



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

# Caracterización fisiológica y biomecánica de ciclistas jóvenes de alto rendimiento

---

Xabier Artetxe Gezuraga

Dirigida por:  
Dra. Sara Maldonado Martín  
Vitoria-Gasteiz, 2023

---

TESIS DOCTORAL



(c)2023 XABIER ARTETXE GESURAGA

*Gurasoei;*  
*bizitzan beti aurrera egiteko beharrezkoak diren emandako baloreengatik.*

*Eñaut eta Mikeleri;*  
*nire lanak lapurtu dizkizuen egun eta gau guztiengatik.*

*Alaitzi;*  
*lortutako guztiaren parte garrantzitsuena izateagatik.*



eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

## **PROGRAMA DE DOCTORADO**

Ciencias de la Actividad Física y del Deporte

## **TESIS DOCTORAL**

Caracterización fisiológica y biomecánica de ciclistas jóvenes de alto rendimiento

## **AUTOR**

Xabier Artetxe Gezuraga

2022

## **DIRECCIÓN**

Doctora Sara Maldonado Martín

Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU

## **DEPARTAMENTO**

Departamento de Educación Física y Deportiva

Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU



*«La vida es como montar en bicicleta;  
para mantener el equilibrio siempre tenemos que seguir avanzando»*

**Albert Einstein**





## AGRADECIMIENTOS

A Sara Maldonado-Martín, no solo por darme la oportunidad de ser el primer y peor alumno de doctorado que ha tenido, sino gracias también por confiar, incluso más que yo, en que esto algún día viese la luz. Por ser la persona más trabajadora que he conocido en la vida. Y por tener un pacto con el diablo.

A Txus Cámara, por haberme contagiado las ganas de aprender. Por esas horas en la *uni* o en el coche hablando de lo que es la investigación científica. Por tener tan claro qué es lo realmente importante en la vida, por tus valores humanos y por ser como eres. No cambies.

A todos los profesores, entrenadores y colegas que he tenido. Y cómo no, a los ciclistas, a los que me han dejado «enredar» con ellos, y que tanto me han enseñado y siguen enseñando, viendo cosas que no existen en libros y *papers*.



## DECLARACIÓN

El autor de esta tesis doctoral ha participado en todo el proceso de investigación, desde el diseño hasta el producto final de la escritura de esta tesis doctoral. Para ello, ha revisado la bibliografía existente, participado en el diseño de las intervenciones y en su puesta en práctica, así como en las distintas valoraciones y en la obtención y análisis de datos, y ha tratado de hacer una buena discusión tras haber interpretado los resultados en profundidad.

Este trabajo no podría haberse llevado a cabo sin la supervisión de la tutora y directora del mismo, quien ha sido parte activa durante todo el proceso.

La investigación se ha llevado a cabo en instalaciones y con recursos de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Facultad de Educación y Deporte (Sección Ciencias de la Actividad Física y del Deporte) y del Departamento de Educación Física y Deportiva de la UPV/EHU. Además, la beca SAIOTEK del Gobierno Vasco (SAI10/42, SA-2010/00071) así como Seguros Bilbao han contribuido en la financiación de la investigación.

No ha existido conflicto de interés alguno a la hora de realizar esta investigación, y las becas y ayudas no han repercutido en los resultados obtenidos y presentados.

El texto íntegro ha sido redactado en género masculino (los ciclistas), ya que los participantes de la investigación fueron ciclistas hombres, pero mucha de la información aportada en la introducción como en el marco teórico podría ser igualmente referente a mujeres (las y los ciclistas).



## ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS .....	25
LISTA DE TABLAS .....	27
ABREVIACIONES.....	29
PREFACIO.....	31
RESUMEN.....	33
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>35</b>
1.1. El ciclismo .....	37
1.2. El ciclismo de carretera.....	38
1.3. Ciclismo y Rendimiento.....	40
1.4. Clasificación de las categorías en el ciclismo .....	41
<b>Capítulo 2. Marco teórico.....</b>	<b>43</b>
2.1. Factores fisiológicos que afectan al rendimiento del ciclismo en carretera .....	45
2.1.1. Parámetros fisiológicos máximos.....	47
2.1.2. Parámetros fisiológicos submáximos .....	51
2.2. Factores biomecánicos que afectan al rendimiento del ciclismo en carretera.....	62
2.2.1. Factores cinéticos .....	62
2.2.2. Factores cinemáticos .....	73
2.3. Otros factores .....	79
<b>Capítulo 3. Objetivos e hipótesis .....</b>	<b>81</b>
3.1. Objetivos.....	83
3.2. Hipótesis.....	83
<b>Capítulo 4. Marco experimental.....</b>	<b>85</b>
4.1. Diseño.....	87
4.2. Población de estudio .....	89
4.3. Material, métodos y procedimiento.....	90
<b>Capítulo 5. Etapa 1.....</b>	<b>93</b>
<b>Influencia de la posición sobre la bicicleta en el área frontal, en ciclistas de carretera. 95</b>	
Introducción .....	95
Resultados .....	100
Discusión .....	105
Conclusiones.....	106
<b>Capítulo 6. Etapa 2.....</b>	<b>109</b>
<b>Influencia de la técnica de pedaleo en la eficiencia metabólica de ciclistas de élite. ....</b>	<b>111</b>
Introducción .....	111
Materiales y métodos .....	112

Resultados .....	118
Discusión .....	123
Conclusiones.....	124
<b>Capítulo 7. Etapa 3.....</b>	<b>125</b>
<b>La eficiencia bruta y su relación con el consumo máximo de oxígeno en ciclistas jóvenes de élite durante la temporada de competición. ....</b>	<b>127</b>
Introducción .....	127
Materiales y métodos .....	128
Resultados .....	129
Discusión .....	134
Conclusiones.....	136
<b>Capítulo 8. Etapa 4.....</b>	<b>137</b>
<b>Efectos de la interrupción a largo plazo del entrenamiento en ciclistas de carretera jóvenes de alto rendimiento. ....</b>	<b>139</b>
Introducción .....	139
Materiales y métodos .....	140
Resultados .....	144
Discusión .....	146
Conclusiones.....	148
<b>Capítulo 9. Conclusiones .....</b>	<b>149</b>
9.1. Conclusiones generales al finalizar las cuatro etapas .....	151
9.2. Aplicaciones prácticas para el entrenamiento .....	152
<b>Capítulo 10. Limitaciones del trabajo y propuestas de futuro .....</b>	<b>155</b>
10.1. Limitaciones potenciales del trabajo.....	157
10.2. Futuras líneas de investigación .....	157
<b>Capítulo 11. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>159</b>
<b>Capítulo 12. Anexos.....</b>	<b>185</b>
12.1. Anexo 1. Consentimiento informado.....	187
12.2. Anexo 2. Cuestionario Salud.....	191

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Especialidades dentro del ciclismo según Unión Ciclista Internacional (UCI). .....	37
Figura 2: Esquema general de los múltiples factores fisiológicos que interactúan como determinantes de la velocidad de competición o la producción de energía. ....	46
Figura 3: Diagrama de las principales fuerzas que influyen en el avance.....	63
Figura 4: Componentes de fuerzas aplicadas al pedal respecto a la posición angular de la biela.      64	
Figura 5: Fuerzas contra el pedal.....	66
Figura 6: Componentes de la fuerza ejercida contra la superficie del pedal en tres dimensiones.....	66
Figura 7: Pedalear en el tiempo.....	67
Figura 8: Diferencias en la fuerza efectiva aplicada por ciclistas expertos y novatos para una misma potencia de pedaleo.....	68
Figura 9: Torque efectivo. ....	69
Figura 10: Diagramas de fuerzas que influyen en el avance del ciclista en pendientes.....	72
Figura 11: Comparación entre distintas técnicas de pedaleo y su relación con a) el índice de efectividad de par y b) la eficiencia bruta.....	75
Figura 12: Evolución de la efectividad del torque en distintos grados del ciclo de pedalada y con distintas técnicas. ....	76
Figura 13: Diagrama de nivel y duración de activación muscular durante la pedalada de los músculos del tren inferior.....	77
Figura 14: Diagrama de flujo del proyecto de investigación y relación con la temporada de competición de ciclismo y con los estudios presentados en los capítulos 5-8.....	88
Figura 15: Ejemplos de fotografías de un ciclista en posiciones corporales diferentes. ....	99
Figura 16: Datos que ilustran la relación del APCB en la PPF entre los métodos FPN y PC.      102	
Figura 17: Datos que ilustran la relación del APCB, en la PCM, entre los métodos FPN y PC.      103	
Figura 18: Datos que ilustran la relación del APCB, en la PMM, entre el método FPN y el PC.      104	
Figura 19: Datos del torque de un participante y del ciclo de una biela. ....	113
Figura 20: Intensidades de ejercicio de acuerdo con las generaciones de potencia en la que aparecían el LT y el OBLA.....	117
Figura 21: Datos que ilustran la relación entre el $T_{medio}$ y la GE a la intensidad en que se produjo el LT ( $I_2$ ).....	119
Figura 22: Datos que ilustran la relación entre la DT y la GE a la intensidad del ejercicio en que apareció el LT ( $I_2$ ). ....	120
Figura 23: Datos que ilustran la relación entre el $T_{medio}$ y la GE a la intensidad del ejercicio en que apareció el OBLA ( $I_3$ ).....	121
Figura 24: Datos que ilustran la relación entre la cadencia y la GE a la intensidad de ejercicio en la que apareció el OBLA ( $I_3$ ). ....	122
Figura 25: GE media, medida en cada generación de potencia, durante dos fases de la temporada de competición. ....	132

Figura 26: Relación entre el consumo máximo de oxígeno y la eficiencia bruta en T2 y T1. 133

Figura 27: Porcentajes de cambio en variables fisiológicas y de rendimiento..... 145



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características de los participantes.....	89
Tabla 2: Área frontal proyectada del conjunto ciclista-bicicleta (m <sup>2</sup> ), obtenida con el método de planimetría computarizada y con las fórmulas de predicción no logarítmicas de diferentes posiciones corporales.....	100
Tabla 3: Características del protocolo progresivo de la prueba de esfuerzo cardiopulmonar sobre cicloergómetro.....	115
Tabla 4: Variables fisiológicas obtenidas en T1 y T2.....	130
Tabla 5: Valores antropométricos, hematológicos y fisiológicos obtenidos en T3 y T4. ....	143



## ABREVIACIONES

ANOVA: análisis de la varianza.

APCB: área frontal proyectada del conjunto ciclista-bicicleta.

ASC: área de superficie corporal predicha.

CP: potencia crítica.

*d*: tamaño del efecto, *d* de Cohen.

D(a-v) O<sub>2</sub>: diferencia arterio-venosa de oxígeno.

DC: punto muerto.

DE: desviación estándar.

DT: distribución del torque.

EMG: electromiografía.

FC: frecuencia cardíaca.

FC<sub>LT</sub>: frecuencia cardíaca en umbral de lactato.

FC<sub>max</sub>: frecuencia cardíaca máxima.

FC<sub>OBLA</sub>: frecuencia cardíaca en OBLA.

F<sub>d</sub>: fuerza de arrastre

FE: fuerza efectiva.

F<sub>N</sub>: fuerza angular normal.

FPN: fórmulas de predicción no logarítmica.

FR: fuerza resultante.

F<sub>r</sub>: fuerza de rozamiento en giro.

F<sub>T</sub>: fuerza angular tangencial.

F<sub>X</sub>: fuerza horizontal o antero-posterior.

F<sub>Y</sub>: fuerza vertical.

F<sub>Z</sub>: fuerzas medio-laterales.

FTP: umbral de potencia funcional.

GE: eficiencia mecánica bruta.

GET: umbral de intercambio de gases.

GPA: potencia bruta absorbida.

GPR: potencia bruta realizada.

GRS: recuento sanguíneo completo.

I<sub>1</sub>: producción de potencia inmediatamente inferior a la intensidad a la que aparece el LT.

I<sub>2</sub>: producción de potencia a la que aparece el LT.

I<sub>3</sub>: producción de potencia a la que aparece el OBLA.

IC: intervalo de confianza.

IE: índice de efectividad de la pedalada.

*i.e.*: «id est», es decir.

[La]: concentración de lactato.

[La]<sub>LT</sub>: concentración de lactato en el umbral de lactato.

[La]<sub>max</sub>: concentración máxima de lactato.

LT: umbral de lactato.

MC: masa corporal.

MLSS: máximo estado estable de lactato.

MMSS: máximo estado estable metabólico.

*n*: tamaño de la muestra.

OBLA: inicio de acumulación de lactato en sangre.

O<sub>2</sub>: oxígeno.

*P*: valor *P*, diferencias significativas.

PC: planimetría computarizada.

PCM: posición sujetándose en la caída del manillar.

p. ej.: por ejemplo.

PMM: posición sobre manubrio del manillar.

PPF: posición de sujeción por encima de las palancas de freno.

Q: gasto cardíaco.

*r*: coeficiente de correlación de Pearson.

*r*<sup>2</sup>: coeficiente de determinación.

RCP: punto de compensación respiratoria.

RER: tasa de intercambio respiratorio.

RPP: perfil de potencia récord.

T o T<sub>C</sub>: torque o fuerza de torsión.

T<sub>máximo</sub>, T<sub>medio</sub> y T<sub>mínimo</sub>: torque máximo, medio y mínimo, respectivamente.

T1 y T2: temporada de competición (abril y julio, respectivamente).

T3: final de la temporada de competición (septiembre).

T4: comienzo de siguiente temporada (noviembre).

UA: umbral aeróbico.

UAn: umbral anaeróbico.

UCI: Unión Ciclista Internacional.

UPV/EHU: Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea.

VCO<sub>2</sub>: producción de dióxido de carbono.

VE: ventilación.

V<sub>max</sub>: intensidad máxima.

VO<sub>2</sub>: consumo de oxígeno.

VO<sub>2LT</sub>: consumo de oxígeno en umbral de lactato.

VO<sub>2max</sub>: consumo de oxígeno máximo.

VO<sub>2OBLA</sub>: consumo de oxígeno en OBLA.

VS: volumen sistólico de eyección.

VT1 y VT2: umbrales ventilatorios 1 y 2, respectivamente.

W<sub>max</sub>: producción máxima de potencia o intensidad máxima.

W<sub>LT</sub>: intensidad al umbral del lactato.

W<sub>OBLA</sub>: intensidad al comienzo de la acumulación de lactato en sangre.

$\bar{x}$ : media aritmética.

## PREFACIO

Quizás yo comencé a construir la casa por el tejado. Pero seguro que, gracias a eso, se ha podido escribir esta tesis doctoral. Cuando decidí dejar el ciclismo de competición para enfocarme en los estudios, casi sin darme cuenta me encontré al volante de un vehículo como director deportivo. Por lo tanto, mi misión era la de ayudar a esos jóvenes deportistas (algunos mayores que yo), a que pudiesen conseguir su sueño de pasar al campo profesional. Para ello, aunque era importante la estrategia en carrera, para mí lo era mucho más el llegar a la competición en las mejores condiciones de poder desarrollar el máximo de sus posibilidades. Y es ahí, donde veía que se podía ayudar mucho más a estos ciclistas, pero era justo ahí donde más dudas tenía, y más lagunas encontraba en mi interior. Por lo tanto, me tocaba a mí formarme para después poder formar a ellos.

Es por ello, que yo cuando acudía a la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, lo hacía con mil preguntas en mi cabeza, y con ganas de buscar las respuestas a esas inquietudes. Todo lo que aprendía lo intentaba relacionar con la práctica del ciclismo, y buscar cómo optimizar el rendimiento de mis ciclistas. Al terminar la licenciatura pensaba que tenía una buena base como Preparador Físico, y me encontraba preparado para ayudar a los deportistas. Pero, aunque aumenté mis conocimientos acerca de entrenamiento, fisiología, biomecánica, nutrición... las mil dudas que tenía se convirtieron en un millón. Mis conocimientos no eran suficientes. Puede llegar a ser frustrante darse cuenta de que cuando piensas que vas a llegar a la meta, te des cuenta que no estás más que recorriendo el primer kilómetro de un Tour de Francia. Que para terminar la primera etapa aún queda mucho camino por recorrer, pero que después de terminar llegarán más etapas y más duras.

Y es aquí donde se juntaron el hambre y las ganas de comer. Tenía la suerte de tener en mis manos la posibilidad de trabajar con ciclistas jóvenes que marcaban una referencia en la categoría sub-23 a nivel estatal, y algunos de ellos que acababan de dar el paso al campo profesional. Y teníamos las ganas de aprender, y de buscar respuestas a algunas de ese millón de preguntas que rondaban en mi cabeza. Queríamos buscar soluciones de optimizar el rendimiento de nuestros ciclistas, de que fuesen más eficientes, y de que llegasen antes del punto A al punto B, que es al fin y al cabo de lo que trata este deporte.

En la literatura científica hay varios estudios acerca del ciclismo. Pero la mayoría de ellos son realizados con una población denominada nivel competitivo o una población de ciclistas profesionales. Hay muy poco estudiado sobre ciclistas jóvenes, es por ello, que al cuestionarnos diferentes preguntas no sabíamos a qué población se parecerían más las personas que teníamos como muestra de estudio.

Nos pusimos manos a la obra en el laboratorio de Fisiología y Biomecánica del "IVEF". Después de diseñar un plan pudimos recoger muestras a lo largo de una temporada ciclista: pretemporada, temporada competitiva e incluso en la fase de descanso entre dos temporadas. Analizamos algunos parámetros novedosos en el marco de estudio que teníamos con deportistas jóvenes. Fueron muchas horas de recogida de datos y análisis a lo largo de un año, y aquí resumimos y presentamos los resultados más importantes como tesis doctoral, para tratar de caracterizar cómo son biomecánica y fisiológicamente los ciclistas jóvenes de alto rendimiento.

Hoy en día, gracias al hecho de haber comenzado a construir la casa por el tejado, creo que he adquirido unos buenos cimientos. Lo poco o mucho que he conseguido en mi carrera profesional es en gran parte a lo aprendido en esta fase de mi carrera, en la que tuve un aumento exponencial en mi curva de aprendizaje. Etapa que recuerdo con mucho cariño por la satisfacción que genera el conseguir resultados (esperados o no) después de un proceso de investigación. Y aunque las dudas siguen en mi cabeza, sé que al despejar una me llegarán unas cuantas dudas más. Pero eso es lo que principalmente he aprendido con la investigación.

## RESUMEN

**Finalidad:** esta tesis doctoral se ha desarrollado como una carrera de ciclismo en ruta por etapas para realizar una caracterización biomecánica **a)** analizar la influencia de la posición del ciclista en la resistencia aerodinámica, y compararlo con distintos métodos para su valoración, **b)** analizar la influencia que tiene la técnica de pedaleo en la eficiencia metabólica a distintas intensidades] y fisiológica **c)** evaluación de la eficiencia mecánica bruta (GE) y su relación con el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2max}$ ) a distintas intensidades en una temporada de competición, **d)** valoración de cinco semanas de desentrenamiento en parámetros relativos al rendimiento en ciclistas jóvenes de alto rendimiento.

**Métodos:** En esta investigación participaron 19 ciclistas jóvenes de alto rendimiento (profesionales y sub-23) que competían a nivel nacional o superior en ciclismo de carretera. Las pruebas de valoración consistieron en **a)** mediciones antropométricas y planimetría computarizada, para la valoración del área frontal proyectada del conjunto ciclista-bicicleta (APCB), **b y c)** test de esfuerzo cardiopulmonar con análisis de gases, de concentración de lactato [La], y el torque de la pedalada, para la valoración de la eficiencia metabólica bruta y su relación con la técnica de pedaleo (torque y cadencia) y con el consumo de oxígeno ( $VO_2$ ) en distintas intensidades, y **d)** test de esfuerzo cardiopulmonar con análisis de gases y de [La] y análisis hematológico, para la cuantificar de los efectos del cese de entrenamiento en parámetros clave para el rendimiento deportivo.

**Resultados:** **a)** Las fórmulas de predicción no logarítmica (FPN) sobrestimaron las APCB en la posición de sujeción por encima de las palancas de freno (PPF) y en la posición sujetándose en la caída del manillar (PCM), en comparación con el APCB medida con el método planimetría computarizada (PC) (6,9% y 5,1%, respectivamente;  $P < 0,05$ ). Se obtuvieron diferencias significativas entre las tres posiciones con el método PC. **b)** No se encontró una relación significativa entre la técnica de pedaleo y la GE inmediatamente por debajo del umbral de lactato (LT). Sin embargo, a intensidad de LT hubo una correlación significativa entre la GE, el torque medio y la regularidad de la distribución del torque ( $r=0,65$  y  $r=0,66$ , respectivamente;  $P < 0,05$ ). En el inicio de acumulación de lactato en sangre (OBLA), a medida que aumentaba la cadencia, la GE disminuía ( $r=-0,81$ ;  $P < 0,05$ ). **c)** No se obtuvieron diferencias significativas en la GE en ninguna carga de trabajo entre abril-T1 y junio-T2, ni en la GE media entre las pruebas ( $P=0,93$ ) T1 (19,3%) y T2 (19,4%). No se encontró ninguna relación significativa entre la GE media y el  $VO_{2max}$  en T1 ( $r=-0,28$ ,  $P=0,30$ ) o T2 ( $r=-0,27$ ,  $P=0,32$ ). **d)** Tras la interrupción en el entrenamiento, aumentó la masa corporal de los ciclistas ( $P=0,014$ ;  $d=0,9$ ), disminuyendo ( $P \leq 0,05$ ;  $d \geq 0,9$ ), en cambio, los valores de  $VO_{2max}$  ( $L \cdot \text{min}^{-1} = -8,8 \pm 5,0\%$ ,  $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} = -10,8 \pm 4,2\%$ ),  $W_{max}$  ( $W = -6,5 \pm 3,1\%$ ;  $W \cdot \text{kg}^{-1} = -13,4 \pm 7,6\%$ ), y los valores

hematológicos (recuento de glóbulos rojos,  $-6,6\pm 4,8\%$ ; hemoglobina,  $-5,4\pm 4,3\%$ , y hematocrito,  $-2,9\pm 3,0\%$ ).

**Conclusiones:** **a)** La sobrestimación del APCB con las FPN en la PMM y en la PCM, y la menor sensibilidad de las FPN para mostrar diferencias significativas entre la PMM y la PCM sugiere que las FPN no son apropiadas para predecir con exactitud el APCB. **b)** La intensidad del ejercicio desempeña un papel importante en la relación entre la técnica de pedaleo y la GE. **c)** La GE de los ciclistas jóvenes de élite podría no variar durante la fase más importante de la temporada de competición. Un menor volumen e intensidad acumulados en el entrenamiento de estos ciclistas podría explicar su GE inferior con respecto a los ciclistas profesionales de más edad, y podría no haber sido suficiente para promover incrementos de la GE en ciclistas con un  $VO_{2max}$  menor. **d)** Cinco semanas de interrupción del entrenamiento dieron lugar a reducciones considerables en los valores fisiológicos y hematológicos en ciclistas jóvenes de carretera de alto nivel, lo que indica la necesidad de una interrupción menor en el entrenamiento. Este perjuicio a largo plazo es más pronunciado cuando se expresa en relación con la masa corporal, lo cual enfatiza la influencia de esa masa corporal en la generación de potencia. Debería implementarse un programa de mantenimiento basado en estrategias de reducción del entrenamiento para evitar las grandes disminuciones en los valores fisiológicos de los jóvenes ciclistas que aspiran a convertirse en profesionales.

**Palabras clave:** aerodinámica, ciclismo, desentrenamiento, eficiencia, sub-23, técnica de pedaleo.



# Capítulo 1.

Introducción



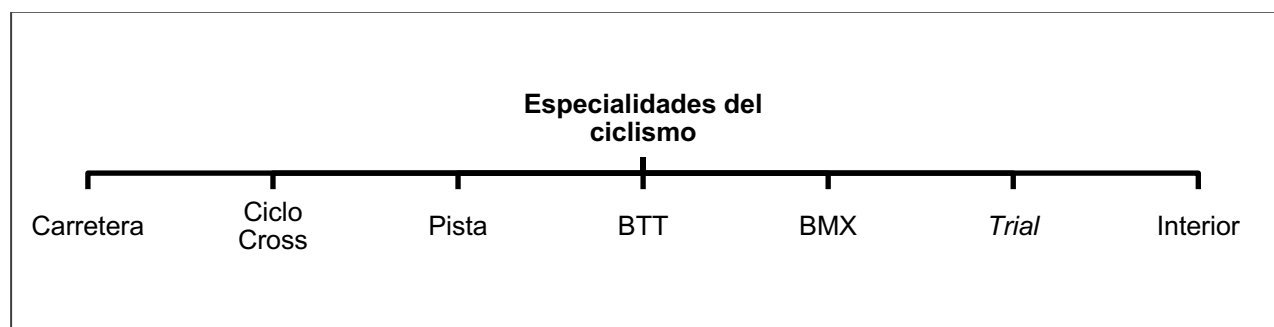
## 1. Introducción

El control y la evaluación de las características fisiológicas y biomecánicas de los deportistas de alto rendimiento, es una herramienta necesaria para los entrenadores que nos proporciona la información que necesitamos para desarrollar nuestros planes de entrenamiento, conocer el estado de los deportistas, o identificar nuevos talentos deportivos. Aunque exista una evidencia científica en parámetros biomecánicos y fisiológicos para determinar y optimizar el rendimiento en ciclistas de categoría Profesional, la información disponible para la caracterización de los ciclistas Sub-23 sigue siendo bastante limitada en la literatura científica actual.

### 1.1. El ciclismo

Las primeras carreras registradas de ciclismo datan de 1868 en París, pero pronto se empezaron a extender por otros países de Europa (Mansilla, 1995). Las competiciones de ciclismo forman parte del programa de los Juegos Olímpicos desde los *Juegos de la I Olimpiada* en Atenas 1896 (Polishuk, 1993).

Existe una gran variedad de disciplinas dentro de este deporte, como se muestra en la Figura 1: ciclismo en ruta o carretera, *ciclocross*, pista, *Motocross* (BMX), todo-terreno (BTT), *trial* y ciclismo en interiores, así como diferentes especialidades y categorías dentro de cada una. La mayoría de disciplinas citadas tienen en común que el ciclista que emplee el menor tiempo en cubrir un recorrido determinado resultará vencedor (McDaniel *et al.*, 2002), pero hay disciplinas en las que no se disputan carreras, como las de interior (*i.e.* se desarrollan ejercicios artísticos o partidos con balón y porterías), la de *BMX Freestyle* (*i.e.* consiste en hacer acrobacias sobre la bicicleta) y el *trial* (*i.e.* consiste en superar obstáculos sin apoyo de pies en suelo) (UCI, 2022b).



**Figura 1: Especialidades dentro del ciclismo según Unión Ciclista Internacional (UCI).**

BMX = bici motocross; BTT = bici todo-terreno.

## 1.2. El ciclismo de carretera

El ciclismo en ruta o carretera, es la modalidad que goza de mayor popularidad; algunas grandes carreras atraen a decenas de millones de aficionados y son vistas por espectadores de todo el mundo (UCI, 2022c). Descrito a grandes rasgos, se trata de competiciones en las que cada deportista recorre sobre su bicicleta una determinada distancia en carreteras que pueden ser de distintas características, y lo puede hacer ayudado por las acciones de sus compañeros de equipo y de forma circunstancial de sus adversarios, y contra las acciones tácticas de sus adversarios, y en las que elementos externos a la propia acción del corredor como el terreno, la meteorología (*i.e.* viento, lluvia...), y el resto de corredores (tanto adversarios como compañeros de equipo) suponen una incertidumbre constante que puede traer cambios en la acción motriz. En palabras técnicas del campo de la praxiología motriz, el ciclismo de carretera «es un deporte sociomotor de oposición-cooperación en el que existe incertidumbre con el medio, el adversario y con el compañero, donde, además, se precisa de un implemento para el desarrollo de la acción de juego (la bicicleta). La forma de participación en el espacio es común y simultánea siendo la comunicación práxica con los compañeros esencial y directa e indirecta y con los adversarios contracomunicación práxica esencial directa e indirecta» (Hernández Moreno *et al.*, 2001).

Las competiciones en carretera pueden ser de una sola etapa, o de varias etapas corridas en jornadas consecutivas:

- Las carreras que se disputan en un solo día suelen denominarse *clásicas*, en las que destacan las pruebas más prestigiosas o *monumentos* del ciclismo, caracterizadas por su antigüedad y dureza como son la Lieja - Bastoña - Lieja, el Giro de Lombardía, París - Roubaix, Milán - San Remo y el Tour de Flandes (Rebeggiani, 2016). Estas competiciones de una sola etapa pueden ser llanas, de media o alta montaña, así como de contrarreloj individuales o por equipos (Algarra y Gorrotxategi, 1996; García López *et al.*, 2002).
- Las carreras por etapas son aquellas que se disputan en más de una jornada, en las que el ciclista vencedor es el más regular en todas las jornadas que incluyen etapas con recorridos de montaña, etapas llanas y contrarrelojes. Las encontramos desde cuatro etapas consecutivas y una contrarreloj individual, hasta veintiún etapas en tres semanas con solo uno o dos días de descanso con una contrarreloj individual y otra por equipos. Las más conocidas son el Tour de Francia, el Giro de Italia y la Vuelta a España (Lucía *et al.*, 2001a; Rebeggiani, 2016).
- Las etapas, ya sean de carreras clásicas o por etapas, pueden ser pruebas llanas, de media o alta montaña, así como de contrarreloj individuales o por equipos

(Algarra y Gorrotxategi, 1996; García López *et al.*, 2002). El tipo de prueba determina, en gran medida, una especialización del ciclista hacia uno o varios terrenos en función de sus características antropométricas y fisiológicas (Algarra y Gorrotxategi, 1996; Jeukendrup y Martin, 2001; Mujika y Padilla, 2001), por lo que cada corredor desempeña un papel concreto dentro de la estructura de su equipo. Se pueden diferenciar a corredores rodadores (dominan las etapas llanas), escaladores (media y la alta montaña), todo terreno o líderes (se desenvuelven muy bien en todo tipo de etapas), esprinteres (corredores muy rápidos especializados en llegadas) y contrarrelojistas (especialistas en contrarreloj) (Mujika y Padilla, 2001; Peinado Lozano *et al.*, 2011).

Cuando se analizan las competiciones deportivas, en este caso las de ciclismo en ruta, se está dando inherentemente importancia al deportista o equipo que va a luchar por superarse, por vencer, por rendir mejor que sus contrincantes; es ahí donde el foco se centra en cómo conseguir ese mejor rendimiento: detección de talentos, métodos de entrenamiento, métodos de valoración y seguimiento, materiales, estrategia... Para acertar con las decisiones que se puedan tomar a nivel técnico, es esencial tener el mayor conocimiento y mejor control sobre los factores que afectan al rendimiento.

Existen elementos de gran importancia para el rendimiento deportivo del ciclismo en carretera como son las características tácticas que surgen de la dinámica interpersonal entre ciclistas (Jeukendrup y Martin, 2001; Kolumbet *et al.*, 2017), características estratégicas relacionadas con la competición (la posición que adoptan los corredores dentro del grupo (Jeukendrup y Martin, 2001)), condiciones ambientales y meteorológicas, y características globales relacionadas con la organización del deporte (mecanismos socio-culturales, económicos y autoritarios (Phillips y Hopkins, 2020)); cada carrera o competición ofrece características distintas que afectarán a ciclistas y equipos en conjunto, y que pueden determinar el éxito o la victoria.

Además de los factores contextuales mencionados, los que se considera tienen mayor implicación en el rendimiento del ciclista son los factores de rendimiento individual antropométricos, fisiológicos, biomecánicos y aerodinámicos, que suponen un filtro de acceso a la élite deportiva (Algarra y Gorrotxategi, 2012; Crouch *et al.*, 2017; Faria *et al.*, 2005a, 2005b; Fonda, 2012; Jeukendrup y Martin, 2001; Mujika y Padilla, 2001). El ciclismo en carretera se considera un deporte de fondo que requiere de grandes demandas energéticas para el deportista (Padilla *et al.*, 2001) debido a la necesidad de mantener un ejercicio de alta intensidad durante muchos kilómetros (Peinado Lozano *et al.*, 2011; Rodríguez-Marroyo *et al.*, 2003). Cuando los músculos del ciclista crean una fuerza que se aplica perpendicularmente al brazo de la biela de la bicicleta, una revolución del brazo de la biela crea dos impulsos angulares (uno por pierna), que da como resultado un impulso hacia delante. La producción

de fuerza óptima y, como resultado, el impulso hacia adelante óptimo, es una interacción compleja de inervación, patrones de reclutamiento muscular, la función contráctil del músculo, así como una interacción elástica tendón-músculo y procesos metabólicos que ocurren en estos tejidos (Leo *et al.*, 2022). Para que el aprovechamiento de ese impulso sea eficiente, las características de la bicicleta y la posición del ciclista sobre esta son decisivos. Si se pone el foco de análisis sobre el objetivo de crear una producción de fuerza óptima que impulse la bicicleta hacia adelante, habrá que fijarse en el conjunto ciclista-bicicleta, y, por tanto, cómo interaccionan los parámetros fisiológicos mencionados anteriormente con los biomecánicos y aerodinámicos. Estos factores limitantes del ejecutante individual se han estudiado mayormente desde una perspectiva reduccionista, partiendo del componente ciclista-bici como conjunto aislado de su contexto, que, como una máquina, tiene el potencial de mejorar su rendimiento a través de modificaciones en distintas variables.

A la vista de la importancia de los factores fisiológicos y biomecánicos en el rendimiento individual y colectivo del ciclismo en ruta, se hará un análisis en profundidad de los mismos en el capítulo siguiente, que sirva como marco teórico sobre el que se desarrollen distintos estudios de investigación.

### **1.3. Ciclismo y Rendimiento**

Cuando analizamos las diferentes modalidades ciclistas desde la perspectiva de las ciencias del deporte, los parámetros fisiológicos y biomecánicos que determinarán el rendimiento en cada una de las disciplinas son diversas. Por ejemplo, las modalidades como el ciclismo de carretera requieren de un alto grado de capacidad aeróbica, mientras que otras modalidades de más corta duración como el BMX y algunos de los eventos de ciclismo en pista (llamados Sprint) implican una alta contribución del metabolismo anaeróbico (Faria, 2009; Faria *et al.*, 2005a).

Recientemente se ha investigado la tipología muscular en ciclistas de primera clase mundial que compiten en diferentes disciplinas como BMX, ciclocrós, BTT, ciclismo de carretera y ciclismo en pista. Algunos de los resultados observados demuestran que los ciclistas de BMX o ciclismo en pista poseen una tipología muscular predominante en fibras rápidas, si las comparamos con disciplinas como el ciclocrós, BTT o ciclismo en carretera. También, que las diferencias en la tipología muscular podrían orientarnos en la identificación del talento (Lievens *et al.*, 2021).

Por esta razón, la maduración biológica juega un papel fundamental en el proceso de desarrollo del deportista a largo plazo, lo que permite cuantificar los indicadores clave de rendimiento relacionados con la edad dentro de cada disciplina ciclista (Gallo *et al.*, 2021; Nimmerichter, 2018; Spragg y van Bon, 2020).

#### 1.4. Clasificación de las categorías en el ciclismo

- Por edad cronológica. Según la reglamentación de la UCI podemos diferenciar tres categorías que están relacionadas con la edad cronológica de los ciclistas: categoría junior o U19 (17 a 18 años), categoría sub-23 o U23 (19 a 22 años) y élite (> 23 años). Todas las categorías inferiores a menores de 17 años están regidas por las federaciones de carácter nacional (UCI, 2022a).
- Por nivel de Rendimiento. En un estudio en el cual hicieron una revisión sistemática de la literatura, trataron de agrupar a los diferentes deportistas por sus capacidades físicas, y no por la edad. Hasta la fecha, tenemos una terminología muy amplia en la literatura que nos habla de personas sedentarias, no entrenadas, activas, recreacionales, entrenadas, amateur, élite, bien entrenadas, altamente entrenadas, clase mundial, profesionales... Dependiendo de parámetros fisiológicos, De Pauw *et al.* (2013) crearon un sistema de grupos por niveles de rendimiento, del 1 al 5; los del nivel de rendimiento 1, serían los ciclistas saludables poco entrenados, no competitivos y los de nivel de rendimiento 5 (PL5) los ciclistas profesionales. Aunque años antes Lucía *et al.* (1998) mostraron que, en ciertos parámetros fisiológicos (*e.g.*  $VO_{2max}$  y equivalentes ventilatorios), no existen diferencias entre los ciclistas jóvenes altamente entrenados y los profesionales.





# Capítulo 2.

Marco teórico



## 2. Marco teórico

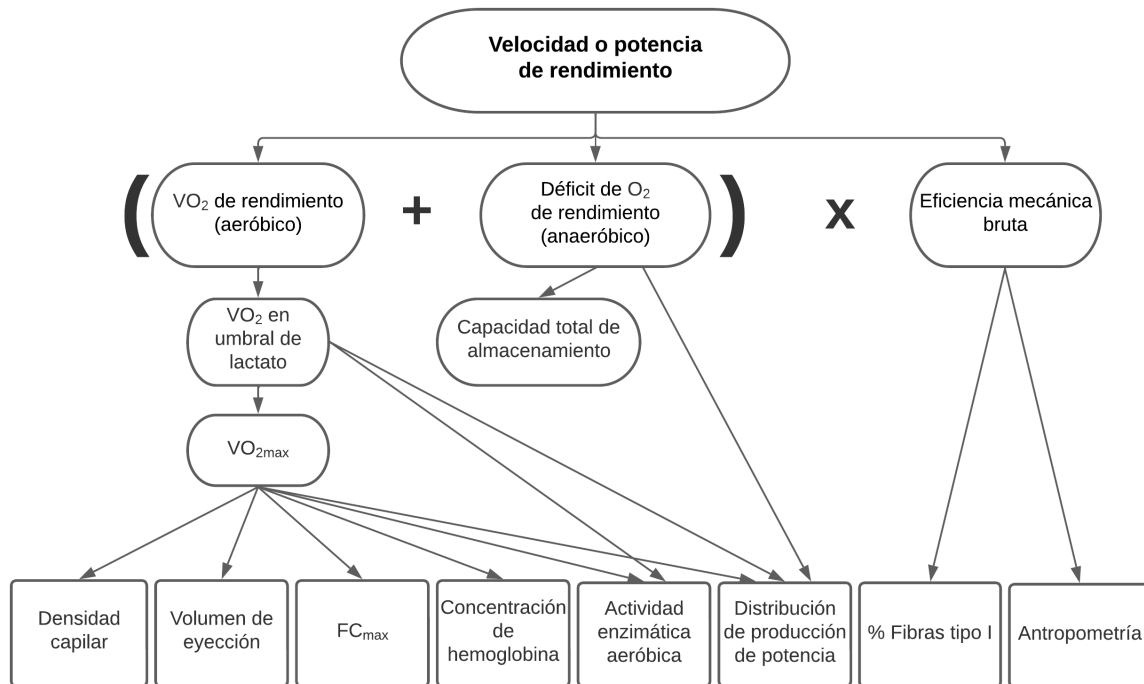
En la incesable lucha del ciclista por superarse, por vencer, por ser mejor que sus contrincantes, en definitiva, en el camino hacia ese mejor rendimiento, los factores que reducen la perspectiva del rendimiento en el ciclismo al ciclista como máquina (i.e., antropométricos, fisiológicos, biomecánicos y aerodinámicos) son aquellos a los que alumbra el foco.

A la vista de la importancia de los factores fisiológicos y biomecánicos en el rendimiento individual y colectivo del ciclismo en ruta, a continuación, se presentará un análisis en profundidad de los mismos.

### 2.1. Factores fisiológicos que afectan al rendimiento del ciclismo en carretera

El ciclismo en carretera es un deporte con requerimientos físicos en los que la cualidad de resistencia es la predominante, y donde frecuentemente, se utilizan los esfuerzos aeróbicos como marcadores de referencia para evaluar el rendimiento. Sin embargo, el ciclismo de carretera no es un esfuerzo de resistencia aeróbica constante; el resultado de una carrera muchas veces se define durante períodos críticos. Como dijeron Lucía *et al.* (2003), el ciclismo es un deporte con unas exigencias fisiológicas extremas (p. ej. cuando los ciclistas intentan realizar una escapada, o durante un sprint final tras cuatro o cinco horas encima de la bicicleta en una etapa de 180 kilómetros).

En la Figura 2 se pueden ver cuáles son los determinantes fisiológicos que según Joyner y Coyle (2008) afectan a la producción de energía y consecuentemente, al rendimiento en deportes de resistencia: la cinética del metabolismo aeróbico, la contribución anaeróbica y la eficiencia mecánica bruta.



**Figura 2: Esquema general de los múltiples factores fisiológicos que interactúan como determinantes de la velocidad de competición o la producción de energía.**

$FC_{max}$ =frecuencia cardíaca máxima;  $VO_2$ =consumo de oxígeno;  $VO_{2max}$ =consumo máximo de oxígeno. Adaptada de Joyner y Coyle (2008).

Seguendo el modelo de Joyner y Coyle (2008) que se presenta en la Figura 2, se sugiere que el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2max}$ ) y el umbral de lactato interactúan para determinar la tasa de metabolismo aeróbico y anaeróbico que se puede sostener durante un tiempo determinado (i.e.,  $VO_2$  de competición), y la eficiencia interactúa con el  $VO_2$  de competición para determinar la velocidad o potencia (i.e., velocidad o potencia de competición) que puede lograrse con esa cantidad de consumo de energía.

En el transcurso de una prueba, los ciclistas demandan continuamente esfuerzos máximos y submáximos dentro de las vías aeróbicas, obteniendo la energía mediante la oxidación de ácidos grasos y la glucólisis aeróbica (Padilla *et al.*, 2008). En los siguientes párrafos se detallan esos parámetros fisiológicos máximos y submáximos, sus características, y su importancia en el ciclismo en ruta.

## 2.1.1. Parámetros fisiológicos máximos

### Consumo máximo de oxígeno

El consumo de oxígeno ( $VO_2$ ) es la cantidad de oxígeno ( $O_2$ ) que el organismo necesita absorber, transportar y metabolizar para satisfacer las exigencias fisiológicas, *i.e.*, para producir la energía que requiera la actividad física que se esté dando y el gasto energético basal. Se expresa en volumen de  $O_2$  por unidad de tiempo, y de forma absoluta o relativa a la masa corporal ( $L \cdot \text{min}^{-1}$  o  $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ , respectivamente).

El  $VO_2$  está determinado por la diferencia arterio-venosa del oxígeno ( $D(a-v) O_2$ ) y el gasto cardíaco ( $Q$ ), según la siguiente fórmula:  $VO_2 (L \cdot \text{min}^{-1}) = Q \times D(a-v)O_2$ . A su vez, el  $Q$  está determinado por el volumen sistólico de eyección ( $VS$ ,  $\text{mL} \cdot \text{lat}^{-1}$ ) y la frecuencia cardíaca ( $FC$ ,  $\text{lat} \cdot \text{min}^{-1}$ ) según la siguiente fórmula:  $Q(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}) = VS \times FC$ . Las anteriores fórmulas explican que, a mayor intensidad de actividad física, y debido al incremento de la  $D(a-v) O_2$ , del  $VS$  y de la  $FC$  que esta provoca, mayor será el  $VO_2$ .

El  $VO_2$  es uno de los parámetros altamente relacionados con el rendimiento en deportes de resistencia pudiendo ser determinante en los resultados deportivos (Bell *et al.*, 2017; Czuba *et al.*, 2014; Gronek *et al.*, 2013; Holdys *et al.*, 2013; Lucía *et al.*, 2003; Michalczyk *et al.*, 2008; Santalla *et al.*, 2012). Se puede distinguir entre valores máximos y submáximos de  $VO_2$ , que se tratarán a continuación, y que afectarán a lo realmente importante para el rendimiento, que es el nivel de metabolismo aeróbico que se puede mantener durante una carrera, *i.e.*, el  $VO_2$  de competición (Joyner y Coyle, 2008).

Por su parte, el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2\text{max}}$ ) corresponde a la cantidad máxima de  $O_2$  que el organismo es capaz de metabolizar. El  $VO_{2\text{max}}$  se alcanza a determinada potencia (*i.e.* cuando la exigencia energética es muy alta debido a actividad física de máxima intensidad) y se puede sostener por un tiempo determinado.

El  $VO_{2\text{max}}$  está principalmente limitado por la capacidad del sistema cardiovascular para transportar el  $O_2$  desde la atmósfera hasta las mitocondrias en los músculos esqueléticos (Bassett y Howley, 2000), a la que afectan cuatro factores principales:

- Capacidad de difusión pulmonar: la capacidad de los pulmones para saturar la sangre con  $O_2$  en un esfuerzo máximo resulta mayor (> 5%) en deportistas altamente entrenados, por lo que la disponibilidad de  $O_2$  con que producir energía también es mayor.

- Gasto cardíaco (Q): el Q es mayor en deportistas entrenados, por lo que a una misma FC son capaces de perfundir mayor cantidad de sangre oxigenada. El Q es el factor que mayor repercusión tiene sobre el  $VO_{2max}$ .
- Capacidad de la sangre para transportar  $O_2$ : será mayor cuanto más elevado sea el porcentaje de hemoglobina en sangre.
- Factores periféricos como las características de los músculos esqueléticos: entre estos factores se pueden distinguir la difusión de  $O_2$  intracelular, los niveles de enzimas mitocondriales y el aumento de densidad capilar que se da con el entrenamiento.

Además de los mencionados anteriormente, personas de distinto sexo, edad y genética también muestran diferencias en el  $VO_{2max}$ :

- Para una misma edad y condición física el  $VO_{2max}$  es mayor en los hombres que en las mujeres (López Chicharro y Fernández Vaquero, 2001). Entre deportistas igual entrenados se observa un  $VO_{2max}$  5-15 % menor en las mujeres (Charkoudian y Joyner, 2004). En estas diferencias pueden intervenir diferentes factores, como la composición corporal (menor porcentaje muscular para igual masa corporal, MC), factores hormonales, o factores de función cardiovascular (menor volumen sanguíneo, *i.e.*, menor Q), e incluso la menor concentración de hemoglobina que presentan las mujeres (Astrand *et al.*, 1964). Podemos encontrar en ciclistas mujeres de primer nivel mundial valores de  $VO_{2max}$  por encima de 60  $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$  (Wilber *et al.*, 1997), 63,8  $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$  para las ciclistas del equipo Nacional de Australia (Ebert *et al.*, 2005), 64,2  $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$  para las ciclistas que participaron en el Tour de Idaho, (Pfeiffer, 1993), aunque no son equitativos si los comparamos con los mejores ciclistas hombres. En ciclistas hombres de alto nivel, el  $VO_{2max}$  suele estar por encima de 70  $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ , siendo incluso superior a 80  $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ , en aspirantes al Tour de Francia (Bell *et al.*, 2017; Santalla *et al.*, 2012).
- El  $VO_{2max}$  aumenta gradualmente en paralelo con la ganancia de la masa corporal hasta alcanzar su máximo entre los 18-25 años en mujeres y 25-30 años en hombres (López Chicharro y Fernández Vaquero, 2001). En ciclistas hombres de categorías cadete (15-16 años), juvenil (17-18 años) y sub-23 (19-22 años) se han registrado valores medios de  $63,3 \pm 4,5$   $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ,  $68,5 \pm 6,5$   $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$  y  $69,7 \pm 7,5$   $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ , respectivamente (Marín-Pagán *et al.*, 2021), similares a otros estudios comparativos respecto a la edad (Pérez-Landaluce *et al.*, 2002). Una vez alcanzado el máximo, el  $VO_{2max}$  irá disminuyendo gradualmente, en torno al

10 % por cada década dependiendo del nivel de actividad (Buskirk y Hodgson, 1987; Eskurza *et al.*, 2002; Fitzgerald *et al.*, 1997; Heath *et al.*, 1981; Pimentel *et al.*, 2003). Los causantes de estas pérdidas pueden ser la disminución de la FC, la pérdida de la masa muscular y la reducción del volumen sanguíneo (Ito *et al.*, 2001). La disminución de  $VO_{2max}$  es 50% inferior en personas activas que en sedentarias (Kasch *et al.*, 1990). En el caso de un cinco veces ganador del Tour de Francia, sus valores de  $VO_{2max}$  se redujeron un 12% y 20% por década en valores absolutos y relativos, respectivamente, después de su retirada (Mujika, 2012); estas pérdidas se justifican con el altísimo nivel que ostentaba antes de la retirada, el cambio en su composición corporal (>14% de MC), y una frecuencia de entrenamiento reducida.

- La información sobre cómo afectan los marcadores genéticos al  $VO_{2max}$  y otros factores limitantes del rendimiento es todavía escasa (Hagberg *et al.*, 2001; Levine, 2008). Bouchard *et al.* (1999) evaluaron la heredabilidad de factores fisiológicos y capacidades físicas, llegando a la conclusión de que, aunque heredables, los factores genéticos representan una proporción muy variable de las diferencias interindividuales (20-90%); la herencia puede condicionar el  $VO_{2max}$  hasta un 50% de la varianza fenotípica total (en adultos sedentarios después de ajustarla para las variables edad, sexo, MC y composición corporal), aunque dicho valor se vería aumentado por factores familiares no genéticos hasta un 70% (Schutte *et al.*, 2016; Williams *et al.*, 2017). Además, la entrenabilidad del  $VO_{2max}$  se caracteriza por un grado importante de agregación familiar, de manera que algunas familias se caracterizan por un patrón de alta entrenabilidad, y otras, por presentar una respuesta muy baja. Una revisión sistemática realizada más recientemente concluye que se han estudiado 97 genes diferentes como posibles predictores de la entrenabilidad del  $VO_{2max}$ . Pero para poder afirmar estos datos e identificar otras posibles variantes genéticas, hacen falta más estudios que además se hagan entre diferentes etnias, ya que la mayoría son realizadas con población caucásica (Williams *et al.*, 2017).

Diversos estudios llevados a cabo con estudiantes físicamente activos y ciclistas no profesionales (MacDougall *et al.*, 1998; Rodas *et al.*, 2000; Rønnestad *et al.*, 2015; Tabata *et al.*, 1996) han mostrado aumentos de  $VO_{2max}$  del 3 al 14,5% tras entrenamientos de distinto tipo (*i.e.* aeróbico continuo, interválico, fuerza), lo que demuestra la entrenabilidad del  $VO_{2max}$ . Otras investigaciones (Bentley *et al.*, 2007; Conley y Krahenbuhl, 1980; Larsen, 2003; Lucía *et al.*, 2006) han observado en atletas de resistencia de alto nivel con similares  $VO_{2max}$  que el entrenamiento no tiene efecto de mejora sobre el  $VO_{2max}$  (aumento pequeño y no

significativo) como lo tiene en deportistas de bajo nivel (Hickson *et al.*, 1988; Santalla *et al.*, 2009), a pesar de que exista evidencia de que su rendimiento hubiera aumentado.

Los deportistas de resistencia de élite muestran niveles de  $VO_{2max}$  50-100% superiores a personas jóvenes sanas activas (Costill *et al.*, 1976), y significativamente superiores a otros grupos de personas (*i.e.*, ciclistas entrenados, recreacionales, no entrenados) (De Pauw *et al.*, 2013). Por esta razón, se ha sugerido que el  $VO_{2max}$  sea probablemente el parámetro más determinante en deportes de resistencia (Bassett y Howley, 2000; di Prampero, 2003; Faria *et al.*, 2005b; Jones y Burnley, 2009; Levine, 2008; Pate y Kriska, 1984). Aún así, es necesario tener en cuenta, que este parámetro no parece ser el que mejor discrimine el rendimiento de deportistas de alto nivel (Hagberg *et al.*, 2001; Menaspà *et al.*, 2010), ya que un alto  $VO_{2max}$  no asegura el éxito en la carrera profesional, y no parece que tenga gran utilidad para determinar la capacidad real de mantener un esfuerzo de forma prolongada en carreras de duración media-larga (Bentley *et al.*, 2001; Bosquet *et al.*, 2002). De hecho, la obtención de energía fluctúa entre diferentes vías metabólicas, y la intensidad media en este tipo de carreras no suele alcanzar el  $VO_{2max}$ . Se ha podido observar que los ciclistas pasan alrededor de 75-79 minutos al 70-90% del  $VO_{2max}$ , entre 89-97 minutos al 50-70% del  $VO_{2max}$ , y unos 20 minutos alrededor del 90% del  $VO_{2max}$  por día durante el Tour y la Vuelta, siendo <50% del  $VO_{2max}$  la intensidad a la que discurren el 75% de las etapas (Barranco y Murillo, 2021). La contrarreloj de montaña es considerada la que mayor exigencia de intensidad tiene dentro del ciclismo en carretera (Mujika y Padilla, 2001; Vogt *et al.*, 2006). Así, en una carrera simulada se ha observado que los valores medios de  $VO_2$  rondaban el 90% del  $VO_{2max}$  (80-98% del  $VO_{2max}$ ) (Peinado *et al.*, 2018), y superiores al 90% del  $VO_{2max}$  de 18-27 minutos en etapas de montaña y de 20-70 minutos en contrarreloj (Barranco y Murillo, 2021). Estos datos apuntan a que un mayor rendimiento y el éxito en el más alto nivel competitivo puede estar relacionado con otros numerosos factores que afectan a la resistencia aeróbica, principalmente con mejoras submáximas como la economía de carrera, el umbral anaeróbico o el de lactato como parámetros diferenciadores, que dan como resultado un incremento del tiempo hasta el agotamiento en esfuerzos submáximos, es decir, una mayor eficiencia.

Estas consideraciones no despojan de valor al  $VO_{2max}$ , ya que para llegar a competir a nivel profesional se debe tener un alto nivel de forma física, y para detectar ciclistas de categorías inferiores que puedan llegar a destacar, el uso de marcadores como el  $VO_{2max}$  es indispensable (Menaspà *et al.*, 2010; Phillips y Hopkins, 2020); cuanto mayor sea el  $VO_{2max}$ , mayor será la reserva de capacidad aeróbica y más eficiente el  $VO_2$  de competición que soportarán la alta velocidad o potencia que se desarrollen en competición.

### **Producción máxima de potencia**



La producción máxima de potencia ( $W_{max}$ ), también denominada pico máximo de potencia o potencia pico, se define como la carga de trabajo más alta sostenida durante 2 a 3 minutos durante el ejercicio progresivo hasta el agotamiento, expresada en vatios de forma absoluta o relativa a la masa corporal ( $W$  o  $W \cdot kg^{-1}$ , respectivamente) (Faria *et al.*, 2005b).

La  $W_{max}$  tiene correlación positiva significativa alta con el  $VO_{2max}$  y con el tiempo total para una carrera de 20 km, por lo que se considera una variable determinante del rendimiento en ciclismo (Bentley *et al.*, 1998; Hawley y Noakes, 1992); un  $W_{max}$  superior a  $5,5 W \cdot kg^{-1}$  en prueba de esfuerzo incremental se considera prerrequisito para llegar a alto nivel en el ciclismo en carretera, y superior a  $6,34 W \cdot kg^{-1}$  para profesionales (Faria *et al.*, 2005b); la élite ciclista muestra valores entre  $6-7,5 W \cdot kg^{-1}$  (400-525 W), dependiendo de las características del test (Bell *et al.*, 2017; Lucía *et al.*, 2001a; Padilla *et al.*, 1999), y en categorías cadete y sub-23 presentan  $W_{max}$  de  $5,2 W \cdot kg^{-1}$  (350 W) y  $5,5 W \cdot kg^{-1}$  (371 W), respectivamente (Pérez-Landaluce *et al.*, 2002), aunque hay registros de ciclistas de categoría sub-23 que ya generan una media de  $6,7 W \cdot kg^{-1}$  (428 W) de  $W_{max}$  (Marín-Pagán *et al.*, 2021).

Al igual que se comentaba del  $VO_{2max}$ , tener un alto  $W_{max}$  es requisito para el ciclismo profesional de mayor nivel, pero debido a la duración de las carreras de ciclismo en ruta, son escasos los momentos en los que se alcanzan esas intensidades; en etapa simulada de contrarreloj de montaña, en el kilómetro de la etapa en que se mostró mayor rendimiento se observaron valores medios al  $92,2 \pm 13$  del  $W_{max}$  ( $5,2 \pm 2,4 W \cdot kg^{-1}$ ;  $389 \pm 68 W$ ), oscilando entre el 84-100% del  $W_{max}$  ( $3,8-6,6 W \cdot kg^{-1}$ ;  $345-432 W$ ), en ciclistas de élite amateur (Peinado *et al.*, 2018), y algo inferiores al analizar los puertos de montaña que por la combinación de distancia y pendiente producen los valores más elevados en marcadores de intensidad (*e.g.*, FC, W,  $VO_{2max}$ ) en competiciones reales de varias semanas en ciclistas de élite profesionales (al  $76 \pm 8\%$  del  $W_{max}$ ;  $345 \pm 47 W$ ) (Padilla *et al.*, 2008). Esto muestra que la realidad de la competición obliga a ciclistas a equilibrar sus esfuerzos, para mantener altas intensidades submáximas de potencia, de forma eficiente.

### 2.1.2. Parámetros fisiológicos submáximos

Partiendo de la naturaleza del ciclismo en ruta que requiere del ciclista un esfuerzo de gran intensidad continuado durante horas y repetido por varios días, queda patente la importancia de variables fisiológicas submáximas, que marcan el rendimiento de competición real.

Se distinguen distintos hitos fisiológicos entre el estado de reposo o la acción del metabolismo basal y el  $VO_{2max}$  o  $W_{max}$ , que indican cambios en la tasa de implicación de distintos metabolismos energéticos a medida que la intensidad del esfuerzo va incrementándose. Todos esos hitos fisiológicos tienen en común que se localizan en la transición de metabolismo aeróbico-anaeróbico (Skinner y McLellan, 1980), es decir, en

determinadas intensidades de la actividad física que desencadenan fluctuaciones agudas en el suministro de energía oxidativa y no oxidativa, la bioquímica muscular y sanguínea, las respuestas cardiorrespiratorias, los procesos de fatiga y la percepción del esfuerzo (Bosquet *et al.*, 2002; Jones *et al.*, 2019). Se denomina «umbral» a esos hitos que marcan un cambio fisiológico en respuesta a un estímulo que resulta suficiente para tal cambio, y por debajo del que no se daría cambio y se mantendría el estado previo. Realizar el entrenamiento por debajo, en comparación con por encima, de dichos umbrales promoverá diferentes adaptaciones fisiológicas (Jones y Carter, 2000).

La literatura recoge multitud de umbrales fisiológicos que se pueden medir a partir de diversos métodos; para identificar sus límites, la mayoría tienen en cuenta las respuestas de intercambio de sangre (*i.e.*, la concentración de lactato en sangre, [La]) o la dinámica y relación entre variables ventilatorias durante la actividad física. A menudo se genera confusión y malentendidos con distintos términos que parecen indicar un mismo hito, o con un mismo término que parece indicar hitos o mecanismos fisiológicos distintos (Faude *et al.*, 2009; Jamnick *et al.*, 2020; Keir *et al.*, 2015), como ocurre con los siguientes ejemplos: umbral de lactato, umbral de intercambio de gases, umbral ventilatorio, punto de inflexión del lactato, umbral anaeróbico, el inicio de la acumulación de lactato en sangre, umbral anaeróbico individual, mínimo de lactato, umbral de compensación respiratoria, máximo estado estable de lactato... A pesar de la ambigua terminología, se describen comúnmente dos umbrales principales de intensidad de ejercicio: el umbral aeróbico y el umbral anaeróbico; estos términos, «aeróbico» y «anaeróbico», se siguen empleando, aunque se consideren incorrectos (*i.e.*, sus significados denotan presencia o ausencia de O<sub>2</sub> y de VO<sub>2</sub>, cuando ambas vías metabólicas actúan en paralelo con distinta implicación (Chamari y Padulo, 2015)). A continuación, se abordan las características generales de estos dos umbrales, y se comentan los demás umbrales que guardan relación con ellos.

### **UMBRAL AERÓBICO**

El umbral aeróbico (UA) es el primero que se identifica a medida que la intensidad de la actividad física va en aumento. Cuando se utilizan marcadores sanguíneos, se conoce como «umbral de lactato», y si las estimaciones se realizan con respecto al intercambio de gases y parámetros ventilatorios, se denomina «primer umbral ventilatorio»; ambos umbrales muestran una alta correlación entre sí (Pallares *et al.*, 2016). El UA se suele situar en niveles del 65-80% del VO<sub>2max</sub> o a 2 mmol·L<sup>-1</sup> de [La] (Binder *et al.*, 2008; Fernandez-Rodriguez *et al.*, 2019).

#### **Primer umbral ventilatorio**

El «primer umbral ventilatorio» (VT1, del inglés *ventilatory threshold*) se puede identificar como el punto de transición en la producción de dióxido de carbono ( $VCO_2$ ) frente a la pendiente de  $VO_2$  de menos de 1 a más de 1, o como el nadir del equivalente ventilatorio de  $VO_2$  ( $VE \cdot VO_2^{-1}$ ) en relación a la intensidad (i.e., cuando la presión parcial del  $O_2$  espiratorio final comienza a aumentar sistemáticamente en relación con el  $VO_2$ ) (Beaver *et al.*, 1986; Mezzani *et al.*, 2012; Wasserman y McIlroy, 1964). Meyer *et al.* (2005) proponen combinar criterios o metodologías, identificando el VT1 como la intensidad en la que se da un incremento desproporcional de la ventilación (VE), del tasa o cociente de intercambio respiratorio (RER, i.e.  $VCO_2 \cdot VCO_2^{-1}$ ), del  $VCO_2$ , y del  $VE \cdot VO_2^{-1}$  sin que simultáneamente ocurra lo mismo en el  $VE \cdot VCO_2^{-1}$ , ni varíe la linealidad del  $VO_2$ .

El VT1 puede discriminar el rendimiento de deportistas con  $VO_{2max}$  similares (Bentley *et al.*, 2007); ya que ha demostrado tener sensibilidad a cambios en el rendimiento de ciclistas de élite (Lucía, Hoyos, Pérez, *et al.*, 2000), mejorando el  $\%VO_{2max}$  a intensidad de VT1, pese a no tener cambios en su  $VO_{2max}$ .

### **Umbral de lactato**

El umbral de lactato (LT, del inglés *lactate threshold*) se identifica en la curva lactato-velocidad como la intensidad de actividad física que provoca un incremento de la [La] sistemático observable sobre los valores de reposo o sobre los valores de estadios previos en un test incremental (Fernandez-Rodriguez *et al.*, 2019).

Domínguez *et al.* (2015) recoge distintos métodos con los que se propone identificar el LT: a) intensidad que precede al incremento sistemático de la [La] (Davis *et al.*, 1976), b) intensidad que precede al inicio de dos aumentos progresivos en las concentraciones de lactato en una prueba incremental (Farrell *et al.*, 1979), c) intensidad que precede a incrementos de [La] concretos (i.e.,  $0,2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Weltman *et al.*, 1987),  $0,5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Hughson y Green, 1982; Zoladz *et al.*, 1995),  $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Bentley *et al.*, 2007)) respecto al valor más bajo, o al previo, o al de reposo, d) intensidad que corresponde con una [La] absoluta de  $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  denominada «primer punto de inflexión de lactato» (del inglés *lactate turn-point*) (Kindermann *et al.*, 1979). Los métodos mencionados no discriminan entre variaciones interindividuales e intraindividuales (Faude *et al.*, 2009; Midgley *et al.*, 2007), por lo que se propone identificar el LT como el punto de corte de dos regresiones lineales sobre la curva cinética de la [La].

El LT ha demostrado tener la sensibilidad de diferenciar el rendimiento en deportistas con similar  $VO_{2max}$  (Bentley *et al.*, 2007) y se considera un indicador de rendimiento importante (Coyle *et al.*, 1991; Jacobs, 1986), bien sea expresado en relación al  $\%VO_{2max}$  (Joyner y Coyle, 2008) o a la potencia o velocidad a la que tiene lugar (Støren *et al.*, 2014). Un dos-veces ganador

del Tour de Francia produjo 379 W ( $5,4 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en el primer punto de inflexión de lactato (i.e., LT fijado en  $2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), que corresponde con el 72,2 % de su  $W_{\text{max}}$  (Bell *et al.*, 2017).

## UMBRAL ANAERÓBICO

El umbral anaeróbico (UAN) es el segundo umbral que se identifica a medida que la intensidad de la actividad física continúa incrementándose y casi alcanza el máximo.

Con respecto a las necesidades del ciclismo en carretera, tanto para evaluar el rendimiento como para planificar el entrenamiento, resulta importante conocer qué producción de potencia submáxima genera la máxima tasa metabólica oxidativa sostenible, que marca el límite entre una intensidad de ejercicio fuerte, y otra muy fuerte o severa. Ese límite de intensidad se denomina «máximo estado estable metabólico» (MMSS, del inglés *maximal metabolic steady state*), ya que genera cambios significativos en las dinámicas cardiorrespiratorias y metabolismo muscular (Jones *et al.*, 2019), que de superarse de forma mantenida, aceleraría la percepción del esfuerzo y fatiga, provocando disminución en el rendimiento de competición (Hureau *et al.*, 2018).

Al igual que existe confusión y debate con la terminología y los métodos de valoración referentes a umbrales, también está latente la discusión con respecto a cuál es el umbral o método que mejor determina el MMSS (Craig *et al.*, 2015; Galán-Rioja *et al.*, 2020; Garcia-Tabar y Gorostiaga, 2019, 2021; Jones *et al.*, 2019; Keir *et al.*, 2015; Keir *et al.*, 2021). Al tratarse de umbrales que ocurren de forma más o menos simultánea, o que pretenden valorar el mismo hito fisiológico, otro interrogante es si existe equivalencia entre algunos de ellos, es decir, si se pueden utilizar de manera indistinta o intercambiable. Hay muchos factores que afectan a estas valoraciones que dificultan el consenso entre investigadores, y por norma general se desaconseja su interpretación como equivalentes, debido a que: a) hay variables que son protocolo-dependientes (Arratibel-Imaz *et al.*, 2016; Faude *et al.*, 2009; Jamnick *et al.*, 2018), b) no se muestran diferencias significativas entre valoraciones, pero sí sobreestimación de una respecto a la otra (Arratibel-Imaz *et al.*, 2016; Galán-Rioja *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2019; Karsten *et al.*, 2021; Valenzuela *et al.*, 2018), c) se observa correlación significativa grande pero con límites de confianza amplios (Borszcz *et al.*, 2018; Karsten *et al.*, 2021; Morgan *et al.*, 2019), aunque también hay otras investigaciones que los proponen como equivalentes, al menos en algunos casos (Denham *et al.*, 2020; MacInnis *et al.*, 2018; Valenzuela *et al.*, 2018) o hacer propuestas para corregir valores y aumentar el grado de equivalencia (Iannetta *et al.*, 2022).

Cuando se utilizan marcadores sanguíneos, el MMSS se conoce como «máximo estado estable de lactato», y si las estimaciones se realizan con respecto al intercambio de gases y parámetros ventilatorios, se denomina «segundo umbral ventilatorio», entre otras nomenclaturas. El UAN se suele situar en niveles del 80-95% del  $VO_{2max}$  o al equivalente teórico de  $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  de [La] (Fernandez-Rodriguez *et al.*, 2019), aunque al igual que el UA, el UAN es individual y variable inter- e intra-sujetos (Binder *et al.*, 2008). Otros umbrales de uso muy común, aunque se debata si son marcadores o «artefactos» fisiológicos (Gorostiaga *et al.*,

2022), son los relacionados con la producción de potencia submáxima, que también se desarrollan a continuación.

### **Segundo umbral ventilatorio**

El «segundo umbral ventilatorio» (VT2) tradicionalmente denominado «umbral anaeróbico» ahora conocido como «punto de compensación respiratoria» (RCP, del inglés *respiratory compensation point*) o como «umbral de intercambio de gases» (GET, del inglés *gas exchange threshold*), definido como la carga de trabajo más alta que se puede mantener antes de que se produzca una hiperventilación marcada debido a la acidosis metabólica (i.e.,  $\text{H}^+$ ) (Broxterman *et al.*, 2018; Meyer *et al.*, 2005). El VT2 se puede identificar como el nadir o aumento no lineal del  $\text{VE} \cdot \text{VCO}_2^{-1}$  con respecto a la intensidad (Mezzani *et al.*, 2012), como una inflexión de compensación del VE con respecto al  $\text{VCO}_2$  (i.e., RCP) (Binder *et al.*, 2008), o como una disminución sistémica del  $\text{CO}_2$  al final de la espiración (Beaver *et al.*, 1986; Mezzani *et al.*, 2012; Wasserman y McIlroy, 1964).

El VT2 puede discriminar el rendimiento de deportistas con  $\text{VO}_{2\text{max}}$  similares (Bentley *et al.*, 2007); ha demostrado tener sensibilidad a cambios en el rendimiento de ciclistas de élite (Hoogeveen, 2000; Lucía, Hoyos, Pérez, *et al.*, 2000), mejorando el  $\% \text{VO}_{2\text{max}}$  a intensidad de VT2, pese a no tener cambios en su  $\text{VO}_{2\text{max}}$ .

### **Máximo estado estable de lactato**

El «máximo estado estable de lactato» (MLSS, del inglés *maximum lactate steady state*), supone la mayor intensidad y consiguiente producción de [La] que puede ser sostenida durante un tiempo sin una acumulación continua de lactato (Billat *et al.*, 2003). El UAn se caracteriza por la intensidad del ejercicio en la que la tasa de producción de [La] excede la tasa de absorción, desequilibrio metabólico que resulta en un inevitable aumento exponencial de [La] (Fernandez-Rodriguez *et al.*, 2019).

### **Inicio de acumulación de lactato en sangre**

Relacionado con el MLSS, el «inicio de acumulación de lactato en sangre» (OBLA, del inglés *onset of blood lactate accumulation*), supone ese mismo límite en el que la [La] comienza a aumentar de forma exponencial. Varios autores definieron el OBLA como un umbral que ocurre a una [La] fija de  $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (Karlsson y Jacobs, 1982; Kindermann *et al.*, 1979), sin tener en cuenta la variabilidad individual (Binder *et al.*, 2008; Fernandez-Rodriguez *et al.*, 2019) que se ha demostrado puede tener (rango entre 2 y  $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) entre deportistas de diferente condición física (Beneke *et al.*, 2000). Dejando a un lado la variabilidad interpersonal del umbral individual, la producción de potencia a intensidad de OBLA fijo de  $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , puede discriminar entre ciclistas cadetes (15-16 años) con éxito ( $4,2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 260 W) y sin éxito ( $3,8$

$W \cdot kg^{-1}$ ; 234 W) en competición, respectivamente (Gallo *et al.*, 2021); y estos datos se pueden comparar con los que muestra un dos-veces ganador del Tour de Francia ( $5,9 W \cdot kg^{-1}$ ; 419 W; 79,8% de la  $W_{max}$ ) (Bell *et al.*, 2017).

No es posible realizar análisis del  $VO_2$  o de [La] durante competición, ya que afectaría al rendimiento, pero resulta interesante observar las simulaciones de competición que se han realizado, en las que se ha dispuesto de materiales de medición y analizadores portátiles para conocer con mayor precisión las dinámicas de marcadores fisiológicos del ciclismo en ruta, en situación de competición casi real, o las estimaciones que se han hecho a través de otros marcadores relacionados en competición real.

Peinado *et al.* (2018) analizaron kilómetro a kilómetro el perfil fisiológico de ciclistas de élite amateur en una contrarreloj simulada de montaña, y observaron valores medios al 90% (80-98%) del  $VO_{2max}$  ( $61,6 \pm 2,0 mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ), *i.e.*, en el rango aproximado (80-95% del  $VO_{2max}$ ) similares a valores donde se suele situar el UAn (Fernandez-Rodriguez *et al.*, 2019). Otros estudios aportan datos de  $VO_2$  medio más bajos en carreras simuladas de montaña, pero en las que se establece y controla la cadencia y potencia de pedaleo, por lo que no parece apropiado tomarlos como valores de competición (Bertucci *et al.*, 2012; Nimmerichter *et al.*, 2015), o que corresponden a otra especialidad de ciclismo (Smekal *et al.*, 2015).

Analizar las dinámicas bioquímicas durante la carrera resulta más complejo; Peinado *et al.* (2018) analizaron la [La] de los ciclistas de élite amateur justo cuando acabaron la simulación de carrera, y registraron valores de  $10,87 \pm 1,12 mmol \cdot L^{-1}$ , indicador de que las contrarreloj de montaña se caracterizan por una acidosis sostenida, que además resultó superior a la [La] en prueba de esfuerzo incremental en laboratorio realizada a los mismos ciclistas ( $10,09 \pm 1,17 mmol \cdot L^{-1}$ ). Otros estudios han estimado el tiempo que los ciclistas de élite profesional pasan en distintas intensidades relativas a la [La], extrapolarlo la FC alcanzada a intensidad de distintos umbrales en prueba de esfuerzo de laboratorio a la FC de competición: estimaron que en contrarrelojes de distinta exigencia (*i.e.*, distancia y pendientes variables), los ciclistas pasan entre el 2-40% del tiempo de la carrera a intensidad de OBLA (*i.e.*, FC en OBLA  $\pm 3$  lpm), entre el 18-98% por debajo del OBLA, y entre el 0-42% por encima del OBLA, siendo las etapas de contrarreloj de prólogo las más exigentes (Padilla, Mujika, Orbananos, *et al.*, 2000). El mismo grupo de investigadores estimaron que en etapas de montaña, el tiempo que los ciclistas pasan a tan alta intensidad es muy inferior, siendo  $<13\%$  del tiempo de la carrera a intensidad de OBLA,  $<4\%$  por encima del OBLA, y entre el 30-44% del tiempo de carrera por encima del LT (Padilla *et al.*, 2008), y todavía más bajo en etapas de salida masiva,  $<4\%$  del tiempo de la carrera a intensidad de OBLA,  $<1\%$  por encima del OBLA, y solo entre el 5-17% del tiempo de carrera por encima del LT (Padilla *et al.*, 2001). Teniendo en cuenta que las estimaciones de tiempo a distintas intensidades se hacen en base a la FC de competición y

que esta podría subestimar la intensidad real (Vogt *et al.*, 2006), cabe pensar que es mayor el tiempo relativo que pasan sobre las intensidades mencionadas.

### ***Producción de potencia submáxima***

La manera más fiable de calcular el UAn es a través de test de laboratorio, pero ante la dificultad que en ocasiones genera realizar estas pruebas, y con la popularización del uso potenciómetros móviles por parte de preparadores físicos y ciclistas, se ha investigado sobre otros marcadores para medir el rendimiento en umbrales funcionales. Por otro lado, la variable central para determinar las demandas de carga de trabajo durante el ciclismo es la producción de potencia mecánica que produce el ciclista para propulsar la bicicleta (Coyle *et al.*, 1991), por lo que resulta apropiado poder monitorizar, valorar y controlar entrenamientos y competición a partir de variables relacionadas con la potencia producida, implementándola al control de FC que se empleaba hasta hace 20 años (Vogt *et al.*, 2006).

Como se comentaba anteriormente, en el ciclismo en ruta raramente se observan valores de  $W_{max}$ , siendo los valores medios de ciclistas de élite amateur al 72% del  $W_{max}$  ( $302 \pm 7$  W;  $4,2 \pm 0,1$  W·kg<sup>-1</sup>) en una etapa de contrarreloj de montaña (Peinado *et al.*, 2018), o los valores medios de ciclistas profesionales al  $74 \pm 9\%$ ,  $76 \pm 8\%$  y  $71 \pm 1\%$  del  $W_{max}$  en el cómputo total de etapas de montaña de tres exigencias distintas (*i.e.*, con combinaciones de distancia y pendiente diferentes) (Padilla *et al.*, 2008). Los datos sobre producción de potencia de competición, son valores que median con esfuerzos superiores e inferiores, para conseguir mantener la capacidad de esfuerzo estable y poder terminar la etapa con un rendimiento óptimo. Es en el conocimiento de los valores de producción de potencia que pueden mantenerse estables por no producir fatiga o depleción de sustratos que reduzcan el rendimiento donde entra la valoración de los umbrales que se explican a continuación:

#### ***Umbral de potencia funcional***

El «umbral de potencia funcional» (FTP, del inglés *functional threshold power*) se define como la máxima potencia (medida en vatios) que un ciclista puede mantener a un ritmo casi constante durante aproximadamente una hora sin fatigarse. Se estima que el FTP ocurre alrededor de  $5,0-6,0$  W·kg<sup>-1</sup> y  $3-5$  W·kg<sup>-1</sup> para ciclistas profesionales y aficionados, respectivamente (Allen y Coggan, 2014), y en ciclistas de categoría sub-23 se han estimado valores de  $4,91 \pm 0,5$  W·kg<sup>-1</sup> ( $314 \pm 32,6$  W), potencia que generan al 73,2% del  $W_{max}$  (Marín-Pagán *et al.*, 2021).

#### ***Potencia crítica***

La definición de «potencia crítica» (CP) ha evolucionado de «la producción de energía externa que puede mantenerse indefinidamente o durante un tiempo muy largo sin fatiga» (Poole *et*



*al.*, 2016) a «la intensidad en la que todavía es posible un estado estable, que diferencia el ejercicio intenso del severo» (Jones *et al.*, 2019). La CP consiste en un simple modelo matemático que describe la relación entre la potencia sostenible y el desarrollo de la fatiga durante el ejercicio de alta intensidad, y al mismo tiempo proporciona una estimación del MMSS (Galán-Rioja *et al.*, 2020; Poole *et al.*, 2016). La CP está asociada al rendimiento en eventos de resistencia; se basa en el hecho de que el periodo durante el cual un ciclista puede rodar depende de la intensidad a la que esté pedaleando (Zabala y Cheung, 2018), y además, discrimina entre diferentes adaptaciones fisiológicas y resultados de rendimiento dependiendo de si se entrena por encima o por debajo del umbral (Iannetta *et al.*, 2018; Vanhatalo *et al.*, 2011).

### *Modelo de potencia-duración*

Para aprovechar la gran cantidad de datos que se pueden obtener de potenciómetros móviles, se han desarrollado nuevos softwares de análisis de datos y valoración del rendimiento como WKO o Golden Cheetah. Estos programas aportan parámetros de control funcional, en algunos casos novedosos, que pueden ayudar al control del entrenamiento. Entre otros, destacan en la valoración de parámetros como  $W_{\max}$  potencia aeróbica máxima, velocidad aeróbica máxima, perfilado del FTP, capacidad de reserva funcional, o tiempo hasta el agotamiento, o reserva de energía, estamina, y el valor de torque (Cusick y Coggan, s.f.), y la posibilidad de obtener toda esta información a través de pruebas de campo. Aunque existe gran cantidad de literatura respecto a la información que ofrecen, todavía no existe evidencia científica que respalde la precisión de los potenciómetros comerciales en concreto.

El modelo de potencia-duración permite crear el «perfil de potencia récord» de un ciclista (RPP, del inglés *record power profile*), que Pinot y Grappe (2011) definieron como el «documento de identidad del potencial físico de un ciclista», en el que se detalla la  $W_{\max}$  media alcanzada para diferentes duraciones de esfuerzo. Un estudio reciente destaca la potencial utilidad del RPP para diferenciar a los ciclistas en función de las categorías de profesionalización o por tipo de especialidad (p. ej., escaladores vs. contrarrelojistas) (Valenzuela *et al.*, 2022); afirman que un ciclista profesional debe alcanzar los  $6,3 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$  en 20 minutos para ser competitivo. En otra reciente publicación, se sugiere que un ciclista, para ser competitivo en la categoría élite-sub-23, debería ser capaz de conseguir  $5,8 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$  en un test de 20 minutos, siendo necesarios  $6,1 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$  en ese mismo periodo crítico para ser dominador en la categoría y poder pasar a profesionales (de Lucas Rogero *et al.*, 2022).

Las más recientes recomendaciones con respecto a la obtención del RPP de un ciclista cuando se obtiene a través de pruebas de campo, incluye *a)* realizarlas siempre siguiendo las pautas preestablecidas de la literatura existente (*i.e.*, número establecido de pruebas de predicción, recuperación entre pruebas, pendiente de la carretera y análisis de datos), *b)*

evitar ensayos de predicción de esfuerzo único, como suele realizarse con el FTP, c) estimar los parámetros de potencia-duración a través de la fórmula  $W(t) = W'/t + CP$  (donde  $W$  es la potencia producida,  $W'$  es la capacidad de trabajo por encima de la CP, y  $t$  es la duración de la prueba en segundos) (Leo et al., 2022).

### **Eficiencia**

La eficiencia, definida como la relación entre el trabajo realizado y el costo total de la energía metabólica, es considerada un determinante clave del rendimiento del ciclismo de resistencia (Joyner y Coyle, 2008). Se estudian variables de la mecánica de pedaleo (cadencia, torque) cuya variación pueda afectar a una mayor producción de trabajo con el mismo o menor costo energético para aplicarlo al rendimiento (Ettema y Loras, 2009; Jobson et al., 2012; McDaniel et al., 2002); dentro de estas relaciones entre variables destaca la «eficiencia mecánica bruta», como la mejor opción para valorar la eficiencia en ciclismo.

### ***Eficiencia mecánica bruta***

La eficiencia mecánica bruta (GE, del inglés *gross mechanical efficiency*), también conocida como rendimiento bruto, se define como el porcentaje de energía metabólica que se transforma en energía mecánica (Edwards et al., 2009), y se calcula a través de la siguiente fórmula:  $GE = \frac{\text{Trabajo realizado} = \text{Potencia generada (kcal}\cdot\text{min}^{-1})}{\text{Energía gastada} = \text{energía consumida (kcal}\cdot\text{min}^{-1})} \times 100$ . En ciclismo, la GE sería la relación entre la potencia de pedaleo y el gasto de energía. Un incremento en la eficiencia conlleva un descenso del porcentaje de  $VO_{2\max}$  necesario para mantener un trabajo mecánico determinado; por lo tanto, un ciclista será más eficiente cuando genere más potencia con un mismo o menor gasto energético. La mayor cantidad de estudios se centran en factores biomecánicos (técnica de pedaleo y ajustes de la bicicleta), como el de Leirdal y Ettema (2011b), que atribuyeron a la cadencia de pedaleo fuerte relación con la GE, o Ferrer-Roca et al. (2017) que estudiaron los cambios en la longitud de la biela del pedal en la GE. También se ha estudiado el impacto negativo que pueden tener factores ambientales como la temperatura (Hettinga et al., 2007). Joyner y Coyle (2008) demostraron que la eficiencia del ciclo de cada pedalada está altamente correlacionada con el porcentaje de fibras musculares tipo I. Por su parte, Hopker, Passfield, et al. (2009) después de demostrar que el entrenamiento puede mejorar la GE con una relación inversa entre GE y  $VO_{2\max}$  en ciclistas entrenados (Hopker et al., 2012), aunque todavía no se ha comprobado el impacto que tiene en el rendimiento de competición. Bell et al. (2017) estudiaron el caso de un dos-veces campeón del Tour, que exhibió algo inusual en ciclistas de élite, i.e., altos valores de  $VO_{2\max}$  y de GE media ( $84 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$  y 23,0-23,6%, respectivamente), dos características necesarias para mantener una potencia submáxima muy elevada, lo que consideraron podría ser un factor que contribuyera al éxito. Al comparar Moseley et al. (2004) a ciclistas de élite con respecto a

ciclistas recreacionales, no observaron diferencias en la GE, aunque sí hubiese diferencias significativas en sus  $VO_{2max}$  y  $W_{max}$ .

### **Eficiencia neta**

La eficiencia neta es similar a GE, de la que se diferencia porque se resta el aporte de  $VO_2$  en reposo (Castronovo et al., 2013):  $Eficiencia\ neta = \frac{Trabajo\ realizado}{Energía\ gastada - Consumo\ de\ energía\ en\ reposo} \times 100$ .

### **Eficiencia delta**

La eficiencia delta no tiene en cuenta la influencia de aquellos procesos metabólicos que no contribuyen al trabajo realizado, y por lo tanto no es un parámetro integral, sino que representa una medida de relación incremental, por lo que se ha considerado un indicador de rendimiento más viable que GE y la eficiencia neta (Castronovo et al., 2013):  $Eficiencia\ delta =$

$$\frac{\Delta Trabajo\ realizado}{\Delta Energía\ gastada}$$

## **2.2. Factores biomecánicos que afectan al rendimiento del ciclismo en carretera**

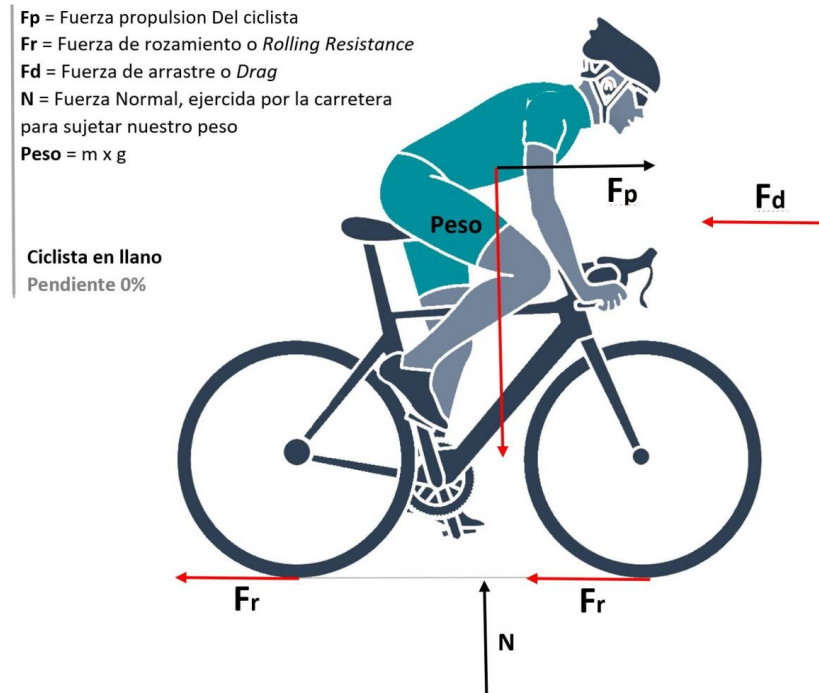
Desde el punto de vista de la biomecánica, el ciclismo se puede definir como la actividad física que se desarrolla mediante la interacción de ciclista y máquina (bicicleta). La biomecánica se encarga de analizar y comprender la mejor configuración entre los componentes de esa relación, y optimizar los recursos disponibles para transmitir eficazmente fuerza (potencia) a la bicicleta a través del sistema músculo-esquelético (Gregor *et al.*, 1991); se trata de un análisis multidisciplinar, que se vale del estudio de aspectos relacionados con la ingeniería mecánica, dinámica muscular, fisiología, etc. Los avances en los conocimientos biomecánicos y en el ajuste de la bicicleta han hecho este proceso más eficiente y preciso (Zabala y Cheung, 2018).

La biomecánica del ciclismo se puede realizar desde el estudio de los factores cinéticos y los cinemáticos.

- Factores cinéticos: este análisis se orienta al estudio de las fuerzas que afectan al desplazamiento: las fuerzas propulsivas (*e.g.*, fuerzas aplicadas a pedales y biela) son las que ayudan a avanzar en el sentido de la marcha, y las resistivas (*e.g.*, aerodinámica, rozamiento y pendiente) son las que se oponen al desplazamiento.
- Factores cinemáticos: este análisis se orienta al estudio de otros factores relacionados con el movimiento que determinan la eficacia mecánica del desplazamiento en ciclismo (*e.g.*, técnica de conducción, ciclo de pedaleo y sus fases, análisis cinemático del pedal-tobillo-rodilla-cadera, cadencia de pedalada óptima).

### **2.2.1. Factores cinéticos**

Como se puede apreciar en la Figura 3, el ciclista genera fuerzas para conseguir desplazarse hacia delante, conocidas como fuerzas de propulsión (vector negro), que tienen que ser superiores a las fuerzas de resistencia (vectores rojos), que se oponen a ese movimiento.



**Figura 3: Diagrama de las principales fuerzas que influyen en el avance.**

Ciclista en llano. Pendiente 0%.  $F_p$ =fuerza de propulsión del ciclista;  $F_r$ =fuerza de rozamiento de las ruedas o *rolling resistance*;  $F_d$ =fuerza de arrastre o *drag*;  $N$ =fuerza normal, ejercida por la carretera para sujetar nuestro peso;  $Peso = m \times g$  (masa corporal por aceleración de la gravedad). Tomada de Velasco (2018).

#### 2.2.1.1. Fuerzas propulsivas

Las fuerzas propulsivas son aquellas que ejerce el ciclista contra la bicicleta y que le permiten desplazarse hacia delante, como la fuerza sobre el sillín, el manillar y, especialmente, contra los pedales, que activan la mecánica cinética de la bicicleta, haciendo girar la rueda.

##### **Fuerza contra el sillín y el manillar**

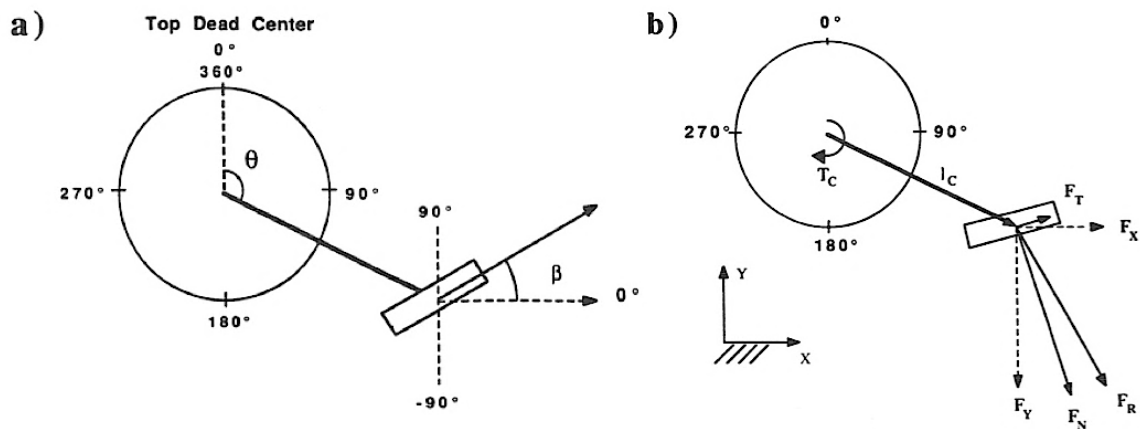
La producción científica en relación a las fuerzas propulsivas en ciclismo se ha centrado en la relativa a las fuerzas contra los pedales, ya que son el mecanismo que hace que la bicicleta se desplace. En comparación con la fuerza de propulsión contra los pedales, no hay tantos estudios sobre las fuerzas que se generan contra el sillín o contra el manillar, y se considera que estas fuerzas son poco significativas para el rendimiento (Gutierrez, 1994).

##### **Fuerza contra los pedales**

La fuerza de propulsión principal es la que se genera contra los pedales, partiendo de la contracción muscular, y haciendo que el mecanismo pedal-biela-plato-cadena-piñón haga revolucionar la rueda con tracción. Hay diferentes factores que tienen influencia en esta

fuerza propulsiva, como los factores fisiológicos previamente analizados que muestran su funcionalidad en la acción motriz de pedalear, o la técnica y la cadencia de pedaleo que se analizarán más adelante; como su nombre da a entender, es una fuerza que se genera al pedalear, y que se estudia en ese mismo punto de unión del último segmento corporal contra el pedal que ofrece resistencia a vencer.

La fuerza que el ciclista genera contra los pedales se ha estudiado desde finales del siglo XIX, y los dinamómetros con los que se ha medido han vivido una gran evolución hasta los más actuales sensores que, instalados en el pedal, son capaces de medir y registrar los componentes de la fuerza aplicada contra cada pedal con precisión (García López, 2009).



**Figura 4: Componentes de fuerzas aplicadas al pedal respecto a la posición angular de la biela.**

$\beta$ =ángulo del pedal;  $\theta$ =ángulo de la biela;  $F_N$ ,  $F_T$ ,  $F_X$ ,  $F_Y$ ,  $F_R$ =componentes de la fuerza ejercida sobre el pedal: fuerza normal, tangencial, horizontal, vertical y resultante, respectivamente;  $l_C$ =vector de la longitud de biela;  $T_C$ =torque neto creado en el centro de la biela. Tomada de Kautz et al. (1991).

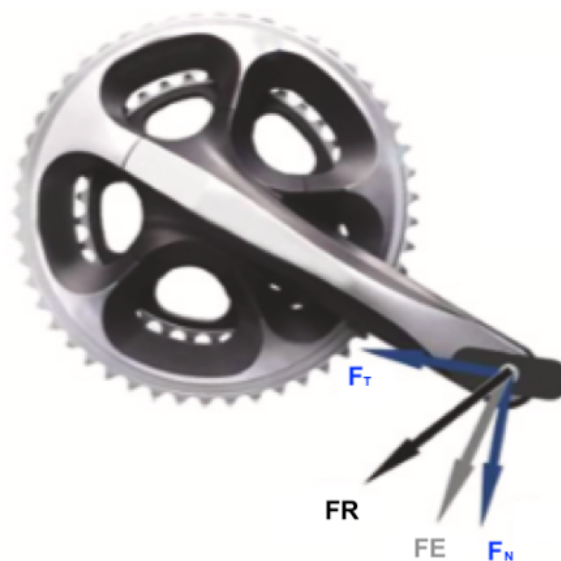
Como ejemplo de la evolución en la medición de la fuerza contra el pedal están los estudios de Kautz et al. (1991), que partiendo de la posición angular en que se encontrara la biela (ángulo  $\theta$ , i.e., ciclo de  $0^\circ$ - $360^\circ$  partiendo de posición vertical con el pedal sobre el eje) y su longitud, descompusieron la fuerza que se aplica sobre el pedal, observando dos fases en el ciclo de pedaleo: una que hace énfasis en la fase de bajada del pedal (downstroke) y otra que hace énfasis en la subida (upstroke) o recobro. Determinaron que, basándose en la orientación angular del pedal respecto a su eje de inserción en la biela (ángulo  $\beta$ ), la fuerza aplicada en el ciclo de la pedalada presenta distintos componentes vectoriales (i.e., los vectores de fuerza angular normal y tangencial,  $F_N$  y  $F_T$ , a partir de los que se calculan los

vectores de fuerza horizontal o antero-posterior y vertical,  $F_x$  y  $F_y$ , para poder conocer la fuerza resultante y la fuerza de torsión o torque neto creado en el centro de la biela,  $FR$  y  $T_c$ , respectivamente. Figura 4). El análisis de esos ángulos y vectores de fuerza permitió conocer la cantidad de trabajo externo negativo y positivo producido por el ciclista en cada revolución de la biela, obteniendo la potencia media de cada pierna en cada revolución de la biela. Con ello, se obtiene un índice donde queda patente la importancia de la fase de bajada del pedal, que expresa la cantidad de trabajo producido como porcentaje del total de potencia positiva en cada revolución.

Como se indica en la publicación de "Biomechanics of Cycling" de Bini y Carpes (2014) la fuerza muscular se transfiere a los pedales a través de los huesos y tendones, pero la dirección de aplicación de la fuerza en los pedales dependerá de la posición del pie en relación con la superficie del pedal. Así, para el análisis de las direcciones de fuerza, la Fuerza Total o Fuerza Resultante del pedal se separa en tres componentes (normal,  $F_y$ ; antero-posterior,  $F_x$ ; y medio-lateral,  $F_z$ ). Con la llegada de los pedales automáticos con cala fija, las fuerzas medio-laterales se quedan reducidas casi al mínimo, y esto hace que en diferentes estudios se entienda el análisis cinético del pedal como la suma de la  $F_y$  y la  $F_x$  (Bini y Carpes, 2014).

#### *Índice de efectividad de la pedalada*

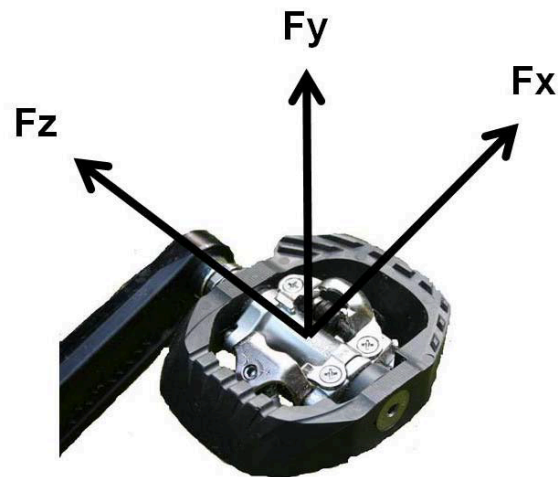
Una valoración habitual con estas mediciones, basada en los estudios de LaFortune y Cavanagh (1983), es el índice de efectividad (IE) de la pedalada, que indica el porcentaje de la fuerza contra los pedales que produce potencia de propulsión a la bicicleta, calculado como la ratio entre FE y FR. Según la publicación de Bini y Carpes (2014), la magnitud y dirección de las fuerzas vienen determinadas por el nivel del ciclista, de manera que la mayor parte de la FR será FE cuando haya una correcta aplicación de las fuerzas.



**Figura 5: Fuerzas contra el pedal.**

FE=fuerza efectiva;  $F_T$ =fuerza tangencial;  $F_N$ =fuerza normal; FR=fuerza resultante.  
Adaptada de Bini y Carpes (2014).

La  $F_z$  nace de la movilidad de la cala dentro del pedal (Figura 6) y no influye en el torque de la biela (Bini y Carpes, 2014). Los casos en los que se ha estudiado la  $F_z$  tenían como objetivo cuantificar las cargas soportadas por la articulación de la rodilla, y concluían que el aumento de la aplicación de  $F_z$  junto con mayor rotación interna de la rodilla podría estar asociado con sobrecarga en los tejidos blandos de la rodilla (Boyd *et al.*, 1997; Ericson, 1984; Gregor y Wheeler, 1994; Ruby *et al.*, 1992). Las calas fijas reducen la  $F_z$  debido a que impiden el movimiento entre las partes de unión, a excepción de un pequeño grado de abducción-aducción (Ramos-Ortega *et al.*, 2014), por lo que podrían contribuir a reducir las lesiones de rodilla relacionadas con esa holgura.

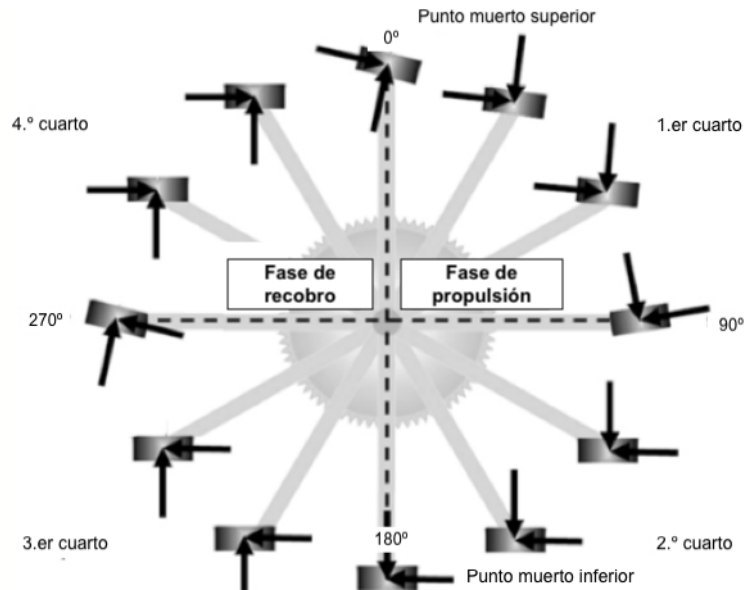


**Figura 6: Componentes de la fuerza ejercida contra la superficie del pedal en tres dimensiones.**

$F_x$ =fuerza horizontal o antero-posterior;  $F_y$ =fuerza vertical;  $F_z$ =fuerza medio-lateral.  
Tomada de Bini y Carpes (2014).

En la Figura 7 se puede observar el ciclo completo de la pedalada, con la fase de bajada o propulsión (*i.e.*, biela entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ ) y la fase de subida o recobro (*i.e.*, biela entre  $180^\circ$  y  $360^\circ$ ). Cuando la biela está a  $0^\circ$  y a  $180^\circ$  se denominan puntos muertos (DC, del inglés *dead centre*) superior e inferior. Cada fase, a su vez, está dividida en dos mitades, resultando en cuatro cuartos, cada uno con diferentes vectores de fuerza contra el pedal.

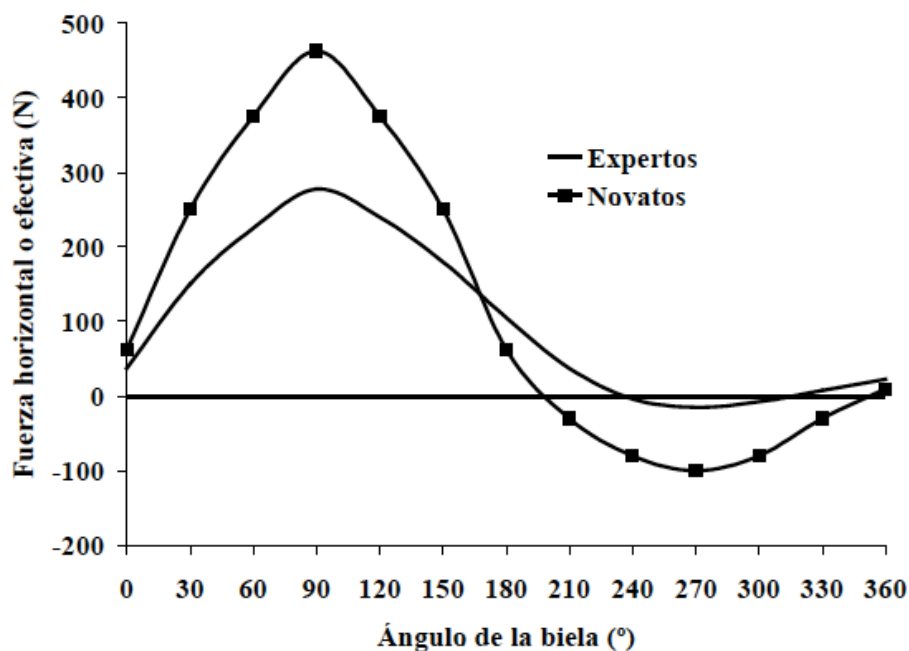




**Figura 7: Pedalear en el tiempo.**

Ciclo de pedalada completo, dividido en fase de propulsión y de recobro, y a su vez en cuartos relativos a la dirección de los vectores de la fuerza contra el pedal. Adaptada de Bini y Carpes (2014).

La mayor eficacia mecánica o mayor FE se manifiesta en la fase de propulsión del pedal, entre los 100 y 105° del ciclo de pedaleo, cuando la biela se encuentra en horizontal, que es cuando mayor torque tiene (Gutierrez, 1994). En ocasiones, los ciclistas aplican fuerza en los músculos flexores del miembro inferior en la fase de recobro (180°-360°) produciendo una acción de tirado del pedal descrita por Mornieux *et al.* (2010). Sanderson (1991) apuntaba que los ciclistas expertos son capaces de retrasar y disminuir el impulso negativo y adelantar antes del punto muerto a 0° el impulso positivo, por lo que necesitan menor impulso positivo para mantener el mismo IE que los ciclistas noveles, ya que esa potencia de propulsión se ve afectada por las dos fases del ciclo.



**Figura 8: Diferencias en la fuerza efectiva aplicada por ciclistas expertos y novatos para una misma potencia de pedaleo.**

Tomada de García López (2009).

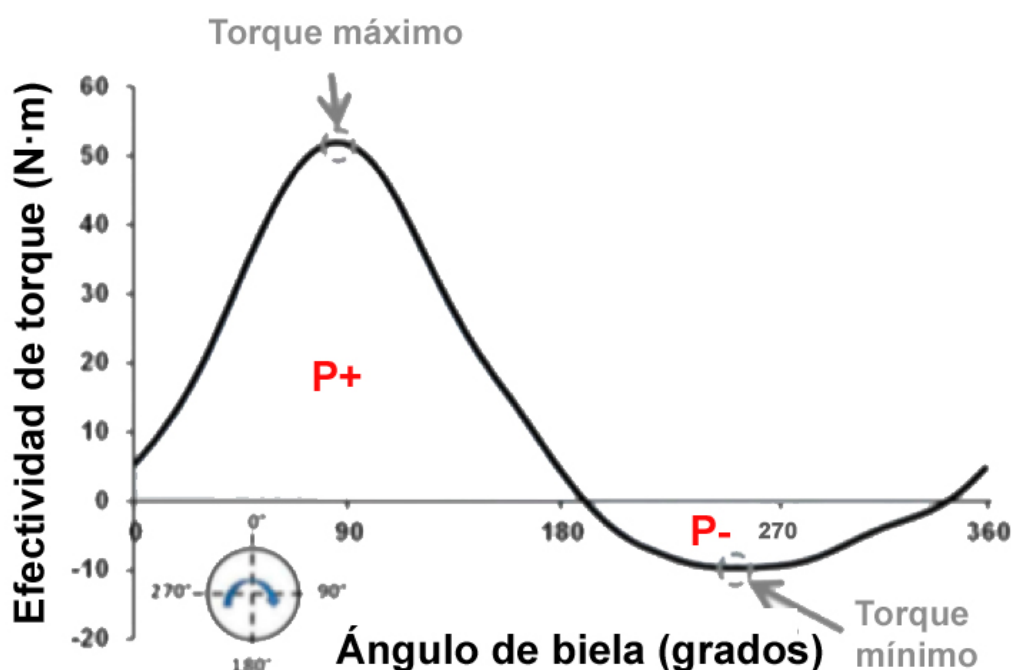
No encontraron relaciones entre la técnica de pedaleo y la eficacia del mismo, creyeron que debido a que la medición se analizaba el ciclo completo de la pedalada (Sanderson, 1991); cuando midieron el IE en la fase propulsiva y fase de recobro por separado, detectaron que los ciclistas cambiaban su técnica de pedaleo según la carga (Kautz *et al.*, 1991; Zameziati *et al.*, 2006) y la cadencia que se solicitara (Candotti *et al.*, 2007; Patterson y Moreno, 1990). Distintos estudios desaconsejan el IE por no contemplar variables cinéticas y cinemáticas que cambian para mejorar la técnica y que no necesariamente implican una mejora de la eficacia de la pedalada (Bini y Diefenthaler, 2010; Korff *et al.*, 2007; Mornieux *et al.*, 2008).

La técnica de pedaleo y el ahorro de energía siempre han sido dos variables muy investigadas en el ciclismo. Con respecto al IE, se presenta el estudio de Leirdal y Ettema (2011b) donde se examinó la relación entre la técnica de pedaleo y la GE, definido como el ratio de trabajo realizado con respecto a la energía consumida. Así, en diez ciclistas bien entrenados se midió la FE, DC y GE, y observaron que el gasto energético estaba fuertemente relacionado con la cadencia, pero que la FE (como medida de técnica de pedaleo) no era la causa de esta relación. Se concluyó que la FE estaba afectada por las fuerzas de inercia, y que el valor de este parámetro, como medida del estudio de la técnica debería ser cuestionado. De la misma manera, Cannon *et al.* (2007) señalaron cómo un aumento de la dorsiflexión del tobillo disminuía la GE por aumento de la actividad del gastrocnemio lateral.

### Efectividad del torque

La efectividad del torque, es una métrica dinámica que calcula el torque positivo (fase de propulsión o de bajada del pedal 0-180°) y el torque negativo (fase de recobro o subida del pedal 180-360°) aplicado a la biela en cada pedalada. De tal manera, que si se analiza una curva de torque efectivo-ángulo de la biela (Figura 9) se podría analizar el torque mínimo y máximo, o impulso negativo y positivo (García López, 2009). Con estos parámetros, algunos ergómetros (e.g. Lode Excalibur Sport, Groningen, Países Bajos) presentan la posibilidad de obtener una proporción entre el impulso negativo y positivo con la siguiente ecuación:

$$\text{Efectividad del torque} = \left( \frac{P+ + |P-|}{P+} \right) * 100$$



**Figura 9: Torque efectivo.**

P+=Impulso positivo; P-=Impulso negativo. Adaptada de García-López et al. (2016).

### Otras medidas de efectividad de la pedalada

La potencia bruta realizada y la absorbida (del inglés *gross power released*, GPR y *gross power absorbed*, GPA, respectivamente), son métricas que tienen por objeto dar un valor neto a la efectividad de la pedalada sobre la potencia general realizada. Así, GPR es la potencia que el ciclista utiliza para desplazar la bicicleta hacia delante (e.g., potencia en W al 80% del torque effectiveness:  $GPR = W \times 0.8$ ) y GPA la potencia que es absorbida a consecuencia del torque negativo ( $GPA = P_{\text{total}} - GPR$ ) (Cusick y Coggan, s.f.).

### *Eficiencia mecánica*

Como se comentaba anteriormente, es objeto del análisis biomecánico conocer la manera de optimizar las capacidades de los ciclistas, para que las fuerzas que se proyectan contra los pedales sean lo mayores posibles; generar una gran cantidad de torque, i.e., tener una buena eficacia mecánica, es importante en el rendimiento del ciclismo, pero la fuerza generada debe ir acompañada de una utilización eficiente, es decir, debe ser sostenible desde un punto de vista metabólico, adecuarse al tiempo que dura la carrera.

En el apartado de factores cinemáticos que afectan al rendimiento del ciclismo en carretera se tratarán esos factores de los que pueden depender tanto la eficacia como la eficiencia mecánica; la combinación óptima de factores como la técnica de pedaleo y cadencia es un objetivo complejo que depende de la biomecánica del ciclismo.

#### **2.2.1.2. Fuerzas resistivas**

Las dos grandes fuerzas que se oponen al desplazamiento son las producidas por el contacto de la rueda con el suelo (rozamiento en giro) y, sobre todo, la ejercida por el aire (rozamiento aerodinámico).

##### ***Fuerza de rozamiento en giro***

La fuerza de rozamiento en giro ( $F_r$ ) es la producida por el contacto de las ruedas con el suelo. La  $F_r$  cobra mayor importancia a velocidades bajas, cuando la resistencia aerodinámica no es tan relevante. Existen varios factores que aumentan a la  $F_r$ , afectando negativamente a la capacidad para avanzar, como una mayor masa del conjunto ciclista-bicicleta, una menor presión de la rueda, y un menor diámetro y mayor sección transversal de rueda (Gutierrez, 1994).

##### ***Fuerza de rozamiento aerodinámico***

En cuanto a la aerodinámica, la influencia de la resistencia aerodinámica en el ciclismo ha sido ampliamente estudiada (Barry *et al.*, 2014; Candau *et al.*, 1999; Capelli *et al.*, 1993) y demostrada especialmente durante las competiciones de ruta en contrarrelojes individual y por equipos (Padilla, Mujika, Angulo, *et al.*, 2000). Para desplazarse, un ciclista debe ser capaz de vencer, como se muestra en la Figura 3, a la resistencia de la gravedad, la resistencia de rodadura que surge de las pérdidas de energía sobretodo del neumático rozando con el asfalto y la resistencia aerodinámica al avance (Zabala y Cheung, 2018).

La resistencia aerodinámica al avance está determinada por los siguientes factores; la densidad del aire, la velocidad del aire de la bicicleta, el coeficiente de resistencia aerodinámica ( $C_d$ ) y la superficie frontal proyectada ( $A$ ) (Zabala y Cheung, 2018). El ciclista

propulsa la bicicleta por la acción de los miembros inferiores del cuerpo, realizando un gesto motor de carácter cíclico.

En el ciclismo en ruta, la mayor fuerza opuesta al desplazamiento de las etapas que se desarrollan en terreno llano es la aerodinámica, que supone más del 80% de todas las fuerzas de resistencia a una velocidad de  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , y superior a medida que se incrementa la velocidad (Gross *et al.*, 1983). La resistencia aerodinámica es la fuerza que se genera cuando el conjunto ciclista-bicicleta se desplazan a través del aire y se produce un rozamiento del aire contra la superficie del conjunto que se desplaza, y reduce la velocidad.

Se ha investigado cómo reducir la fuerza de arrastre del aire y conseguir una mejor aerodinámica (carácter de coeficiente de rozamiento reducido) desde distintas disciplinas, y se han introducido numerosos cambios al ciclismo: vestimenta (trajes ceñidos, de una sola pieza, de materiales de fibra suaves (Faria y Cavanagh, 1978; Gregor *et al.*, 1991), casco (forma de gota de agua...), formas y dimensiones de distintos componentes de la bici, posición del cuerpo...

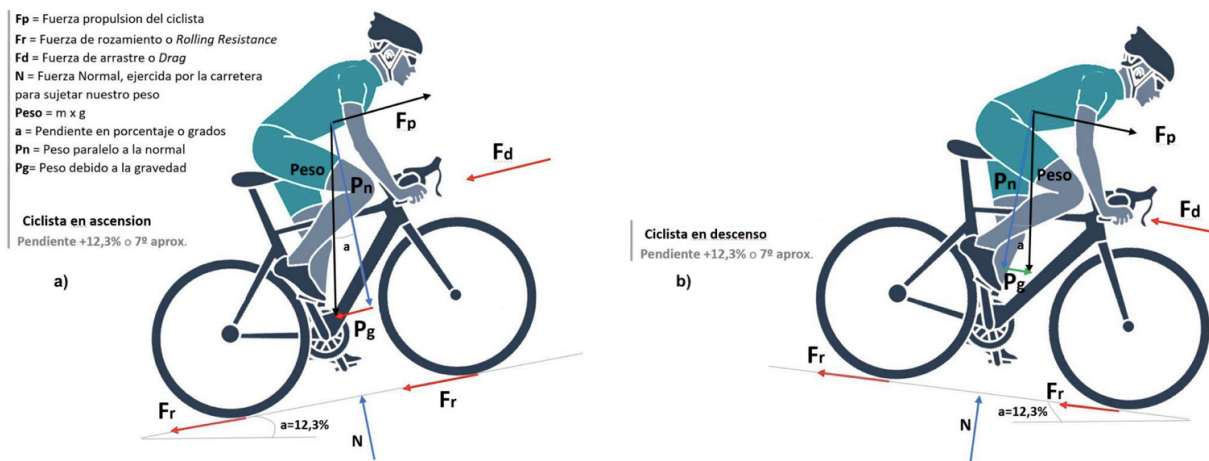
Cuando el aire que se desliza alrededor de un objeto es incapaz de seguir su contorno, se produce la denominada fuerza de arrastre de forma, en la que parte del aire se frena al chocar contra la sección transversal del cuerpo perpendicular al flujo, y otra parte es incapaz de seguir el contorno de la superficie, produciéndose dos vértices iguales detrás del ciclista que producen una fuerza de arrastre opuesta al desplazamiento. La magnitud de la fuerza de arrastre de forma depende de la sección transversal o área frontal proyectada del conjunto ciclista-bicicleta (APCB) expuesta al desplazamiento, y al contorno del perfil, por lo que reduciendo esa área y adecuando el perfil se reduce la fuerza resistiva. Un cambio de posición del ciclista sobre la bicicleta (de vertical a posición de carrera) reduce  $\sim 0,16 \text{ m}^2$  el área frontal, lo que produce un incremento en la velocidad de  $1,13 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , cuando se desplaza a una velocidad de  $24 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (Faria y Cavanagh, 1978). Los cascos con perfil de gota de agua, gracias a su contorno longilíneo, han reducido la fuerza de resistencia aerodinámica en 1 Newton (N) a  $48 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , haciendo ganar así  $1,6 \text{ s}\cdot\text{km}^{-1}$  (Kyle, 1989). Resulta interesante estudiar, tanto por separado como de forma global, los componentes del conjunto ciclista-bicicleta (p. ej., la forma y dimensiones de los elementos que acompañan al ciclista como la indumentaria y la bicicleta, y la posición o posiciones sobre la bicicleta) más adecuadas para una cinética más eficiente, pero conviene no olvidar otros factores a los que pueden afectar esos cambios o esa nueva postura, como la eficiencia energética, la transmisión de fuerza al pedal, comodidad y seguridad, para llegar a un equilibrio beneficioso, o al menos, no contraproducente.

Los túneles de viento han sido utilizados para valorar la resistencia aerodinámica en diferentes posiciones, con diferentes materiales y formas. Un estudio tuvo como conclusiones que la posición de los brazos con los codos hacia dentro y los antebrazos

nivelados hacia arriba con inclinación de 30° podía reducir el rozamiento un 8%, debido a la reducción del APCB (Kyle, 1990).

### Fuerza de la pendiente

El peso, fuerza que genera la masa del conjunto ciclista-bicicleta por la aceleración de la gravedad, puede ejercer tanto como fuerza propulsiva como resistiva, dependiendo de la pendiente. Así, en pendientes positivas o ascendentes se opone al desplazamiento (en la Figura 10 a, la pendiente es  $a > 0^\circ$ , y el peso debido a la gravedad,  $P_g$ , frena el avance), en pendientes negativas o descendentes ayuda (Figura 10 b, la pendiente es  $a < 0^\circ$ , y el peso debido a la gravedad,  $P_g$ , empuja o ayuda a avanzar), y en pendientes neutras o llanas prácticamente no tiene influencia (Velasco, 2018).



**Figura 10: Diagramas de fuerzas que influyen en el avance del ciclista en pendientes.**

a) pendiente ascendente; b) pendiente descendente;  $F_p$ =fuerza de propulsión del ciclista;  $F_r$ =fuerza de rozamiento de las ruedas o *rolling resistance*;  $F_d$ =fuerza de arrastre o *drag*;  $N$ =fuerza normal, ejercida por la carretera para sujetar nuestro peso;  $Peso = m \times g$  (masa corporal por aceleración de la gravedad);  $a$ =pendiente en porcentaje o grados;  $P_n$ =peso paralelo a la normal;  $P_g$ =peso debido a la gravedad y que a) frena o b) empuja. Adaptada de Velasco (2018).

Como se comentaba anteriormente, en etapas que se desarrollan en llano, la mayor fuerza que se opone al desplazamiento es la resistencia aerodinámica; pero en etapas de montaña, en las que la velocidad de desplazamiento es menor, es el peso, debido a la pendiente positiva el que asume la mayor parte de fuerza resistiva. Se estima que puede superar el 90% de las fuerzas que hay que vencer para avanzar. Rodríguez-Marroyo *et al.* (2003) analizaron la influencia de las tres fuerzas resistivas mencionadas en puertos de montaña de distinta categoría (*i.e.*, categoría especial, 1ª, 2ª y 3ª categoría, con pendientes del 6,4%, 6,5%, 5,8% y 5,5%, respectivamente) en la Vuelta a España, y se observó que más del 90% de las fuerzas resistivas eran debidas a la pendiente, excepto en los puertos de 3ª categoría, que era algo inferior.

### 2.2.2. Factores cinemáticos

Los factores cinemáticos son aquellos que están relacionados con el movimiento y determinan la eficacia mecánica del desplazamiento en ciclismo, es decir, de los factores cinemáticos depende, en mayor o menor medida la magnitud de las fuerzas que influyen en el desplazamiento (*i.e.*, fuerzas propulsivas y resistivas).

#### **Cadencia**

La cadencia o frecuencia de pedaleo es una variable cinemática que puede alterarse libremente durante la carrera, cambiando la velocidad de la marcha y el desarrollo utilizado (Gregor *et al.*, 1991). Es un parámetro de fácil cuantificación y monitorización a través del cadenciómetro, que suele acompañarse del velocímetro y pulsómetro en la mayoría de dispositivos comerciales.

La cadencia de pedaleo óptima es uno de los parámetros más discutidos en ciclismo. Según diversos estudios, las cadencias seleccionadas por los ciclistas durante la competición son superiores a las que se consideran óptimas desde el punto de vista energético (Vercruyssen y Brisswalter, 2010), aunque hay estudios que han encontrado que cadencias 9,2% inferiores a las escogidas no solo son más eficientes, sino que también mejoran el tiempo de contrarreloj en llano (1,5% más rápido) de ciclistas amateur bien entrenados (Watson y Swensen, 2006), o muestran mayor efectividad de par y GE (Leirdal y Ettema, 2011b), o son más eficientes y producen mayor  $W_{max}$  (Stebbins *et al.*, 2014). Las cadencias elegidas por los ciclistas oscilan entre 90-100 rpm en llano (contrarreloj y etapas por equipos), y 70-75 rpm en puertos de extrema dureza (Lucía *et al.*, 2001b); la cadencia es menor en puertos porque se suelen correr de pie, posición en la que *a*) la distancia desde las articulaciones hasta el punto de aplicación de fuerza disminuye y permite aplicar más fuerza aprovechando la masa corporal para vencer la resistencia de la pendiente, y *b*) al aumentar la fuerza aplicada al pedal es necesario disminuir la cadencia, aunque *c*) parece que los ciclistas que vencen estas etapas son los que consiguen mantener cadencias más elevadas (Rodríguez-Marroyo *et al.*, 2003).

Factores que influyen en la cadencia de pedaleo óptima:

- Talla: ciclistas de menor talla vs. mayor talla.
- Nivel de práctica
- Contrarrelojes vs. llanas (Lucía, Hoyos, Pérez, *et al.*, 2000).
- Posición de sentado vs. de pie

- Geometría de la bicicleta: longitud de biela, altura de sillín, ángulo del tubo de sillín...

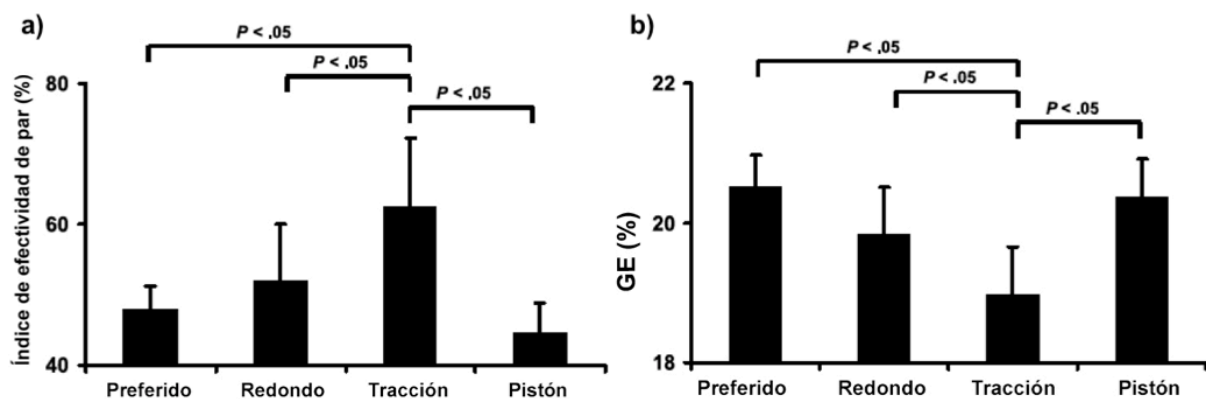
Muchos estudios han incidido en el nivel de activación de la musculatura del tren inferior a través de electromiografía (EMG), dependiendo de la cadencia o de la intensidad de pedaleo escogida (Baum y Li, 2003; Ericson, 1986; Li y Baum, 2004; Lucía *et al.*, 2004; MacIntosh *et al.*, 2000; Marsh y Martin, 1995; Neptune *et al.*, 1997; Sarre *et al.*, 2003; Suzuki *et al.*, 1982). Los músculos que más comúnmente se han estudiado son el glúteo mayor, semitendinoso, semimembranoso, bíceps femoral, recto femoral, vasto medial, vasto lateral, sóleo, gastrocnemios y tibiales, con resultados muy variados. Ericson (1986) indicó que a medida que la cadencia de pedaleo se incrementó de 40 a 100 rpm no se mostraron cambios en el nivel de activación para recto femoral y bíceps femoral. Neptune *et al.* (1997) registraron la actividad EMG de ocho músculos de las extremidades inferiores a 250 W a través de velocidades de pedaleo que oscilaron entre 45 y 120 rpm, y observaron que glúteo mayor, bíceps femoral, semimembranoso y vasto medial aumentaron su nivel de actividad sistemáticamente a medida que aumentaba la velocidad de pedaleo. En contraste, la relación EMG-cadencia de glúteo y sóleo mostró una tendencia cuadrática con un mínimo de actividad EMG a velocidades de pedaleo cercanas a 90 rpm, mientras que la actividad de recto femoral y tibial anterior no se vio afectada por la cadencia. Sarre *et al.* (2003) no encontraron un efecto significativo de la cadencia en los niveles de actividad de vasto lateral y medial, mientras que la del recto femoral fue significativamente mayor a velocidades de pedaleo más bajas (~60 rpm). Lucía *et al.* (2004) obtuvieron resultados contradictorios en ciclistas profesionales a ~370 W, mostrando una disminución de la actividad EMG del vasto lateral y glúteo mayor con el aumento de la velocidad de pedaleo. En general, incluso si la mayoría de los estudios informaron un aumento del nivel de actividad de EMG en gastrocnemio y semimembranoso en relación con un aumento de la cadencia de pedaleo, existen resultados contradictorios con los otros músculos. Estas discrepancias podrían explicarse por las diferencias en el estado de entrenamiento de los deportistas, el rango de cadencias analizadas y los niveles de potencia. Por ejemplo, la potencia se fijó en 120 W en el estudio realizado por Ericson (1986), mientras que Sarre *et al.* (2003) fijó la potencia de ~222 W a ~370 W. MacIntosh *et al.* (2000) promediaron la actividad EMG para siete músculos del tren inferior, a cuatro salidas de potencia (100, 200, 300 y 400 W) en cada cadencia (50, 60, 80, 100 y 120 rpm). Sus resultados confirmaron que el nivel de activación muscular se modifica por la cadencia en una potencia dada, y mostraron que el nivel mínimo de actividad de EMG se produce a una cadencia progresivamente mayor a medida que aumenta la potencia (*e.g.*, se observó una amplitud mínima de EMG a menos de 60 rpm para 100 W, y cerca de 100 rpm para 400 W), sugiriendo que, a una salida de potencia submáxima dada, hay una cadencia con un nivel mínimo de activación del músculo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos autores promediaron los valores de siete músculos, por lo que los resultados no pueden extenderse a cada músculo de las



extremidades inferiores, ya que cada uno responde de manera diferente a la modificación de la velocidad de pedaleo.

### Técnica de pedaleo

En el estudio cinemático de la técnica de pedaleo se utiliza la biela como punto de referencia para estudiar las fases del ciclo de pedaleo. Como se ilustraba en la Figura 7, el ciclo de pedaleo consta de dos fases: la fase de propulsión es el movimiento que se realiza entre 0-180°, y la de recobro o tracción, entre 180-360°; siguiendo el patrón de pedaleo comentado, tradicionalmente se ha aceptado que el pedaleo debe de ser lo más redondo posible. Para Bini y Carpes (2014) la mayor efectividad mecánica se produce cuando el ciclista aplica una fuerza propulsiva de 0 a 180° y una fuerza contraria al movimiento de la biela de 180° a 360° con efecto minimizador del toque negativo que se produce en la fase de recobro. El estudio de Korff *et al.* (2007) presentó la técnica de tracción de pedales (*i.e.* técnica basada en la fase de recobro) como la más efectiva desde el punto de vista mecánico (Figura 11 a) que las demás técnicas analizadas (*i.e.*, técnica preferida, en redondo, en pistón), pero al mismo tiempo es la que requirió mayor gasto energético y por tanto se consideró ineficiente (Figura 11 b). La técnica de pedaleo a pistón resultó la más económica o eficiente desde el punto de vista energético,

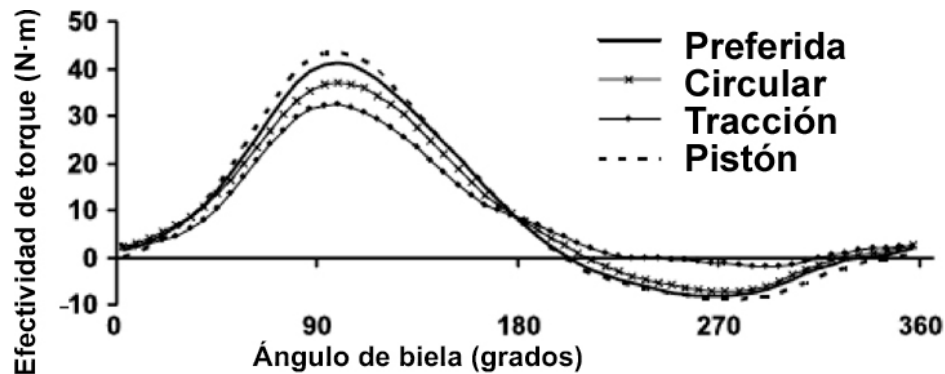


**Figura 11: Comparación entre distintas técnicas de pedaleo y su relación con a) el índice de efectividad de par y b) la eficiencia bruta.**

GE=eficiencia bruta. Adaptada de Korff *et al.* (2007).

debido a la no actuación muscular en la fase de recobro (180°-360°; *i.e.*, provocó un ahorro energético al colaborar menos grupos musculares). Así mismo, generó mayor torque en la fase propulsiva (0°-180°) (Figura 12) con respecto a otras técnicas, aunque no resultó tan eficaz desde el punto de vista mecánico al no contrarrestar la generación de torque negativo en la fase de recobro. Sin embargo, en este estudio los participantes no tuvieron mucho

tiempo para entrenar y adaptarse a las nuevas técnicas de pedaleo. En este sentido, autores como Luttrell y Potteiger (2003) observaron que, entrenando seis semanas una técnica concreta, la eficiencia de esta técnica concreta mejoraba.



**Figura 12: Evolución de la efectividad del torque en distintos grados del ciclo de pedalada y con distintas técnicas.**

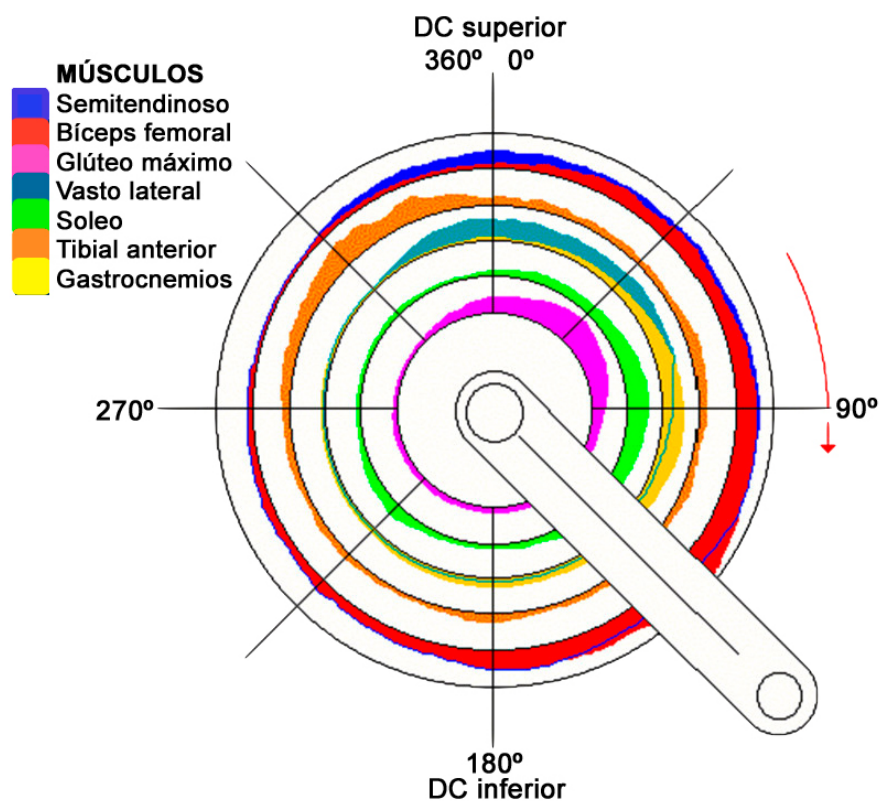
Adaptada de Korff *et al.* (2007).

García-López *et al.* (2016) pusieron de manifiesto la relación entre nivel o experiencia del ciclista y la técnica de pedaleo, señalando, como ya habían indicado otros autores (Candotti *et al.*, 2007; Coyle *et al.*, 1991; Sanderson, 1991), que a mayor nivel del ciclista mayor es su capacidad para acentuar la fase de recobro a la hora de maximizar la potencia, produciendo así un menor torque negativo.

La uniformidad de la distribución del torque (DT), con una disminución de los ángulos DC superior e inferior, mostraron tener relación con el consumo energético en esfuerzos submáximos con un incremento de la GE (Leirdal y Ettema, 2011a, 2011b).

Numerosos estudios han centrado la atención en cómo funciona la musculatura durante el esfuerzo de pedalada, qué patrón motor es el que impera y qué modificaciones se podrían inducir para mejorar la técnica de pedaleo, y para lograr mejor eficiencia mecánica y metabólica. Hug y Dorel (2009) revisaron la bibliografía existente sobre la técnica de pedaleo desde el análisis EMG, y pudieron constatar lo siguiente en cuanto a la implicación de la musculatura del tren inferior en el ciclo de pedalada (*i.e.*, musculatura implicada y nivel de activación en cada momento del ciclo), así como distintos factores que pueden afectar en lo anterior (p. ej., producción de potencia, cadencia, interfaz pie-zapatilla, posición del cuerpo, nivel de condición física y fatiga): a) indicaron que los grupos musculares con mayor implicación en la generación de fuerza fueron cuádriceps e isquiotibiales, destacando *grosso modo* que desde el DC superior hasta los 90° actúan mayormente glúteo mayor, cuádriceps y

gastrocnemios, de 90 a 270°, gastrocnemios e isquiotibiales y de 270° hasta el DC superior, tibial anterior y recto femoral (Figura 13); *b*) por lo general, se muestra mayor activación muscular en EMG a medida que aumenta la producción de potencia y/o la cadencia, lo que también se constata con respuestas de momento de fuerza ampliado en multitud de articulaciones de las extremidades inferiores a medida que aumentan la carga de trabajo y fatiga (Bini y Diefenthaeler, 2010); *c*) los pedales con calas de clip permiten generar torque en la fase de recobro y mejoran la estabilidad del pie sobre el pedal, por lo que la activación muscular es mayor con estos vs. los pedales estándar sin sujeción; *d*) cuando se pedalea en posición de pie la activación es mayor, en parte por la necesidad de estabilizar pelvis en ausencia de sillín.



**Figura 13: Diagrama de nivel y duración de activación muscular durante la pedalada de los músculos del tren inferior.**

DC=punto muerto; Identificación de músculo respecto al color: Azul=semitendinoso; rojo=bíceps femoral; rosa=glúteo mayor; verde oscuro=vasto lateral; verde claro=sóleo; naranja=tibiales; amarillo=gastrocnemios. El grosor de la franja de color indica nivel de activación EMG. Adaptado de Costan y Pantea (2010).

Bini *et al.* (2009) investigaron el efecto de cambiar la posición de las rodillas respecto al plano frontal (*i.e.*, neutro, abducción y aducción) en la FR,  $VO_2$ , y cadencia, y concluyeron que, aunque con las rodillas en aducción (*i.e.*, rozando el cuadro de la bicicleta) se consiguieran

aumentos significativos de cadencia y FR en el pedal sin diferencias en VO<sub>2</sub>, ese aumento no se veía reflejado en la fuerza transmitida al movimiento; se propuso valorar de forma individual el posible entrenamiento con rodillas en aducción para lograr adaptaciones musculares que favorezcan el rendimiento, atendiendo el riesgo de sobrecarga y lesión en las estructuras de las rodillas.

### **Posición sobre la bicicleta**

La posición óptima sobre la bicicleta es uno de los objetivos que busca cualquier ciclista, tanto para lograr rendir a mayor nivel (*i.e.*, ganar potencia, mejorar eficiencia, reducir fuerzas resistivas), como para evitar sufrir lesiones y aumentar la comodidad (Silberman *et al.*, 2005). Para lograr la posición deseada se debe ajustar la bicicleta de forma sistemática para cumplir los objetivos y necesidades del ciclista, previa evaluación de sus condición física y rendimiento (Swart y Holliday, 2019).

Según una revisión sistemática de Bini y Priego-Quesada (2022), la cinemática de las extremidades inferiores está influenciada por los cambios en la altura del sillín de más del 4% de la longitud de la pierna, lo que podría provocar cambios en las cargas de las extremidades inferiores, el VO<sub>2</sub> o la eficiencia. Swart y Holliday (2019), recomendaron una configuración inicial utilizando mediciones estáticas del ángulo de flexión de la rodilla (25°-35°) a través de la técnica descrita por Holmes *et al.* (1994), y también mediciones estáticas para evaluar otros ángulos articulares (*e.g.*, cadera hombro), y para guiar la posición inicial de la distancia hasta el manillar y la caída del manillar. Al configurar la altura del sillín mediante mediciones dinámicas, recomendaron un ángulo de flexión de rodilla de 33°-43° pedaleando a baja intensidad y entre 30°-40° a alta intensidad, pero al igual que Bini y Priego-Quesada (2022), indicaron la necesidad de que aumente la evidencia sobre rangos óptimos del ángulo de la rodilla utilizando mediciones dinámicas, y aplicar las mejoras tecnológicas para una configuración precisa, así como valores de referencia para el resto de articulaciones.

Según Jeukendrup y Martin (2001), un cambio en la posición del cuerpo (*e.g.*, *a*) manos en las cubiertas de los frenos, *b*) manos en las caídas del manillar de la carretera, *c*) codos en el manillar de contrarreloj y *d*) posición optimizada para túnel de viento) puede resultar en una reducción de la resistencia aerodinámica (área de arrastre de 0,358 m<sup>2</sup>, 0,307 m<sup>2</sup>, 0,269 m<sup>2</sup>, y 0,240 m<sup>2</sup>, respectivamente), que podrían reducir el tiempo de rendimiento (<0 min, <2-5 min, <5-7 min, y <7-9,5 min, respectivamente, siendo los rangos más amplios para amateur y menores para ciclistas de élite), aunque también podría comprometer la potencia por generar ángulos articulares contraproducentes con el rendimiento. Barry *et al.* (2014) también comprobaron que los cambios de posición sobre la bici que disminuyen el área frontal del conjunto ciclista-bicicleta (*i.e.*, flexión de tronco y bajada de torso, cabeza baja y mirada hacia delante, y manos sobre frenos con antebrazos en posición horizontal) reducen

un 13,9% la fuerza de arrastre y provocan un ahorro energético gracias a las ganancias aerodinámicas.

### 2.3. Otros factores

Además de los parámetros fisiológicos y biomecánicos, existen otros factores que juegan un papel crucial en el desarrollo final del resultado. Las características antropométricas son importantes en la determinación de la especialidad del ciclismo. Los escaladores suelen ser bajos y ligeros y los contrarrelojistas altos y pesados (Zabala y Cheung, 2018). Es necesario tener en cuenta la estrategia nutricional (Atkinson *et al.*, 2003), la estrategia de regulación del esfuerzo en carrera o *pacing* (Faria *et al.*, 2005a), la aclimatación a la altitud (Hahn y Gore, 2001), la aclimatación a temperaturas extremas como frío, calor y humedad (Racinais *et al.*, 2015) o el estado anímico del ciclista (Zabala y Cheung, 2018). Todos ellos tienen una considerable influencia en el rendimiento y se ven influenciadas por las características de la prueba.

La monitorización y evaluación de las características fisiológicas y de rendimiento de los ciclistas proporciona información relevante sobre el desarrollo atlético a largo plazo, el proceso de entrenamiento y la identificación de talentos. Mientras que existe gran evidencia científica sobre características fisiológicas, biomecánicas y otros factores que influyen en el rendimiento de ciclistas profesionales de élite, la información relativa a ciclistas de categorías inferiores todavía es escasa. Por todo ello, el objetivo de la presente tesis será ahondar en los factores que afectan al rendimiento de ciclistas de categoría sub-23, con especial interés en la posición sobre la bicicleta, la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica.

Esta revisión de la literatura sobre los factores que afectan al rendimiento deportivo del ciclismo de carretera ha dejado al descubierto algunas lagunas y suscitado preguntas sobre la materia, especialmente en lo relativo a los métodos de valoración de la fuerza de resistencia aerodinámica, y en cómo afectan a la eficiencia metabólica bruta y a otros factores fisiológicos de ciclistas jóvenes de élite los cambios en la técnica de pedaleo, la temporada de competición o el desentrenamiento.



# **Capítulo 3.**

Objetivos e hipótesis





### 3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Objetivos

- Determinar si los cálculos de la APCB obtenida con fórmulas de predicción logarítmica para distintas posiciones sobre el manillar son comparables a la APCB medida con el método de planimetría computarizada, y 2) analizar con los dos métodos la influencia de la posición corporal sobre la APCB.
- Investigar la relación entre los marcadores de la técnica de pedaleo (DT,  $T_{\text{medio}}$ ,  $T_{\text{máximo}}$ ,  $T_{\text{mínimo}}$  y cadencia) y la GE a intensidades submáximas, teniendo en cuenta las diferencias fisiológicas inter-individuales.
- Evaluar la GE de ciclistas jóvenes durante una temporada de competición, y determinar la relación entre GE y  $VO_{2\text{max}}$  en ciclistas jóvenes de élite.
- Examinar los efectos de una interrupción en el entrenamiento de cinco semanas, en ciclistas jóvenes de alto nivel, en lo relativo a la composición corporal y los parámetros hematológicos y fisiológicos relacionados con el rendimiento.

#### 3.2. Hipótesis

- La APCB predicha con las fórmulas de predicción logarítmica en distintas posiciones sobre el manillar de un grupo de ciclistas de élite, con bicicletas con la misma geometría, será más alta a la APCB obtenida con el método planimetría computarizada, y resultará sobreestimada.
- La GE disminuirá por la técnica de pedaleo a medida que la intensidad aumente.
- La GE de ciclistas jóvenes de élite disminuirá a medida que la temporada de competición avance, a diferencia de su  $VO_{2\text{max}}$ .
- Tras una interrupción en el entrenamiento de cinco semanas de ciclistas jóvenes de alto nivel, su masa corporal y medidas de pliegues aumentarán, y los parámetros hematológicos y fisiológicos relacionados con el rendimiento disminuirán significativamente.



# Capítulo 4.

Marco experimental



## **4. MARCO EXPERIMENTAL**

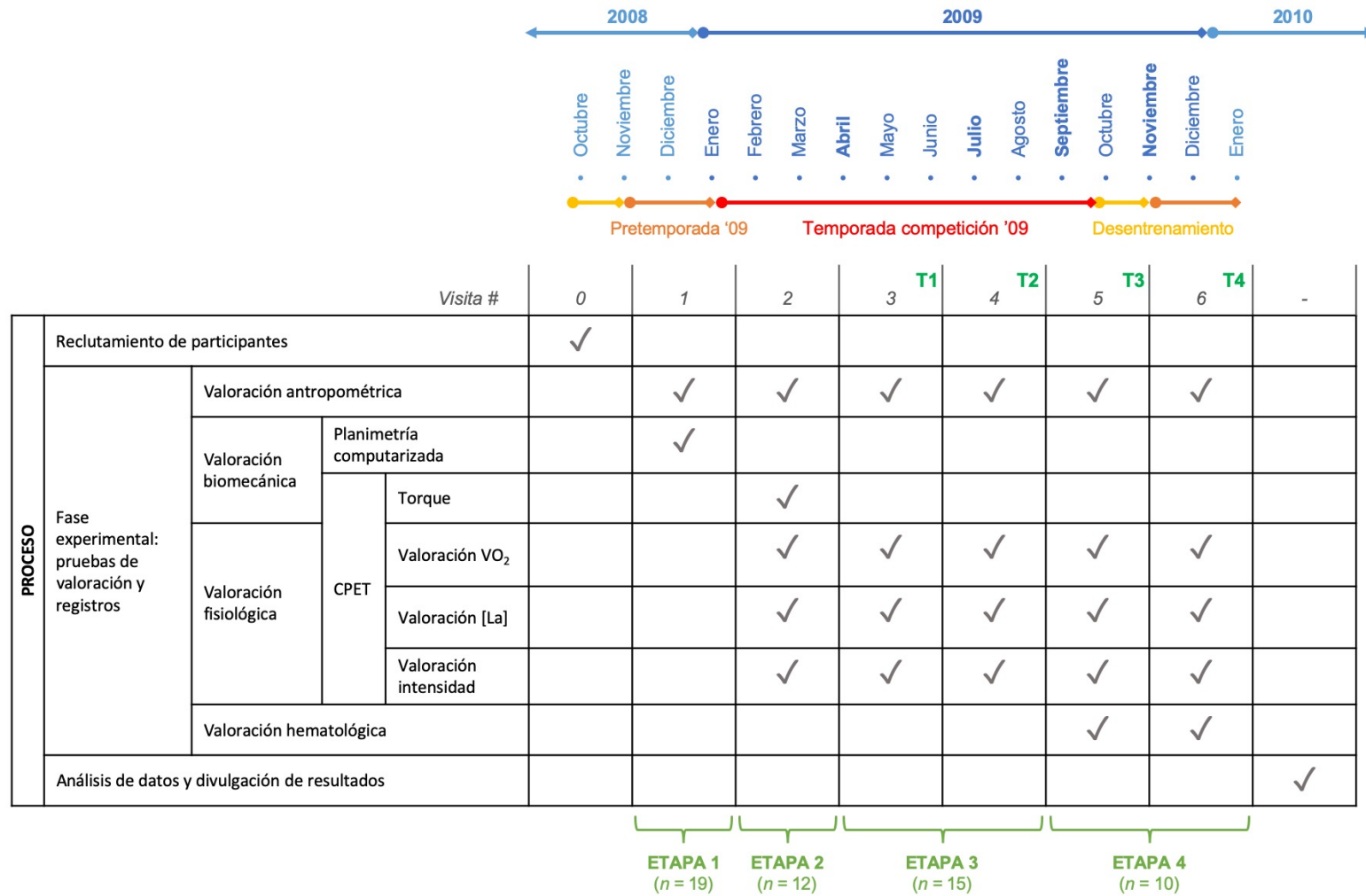
En este apartado se desarrolla el marco sobre el que se desarrolla la parte empírica de esta tesis doctoral; con el fin de abordar los objetivos marcados anteriormente y poder comprobar las hipótesis planteadas, se describen el diseño, criterios de selección, material y métodos, y procedimientos de los distintos estudios que la componen. En posteriores apartados se examinarán y discutirán los resultados obtenidos, se propondrán conclusiones finales y se declararán las limitaciones detectadas.

Esta tesis doctoral se enmarca en el ámbito de las Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, dentro de dos líneas de investigación correspondientes al alto rendimiento deportivo, como son la biomecánica del deporte y la fisiología del ejercicio físico.

### **4.1. Diseño**

Para la realización de la presente “vuelta” de tesis doctoral se llevaron a cabo cuatro “etapas profesionales” de ciclismo en ruta, utilizando el mismo equipo (muestra) de ciclistas (participantes) (Figura 14):

- ETAPA 1: análisis de la influencia de la posición del ciclista en la resistencia aerodinámica, y comparación de distintos métodos para su valoración.
- ETAPA 2: análisis de la influencia que tiene la técnica de pedaleo en la eficiencia metabólica a distintas intensidades.
- ETAPA 3: análisis de la eficiencia metabólica o bruta y su relación con el  $VO_2$  a distintas intensidades durante la temporada de competición, sin grupo control.
- ETAPA 4: análisis de los efectos del desentrenamiento en parámetros relativos al rendimiento, sin grupo control.



**Figura 14: Diagrama de flujo del proyecto de investigación y relación con la temporada de competición de ciclismo y con los estudios presentados en los capítulos 5-8.**

CPET=prueba de esfuerzo cardiopulmonar; VO<sub>2</sub>=consumo de oxígeno y variables ventilatorias; [La]=concentración de lactato en sangre.

## 4.2. Población de estudio

En esta investigación participaron 19 ciclistas jóvenes de alto rendimiento (profesionales y sub-23) que competían a nivel nacional o superior en ciclismo de carretera. Los ciclistas eran varones con edades comprendidas entre los 18 y 22 años. La media de los participantes en experiencia competitiva a nivel de élite nacional era de dos años (rango 1-5 años). Estos ciclistas cubrieron un total de 20 000-25 000 km por año y la duración de sus entrenamientos semanales era de entre 18 y 22 horas. Algunos de los ciclistas de categoría sub-23 que participaron en estos estudios de investigación han conseguido llegar a competir a nivel profesional ( $n=8$ ), e incluso seis de ellos en equipos de categoría World Tour. Las características de los participantes se ofrecen en la Tabla 1.

**Tabla 1: Características de los participantes.**

Variables	$\bar{x} \pm DE$	Rango
Edad (años)	20,6 $\pm$ 1,62	18-22
Talla (cm)	177,4 $\pm$ 5,27	168-188
Masa corporal (kg)	69,5 $\pm$ 5,63	62-83
Experiencia ciclista (años)	2,21 $\pm$ 1,31	1-5

$\bar{x} \pm DE = \text{media} \pm \text{desviación estándar.}$

Todos los participantes se ofrecieron voluntarios para participar en el presente proyecto de investigación, y aportaron su consentimiento informado (ver anexo #1: *Consentimiento informado*) y respondieron al cuestionario de Salud (ver anexo #2: *Cuestionario Salud*) por escrito antes del darse inicio al estudio, siguiendo los postulados de la Declaración de Helsinki. El estudio concuerda con los estándares médicos descritos por Harriss y Atkinson (2009).

### 4.3. Material, métodos y procedimiento

Después de diseñar la metodología de la investigación se procedió a reclutar como participantes potenciales a ciclistas que formaban parte del equipo Seguros Bilbao de categoría sub-23 y ciclistas profesionales que habían pertenecido al mismo equipo (criterios de inclusión).

Todas las personas interesadas, que después de haber sido informadas y conociendo la naturaleza del estudio decidieron participar, entregaron firmado un documento acreditando su consentimiento informado. Las personas que reunieron los criterios de inclusión fueron llamadas para realizar las pruebas de valoración y continuar con el procedimiento que se muestra de forma gráfica en la Figura 14. Todas las pruebas y mediciones fueron realizadas por el mismo grupo de investigación y en el mismo laboratorio de Análisis del Rendimiento Deportivo del Departamento de Educación Física y Deportiva, en la Facultad de Educación y Deporte de la UPV/EHU.

Se citó a los participantes para la realización de las pruebas de valoración correspondientes a cada una de los cuatro "etapas" en seis ocasiones distintas, distribuidas de la siguiente forma:

- **1.<sup>a</sup> visita:** al inicio de la pretemporada (en noviembre del 2008) se realizaron las pruebas correspondientes a la *Etapa 1*, que consistieron en mediciones antropométricas y planimetría computarizada, para la valoración del APCB.
- **2.<sup>a</sup> visita:** también durante la pretemporada (en diciembre del 2008) se realizaron las pruebas correspondientes a la *Etapa 2*, que consistieron en mediciones antropométricas y una prueba de esfuerzo cardiopulmonar con análisis de gases, de [La], y el torque de la pedalada, para la valoración de la eficiencia metabólica bruta y su relación con la técnica de pedaleo (torque y cadencia) en distintas intensidades.
- **3.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup> visitas:** en plena temporada de competición (en abril y julio del 2009, T1 y T2, respectivamente) se realizaron las pruebas correspondientes a la *Etapa 3*, que en ambas visitas consistieron en mediciones antropométricas y una prueba de esfuerzo cardiopulmonar con análisis de gases y de [La], para la valoración de la eficiencia metabólica bruta y su relación con el VO<sub>2</sub> en distintas intensidades.
- **5.<sup>a</sup> y 6.<sup>a</sup> visitas:** justo al final de la temporada de competición (septiembre del 2009, T3) y al inicio de la siguiente pretemporada (noviembre del 2009, T4), se realizaron las pruebas correspondientes a la *Etapa 4*, que en ambas visitas consistieron en mediciones antropométricas, una prueba de esfuerzo cardiopulmonar con análisis de gases y, de [La], y análisis hematológico, para



cuantificar los efectos del cese de entrenamiento en parámetros clave para el rendimiento deportivo.

A excepción de alguna pauta para las seis visitas que los participantes hicieron al laboratorio, no se hizo ningún tipo de intervención por parte del grupo de investigación. Los ciclistas siguieron las pautas de entrenamiento, alimentación, etc. diseñadas por sus entrenadores durante la temporada de competición. Durante el período de interrupción del entrenamiento, los ciclistas no realizaron ningún tipo de entrenamiento físico y no se controló su dieta.

Las distintas valoraciones que se mencionan a lo largo de este capítulo y que se esquematizan en la Figura 14, así como los métodos y procedimientos empleados vienen detallados en el apartado *materiales y métodos* de cada *etapa*, en los capítulos 5, 6, 7 y 8.



# Capítulo 5.

## Etapa 1

*Influencia de la posición sobre la bicicleta en el área frontal, en ciclistas de carretera*



## **Influencia de la posición sobre la bicicleta en el área frontal, en ciclistas de carretera.**

### **Introducción**

En la literatura científica se han presentado varios modelos basados en parámetros fisiológicos, antropométricos y ambientales para calcular las fuerzas de resistencia que hay que afrontar durante una competición (di Prampero, 2000; Martin, 2006; Martin *et al.*, 1998; Olds *et al.*, 1993; Olds *et al.*, 1995). Las fuerzas de resistencia totales, cuando se corre en terreno llano a una velocidad constante, están compuestas por las resistencias de la fricción, rodadura y aerodinámica (Debraux *et al.*, 2009; Neumann, 1992). La resistencia de fricción se genera en los rodamientos y en el sistema de impulsión de la cadena (Martin *et al.*, 1998). Puede suponer entre el 2 y el 5 % de las fuerzas de resistencia totales (Kyle, 2003; Martin *et al.*, 1998). La resistencia a la rodadura está relacionada con el peso combinado de la bicicleta y el ciclista, la presión de las ruedas y la textura de la superficie por la que se corre (Kyle, 2003; Martin *et al.*, 1998). La resistencia aerodinámica viene determinada por el coeficiente de arrastre, el área frontal proyectada del conjunto ciclista-bicicleta (APCB), la densidad del aire y la velocidad relativa del aire respecto al conjunto ciclista/bicicleta. Esta fuerza de resistencia es la que impide en mayor grado el movimiento del ciclista hacia delante (Candau *et al.*, 1999; Capelli *et al.*, 1993; di Prampero *et al.*, 1979; Martin *et al.*, 1998; Neumann, 1992; Olds, 1998): a velocidades de pedaleo superiores a  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , aproximadamente el 90% de las fuerzas de resistencia totales se deben a la resistencia aerodinámica (Capelli *et al.*, 1993; di Prampero *et al.*, 1979), por lo que la energía del ciclista se emplea principalmente para superar esta fuerza (Swain *et al.*, 1987). Fox y McDonald (1973) representaron la potencia para superar la resistencia aerodinámica mediante la siguiente fórmula  $R_a = 0.5 \times p \times APCB \times F_d \times v^2$ , en la que la resistencia aerodinámica ( $R_a$ , N) se define como el producto de una constante (0,5), la densidad del aire ( $p$ ,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), el área frontal proyectada de la combinación entre ciclista y bicicleta ( $APCB$ ,  $\text{m}^2$ ), el coeficiente de arrastre ( $F_d$ , adimensional) y la velocidad relativa del aire respecto al conjunto ciclista/bicicleta. Es común promediar la resistencia aerodinámica e inferir de ese dato el área de arrastre ( $APCB \times F_d$ ) (Olds y Olive, 1999), que es la variable combinada que debe mejorarse para reducir la resistencia aerodinámica (Gross *et al.*, 1983).

Teniendo en cuenta que las modificaciones del APCB a menudo conllevan cambios en la configuración del conjunto ciclista-bicicleta, el APCB no siempre varía independientemente del coeficiente de arrastre, y por lo tanto, la variable conjunta ( $APCB \times F_d$ ) suele ser la variable de interés (Olds y Olive, 1999). Así, para determinar cómo los cambios de forma afectan el coeficiente de arrastre, el APCB debe medirse con precisión (Debraux *et al.*, 2009; Jeukendrup y Martin, 2001; Kyle, 1989; Olds y Olive, 1999).

Los procedimientos de medida del APCB, como el método de planimetría computarizada (PC), el pesaje fotográfico y la planimetría manual, se han descrito previamente en la literatura científica (Bassett *et al.*, 1999; Debraux *et al.*, 2009; Olds y Olive, 1999): el método PC ha demostrado elevados coeficientes de correlación intra-clase (0.997) y de precisión, y sus resultados son similares al pesaje fotográfico y la planimetría manual (Heil, 2001, 2002, 2005). Los métodos de cálculo para predecir el área de los ciclistas o el APCB también pueden encontrarse en la literatura científica (Bassett *et al.*, 1999; Heil, 2001, 2002; Mijovic *et al.*, 2001; Padilla, Mujika, Angulo, *et al.*, 2000). Algunos de ellos utilizan una fracción constante del área de superficie corporal predicha (ASC) (Bassett *et al.*, 1999; Capelli *et al.*, 1993; di Prampero *et al.*, 1979; Olds *et al.*, 1993; Olds *et al.*, 1995; Padilla, Mujika, Orbananos, *et al.*, 2000; Swain, 1994); estos métodos se basan en el supuesto de que el APCB es proporcional a la masa corporal (MC) elevada a la potencia de dos tercios. Este supuesto puede llevar a cálculos poco precisos del APCB cuando la MC de los participantes se encuentra fuera del rango de 60-80 kg (Heil, 2002). Otro método de cálculo para predecir el APCB se basa en la MC de los participantes, en lugar de en su ASC (Heil, 2001). Así, Heil presentó una fórmula de regresión para calcular el área frontal de los ciclistas en una posición de contrarreloj basándose en su MC (Heil, 2001). En 2002, Heil presentó fórmulas de predicción no logarítmicas (FPN), también basadas en la MC de los participantes, para calcular el APCB en diferentes posiciones corporales; posición sobre el manubrio del manillar (PMM), posición sobre las palancas de freno (PPF) y posición sobre la caída del manillar (PCM) (Heil, 2002). Las ventajas del método FPN, en comparación con el PC, son que es una técnica más simple y que permite ahorrar tiempo, ya que solo se necesita la MC de los ciclistas. No obstante, el uso de bicicletas de distinta geometría en el estudio de Heil (2002) plantea la cuestión de la precisión de las FPN cuando se utilizan bicicletas con la misma geometría.

Hasta donde sabemos, no hay estudios que hayan comparado el APCB predicho mediante las FPN con los resultados obtenidos a través del método PC.

Los objetivos del presente estudio fueron: 1) determinar si los cálculos del APCB obtenida con las FPN de la PMM, PPF y PCM son comparables al APCB medida con el método PC, y 2) analizar con los métodos PC y FPN la influencia de la posición corporal sobre el APCB.

Nuestra hipótesis fue que el APCB predicho con las FPN de la PMM, PPF y PCM de un grupo de ciclistas de élite, en bicicletas con la misma geometría, sería más alta a la APCB obtenida con el método PC, y resultará sobreestimada

## **Materiales y métodos**

### **Participantes**

Diecinueve ciclistas de élite varones se ofrecieron voluntarios para participar en el presente estudio. Las características de los participantes fueron las siguientes (media±desviación estándar,  $\bar{x}\pm DE$ ): edad=20,6±1,62 años, talla=177,4±5,27 cm, masa corporal=69,5±5,63 kg.

Todas las valoraciones que se detallan a continuación fueron realizadas durante la primera visita tras el proceso de reclutamiento, en noviembre del 2008, al inicio de la pretemporada de competición.

### **Valoración antropométrica**

La valoración antropométrica consistió en medición de talla (estadiómetro SECA 213, Hamburgo, Alemania) y masa corporal total (báscula plana SECA 869, Hamburgo, Alemania).

A partir de las mediciones realizadas se calculó el área de superficie corporal (ASC) predicha ( $m^2$ ) a través del método de Du Bois y Du Bois (1916) (*Área de Superficie Corporal ( $m^2$ ) = Masa corporal (kg)<sup>0.425</sup> × Talla (cm)<sup>0.725</sup> × 0.007184*).

### **Valoración biomecánica: área frontal proyectada del conjunto ciclista-bicicleta**

El área frontal proyectada del conjunto ciclista-bicicleta (APCB,  $m^2$ ) se determinó a través de dos métodos: predicho a través de las fórmulas no-logarítmicas de Heil (2002), y medido a través del método de planimetría computarizada. En ambos métodos se determinó el APCB para tres posiciones corporales distintas:

- Posición sobre el manubrio del manillar (PMM): posición de torso erguido, con las manos colocadas cerca de la potencia del manillar (Figura 15A).
- Posición de palancas de freno (PPF): posición de torso parcialmente inclinado, con las manos colocadas sobre las palancas de freno (Figura 15B).
- Posición sobre caída de manillar (PCM): posición de torso parcialmente inclinado, con las manos colocadas en la caída (parte inferior) del manillar y los codos totalmente extendidos (Figura 15C).

### ***Método de predicción a través de fórmulas no-logarítmicas***

La FPN del APCB para cada una de las posiciones corporales fue realizada con las siguientes fórmulas (Heil, 2002), utilizando el valor de MC obtenido en la valoración antropométrica:

- Fórmula 1:  $APCB_{PMM} = 0.04038 \times MC^{0.594}$
- Fórmula 2:  $APCB_{PPF} = 0.04324 \times MC^{0.594}$
- Fórmula 3:  $APCB_{PCM} = 0.04091 \times MC^{0.594}$

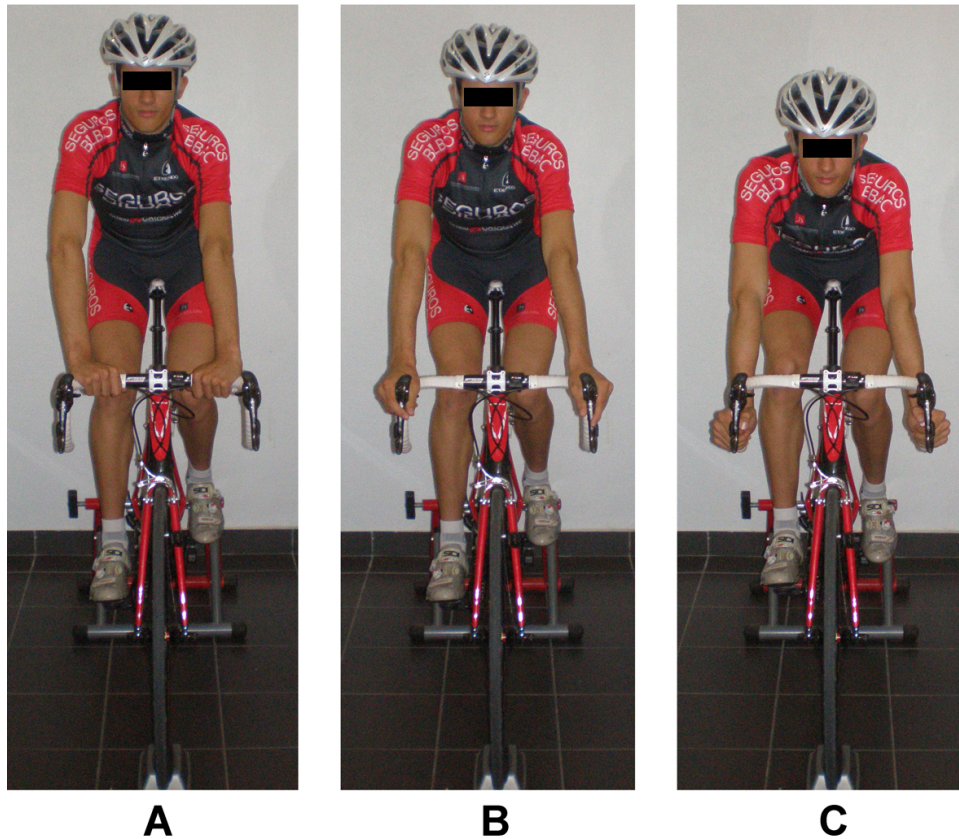
### ***Método de medición a través de planimetría computarizada***

La PC consistió en fotografiar a los ciclistas desde el plano frontal sobre sus bicicletas y tratar las imágenes obtenidas para calcular el APCB.

Se pidió a los participantes acudir con su indumentaria habitual de competición (maillot de ciclismo ceñido y pantalones cortos de ciclismo con tirantes), incluida su bicicleta (BH G5). Las bicicletas se nivelaron con el nivelador digital PosiMotion™.

Se fotografió a los participantes sobre sus bicicletas, que estaban colocadas sobre un rodillo estacionario para interiores, mientras estos miraban a la cámara manteniendo las posiciones de sus piernas y pies (Figura 15): adelantaron su pie derecho con la biela paralela al suelo (la biela a 90°, en que el centro exacto superior es de 0°), y el pie izquierdo por detrás (la biela a 270°). La posición de la cámara de fotos (Casio Exilim F1) fue similar a la posición utilizada por Heil (2002): se colocó a 5 metros por delante de los participantes y a 1,1 metros por encima del suelo. Se tomaron cuatro fotografías de cada participante. En la primera fotografía cada ciclista sujetaba una estructura de calibración cuadrada de superficie conocida (0.5246 m<sup>2</sup>), situada entre las caderas y los hombros, en un plano frontal. Las otras tres fotografías se tomaron con los ciclistas en la PMM, PPF y PCM (Figura 15 A, B y C, respectivamente).





**Figura 15: Ejemplos de fotografías de un ciclista en posiciones corporales diferentes.**

A=posición sobre el manubrio del manillar; B=posición por encima de las palancas de freno; C=posición en la caída del manillar.

Se utilizó el programa Adobe Photoshop CS® para perfilar el área de la estructura de calibración y el APCB de cada posición. Los componentes extrudidos consistieron en cualquier parte observable de la bicicleta, como por ejemplo los radios de las ruedas y el área entre las piernas y la bicicleta. No se incluyeron los frenos ni los cables del cambio de marchas (Heil, 2002). Para la extrusión se utilizó la herramienta del lazo magnético, con una anchura de 10 píxeles y un contraste de agudeza del 99%. Todos los píxeles de la estructura de calibración y del APCB se convirtieron a la paleta de colores 0,0,0 RGB y contaron con la paleta de visualización ampliada con histograma. El APCB (m<sup>2</sup>) de cada posición se obtuvo dividiendo el producto del área de la estructura de calibración y el número de píxeles del APCB de cada posición por el número de píxeles de la estructura de calibración.

### **Análisis estadístico**

Los análisis estadísticos fueron realizados con el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (SPSS Inc., Chicago, EUA, versión 15.0). Se utilizaron pruebas estadísticas descriptivas para presentar las características de base de los participantes, que se reportan como media y desviación estándar ( $\bar{x} \pm DE$ ). La prueba de Shapiro-Wilk sirvió para demostrar

la hipótesis nula de que la muestra procedía de una población con distribución normal; la igualdad de varianzas fue evaluada con la prueba inferencial de Levene. La comparación entre los métodos PC y FPN para la valoración del APCB fue realizada a través de pruebas-t para muestras emparejadas y la correlación entre los métodos fue evaluada utilizando el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). El análisis de la varianza (ANOVA) de medidas repetidas fue utilizado para examinar las diferencias entre el APCB en las tres posiciones corporales valorado con los métodos PC y FPN; las comparaciones *post hoc* fueron ajustadas para comparaciones múltiples con el método de Bonferroni. El nivel de significatividad estadística (valor  $P$ ) fue establecido en 95% ( $\alpha=0,05$ ).

## Resultados

El ASC predicho a través del método de Du Bois y Du Bois (1916) fue de  $1,86 \pm 0,08, m^2$  (rango de 1,70-2,04).

Los valores medios  $\pm$  desviación estándar ( $\bar{x} \pm DE$ ) para las tres posiciones (PMM, PPF y PCM) se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2: Área frontal proyectada del conjunto ciclista-bicicleta ( $m^2$ ), obtenida con el método de planimetría computarizada y con las fórmulas de predicción no logarítmicas de diferentes posiciones corporales.**

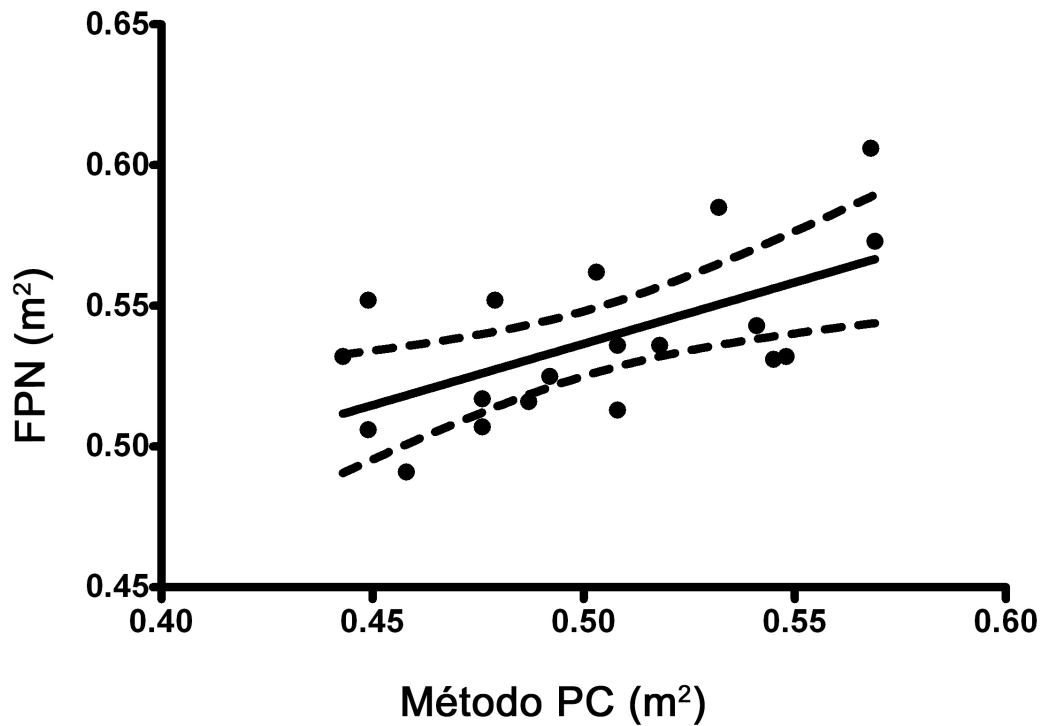
Posición corporal	PC	FPN
PMM	$0,493 \pm 0,039^c$	$0,496 \pm 0,028^f$
PPF	$0,502 \pm 0,039^a$	$0,537 \pm 0,029$
PCM	$0,481 \pm 0,039^{b,c,d}$	$0,507 \pm 0,024^f$

Los datos son  $\bar{x} \pm DE$ . PC=planimetría computarizada; FPN=fórmulas de predicción no logarítmicas; PMM=posición sobre el manubrio del manillar; PPF=posición por encima de las palancas de freno; PCM=posición sujetándose a la caída del manillar.

Diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0,05$ ) <sup>a</sup>=respecto a la PPF obtenida con la FPN; <sup>b</sup>=respecto a la PCM obtenida con la FPN; <sup>c</sup>=respecto a la PPF obtenida con la PC; <sup>d</sup>=respecto a la PMM obtenida con la PC; <sup>f</sup>=respecto a la PPF obtenida con la FPN.

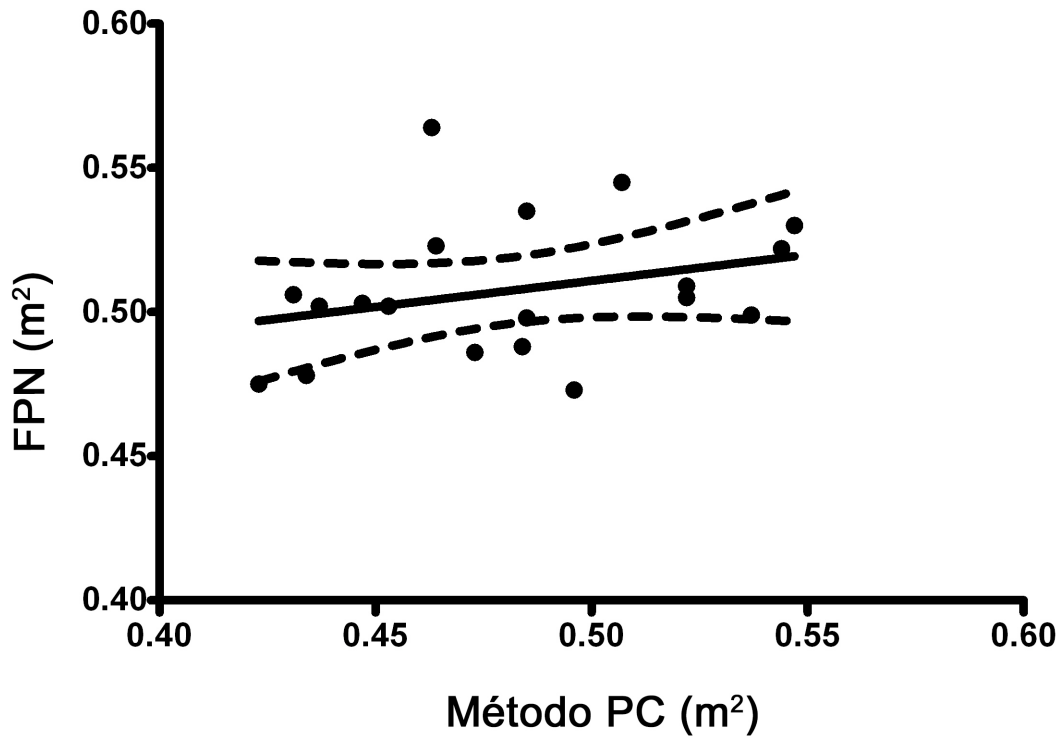
Los resultados demuestran que los valores de APCB calculados con las FPN en la PPF y en la PCM fueron significativamente superiores (6,9% y 5,1%, respectivamente;  $P < 0,05$ ) a la APCB medida con el método PC. Además, aunque la PMM mostró una correlación positiva entre el método FPN y el PC ( $r=0,60$ ;  $P < 0,05$ ) (Figura 16), la PCM no reflejó ninguna correlación entre los dos métodos ( $r=0,29$ ;  $P=0,21$ ) (Figura 17). Por otra parte, no se encontraron diferencias significativas en la posición sobre el manubrio del manillar entre los resultados obtenidos con el método PC y el de la FPN. Además, la PMM mostró una correlación positiva entre la FPN y el método PC ( $r=0,2$ ;  $P < 0,05$ ) (Figura 18).

En relación a la influencia de la posición corporal sobre el APGB, se encontraron diferencias significativas con el método PC, entre la PMM y la PCM (2,4%;  $P < 0,05$ ), y entre la PMM y la PPF (-1,8%;  $P < 0,05$ ). Por otra parte, aunque se obtuvieron diferencias significativas entre la PMM y la PPF (-7,64%;  $P < 0,05$ ) y entre la PPF y la PCM (5,9%;  $P < 0,05$ ), cuando se utilizó la FPN, no se encontraron diferencias significativas entre la PMM y la PCM. Se obtuvo el mayor APGB con el método PC y con el FPN en la PPF, y el menor APGB con el método PC en la PCM. Por el contrario, con el FPN, el APGB en la PCM y la PPF no mostró diferencias significativas, y por tanto no se pudo determinar cuál de estas dos posiciones reflejaba el valor menor.



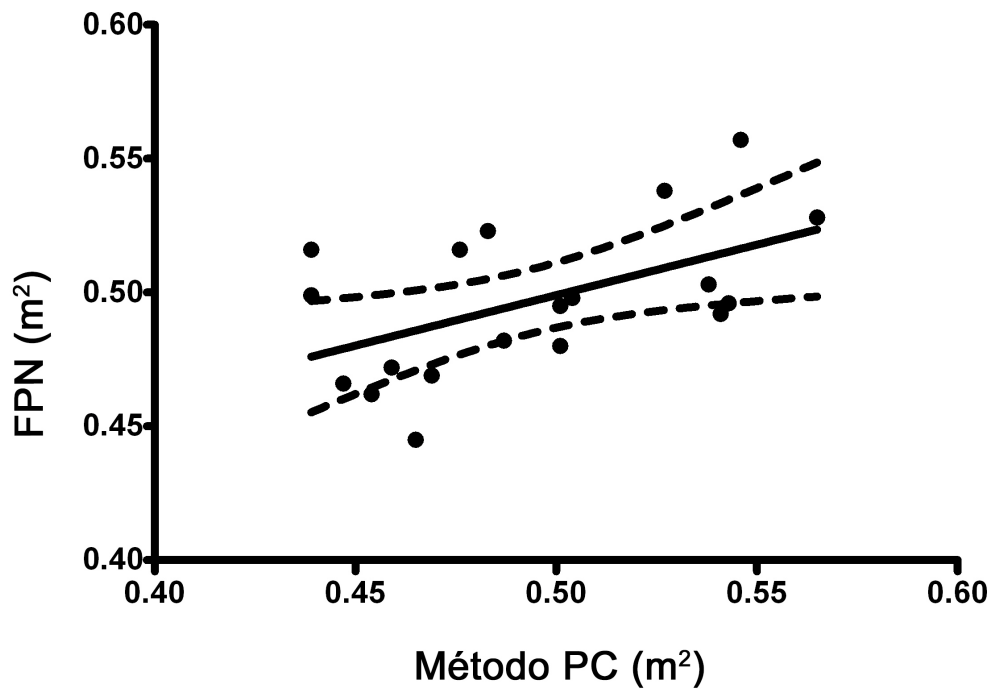
**Figura 16: Datos que ilustran la relación del APCB en la PPF entre los métodos FPN y PC.**

La regresión lineal se representa con una línea negra continua, con intervalos de confianza al  $\pm 95\%$  mediante líneas discontinuas. Hay una correlación positiva entre las dos variables ( $r=0,60$ ,  $P<0,05$ ). La fórmula que describe la relación es  $y=0,834 x+0,055$ ;  $r^2=0,363$ . APCB=área frontal de la combinación entre ciclista y bicicleta, PPF=posición por encima de las palancas de freno, FPN=fórmulas de predicción no logarítmicas, PC=planimetría computarizada.



**Figura 17: Datos que ilustran la relación del APCB, en la PCM, entre los métodos FPN y PC.**

La regresión lineal está representada por una línea negra continua, con intervalos de confianza al  $\pm 95\%$  mediante líneas discontinuas. No hay correlación entre las dos variables ( $r=0,29$ ,  $P<0,21$ ). La fórmula que describe la relación es  $y=0,448x+0,234$ ;  $r^2=0,088$ . APCB=área frontal de la combinación entre el ciclista y la bicicleta, PCM=posición sujetándose a la caída del manillar, FPN=fórmulas de predicción no logarítmicas, PC=planimetría computarizada.



**Figura 18: Datos que ilustran la relación del APCB, en la PMM, entre el método FPN y el PC.**

La regresión lineal se representa con una línea negra continua, con intervalos de confianza al  $\pm 95\%$  mediante líneas discontinuas. Hay una correlación positiva entre las dos variables ( $r=0,52$ ,  $P<0,05$ ). La fórmula que describe la relación es  $y=0,743x+0,2124$ ;  $r^2=0,28$ . APCB=área frontal de la combinación entre el ciclista y la bicicleta, PMM=posición sobre el manubrio del manillar, FPN=fórmulas de predicción no logarítmicas, PC=planimetría computarizada.

## Discusión

El cálculo del APCB con la FPN es una técnica sencilla y que permite ahorrar tiempo, ya que solo se necesita la MC (Heil, 2002) de los participantes. Por el contrario, el método PC requiere mucho tiempo y es más complicado para hallar el APCB: debe tomarse una fotografía del ciclista sobre la bicicleta y el APCB debe obtenerse con un programa digital de imágenes. No obstante, la FPN podría no ser un método adecuado para predecir el APCB cuando se utilizan bicicletas estandarizadas, ya que se emplearon otras con geometría diferente para calcular la FPN (Heil, 2002).

Por lo que sabemos, el presente estudio es el primero que compara el cálculo obtenido del APCB, mediante la FPN, con el APCB obtenida con el método PC utilizando bicicletas con la misma geometría en la posición corporal normalmente adoptada en las competiciones con salida en grupo: la PMM se suele utilizar cuando se sujeta sobre los manillares cuesta arriba, la PPF cuando se corre en terreno llano, y la PCM se suele adoptar a velocidades elevadas para minimizar la resistencia aerodinámica (Grappe *et al.*, 1997).

Dadas las diferencias en la geometría de la bicicleta en el estudio de Heil, concretamente en el ángulo del tubo del sillín, se podría haber sesgado la MC resultante, exponente de una FPN más próxima a 0 (Heil, 2002), esperándose una menor APCB que la obtenida con el método PC. Así mismo, también se observó una correlación positiva del APCB en la PPF, entre los métodos FPN y PC (Figura 16), sugiriendo que las mayores áreas frontales obtenidas con el método FPN estaban relacionadas con mayores áreas frontales obtenidas con el método PC. La diferencia significativa entre la FPN y la PC (Tabla 2) del APCB en esta posición, indica que la FPN no se debería utilizar para calcular el APCB en la PPF, cuando se usan bicicletas con la misma geometría. Además, la ausencia de correlación del APCB en la PCM entre ambos métodos (Figura 17) y las diferencias significativas entre ellas (Tabla 2) sugiere que la FPN tampoco podría utilizarse para obtener el APCB en la PCM.

Aunque la inclusión del participante de mayor (95,7 kg) y menor (62,7 kg) masa corporal tendía a incrementar el exponente de MC, Heil señaló que la diferencia entre los resultados de la FPN final y el análisis sin valores atípicos no fue suficiente para garantizar la exclusión de estos sujetos (Heil, 2002). Sin embargo, los resultados presentados demuestran que el aumento del exponente MC puede haber tenido alguna influencia en la sobrestimación del APCB en la PPF y en la PCM.

Las diferencias de altura de los participantes entre el estudio de Heil y el presente ( $182 \pm 5,1$  cm frente a  $177 \pm 6,4$  cm, respectivamente) no han influido en los resultados, ya que la altura no contribuye significativamente a la predicción del APCB con la posición corporal y la MC incluidas en la FPN (Heil, 2002).

A pesar de las diferencias significativas del APCB en la PPF y la PCM, el APCB calculado con la FPN en la PMM fue similar al APCB obtenida con el método PC (Tabla 2). Además, se encontró una correlación significativa entre ambos métodos en esta posición (Figura 18). Estos resultados indican que la FPN, que es una técnica más sencilla y más rápida que el método PC, podría utilizarse para obtener el APCB con bicicletas de la misma geometría, en la PMM.

Debido a las diferencias significativas en la PPF y la PCM entre ambos métodos, no puede concluirse si los valores de APCB para la PMM, similares en ambos métodos, se deben al azar o a la idoneidad del uso de la FPN en esta posición corporal para calcular el APCB. Se requieren estudios futuros para tratar este tema.

El valor de APCB con el método PC en la PMM es menor que el valor obtenido por Debraux *et al.* (2009) ( $0,533 \text{ m}^2$  vs.  $0,493 \text{ m}^2$ ). Neumann (1992) y Olive (1996) informaron sobre valores superiores a los obtenidos con el método PC en la PPF ( $0,6 \text{ m}^2$  y  $0,605 \text{ m}^2$ , respectivamente, vs.  $0,502 \text{ m}^2$ ). Las diferencias en la geometría de la bicicleta, en la postura corporal dentro de cada posición corporal y/o en el método de cálculo del APCB, pueden haber influido en el APCB superior obtenido en otros estudios.

En cuanto a la influencia de la posición corporal sobre el APCB, se ha observado que, tanto con el método FPN como con el PC, se obtuvo la medida superior de APCB en la PPF (Tabla 2): la distancia mayor entre las manos en la PPF en comparación con la PMM, y el incremento del ángulo del tronco en comparación con la PCM, han influido en el mayor APCB en la PPF. Los resultados del método PC muestran que en la PCM, el APCB fue significativamente menor que en la PMM (Tabla 2). El ángulo del tronco, cuando las manos se colocaban sobre la parte inferior de los manillares, se reducía, lo que contribuía a que la cabeza y los hombros estuvieran más bajos, lo cual reduce el APCB.

No obstante, con la FPN no hubo diferencias significativas entre la PCM y la PMM (Tabla 2). Se esperaba un APCB menor en la PCM, ya que es la posición que los corredores adoptan a altas velocidades para reducir el área de arrastre, lo que disminuye su APCB (Gross *et al.*, 1983). Aunque se establezca una FPN específica para cada una de las posiciones corporales (Heil, 2002), la ausencia de diferencias significativas entre la PCM y la PMM estimadas puede explicarse por el hecho de que el método FPN no es suficientemente preciso para valor las diferencias en el APCB que se observan con el método PC.

## Conclusiones

La sobrestimación del APCB en la FPN y en la PCM con la FPN indica que esta técnica podría no utilizarse para predecir la APCB en estas dos posiciones corporales. Por el contrario, los resultados similares del APCB en la PMM, obtenida con los métodos FPN y PC, y la correlación



positiva entre ellas, implica que la FPN podría utilizarse para obtener con precisión el APCB en esta posición corporal.

En cuanto a las diferencias entre las posiciones corporales, se descubrió que se obtuvo el más alto APCB con ambos métodos en la PPF, y el menor APCB con el método PC en la PCM. No obstante, la ausencia de diferencias significativas en el APCB, entre la PCM y la PMM, obtenidas con la FPN, indica que este método no es suficientemente sensible para apreciar las diferencias en el APCB que se observan con el método PC.



# Capítulo 6.

## Etapa 2

*Influencia de la técnica de pedaleo en la eficiencia metabólica de ciclistas de élite*



## **Influencia de la técnica de pedaleo en la eficiencia metabólica de ciclistas de élite.**

### **Introducción**

En el ciclismo de resistencia, la eficiencia metabólica se suele expresar como eficiencia bruta (GE) (Sassi *et al.*, 2008), y se considera un factor clave para mejorar el rendimiento (Ettema y Loras, 2009; Hopker, Passfield, *et al.*, 2009; Korff *et al.*, 2007; Passfield y Doust, 2000). La GE está determinada por la proporción de cuánto trabajo mecánico se genera, en comparación con la energía metabólica absoluta empleada (Sassi *et al.*, 2008; Zameziati *et al.*, 2006); por tanto, las mejoras en la GE de un ciclista conllevan un aumento de la potencia mecánica producida para un coste metabólico específico (Moseley *et al.*, 2004). Investigaciones anteriores hallaron que varios factores pueden influir en la GE. Entre estos factores, las fibras musculares tipo I han demostrado generar una potencia muscular mayor que las fibras tipo II, al mismo nivel de consumo de oxígeno en estado estable. A consecuencia de esto, los ciclistas con un mayor porcentaje de fibras musculares tipo I cuentan con más resistencia a la fatiga y exhiben una GE mayor durante el ciclismo de resistencia (Horowitz *et al.*, 1994). Investigaciones anteriores también indican que tanto la intensidad como el volumen de entrenamiento pueden mejorar la GE. De acuerdo con Hopker, Passfield, *et al.* (2009), la GE mejoró después de seis semanas de entrenamiento de alta intensidad específico para el deporte. Otros estudios observaron mejoras similares en la GE después de un entrenamiento de alto volumen a largo plazo, lo que dio como resultado una mejor capacidad oxidativa de las fibras musculares (Coyle, 2005; Coyle *et al.*, 1992).

Otro factor que puede estar asociado con las mejoras en la GE de un ciclista es la técnica de pedaleo. La técnica de pedaleo se suele caracterizar biomecánicamente (desde el punto de vista cinético) determinando la uniformidad de la distribución del torque (DT), el torque medio ( $T_{\text{medio}}$ ), el torque máximo ( $T_{\text{máximo}}$ ), el torque mínimo ( $T_{\text{mínimo}}$ ), la cadencia, y la longitud de las bielas (Coyle *et al.*, 1991; Duncan *et al.*, 1997; Korff *et al.*, 2007; McDaniel *et al.*, 2002; Zameziati *et al.*, 2006). Además del torque, midiendo la fuerza efectiva de cada biela, también se puede calcular el impulso positivo y negativo (García-López *et al.*, 2016). Varios estudios han investigado la relación entre los parámetros que caracterizan la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica (Arkesteijn *et al.*, 2013; Coyle *et al.*, 1991; Edwards *et al.*, 2009; Ferrer-Roca *et al.*, 2017; Hopker *et al.*, 2010; Korff *et al.*, 2007; Leirdal y Ettema, 2011b; McDaniel *et al.*, 2002; Theurel *et al.*, 2012; Zameziati *et al.*, 2006). Puesto que la eficiencia metabólica ha demostrado cambiar al elevar la intensidad del ejercicio (Chavarren y Calbet, 1999; Coast y Welch, 1985; Gaesser y Brooks, 1975; Lucía *et al.*, 2001b; McDaniel *et al.*, 2002; Zameziati *et al.*, 2006), la relación entre la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica puede variar con requerimientos mayores de potencia.

La concentración de lactato en sangre se utiliza para comparar los valores de producción de energía, a la vez que se toman en cuenta las diferencias fisiológicas inter-individuales (Padilla, Mujika, Orbananos, *et al.*, 2000). Además, estudios previos han demostrado que la generación de potencia a un umbral de lactato determinado (LT) y el inicio de acumulación de lactato (OBLA) predicen bien el rendimiento del ciclista tanto en pruebas contrarreloj como en competiciones de salida en pelotón (Padilla, Mujika, Orbananos, *et al.*, 2000). Por tanto, las investigaciones sobre la relación entre la técnica de pedaleo y la GE, durante pruebas de laboratorio progresivas, a intensidades de ejercicio determinadas por el LT y el OBLA, deberían tener en cuenta las diferencias fisiológicas inter-individuales. El propósito de este estudio fue investigar la relación entre los marcadores de la técnica de pedaleo (DT,  $T_{\text{medio}}$ ,  $T_{\text{máximo}}$ ,  $T_{\text{mínimo}}$  y cadencia) y la GE a intensidades submáximas, teniendo en cuenta las diferencias fisiológicas inter-individuales.

## **Materiales y métodos**

### **Participantes**

Doce ciclistas de élite se ofrecieron voluntarios para este estudio. La  $\bar{x} \pm DE$  de las características seleccionadas de los ciclistas fueron las siguientes: edad=19,9±1,2 años; altura=176,7±4,8 cm; MC=67,51±5,62 kg; sumatorio de seis pliegues cutáneos=42,4±3,9 mm (subescapular, tríceps braquial, supraespinoso, abdominal, parte frontal del muslo y parte media del gastrocnemio medial); frecuencia cardíaca máxima ( $FC_{\text{max}}$ )=187±6 latidos·min<sup>-1</sup>; concentración máxima de lactato ( $[La]_{\text{max}}$ )=8,94±1,50 mmol·L<sup>-1</sup>; y consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2\text{max}}$ )=75,7±6,2 mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>. Antes de su implicación en el estudio, todos los ciclistas aportaron su consentimiento por escrito, siguiendo los postulados de la Declaración de Helsinki. El estudio concuerda con los estándares médicos descritos por Harriss y Atkinson (2009).

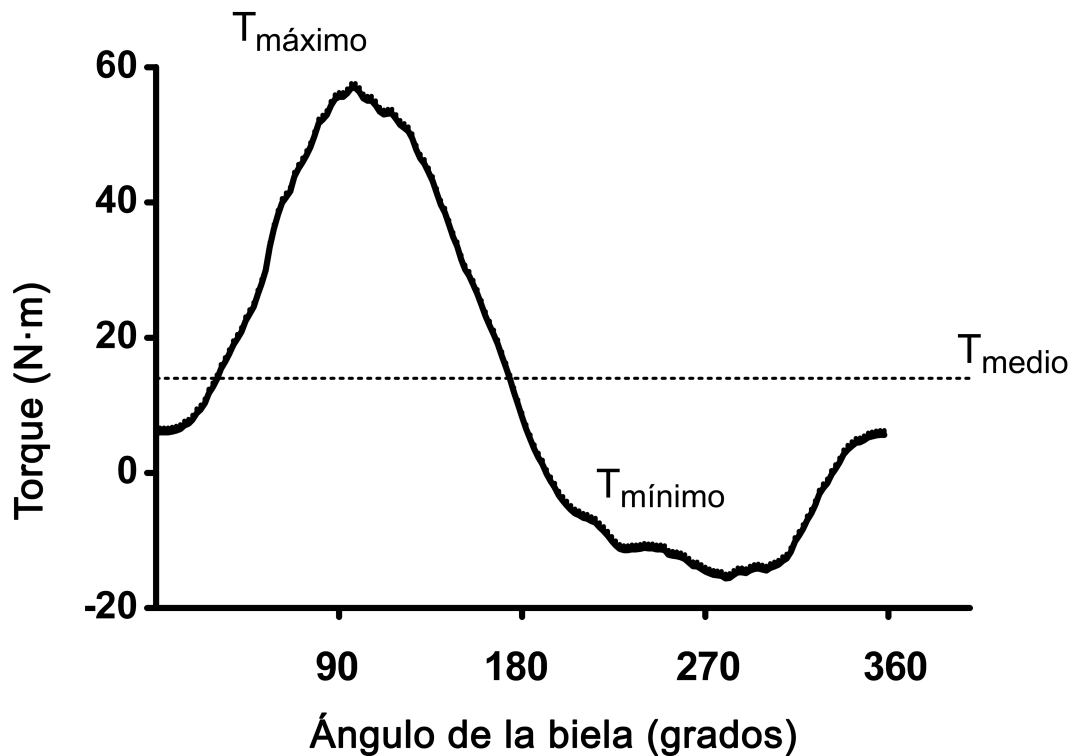
### **Valoración biomecánica: Valoración del torque**

Durante la prueba de esfuerzo cardiopulmonar cuyo protocolo se detalla más adelante, que se realizó en la 2ª visita (correspondiente a la *Etapa 2*), se midieron las FE derecha e izquierda, utilizando las bielas instrumentadas del ergómetro Lode Excalibur Sport (LODE, Groningen, Países Bajos, software Lode v.5.1.5).

El T que actúa de forma perpendicular a la biela se registró a cada 2º. El  $T_{\text{medio}}$  (la media de los T propulsor y retardatriz), el  $T_{\text{máximo}}$  (la media de los T propulsores más altos durante la fase de movimiento ascendente) y el  $T_{\text{mínimo}}$  (la media de los T retardatrices más altos durante la fase de movimiento ascendente, principalmente causadas por el peso de la extremidad que se desplaza hacia arriba) fueron promediadas a partir de los dos pies (Figura 19). También se registró la cadencia. Estos parámetros se midieron durante diez revoluciones, en el

penúltimo minuto de cada generación de potencia (Korff *et al.*, 2007). La uniformidad de distribución del torque (DT) se calculó mediante la siguiente fórmula (Korff *et al.*, 2007):  $DT =$

$$\frac{T_{media}}{T_{máxima}} \cdot 100$$



**Figura 19: Datos del torque de un participante y del ciclo de una biela.**

$T_{medio}$ =media de los torques propulsor y retardatriz;  $T_{máximo}$ =media del mayor torque propulsor;  $T_{mínimo}$ =media del mayor torque retardatriz.

### Valoración fisiológica

#### **Prueba de esfuerzo cardiopulmonar**

La prueba de esfuerzo cardiopulmonar, se llevó a cabo en el laboratorio de Análisis del Rendimiento Deportivo del Departamento de Educación Física y Deportiva, en la Facultad de Educación y Deporte (UPV/EHU), donde se controlaron las condiciones de temperatura, humedad y presión atmosférica (19-23°C, 40-50% y 706-710mm Hg, respectivamente; estación meteorológica Sibelmed 511-570-003, Roselló, Barcelona, España). Se utilizaron ventiladores eléctricos para refrescar el ambiente durante las pruebas.

Los ciclistas estaban familiarizados con la prueba de laboratorio. Se les indicó que se abstuvieran de cualquier ejercicio agotador durante las 24 horas inmediatamente anteriores

a la prueba, y siguieron dietas estandarizadas (ningún consumo de comida en las tres horas previas a la prueba); se les permitió tomar el agua "ad libitum" antes de la prueba.

La prueba de esfuerzo cardiopulmonar máxima limitada por síntomas se realizó en el cicloergómetro LODE Excalibur Sport (LODE, Groningen, Países Bajos, software Lode v.5.1.5). El cicloergómetro fue calibrado para intensidades diarias de 100-1000 W, y se calibró de nuevo antes de cada prueba.

El procedimiento comenzó con el ajuste de la bicicleta a la talla de cada participante (altura y retroceso del sillín, altura y magnitud del manillar, sujeciones de los pedales y longitud del juego de las bielas). La altura y la magnitud del manillar se adaptaron para permitir una posición cómoda, simulando la posición en la que corrían los ciclistas. La longitud de biela fue la misma para todos los participantes (170 mm de longitud). Para la prueba de esfuerzo cardiopulmonar realizada en la 2ª visita, los pedales se adaptaron a las sujeciones tipo cala (Look Keo Carbon, EUA). Se registró cada configuración para asegurar condiciones similares en cada réplica de la prueba de esfuerzo cardiopulmonar.

Tras el ajuste de la bicicleta se prepararon y/o colocaron el resto de instrumentos de medición:

- Pulsómetro para la medición de la frecuencia cardiaca (FC).
- Mascarilla con sistema para la medición de variables ventilatorias y de intercambio de gases respiración a respiración (monitor Jaeger Oxycon Delta System, Hoechberg, Alemania). La calibración de mezcla de gases con las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono se realizó antes de iniciar cada prueba de esfuerzo cardiopulmonar, de acuerdo con las pautas del fabricante.
- Analizador automático de concentración de lactato [La] en sangre (Lactate Pro™, Arkray Factory Inc, Shiga, Japón) que se calibró siguiendo las recomendaciones del fabricante, antes de las pruebas.

Tras explicar el funcionamiento de la prueba se inició la prueba de esfuerzo cardiopulmonar. No hubo calentamiento previo. La prueba de esfuerzo cardiopulmonar consistió en un protocolo con resistencia inicial de 100 W que incrementaba un total de 35 W de forma progresiva, cada cinco minutos (Tabla 3). A los participantes se les pidió que mantuvieran constante la cadencia, a su cadencia (ritmo) preferida, basándose en la retroalimentación visual indicada en pantalla. Las personas técnicas del laboratorio y entrenadores animaron de forma verbal a los deportistas durante la prueba.



**Tabla 3: Características del protocolo progresivo de la prueba de esfuerzo cardiopulmonar sobre cicloergómetro**

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Potencia (W)</b>
<i>Etapa 2 2.<sup>a</sup> visita</i>	<i>Etapas 3,4 Visitas 3.<sup>a</sup>-6.<sup>a</sup></i>	
0-5	0-3	100
5-10	3-6	135
10-15	6-9	170
15-20	9-12	205
20-25	12-15	240
25-30	15-18	275
30-35	18-21	310
35-40	21-24	345
40-45	24-27	380
45-50	27-30	415
...	30-33	450
	33-36	485
	...	...

Tiempo en minutos; potencia en vatios.

Se registraron variables en reposo, submáximas, máximas y de recuperación para valorar la respuesta en las variables cardiorrespiratorias y hemodinámicas: FC, variables ventilatorias, [La], potencia y cadencia. La prueba continuó hasta el agotamiento.

### **Valoración de intensidad**

La intensidad máxima ( $W_{max}$ ) se registró de acuerdo con la medida de potencia más elevada que el ciclista podía mantener durante un período de tres minutos. Cuando la última carga de potencia no podía completarse durante tres minutos, la  $W_{max}$  se calculó como  $W_{max} = W_f + [(t \div 180) \times 35]$  (Kuipers *et al.*, 1985), donde  $W_f$  era la última intensidad completada (en vatios),  $t$  era el tiempo durante el que se mantenía la última intensidad no completada (en segundos), y 35 era la diferencia en la generación de potencia entre las dos últimas intensidades.

### **Valoración de variables ventilatorias**

El  $\text{VO}_{2\text{max}}$  se definió como la media de los cuatro valores de 30-s de  $\text{VO}_2$  consecutivos más altos, obtenidos hacia el final de la prueba. Para asumir el logro del  $\text{VO}_{2\text{max}}$  se tuvo en cuenta el cumplimiento de al menos dos de los siguientes criterios (Duncan *et al.*, 1997):

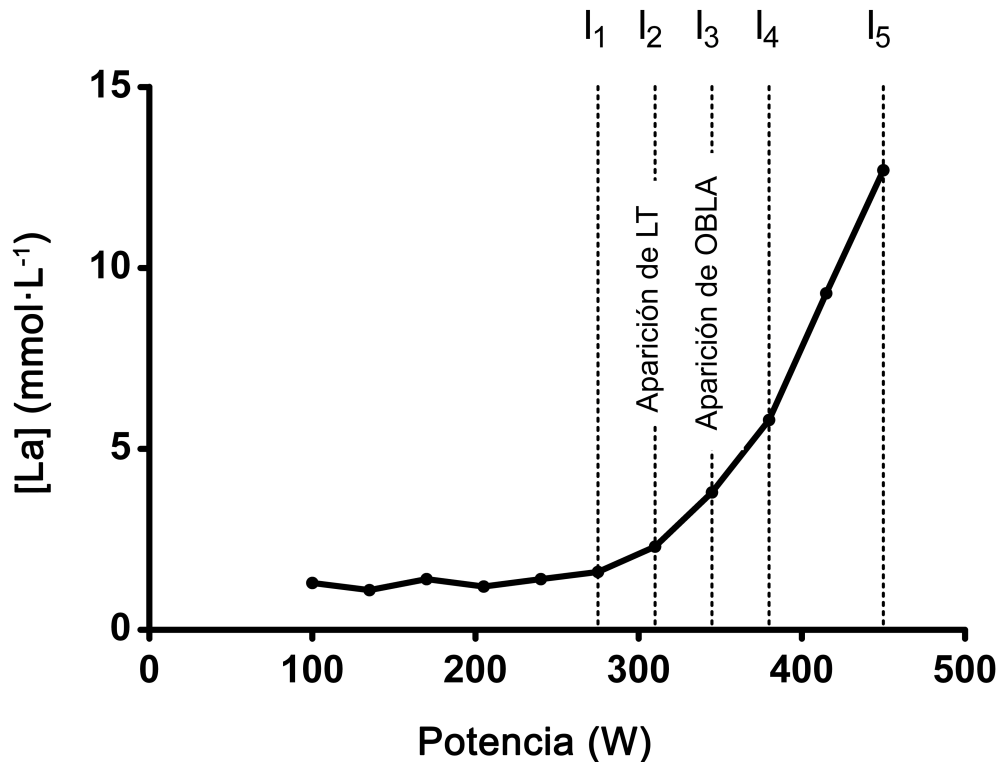
- meseta en el  $\text{VO}_{2\text{max}}$  ( $<2,0 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ) con incremento de la potencia.
- tasa de intercambio respiratorio (RER) por encima de 1,10 (producción de dióxido de carbono dividido entre consumo de oxígeno,  $\text{VCO}_2\cdot\text{VO}_2^{-1}$ ).
- frecuencia cardíaca dentro del intervalo de  $\pm 10 \text{ latidos}\cdot\text{min}^{-1}$ , de la FC máxima predicha para la edad ( $220\text{-edad}$ ).

### **Valoración de concentración de lactato en sangre**

Se tomaron muestras de sangre capilar inmediatamente después de la consecución de cada intensidad (i.e. cada incremento de potencia; cada cinco minutos, dependiendo de la *etapa* de investigación), a fin de determinar la [La]. Las extracciones de muestras de sangre capilar se realizaron en el lóbulo de la oreja izquierda, evitando cualquier contacto con el lóbulo para evitar el sudor.

El LT fue identificado a través de curvas de generación de potencia individuales, definido como la intensidad en que la [La] aumentaba  $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  por encima de los valores de lactato promedio iniciales (Coyle *et al.*, 1991), cuando la intensidad del ejercicio alcanzaba el 40-60% del  $W_{\text{max}}$  (Hagberg y Coyle, 1983). La intensidad del ejercicio correspondiente al OBLA fue identificada en la curva de generación de potencia [La], mediante la interpolación con una línea recta entre los dos puntos más cercanos, cuando la generación de potencia producía una [La] de  $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Sjödín y Jacobs, 1981). Las intensidades al LT ( $W_{\text{LT}}$ ) y OBLA ( $W_{\text{OBLA}}$ ) también se determinaron mediante interpolación de líneas rectas (Padilla *et al.*, 2008).

La prueba progresiva de laboratorio se dividió en tres intensidades diferentes de acuerdo con las generaciones de potencia en las que se producían el LT y el OBLA: la producción de potencia inmediatamente inferior a la intensidad a la que aparecía el LT ( $I_1$ ), la producción de potencia a la que aparecía el LT ( $I_2$ ) y la producción de potencia a la que aparecía el OBLA ( $I_3$ ) (Figura 20).



**Figura 20: Intensidades de ejercicio de acuerdo con las generaciones de potencia en la que aparecían el LT y el OBLA.**

[La]=concentración de lactato en sangre; LT=umbral de lactato; OBLA=inicio de acumulación de lactato en sangre; I<sub>1</sub>=generación de potencia por debajo de la intensidad a la que aparecía el LT; I<sub>2</sub>=generación de potencia a la que se producía el LT; I<sub>3</sub>=generación de potencia a la que aparecía el OBLA.

### Valoración de la eficiencia bruta

La eficiencia bruta (GE) de cada ciclista fue calculada según describieron Gaesser y Brooks (1975) como la proporción entre el trabajo logrado o potencia generada (i.e. vatios convertidos a kcal·min<sup>-1</sup>) y la energía consumida (kcal·min<sup>-1</sup>) x 100 (Coyle *et al.*, 1992; Hopker, Coleman, *et al.*, 2009), donde el consumo de energía (i.e. kcal·min<sup>-1</sup>) fue calculado como la equivalencia calórica del VO<sub>2</sub> y RER en estado estable, utilizando las tablas de Lusk (1928):  $GE = \frac{\text{Potencia generada (kcal}\cdot\text{min}^{-1})}{\text{Energía consumida (kcal}\cdot\text{min}^{-1})} \times 100$ . Para determinar la GE y medir la eficiencia con precisión solo se tuvieron en cuenta los datos de variables ventilatorias registradas en condiciones de ejercicio en estado estable (i.e. por debajo de LT, intensidades entre 135 y 275 W en el presente estudio); la GE se promedió durante los últimos 60 segundos de I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> e I<sub>3</sub> para asegurar que el VO<sub>2</sub> había alcanzado un estado estable, a intensidades en las que el RER fue inferior a 1.

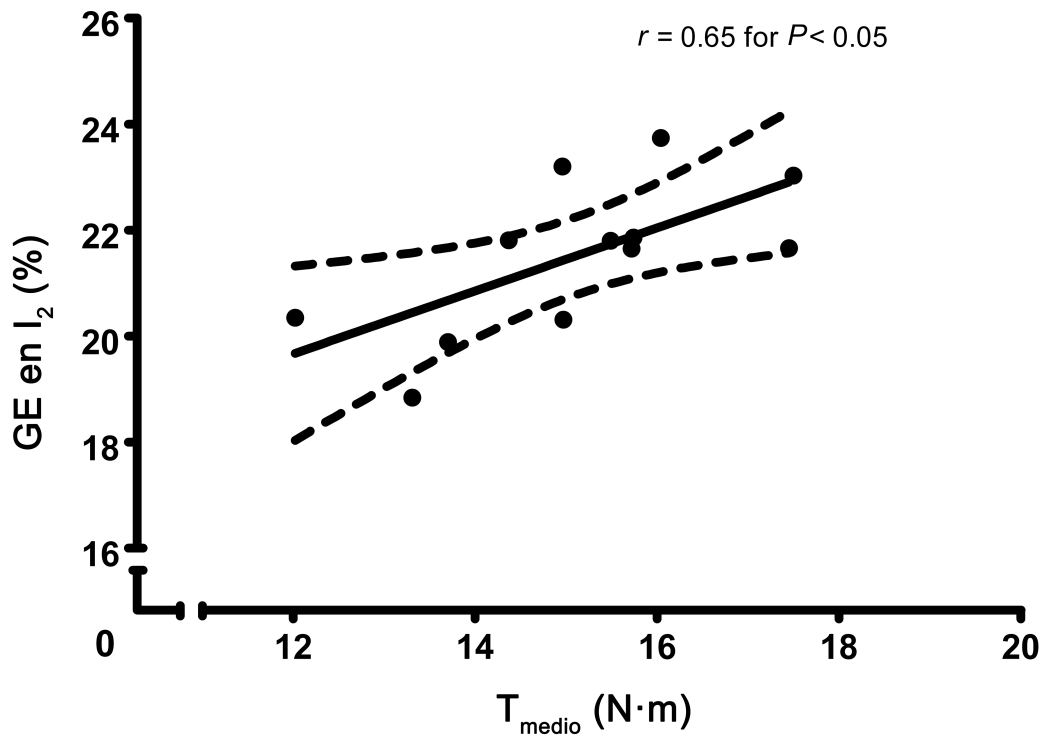
### **Análisis estadístico**

Los análisis estadísticos fueron realizados con el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (SPSS Inc., Chicago, EUA, versión 15.0). Se utilizaron pruebas estadísticas descriptivas para presentar las características de base de los participantes, que se reportan como media y desviación estándar ( $\bar{x} \pm DE$ ). La prueba de Shapiro-Wilk sirvió para demostrar la hipótesis nula de que la muestra procedía de una población con distribución normal; la igualdad de varianzas fue evaluada con la prueba inferencial de Levene. Las diferencias en los cambios de  $T_{\text{medio}}$ ,  $T_{\text{máximo}}$ ,  $T_{\text{mínimo}}$ , DT y cadencia fueron examinadas, para cada intensidad, con el ANOVA de medidas repetidas; cuando se obtuvieron diferencias significativas, las comparaciones *post hoc* fueron ajustadas para comparaciones múltiples con el método de Bonferroni. Para comprobar la hipótesis nula de que la matriz de covarianza del error de las variables dependientes ortonormalizadas era proporcional a una matriz de identidad, se efectuó la prueba de esfericidad de Mauchly. La correlación entre la GE y los parámetros que describían la técnica de pedaleo fue analizada a través del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). El nivel de significatividad estadística (valor  $P$ ) fue establecido en 95% ( $\alpha=0,05$ ).

### **Resultados**

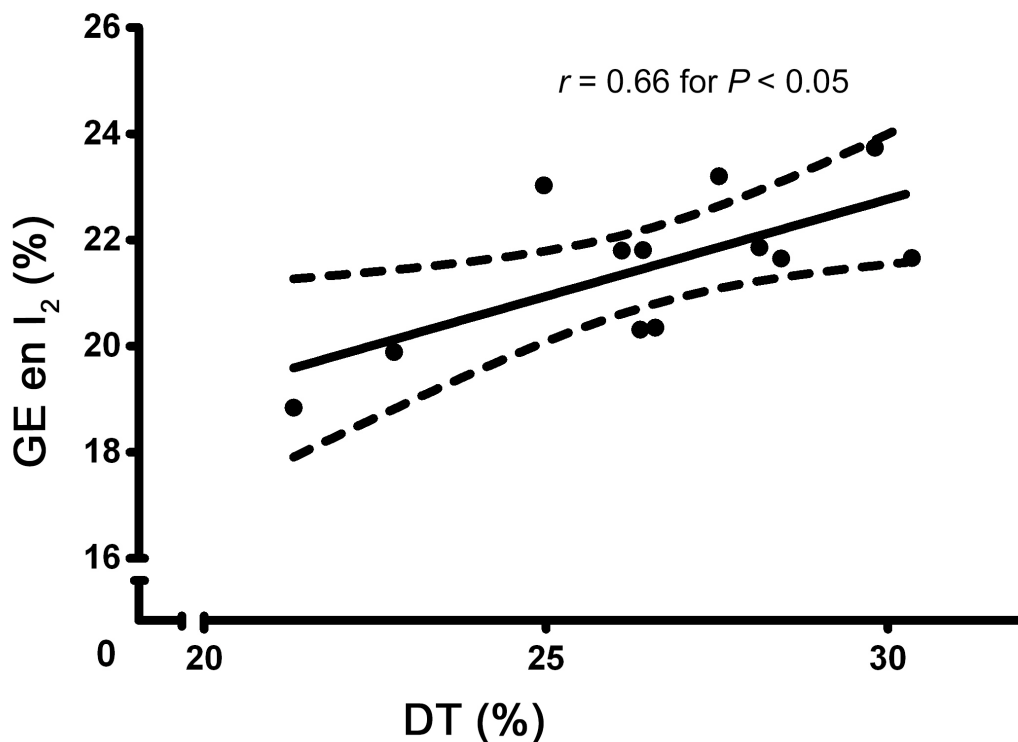
Todos los parámetros reflejaron igualdad en las varianzas ( $P > 0,07$ ) y todos los datos se distribuyeron normalmente: el valor menor de  $P$  se obtuvo en la intensidad de  $I_1$  ( $W=0,920$ ,  $P=0,06$ ). Todos los parámetros también cumplieron la condición de esfericidad ( $P > 0,06$ ). La GE ( $21,46 \pm 1,24\%$ ) en  $I_1$  ( $234 \pm 21$  W) no mostró una correlación significativa con ninguno de los parámetros que describían la técnica de pedaleo ( $T_{\text{medio}}$ :  $r=0,34$ ,  $P=0,27$ ;  $T_{\text{máximo}}$ :  $r=-0,03$ ,  $P=0,99$ ;  $T_{\text{mínimo}}$ :  $r=0,12$ ,  $P=0,69$ ; DT:  $r=0,39$ ,  $P=0,20$ ; y cadencia:  $r=-0,18$ ,  $P=0,57$ ).

En  $I_2$  ( $269 \pm 22$  W), la GE ( $21,51 \pm 1,44\%$ ) mostró una correlación positiva con el  $T_{\text{medio}}$  (Figura 21) y con la DT (Figura 22), pero no con el  $T_{\text{máximo}}$  ( $r=0,02$ ,  $P=0,95$ ), el  $T_{\text{mínimo}}$  ( $r=0,33$ ,  $P=0,29$ ) ni la cadencia ( $r=-0,34$ ,  $P=0,26$ ). En  $I_3$  ( $305 \pm 23$  W), la GE ( $21,56 \pm 1,61\%$ ) correlacionó positivamente con el  $T_{\text{medio}}$  (Figura 23) y negativamente con la cadencia (Figura 24). No se encontró correlación entre la GE y el resto de los parámetros que describen la técnica de pedaleo en  $I_3$  ( $T_{\text{máximo}}$ :  $r=0,35$ ,  $P=0,25$ ;  $T_{\text{mínimo}}$ :  $r=-0,03$ ,  $P=0,91$ ; y DT:  $r=0,28$ ,  $P=0,36$ ).



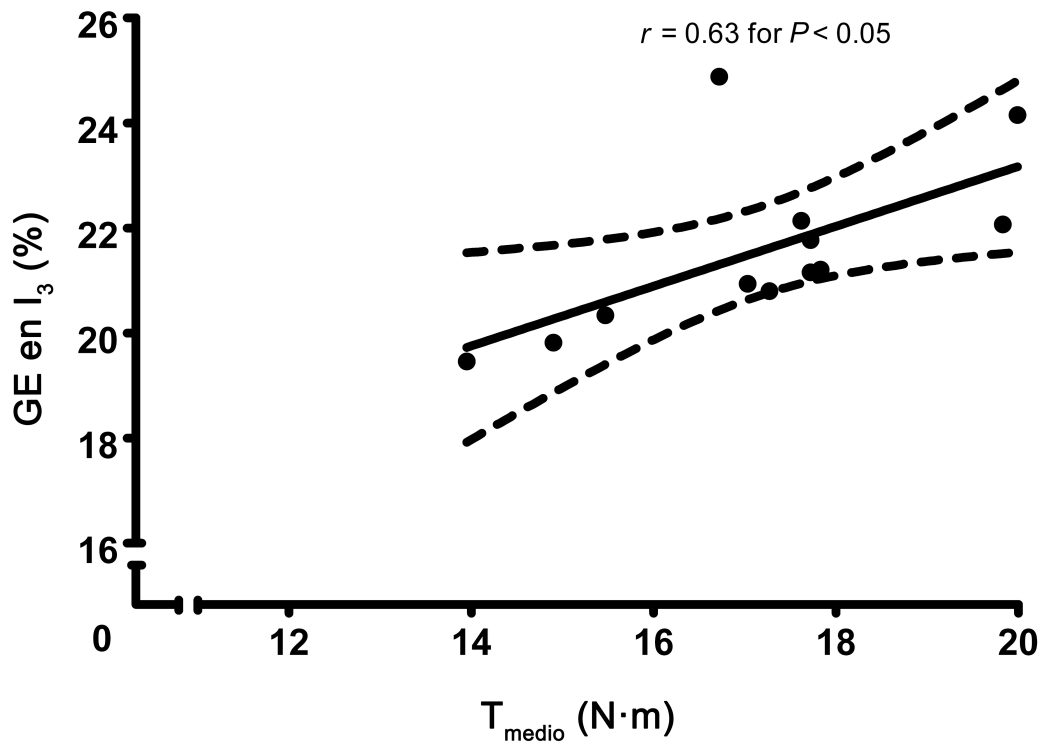
**Figura 21: Datos que ilustran la relación entre el  $T_{medio}$  y la GE a la intensidad en que se produjo el LT ( $I_2$ ).**

La regresión lineal está representada con una línea negra continua; el intervalo de confianza de  $\pm 95\%$  está representado por las líneas punteadas. Hay una correlación positiva entre las dos variables ( $r=0,65$ ,  $P<0,05$ ). La fórmula que describe la relación es  $y=0,594x+12,532$ ;  $r^2=0,434$ . LT=umbral de lactato;  $T_{medio}$ =media de las fuerzas de torque propulsor y retardatriz; GE=eficiencia bruta;  $I_2$ =generación de potencia a la que se produjo el LT.



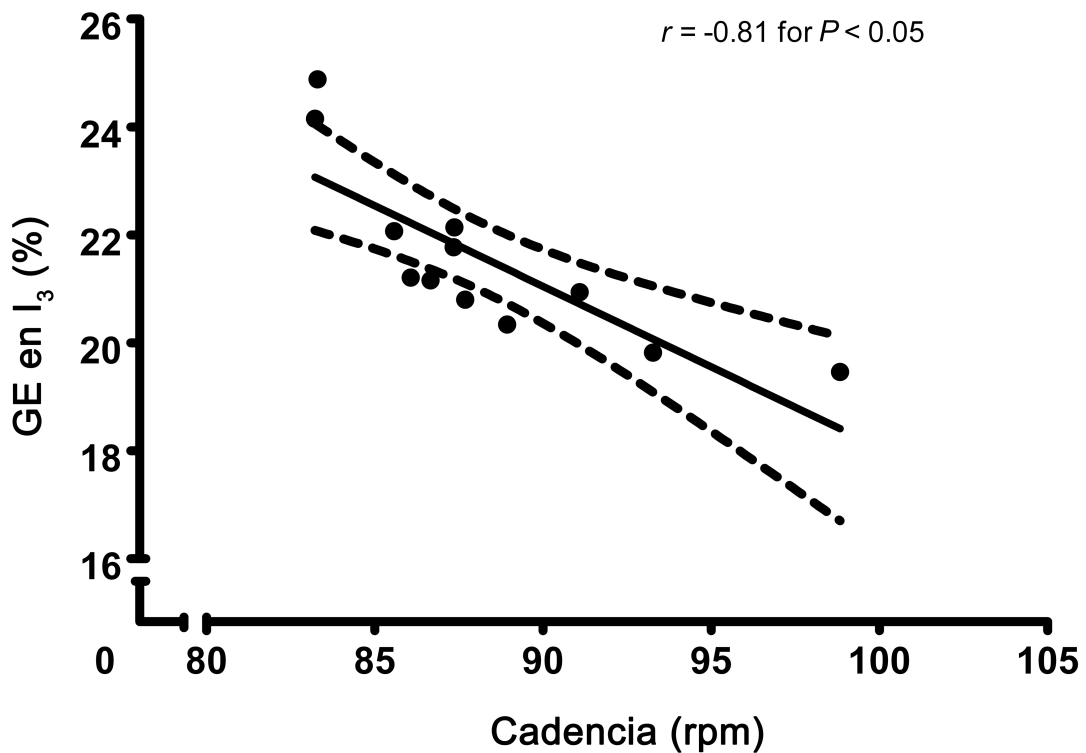
**Figura 22: Datos que ilustran la relación entre la DT y la GE a la intensidad del ejercicio en que apareció el LT (I<sub>2</sub>).**

La regresión lineal está representada por una línea negra continua, con intervalos de confianza al  $\pm 95\%$  mediante líneas discontinuas. Hay una correlación positiva entre las dos variables ( $r=0,66$ ,  $P<0,05$ ). La fórmula que describe la relación es  $y=0,366x+12,788$ ;  $r^2=0,445$ . DT=uniformidad de la distribución del torque; GE=eficiencia bruta; LT=umbral de lactato; I<sub>2</sub>=generación de potencia a la que apareció el LT.



**Figura 23:** Datos que ilustran la relación entre el  $T_{\text{medio}}$  y la GE a la intensidad del ejercicio en que apareció el OBLA ( $I_3$ ).

La regresión lineal está representada por una línea negra continua, con intervalos de confianza al  $\pm 95\%$  mediante líneas discontinuas. Hay una correlación positiva entre las dos variables ( $r=0,63$ ,  $P<0,05$ ). La fórmula que describe la relación es  $y=0,569x+11,781$ ;  $r^2=0,396$ .  $T_{\text{medio}}$ =media del torque propulsor y retardatriz; GE=eficiencia bruta; OBLA=inicio de acumulación de lactato en sangre;  $I_3$ =generación de potencia a la que apareció el OBLA.



**Figura 24: Datos que ilustran la relación entre la cadencia y la GE a la intensidad de ejercicio en la que apareció el OBLA (I<sub>3</sub>).**

La regresión lineal está representada con una línea negra continua, con intervalos de confianza al  $\pm 95\%$  mediante líneas discontinuas. Hay una correlación positiva entre las dos variables ( $r = -0,81$ ,  $P < 0,05$ ). La fórmula que describe la relación es  $y = -0,298x + 47,932$ ;  $r^2 = 0,661$ . GE=eficiencia bruta; OBLA=inicio de acumulación de lactato en sangre; I<sub>3</sub>=generación de potencia a la que aparece el OBLA.



## Discusión

En el presente estudio no se observó una correlación en  $I_1$  entre ninguno de los parámetros que caracterizan la técnica de pedaleo y la GE. No obstante, en  $I_2$  el  $T_{medio}$  y la DT correlacionaron con la GE (Figura 21 y Figura 22, respectivamente), y en  $I_3$  el  $T_{medio}$  también correlacionó con la GE (Figura 23). Además, en  $I_3$  la cadencia correlacionó negativamente con la GE (Figura 24).

La ausencia de interacción entre los parámetros que caracterizan la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica con una generación de potencia por debajo de la intensidad a la que aparece el LT indica que, a esta intensidad, los ciclistas no adaptan su técnica de pedaleo para conseguir eficiencias metabólicas mayores. Las bajas demandas fisiológicas (Pitre, 2000) podrían contribuir a la ausencia de adaptación en la técnica de pedaleo. Estos resultados concuerdan con los de un estudio previo, que defendía que el cuerpo humano no parece preocuparse por minimizar el gasto de energía (Redfield y Hull, 1986).

No obstante, las mayores demandas fisiológicas sí parecen desempeñar cierta función en la técnica de pedaleo; aumentos progresivos en la generación de potencia han demostrado provocar cambios en la técnica de pedaleo (Carpes *et al.*, 2010; Sanderson, 1991). En nuestro estudio, los aumentos en la intensidad del ejercicio, y en consecuencia en las demandas fisiológicas, iban asociados a cambios en la relación entre la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica. No se observaron relaciones significativas en  $I_1$  (46% del  $VO_{2max}$ ), pero en  $I_2$  (53% del  $VO_{2max}$ ) los ciclistas que generaban un  $T_{medio}$  y una DT más elevadas eran más eficientes metabólicamente. Además, en  $I_3$  (60% del  $VO_{2max}$ ), la relación entre la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica indicaría que un  $T_{medio}$  mayor y una cadencia menor estaban relacionadas con una GE más alta. Aun sabiendo que el  $T_{medio}$  no reflejaría *per se* la técnica de pedaleo, la relación positiva entre el  $T_{medio}$  y la GE en  $I_2$  e  $I_3$ , y la ausencia de relación significativa entre el  $T_{máximo}$  y la GE indicarían que, en las producciones de potencia en las que se producen el LT y OBLA, los aumentos en la GE podrían estar asociados con incrementos del torque aplicado durante la revolución completa del pedal, y no a incrementos en el torque máximo durante la fase descendente de la biela. Esta técnica de pedaleo podría redistribuir el trabajo a un número mayor de músculos, con lo que aumentaría la eficiencia metabólica. Estos resultados concuerdan con los de un estudio previo en el que las cadencias menores estaban relacionadas con eficiencias metabólicas mayores, durante un simulacro de contrarreloj (Zameziati *et al.*, 2006). Estudios previos también han descubierto que, para una intensidad de ejercicio determinada, las cadencias menores estaban relacionadas con eficiencias metabólicas mayores (Chavarren y Calbet, 1999; Hagberg *et al.*, 1981; Marsh y Martin, 1993; Sidossis *et al.*, 1992).

Los resultados del presente estudio implican que, durante las pruebas de laboratorio progresivas, después de tener en cuenta las diferencias fisiológicas inter-individuales, la relación entre la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica depende de la intensidad del ejercicio. El conocimiento de la relación entre la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica a diferentes intensidades de ejercicio proporciona a los entrenadores y a los deportistas información práctica que puede ser útil para el entrenamiento concerniente a la técnica de pedaleo. Aunque anteriormente se ha observado que la respiración y el patrón de movimiento podrían influir sobre el rendimiento de los ciclistas (Jameson y Ring, 2000), estos dos parámetros no se controlaron. Se justifica que se realicen más investigaciones para analizar la influencia de estos dos parámetros sobre la técnica de pedaleo.

### **Conclusiones**

Los resultados de este estudio demostrarían que la relación entre los parámetros que caracterizan la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica durante una prueba ciclista progresiva en laboratorio, en la que se tuvieron en cuenta las diferencias fisiológicas inter-individuales, dependería de la intensidad del ejercicio: (1) no se observó ninguna relación a la intensidad por debajo de la generación de potencia en la que se produjo el LT; (2) en la intensidad del ejercicio en la que se produjo el LT, un mayor  $T_{medio}$  y una mayor uniformidad de la distribución del torque fueron más eficientes metabólicamente; (3) en la intensidad en que se produjo el OBLA, un mayor  $T_{medio}$  y una menor cadencia de pedaleo fueron más eficientes metabólicamente.

# Capítulo 7.

## Etapa 3

*La eficiencia bruta y su relación con el consumo máximo de oxígeno en ciclistas jóvenes de élite durante la temporada de competición*



## **La eficiencia bruta y su relación con el consumo máximo de oxígeno en ciclistas jóvenes de élite durante la temporada de competición.**

### **Introducción**

El rendimiento exitoso en ciclismo se basa en varios factores biomecánicos y fisiológicos (Castronovo *et al.*, 2013; Michalczyk *et al.*, 2015). La capacidad aeróbica máxima (medida con el consumo máximo de oxígeno,  $VO_{2max}$ ) es una variable fisiológica fuertemente relacionada con el rendimiento, y puede ser determinante en los posibles éxitos (Bell *et al.*, 2017; Czuba *et al.*, 2014; Gronek *et al.*, 2013; Holdys *et al.*, 2013; Lucía *et al.*, 2003; Michalczyk *et al.*, 2008; Santalla *et al.*, 2012). Sin embargo, el entrenamiento ejerce poco o nada de efecto sobre el  $VO_{2max}$  en deportistas de alto nivel (Hopker, Passfield, *et al.*, 2009; Lucía, Hoyos, Pardo, *et al.*, 2000), posiblemente debido a su alto grado de heredabilidad (Bouchard *et al.*, 1999) y a su relación con polimorfismos genéticos (Ahmetov y Fedotovskaya, 2015).

La eficiencia bruta (GE) difiere del  $VO_{2max}$  en que es adaptable (Hopker, Coleman, *et al.*, 2009) una vez que se alcanza cierto nivel de condición física, y puede ser un factor importante en el rendimiento ciclista (Joyner y Coyle, 2008; Lucía *et al.*, 2003; Santalla *et al.*, 2012). La GE cuenta con una fiabilidad absoluta (Moseley y Jeukendrup, 2001) y se define como la proporción entre la generación de potencia con respecto a las mediciones de consumo de oxígeno ( $VO_2$ ) y producción de dióxido de carbono ( $VCO_2$ ) durante el pedaleo en estado estable. Valores superiores de GE pueden explicar las diferencias de rendimiento de ciclistas con  $VO_{2max}$  similar (Lucía *et al.*, 2002), ya que una mejora del 0,9 % en la GE podría generar una mejora de 25,6 s en una carrera de 20 km (Hettinga *et al.*, 2007).

La GE de un ciclista viene modulada por varios factores externos e internos, que incluyen las condiciones climáticas, la técnica de pedaleo, los regímenes de entrenamiento y la estructura fisiológica del ciclista (Hopker *et al.*, 2010). Las altas temperaturas ambientales y una aclimatación insuficiente al terreno en altura influyen negativamente en la GE. Las altas temperaturas ambientales aumentan el coste energético del ejercicio debido a unas circulación, sudoración y ventilación mayores (Hettinga *et al.*, 2007), mientras que la aclimatación a la altitud por debajo del punto óptimo incrementa la demanda de energía durante la estimulación y contracción musculares (Green *et al.*, 2000). Se cree que estas contracciones musculares pueden mejorar en quienes tienen un mayor porcentaje de fibras musculares tipo I (Coyle *et al.*, 1992; Horowitz *et al.*, 1994). En cuanto a la técnica, una cadencia mayor produce una GE menor (Chavarren y Calbet, 1999; Lucía *et al.*, 2004; Sidossis *et al.*, 1992) pero, en cambio, una cadencia menor durante el entrenamiento no está relacionada con una GE mayor (Kristoffersen *et al.*, 2014).

Seis semanas de sesiones de entrenamiento de alta intensidad aumentaron la GE en ciclistas de competición con buena resistencia (Hopker *et al.*, 2010), y un efecto de entrenamiento acumulado está relacionado con una GE mayor (Hopker *et al.*, 2010). Por tanto, se podría esperar GE superiores en los ciclistas de élite de mayor edad, en comparación con los ciclistas más jóvenes. A pesar de la evaluación de la GE en ciclistas de mayor edad y la importancia de la GE como una variable que mejora el rendimiento (Joyner y Coyle, 2008), no conocemos ningún estudio que haya evaluado el cambio de la GE durante una temporada de competición en ciclistas jóvenes de élite. Además, un estudio previo con ciclistas de carretera varones y profesionales ( $26 \pm 1$  año) demostró que la GE tenía una correlación inversa con el  $VO_{2max}$ , argumentando que la GE podía compensar un  $VO_{2max}$  relativamente bajo (Lucía *et al.*, 2002). Sin embargo, hay una ausencia de datos sobre esta relación en ciclistas jóvenes que aspiran a convertirse en profesionales. Puesto que el rendimiento en la categoría sub-23 de la UCI es crítico para la transición al nivel profesional, determinar la GE y su relación con el  $VO_{2max}$  en estos ciclistas sería útil para entender mejor, y posiblemente potenciar, el rendimiento ciclista. La hipótesis consistía en que: 1) la GE no mostraría diferencias significativas en ciclistas jóvenes de élite durante una temporada de competición, y 2) se encontraría una correlación negativa entre la GE y el  $VO_{2max}$  en estos ciclistas.

Por tanto, los objetivos del presente estudio fueron: 1) evaluar la GE de ciclistas jóvenes durante dos momentos distintos de una temporada de competición, y 2) determinar la relación entre GE y  $VO_{2max}$  en ciclistas jóvenes de élite.

## **Materiales y métodos**

La presente investigación es un estudio descriptivo-observacional en el que los ciclistas ( $n=15$ ) realizaron dos pruebas de ejercicio progresivo en un laboratorio durante la fase de competición (T1=abril; T2=julio), a fin de evaluar las variables fisiológicas seleccionadas.

### **Participantes**

Se reclutaron 15 ciclistas sub-23 ( $20,1 \pm 1,4$  años;  $177,5 \pm 5,7$  cm,  $68,3 \pm 6,2$  kg,  $45,2 \pm 7,5$  mm de seis pliegues cutáneos, con una media de dos años de experiencia competitiva en el nivel de élite nacional (1-5 años). Todos los participantes compitieron en carreras nacionales estándar o de nivel superior, cubrieron un total de 20 000-25 000 km por año y tuvieron un entrenamiento semanal de una duración de entre 18 y 22 horas. El estudio fue aprobado por la Comisión de Bioética de la UPV/EHU, y todos los participantes aportaron su consentimiento por escrito antes de cualquier recopilación de datos.

### **Valoración antropométrica**

La valoración antropométrica fue exactamente igual que la realizada en la *Etapa 2* siguiendo las guías de la Sociedad Internacional de Cineantropometría.

### **Valoración fisiológica**

Toda la valoración fisiológica se llevó a cabo igual que en la *Etapa 2* (Consultar capítulo 6.3. Materiales y métodos, en el apartado correspondiente a la valoración fisiológica), con excepción del protocolo de la prueba de esfuerzo cardiopulmonar, que varió en la duración de los periodos. Así, la resistencia inicial fue de 100 W con incrementos de 35 W de forma progresiva, cada cinco minutos (Tabla 3). (ver en Tabla 3, la columna relativa a la *Etapa 3*).

### **Análisis estadístico**

Los análisis estadísticos fueron realizados con el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (SPSS Inc., Chicago, EUA, versión 15.0). La distribución de los datos fue evaluada con la prueba de Shapiro-Wilk, para comprobar que perteneciesen a una población con distribución normal. Los resultados de las dos pruebas de esfuerzo cardiopulmonar fueron comparados utilizando pruebas-t para muestras emparejadas. El valor de GE media obtenido entre las intensidades fue evaluado utilizando un ANOVA de medidas repetidas para dos factores (i.e. intensidad y momento de valoración). Después se efectuó el análisis *post hoc* de Bonferroni para identificar cualquier diferencia significativa entre las intensidades. Las correlaciones entre la GE media y el  $VO_{2max}$  en cada momento fueron calculadas utilizando el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). Los resultados se reportan como media y desviación estándar ( $\bar{x} \pm DE$ ), a menos que se indique de otro modo. El nivel de significatividad estadística (valor  $P$ ) fue establecido en 95% ( $\alpha=0,05$ ). La significación práctica fue valorada calculando el tamaño del efecto  $d$  de Cohen, dividiendo la diferencia entre las medias de la variable resultante por la desviación estándar ponderada. Los tamaños de efecto ( $d$ ) por encima de 0,8, entre 0,79 y 0,5, entre 0,49 y 0,2 y menores de 0,2 fueron considerados grandes, moderados, pequeños y triviales, respectivamente.

### **Resultados**

No se hallaron diferencias significativas en la GE de ninguna carga de trabajo, en ninguna sesión de prueba ( $P>0,05$ ). Los tamaños del efecto de Cohen de la diferencia en los valores medios entre T1 y T2 se consideraron pequeños o triviales, en intensidades de 135 W ( $d=0,21$ ), 170 W ( $d=0,01$ ), 205 W ( $d=0,32$ ), 240 W ( $d=0,07$ ) y 275 W ( $d=0,24$ ). En T1, la GE se incrementó de  $18,0 \pm 1,1\%$  en la primera carga de trabajo (135 W) hasta  $21,1 \pm 1,3\%$  en la máxima carga de trabajo (275 W) (17,7% mayor). En T2 se mostró un aumento similar de  $18,3 \pm 1,4\%$  a  $21,5 \pm 1,2\%$

(17,5% mayor). El aumento en la GE desde la primera carga de trabajo (135 W) hasta la máxima carga de trabajo (275 W) no fue estadísticamente significativo ( $P>0,05$ ) (Figura 25).

El valor de la GE media, un promedio de la GE calculada a 135, 170, 205 y 275 W, fue del 19,3% durante T1, y del 19,4% durante T2. Las diferencias entre las GE de ambas pruebas no fueron significativas ( $P=0,93$ ,  $d$  trivial).

Los resultados de las variables fisiológicas determinadas en T1 y T2 se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4: Variables fisiológicas obtenidas en T1 y T2**

Variables	T1	T2	P	d Cohen
$W_{max}$ (W)	$385.4 \pm 27.2$	$393.3 \pm 8.7$	0.08	0.3
$W_{max}$ ( $W \cdot kg^{-1}$ )	$5.7 \pm 0.4$	$5.8 \pm 0.5$	0.13	0.3
$VO_{2max}$ ( $L \cdot min^{-1}$ )	$5.1 \pm 0.4$	$5.2 \pm 0.4$	0.6	0.1
$VO_{2max}$ ( $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ )	$75.7 \pm 5.9$	$76.8 \pm 7.1$	0.45	0.2
$FC_{max}$ (latidos·min <sup>-1</sup> )	$179.6 \pm 27.8$	$186.7 \pm 6.2$	0.32	0.3
$[La]_{max}$ (mmol·L <sup>-1</sup> )	$8.4 \pm 1.8$	$10.4 \pm 1.5$	0.002 *	1.1
$[La]_{LT}$ (mmol·L <sup>-1</sup> )	$2.3 \pm 0.2$	$2.4 \pm 0.2$	0.13	0.7
$W_{LT}$ (W)	$290.5 \pm 34.5$	$295.9 \pm 32.9$	0.53	0.2
$PW_{LT}$ (%)	$75.4 \pm 7.1$	$75.1 \pm 3.1$	0.88	0.0
$VO_{2LT}$ ( $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ )	$57.1 \pm 6.7$	$58.1 \pm 5.8$	0.55	0.1
$FC_{LT}$ (latidos·min <sup>-1</sup> )	$161.4 \pm 10.0$	$162.3 \pm 7.8$	0.89	0.0
$W_{OBLA}$ (W)	$334.0 \pm 30.9$	$329.7 \pm 35.8$	0.35	0.1
$PW_{OBLA}$ (%)	$86.7 \pm 3.4$	$83.7 \pm 3.0$	0.001 *	0.8
$VO_{2OBLA}$ ( $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ )	$65.6 \pm 5.3$	$64.3 \pm 6.1$	0.31	0.2
$FC_{OBLA}$ (latidos·min <sup>-1</sup> )	$174.0 \pm 6.6$	$171.1 \pm 7.0$	0.04 *	0.4

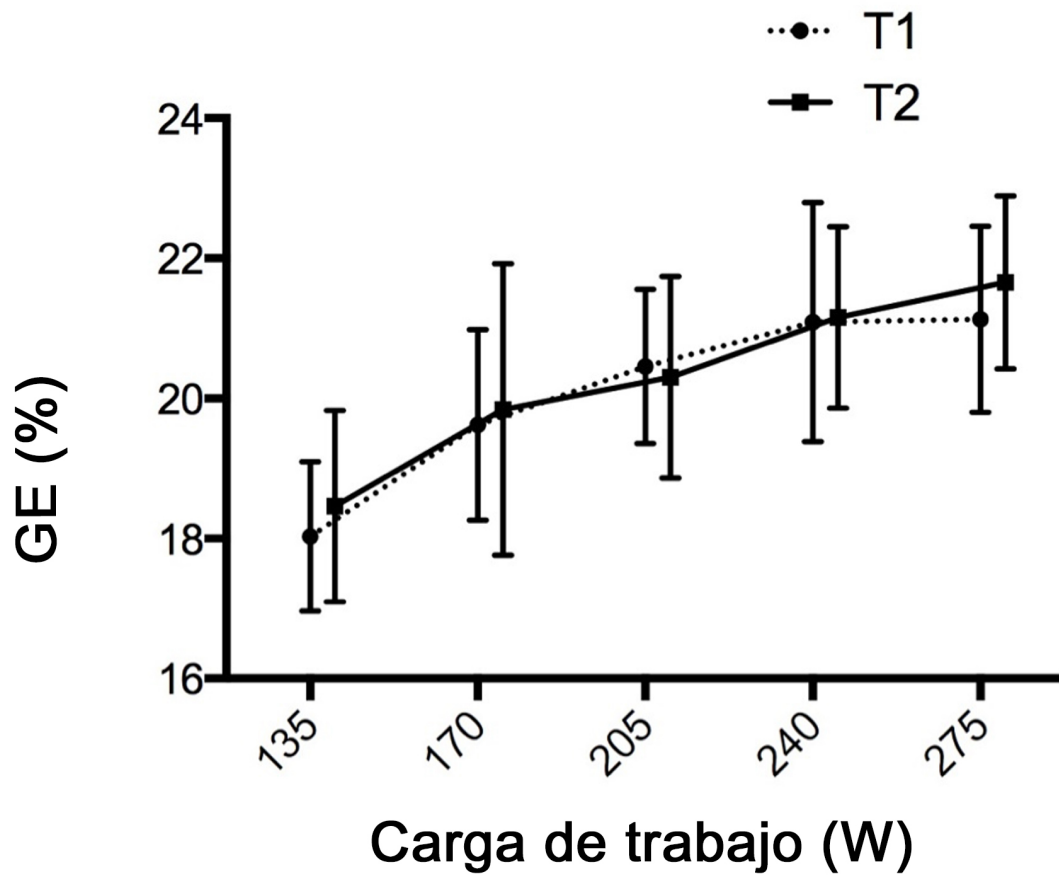
Los valores en T1 y T2 se presentan como  $\bar{x} \pm DE$ . T1=primera prueba (abril); T2=segunda prueba (julio); Valor P=diferencia entre T1 y T2; d Cohen=tamaño del efecto (d de Cohen) entre T1 y T2;  $W_{max}$ =intensidad máxima;  $VO_{2max}$ =consumo máximo de oxígeno;  $FC_{max}$ =frecuencia cardíaca máxima;  $[La]_{max}$ =concentración de lactato máxima; LT=primer umbral de lactato; OBLA=inicio de acumulación lactato en sangre;  $[La]_{LT}$ =concentración de lactato en LT;  $W_{LT}$ =intensidad en LT;  $PW_{LT}$ =porcentaje de intensidad en LT;  $VO_{2LT}$ =consumo de oxígeno en LT;  $FC_{LT}$ =frecuencia cardíaca en LT;  $W_{OBLA}$ =intensidad en OBLA;  $PW_{OBLA}$ =porcentaje de intensidad en OBLA;  $VO_{2OBLA}$ =consumo de oxígeno en OBLA;  $FC_{OBLA}$ =frecuencia cardíaca en OBLA.

Se observaron diferencias significativas en el lactato máximo ( $[La]_{max}$ , mmol·L<sup>-1</sup>) ( $d$  grande), en el porcentaje en que apareció la  $W_{OBLA}$  ( $PW_{OBLA}$ , %) ( $d$  grande) y en la frecuencia cardíaca en OBLA ( $FC_{OBLA}$ , latidos·min<sup>-1</sup>) ( $d$  pequeña).

Se encontraron correlaciones no significativas, pequeñas y negativas entre la GE media y el  $VO_{2max}$  ( $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ) en T1 ( $r=-0,28$ ,  $P=0,30$ ) y en T2 ( $r=-0,27$ ,  $P=0,32$ ) (Figura 26).

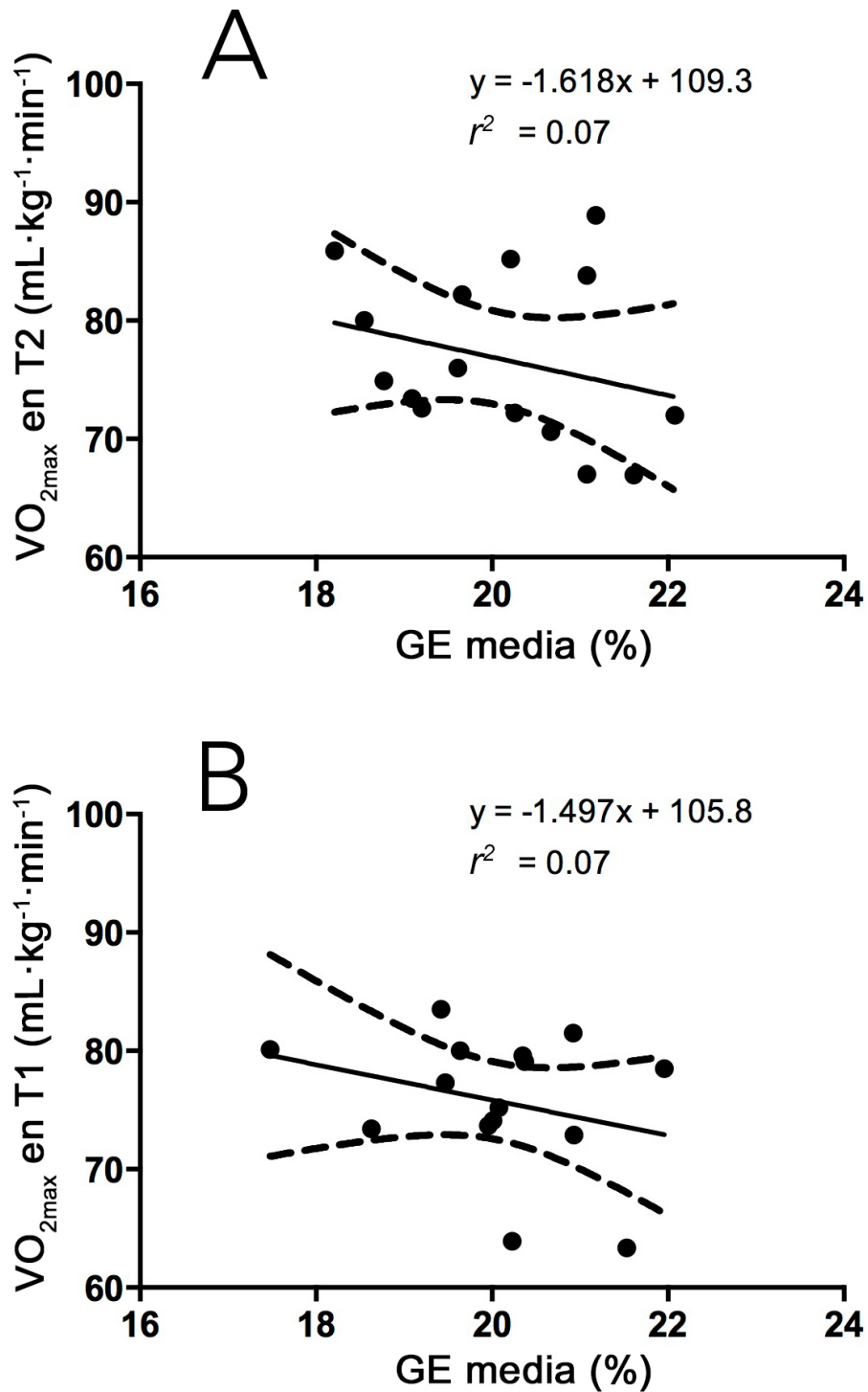






**Figura 25: GE media, medida en cada generación de potencia, durante dos fases de la temporada de competición.**

GE=eficiencia bruta; T1 = primera prueba (abril); T2 = segunda prueba (julio).



**Figura 26: Relación entre el consumo máximo de oxígeno y la eficiencia bruta en T2 y T1.**

La regresión lineal está representada con una línea negra continua, con intervalos de confianza al  $\pm 95\%$  mediante líneas discontinuas. GE=eficiencia bruta; B=T1 = primera prueba (abril); A=T2 = segunda prueba (julio);  $VO_{2max}$ =consumo máximo de oxígeno.

## Discusión

El objetivo de nuestro estudio fue determinar la GE en dos puntos, durante la temporada de competición, y evaluar la relación entre GE y  $VO_{2max}$  en ciclistas de élite sub-23. Los principales hallazgos fueron que la GE era menor en los ciclistas sub-23, en relación con lo observado anteriormente en ciclistas de mayor edad, y que la GE no varió en los dos puntos de medición dentro de la temporada de competición. Además, a diferencia de los corredores profesionales, la GE no estaba relacionada inversamente con el  $VO_{2max}$  en ciclistas jóvenes de élite.

Este es el primer estudio que ha determinado la evolución de la GE durante la temporada de competición en la categoría sub-23 de la UCI. Se ha descrito que la GE de los ciclistas entrenados es de entre 21,1 y 22,4 % (Hopker, Coleman, *et al.*, 2009; Sassi *et al.*, 2008). Sin embargo, la muestra del estudio de Hopker, Coleman, *et al.* (2009) no incluyó ciclistas de élite, y la edad varió considerablemente (entre 18 y 30 años), mientras que el artículo de Sassi *et al.* (2008) tampoco aisló a los ciclistas más jóvenes ( $26 \pm 4$  años). Por tanto, la GE observada en ciclistas mayores fue de un 1,7% y un 3% mayor que en los ciclistas sub-23 de nuestro estudio (19,3%), respectivamente.

Teniendo en cuenta que el volumen y la intensidad de entrenamiento adecuados están relacionados con aumentos en la GE (Hopker *et al.*, 2010; Jobson *et al.*, 2012), y puesto que los ciclistas del presente estudio eran más jóvenes que en estudios anteriores (Hopker, Coleman, *et al.*, 2009; Sassi *et al.*, 2008), la GE observada en ciclistas sub-23 puede deberse en parte a un menor volumen e intensidad de entrenamiento acumulados. Puesto que el  $VO_{2max}$  menor está relacionado con una GE superior como mecanismo de compensación de cara al rendimiento (Hopker *et al.*, 2012), la GE menor de los ciclistas del presente estudio podría deberse en parte a su mayor  $VO_{2max}$ . Por tanto, parece que el entrenamiento de alta intensidad aporta el estímulo más potente para los cambios en la GE (Jobson *et al.*, 2012). Esto podría poner de relieve la necesidad de una cuantificación exacta de la carga de entrenamiento (es decir, carga externa e interna) soportada por los ciclistas, a fin de identificar los efectos del entrenamiento (Mujika, 2017), incluyendo los que influyen sobre la GE.

Las diferencias de la GE entre estudios pueden haberse visto afectadas por las distintas tasas para el cálculo de la GE, que puede limitar las comparaciones entre estudios diferentes. La GE observada en el presente estudio (Figura 25) fue similar a la encontrada en trabajos anteriores, en el sentido de que aumentaba con la generación de potencia absoluta (Chavarren y Calbet, 1999) y de forma curvilínea (Ettema y Loras, 2009). Nuestra GE se determinó a diferentes intensidades (desde 135 hasta 275 W), lo cual también puede limitar las comparaciones con otros estudios que midieron la GE con otras cargas de trabajo (Sassi *et al.*, 2008).

La evolución de la GE permaneció constante durante la fase competitiva de la temporada (i.e., desde abril hasta julio), lo cual difirió de un estudio anterior que observó un aumento del 5,6% en la GE durante el transcurso de la temporada de competición (Hopker, Coleman, *et al.*, 2009). La ausencia de cambios en la GE durante la temporada se añade a la literatura científica destacando que los ciclistas de la categoría sub-23 o superior, entrenados en resistencia, podrían no modificar su GE durante el período competitivo de la temporada. Esta ausencia de cambios en la GE pudo haberse visto afectada por cambios fisiológicos durante la temporada de competición (Jobson *et al.*, 2012), ya que las variables fisiológicas mejoraban en cada medición. Estas mejoras halladas al final de la temporada incluían el  $[La]_{max}$  ( $mmol \cdot L^{-1}$ , 18,7%), la  $PW_{OBLA}$  (% 3,3%) y la  $FC_{OBLA}$  ( $latidos \cdot min^{-1}$ , 1,6%), mientras el resto de las variables medidas permanecía constante (Tabla 4).

Hallazgos previos en la investigación indican que el entrenamiento de fuerza a corto plazo podría mejorar la GE (Paton y Hopkins, 2005; Rønnestad *et al.*, 2011; Sunde *et al.*, 2010), aunque los mecanismos que vinculan el entrenamiento de fuerza y las mejoras en la GE no son conocidos (Jobson *et al.*, 2012). Por tanto, para eliminar su influencia en la GE, no se realizó entrenamiento de fuerza por parte de los ciclistas entre ambas pruebas.

Aunque los mecanismos subyacentes a la relación entre el  $VO_{2max}$  ( $mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ) y la GE (%) no son claros (Jobson *et al.*, 2012), un estudio previo informó sobre una correlación negativa mayor en ciclistas de élite ( $r=-0,63$ ) (Lucia *et al.*, 2004), en comparación con nuestros hallazgos de  $r=-0,28$  y  $-0,27$ , en T1 y T2, respectivamente. Otros observaron que los ciclistas con valores más altos de  $VO_{2max}$  (por encima de  $80 mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ ) fueron incapaces de conseguir tasas de alta eficiencia (superior a 23-24%) (Sassi *et al.*, 2008). A lo largo de estas líneas hemos citado estudios previos que informaron que los ciclistas con un  $VO_{2max}$  alto responden menos en la GE a los cambios relacionados con el entrenamiento que los que tenían un  $VO_{2max}$  menor (Hopker *et al.*, 2012). Aunque es poco común entre los ciclistas de élite, estudios previos han informado sobre  $VO_{2max}$  y GE elevados en los ciclistas del Tour de Francia (Bell *et al.*, 2017; Santalla *et al.*, 2012).

En el presente estudio, en contra de nuestra hipótesis, no hubo una relación significativa entre la GE y el  $VO_{2max}$  en abril ni en julio (Figura 26). Puesto que los aumentos en la GE están relacionados con el volumen y la intensidad de entrenamiento acumulados a lo largo de los años (Jobson *et al.*, 2012), podemos argumentar que la ausencia de una relación significativa puede deberse al hecho de que los ciclistas de este estudio tuvieron un entrenamiento intensivo limitado (aproximadamente de dos años), mientras que los ciclistas profesionales, con relaciones más significativas, habían realizado entrenamiento de resistencia de alto volumen durante varios años (e.g., una media de  $35\ 000 km \cdot año^{-1}$ ) (Lucía *et al.*, 2002).

## **Conclusiones**

La GE de los ciclistas sub-23 es menor que la GE observada en ciclistas de mayor edad, y no varía durante la fase más importante de la temporada de entrenamiento (i.e., de abril a julio). Además, la GE no correlacionó significativamente con el  $VO_{2max}$ . La menor cantidad de volumen e intensidad de entrenamiento en los ciclistas más jóvenes puede explicar su GE menor, en comparación con los ciclistas profesionales de mayor edad, y esta ausencia de entrenamiento no produciría mayores incrementos de la GE en ciclistas con un  $VO_{2max}$  menor.

# Capítulo 8.

## Etapa 4

*Efectos de la interrupción a largo plazo del entrenamiento  
en ciclistas de carretera jóvenes de alto rendimiento*





## **Efectos de la interrupción a largo plazo del entrenamiento en ciclistas de carretera jóvenes de alto rendimiento.**

### **Introducción**

El ciclismo de carretera es en su mayor parte un deporte de resistencia, en el que el rendimiento tiene una correlación elevada con el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2max}$ ), el tipo de fibras musculares, la economía y el umbral del lactato (LT1) (Atkinson *et al.*, 2003). También hay pruebas sustanciales de que la generación de potencia externa máxima ( $W_{max}$ ), y la potencia en el LT1 e inicio de acumulación de lactato (OBLA o LT2), obtenidos durante una prueba ciclista progresiva máxima, predicen el rendimiento en ciclismo (Atkinson *et al.*, 2003; Faria *et al.*, 2005b; Padilla *et al.*, 1999). El  $VO_{2max}$  se considera uno de los factores de referencia para el objetivo de evaluar y seleccionar a los ciclistas de élite estándar, y como prerrequisito para rendir a un nivel elevado. El límite superior para este  $VO_{2max}$  se suele conseguir durante el ejercicio para una masa muscular relativamente grande y representa la capacidad integradora del corazón para generar una gran producción cardíaca, hemoglobina corporal total, alto flujo sanguíneo muscular y extracción de oxígeno muscular, y en algunos casos la capacidad de los pulmones para oxigenar la sangre (Joyner y Coyle, 2008). Además, los ciclistas que pueden tolerar intensidades altas submáximas constantes (*i.e.*, próximas al LT2), cuentan con una ventaja, ya que la mayor parte del tiempo de competición durante el ciclismo en carretera profesional no tiene lugar a la  $W_{max}$ . Por ello, diferentes ciclistas de carretera tienen una producción elevada tanto al LT1 como al LT2, y poseen la capacidad para generar esas altas potencias de breve duración durante la salida en pelotón, escalando y en el final de carrera (Faria *et al.*, 2005b; Mujika y Padilla, 2001). Estas variables fisiológicas se han utilizado para monitorizar el estatus de entrenamiento de ciclistas de competición con el objetivo de evaluar los métodos de entrenamiento y su eficacia, tanto durante la temporada de competición como en el descanso de fuera de temporada (Faria *et al.*, 2005b; Mujika y Padilla, 2003).

La periodización del entrenamiento en ciclistas jóvenes de alto nivel que no son profesionales suele incluir un período de transición, con un estrés menor, para permitir la recuperación física y mental después del final de la temporada de competición (*i.e.*, la interrupción completa en el entrenamiento fuera de temporada). Sin embargo, este período suele ser superior a cuatro semanas, sin ninguna tradición de adopción de estrategias de reducción del entrenamiento, sino que en su lugar se adopta un estilo de vida casi sedentario. El desentrenamiento de larga duración se ha definido como la pérdida parcial o completa de las adaptaciones anatómicas, fisiológicas y del rendimiento inducidas por el entrenamiento, como consecuencia de más de cuatro semanas de reducción o interrupción del entrenamiento, y en respuesta a un estímulo de entrenamiento insuficiente. Como resultado

del desentrenamiento se han presentado reducciones grandes en las características cardiorrespiratorias, metabólicas y musculares en personas altamente entrenadas (Mujika y Padilla, 2000a, 2000b). Por tanto, el rendimiento deportivo específico podría disminuir en los deportistas de alto nivel (Mujika y Padilla, 2000b).

Los efectos de la interrupción del entrenamiento se han investigado en deportistas como jugadores de fútbol (Koundourakis *et al.*, 2014), nadadores (Ormsbee y Arciero, 2012), piragüistas (García-Pallares *et al.*, 2010), jugadores de balonmano (Cardoso Marques y Gonzalez-Badillo, 2006), remeros (Godfrey *et al.*, 2005) y corredores (Houmard *et al.*, 1992), pero los datos en el ciclismo son escasos en lo relativo a lo que ocurre después de un período de interrupción del entrenamiento a largo plazo. Por ello, se necesitan estudios, en primer lugar, para demostrar los efectos de la interrupción del entrenamiento en un deporte donde los marcadores fisiológicos determinan el rendimiento, y en segundo lugar para poner en cuestión las ideas tradicionales sobre el entrenamiento en ciclistas jóvenes. Un estudio previo evaluó la influencia del envejecimiento sobre los efectos cardiovasculares, después de dos meses de interrupción del entrenamiento, en ciclistas varones que mostraban modificaciones morfológicas prácticamente similares en el ventrículo izquierdo en los dos grupos de edad (*i.e.*, jóvenes, de entre 19-25 años, y mayores, de entre 50-60 años) (Giada *et al.*, 1998). Sin embargo, aún no se ha investigado el efecto de la interrupción del entrenamiento en deportistas jóvenes muy entrenados que aspiran a ser ciclistas profesionales.

Por tanto, el propósito de la presente investigación fue examinar los efectos de una interrupción en el entrenamiento de cinco semanas, en ciclistas jóvenes de alto nivel, en lo relativo a la composición corporal y los parámetros hematológicos y fisiológicos relacionados con el rendimiento.

## **Materiales y métodos**

### **Diseño del estudio**

La presente investigación es un estudio observacional sin grupo de control, en el que los ciclistas realizaron dos pruebas de ejercicio progresivo en un laboratorio para evaluar algunas variables fisiológicas. Una prueba se efectuó al final de la fase de competición de ciclismo (septiembre=T3), y la segunda después de una interrupción en el entrenamiento de cinco semanas, coincidiendo con el comienzo de temporada (noviembre=T4). Durante el período de interrupción, los ciclistas no realizaron ningún tipo de entrenamiento físico y no se les controló su dieta.

### **Participantes**

Se seleccionaron diez ciclistas, jóvenes y varones, del mismo equipo ciclista. Las características de los participantes fueron ( $\bar{x} \pm DE$ ): edad  $20,1 \pm 1,4$  años, masa corporal  $68,4 \pm 6,3$  kg, estatura  $177,9 \pm 5,8$  cm, con una media de dos años de experiencia competitiva a nivel nacional (un rango de 1 a 5 años). Su  $VO_{2max}$  era de  $5,3 \pm 0,4$  L·min<sup>-1</sup>,  $78,5 \pm 5,5$  mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup> y  $1386 \pm 87$  mL·kg<sup>-0.32</sup>·min<sup>-1</sup>, con  $W_{max}$  de  $396 \pm 31$  W,  $5,8 \pm 0,4$  W·kg<sup>-1</sup> and  $103 \pm 7$  W·kg<sup>-0.32</sup>. Todos los participantes competían a nivel nacional o superior, con un total de entre 20 000 y 25 000 km por año y con un entrenamiento semanal de una duración media de 18-22 h.

### **Valoración antropométrica**

La valoración antropométrica fue exactamente igual que la realizada en la *Etapa 2* (Consultar capítulo 6.3. Materiales y métodos, en el apartado correspondiente a la valoración antropométrica).

### **Valoración fisiológica**

Prácticamente toda la valoración fisiológica se llevó a cabo igual que en la *Etapa 2* (Consultar capítulo 6.3. Materiales y métodos, en el apartado correspondiente a la valoración fisiológica), con excepción del protocolo de la prueba de esfuerzo cardiopulmonar, que varió en la duración de los periodos. Así, la resistencia inicial fue de 100 W con incrementos de 35 W de forma progresiva, cada cinco minutos (ver en Tabla 3, la columna relativa a la *Etapa 4*). Además, hubo una modificación en la valoración de variables ventilatorias, que se explica a continuación:

### **Valoración de variables ventilatorias**

El  $VO_{2max}$  se definió como la media de los cuatro valores de 30-s de  $VO_2$  consecutivos más altos, obtenidos hacia el final de la prueba. Para asumir el logro del  $VO_{2max}$  se tuvo en cuenta el cumplimiento de al menos dos de los siguientes criterios (Duncan *et al.*, 1997):

- meseta en el  $VO_{2max}$  ( $< 2,0$  mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>) con incremento de la potencia.
- tasa de intercambio respiratorio (RER) por encima de 1,10 (producción de dióxido de carbono dividido entre consumo de oxígeno,  $VCO_2 \cdot VO_2^{-1}$ ).
- frecuencia cardíaca dentro del intervalo de  $\pm 10$  latidos·min<sup>-1</sup>, de la frecuencia cardíaca máxima predicha para la edad (220-edad).

Estudios previos han demostrado que los exponentes de 0,32 y 1 para la masa pueden evaluar el nivel y la capacidad de pedaleo, respectivamente (Padilla *et al.*, 1999). Por tanto, puesto que el ciclismo en carretera transcurre por una amplia variedad de terrenos (cuestas incluidas), ambos valores se ajustaron a la masa corporal elevada a la potencia de 0,32, y se utilizaron proporciones estándar sencillas para comparar a los participantes (Winter y Nevill, 2009).

### **Valoración hematológica**

Para la determinación de los recuentos de sangre completos y diferenciales (glóbulos rojos, recuento sanguíneo completo, GRS  $10^6 \cdot \mu\text{L}^{-1}$ ; hemoglobina,  $\text{g} \cdot \text{dL}^{-1}$ ; y hematocrito, %), todas las muestras de sangre venosa fueron procesadas mediante el método impedancimétrico, en un analizador de sangre utilizado habitualmente en el laboratorio Medikosta (Sysmex XE 2100 Roche). Estos analizadores se calibraron de forma habitual y pasaron los controles de calidad, tal como describe el fabricante. Todas las muestras fueron recogidas por un flebotomista, y analizadas antes de que transcurrieran cuatro horas de su obtención en tubos separadores de suero sanguíneo (BD Vacutainer Plastic SST™ II Advance Tube) de 8,5 mL. La sangre fue extraída entre las 8 y las 10 de la mañana, en ayunas, en el mismo centro clínico especializado, en la 5.<sup>a</sup> y 6.<sup>a</sup> visitas, utilizando técnicas estandarizadas de venopunción, en la vena antecubital, en el pliegue del codo.

**Tabla 5: Valores antropométricos, hematológicos y fisiológicos obtenidos en T3 y T4.**

<b>Variables</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>P</b>	<b>d Cohen</b>	<b>% de cambio</b>
<b>Antropométricas</b>					
Masa corporal (kg)	68.4 ± 6.3	70.1 ± 7.2	0.014	0.9	2.3 ± 2.4
Pliegues de la piel (mm)	45.2 ± 9.5	50.6 ± 7.4	0.16	0.5	15.1 ± 23.7
<b>Hematológicas</b>					
GRS (106/ $\mu$ L)	4.9 ± 0.2	4.6 ± 0.2	0.007	1.3	-6.6 ± 4.8
Hemoglobina (g/dl)	14.9 ± 0.7	14.0 ± 0.5	0.010	1.2	-5.4 ± 4.3
Hematocrito (%)	43.9 ± 2.0	41.7 ± 1.9	0.028	0.9	-2.9 ± 3.0
<b>Fisiológicas</b>					
VO <sub>2max</sub> (L·min <sup>-1</sup> )	5.3 ± 0.4	4.8 ± 0.4	< 0.001	1.7	-8.8 ± 5.0
VO <sub>2max</sub> (mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	78.5 ± 5.5	69.9 ± 4.6	< 0.001	2.4	-10.8 ± 4.2
VO <sub>2max</sub> (mL·kg <sup>-0.32</sup> ·min <sup>-1</sup> )	1386 ± 87	1253 ± 79	< 0.001	2.0	-9.4 ± 5.0
V <sub>max</sub> (W)	396 ± 31	371 ± 28	< 0.001	1.9	-6.5 ± 3.1
V <sub>max</sub> (W·kg <sup>-1</sup> )	5.8 ± 0.4	5.3 ± 0.3	< 0.001	2.4	-8.5 ± 3.3
V <sub>max</sub> (W·kg <sup>-0.32</sup> )	103 ± 7	95.8 ± 5.1	< 0.001	2.2	-7.1 ± 3.0
W <sub>LT</sub> (W)	303 ± 31	264 ± 36	< 0.001	2.1	-12.9 ± 7.0
W <sub>LT</sub> (W·kg <sup>-1</sup> )	4.4 ± 0.3	3.8 ± 0.4	< 0.001	2.0	-14.8 ± 7.4
W <sub>LT</sub> (W·kg <sup>-0.32</sup> )	78.4 ± 6.6	67.8 ± 8.1	< 0.001	2.1	-13.5 ± 6.8
W <sub>OBLA</sub> (W)	336 ± 36	298 ± 40	< 0.001	1.8	-11.5 ± 7.0
W <sub>OBLA</sub> (W·kg <sup>-1</sup> )	4.9 ± 0.4	4.3 ± 0.5	< 0.001	1.7	-13.4 ± 7.6
W <sub>OBLA</sub> (W·kg <sup>-0.32</sup> )	87.0 ± 7.6	76.4 ± 9.0	< 0.001	2.0	-12.1 ± 7.0

Los valores en T3 y T4 se presentan como  $\bar{x} \pm DE$ . T3=tercera prueba (septiembre); T4=cuarta prueba (noviembre); Valor P=diferencias entre T3 y T4; d Cohen=tamaño del efecto (d de Cohen); GRS=recuento sanguíneo completo; VO<sub>2max</sub>=consumo de oxígeno máximo; V<sub>max</sub>=intensidad máxima; W<sub>LT</sub>=intensidad en umbral de lactato; W<sub>OBLA</sub>=intensidad en OBLA.

### **Análisis estadísticos**

Los análisis estadísticos fueron realizados con el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (SPSS Inc., Chicago, EUA, versión 15.0). La distribución de los datos fue evaluada con la prueba de Shapiro-Wilk, para comprobar que perteneciesen a una población con distribución normal. Para evaluar los efectos de la interrupción del entrenamiento en cada variable se efectuaron pruebas-t para muestras pareadas, utilizando los datos del final de temporada de competición y los correspondientes a cinco semanas después. El cambio en las variables (entre T4 y T3) se presentó en forma de porcentaje sobre los valores iniciales; los porcentajes se transformaron en arcosenos antes de su comparación, a fin de reducir asimetrías. Para distinguir los efectos del desentrenamiento en términos relativos (normalizados dividiendo por la masa corporal basada en la escala alométrica, *i.e.* la masa corporal elevada a la potencia de 0,32) y en términos absolutos, los cambios (expresados como porcentajes) fueron comparados utilizando pruebas-t para muestras pareadas y se concretaron intervalos de confianza del 95% (IC de 95%) en torno a las medias.

Los resultados se reportan como media y desviación estándar ( $\bar{x} \pm DE$ ), a menos que se indique de otro modo. El nivel de significatividad estadística (valor *P*) fue establecido en 95% ( $\alpha=0,05$ ). La significación práctica fue valorada calculando el tamaño del efecto *d* de Cohen, dividiendo la diferencia entre las medias de la variable resultante por la desviación estándar ponderada. Los tamaños de efecto (*d*) por encima de 0,8, entre 0,79 y 0,5, entre 0,49 y 0,2 y menores de 0,2 fueron considerados grandes, moderados, pequeños y triviales, respectivamente.

### **Resultados**

#### **Masa corporal y composición corporal**

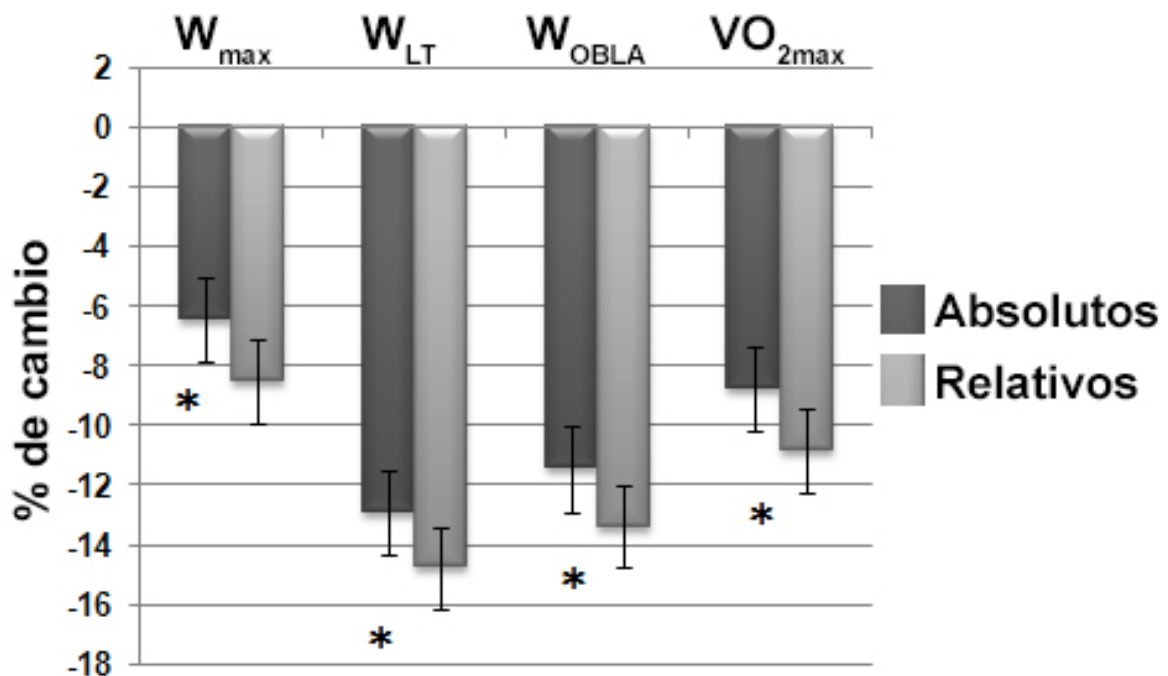
Los cambios en la composición corporal se muestran en la Tabla 5. En comparación con los datos iniciales (T3), la masa corporal ( $68,4 \pm 6,3$  vs.  $70,1 \pm 7,2$  kg; IC del 95% =  $-2,8-0,4$ ;  $d=0,9$ ;  $P=0,014$ ;  $+2,3 \pm 2,4\%$ ) y la suma de seis pliegues cutáneos ( $45,2 \pm 9,5$  vs.  $50,6 \pm 7,4$  mm; IC de 95% =  $-13,5-2,7$ ; ES=0,5;  $P=0,16$ ;  $+15,1 \pm 23,7\%$ ) se incrementaron después de cinco semanas sin entrenar (T4).

#### **Variables hematológicas**

Hubo reducciones en T4 en el recuento de glóbulos rojos ( $4,9 \pm 0,2$  vs.  $4,6 \pm 0,2 \cdot 10^6/\mu$ ; IC del 95%  $0,1-0,5$ ; ES=1,3;  $P=0,007$ ;  $-6,6 \pm 4,8\%$ ), hemoglobina ( $14,9 \pm 0,7$  vs.  $14,0 \pm 0,5$  g/dL; IC=0,3-1,4; ES=1,2;  $P=0,010$ ,  $-5,4 \pm 4,3\%$ ) y hematocrito ( $43,0 \pm 2,0$  vs.  $41,7 \pm 1,9\%$ ; IC=0,2-2,4; ES=0,9;  $P=0,028$ ,  $-2,9 \pm 3,0\%$ ), después del período de interrupción del entrenamiento (Tabla 5).

## VARIABLES FISIOLÓGICAS

Hubo descensos ( $P < 0,001$ ) en T4 en las respuestas fisiológicas de la  $W_{max}$  ( $-6,5 \pm 3,1\%$ ,  $IC=0,3-0,6$ ),  $VO_{2max}$  ( $-8,8 \pm 5,0\%$ ,  $IC=6,1-11,1$ ),  $W_{LT}$  ( $-12,9 \pm 7,0\%$ ,  $IC=0,4-0,9$ ),  $W_{OBLA}$  ( $-11,5 \pm 7,0\%$ ,  $IC=0,4-0,9$ ) (Tabla 5). Hubo reducciones mayores ( $P < 0,05$ ) cuando los cambios se expresaron en términos relativos (i.e., teniendo en cuenta los cambios en la masa corporal) en comparación con los valores absolutos (Tabla 5 y Figura 27). Los resultados no fueron distintos cuando se compararon las medidas escaladas alométricamente a  $kg^{-0,32}$  con los estándares (Tabla 5). Los tamaños del efecto para todas las variables fisiológicas entre T3 y T4 fueron grandes ( $>1$ ) (Tabla 5).



**Figura 27: Porcentajes de cambio en variables fisiológicas y de rendimiento.**

$VO_{2max}$ =consumo máximo de oxígeno;  $W_{max}$ =intensidad máxima,  $W_{LT}$ =intensidad al umbral del lactato;  $W_{OBLA}$ =intensidad al comienzo de la acumulación de lactato en sangre. Diferencia entre todos los valores absolutos y relativos (\* $P < 0,05$ ).

## Discusión

Según la información de la que se dispone, este es el primer estudio que informa sobre cambios en la composición corporal, variables hematológicas y fisiológicas relacionadas con el rendimiento, después de cinco semanas de interrupción del entrenamiento, en ciclistas jóvenes de alto nivel. Los resultados del estudio indican que todos los valores investigados se vieron afectados negativamente por el cese abrupto del estímulo de entrenamiento, con aumentos en la masa corporal y disminución en las variables hematológicas y fisiológicas (Tabla 5). Las disminuciones mayores en las variables fisiológicas, expresadas en relación con la masa corporal, enfatizan la importancia de la masa corporal del ciclista y su influencia en los resultados relacionados con el rendimiento (Atkinson *et al.*, 2003).

El presente estudio ha demostrado una disminución en las variables (absolutas y relativas, *i.e.*, normalizadas dividiendo por la masa corporal y por la masa corporal elevada a la potencia de 0,32, respectivamente) relacionadas con el rendimiento de resistencia en ciclistas jóvenes de alto nivel, después de cinco semanas de estímulos de entrenamiento insuficientes (Tabla 5). La interrupción del entrenamiento ha mostrado una reducción del  $VO_{2max}$  del 6-20% debido a un menor volumen sanguíneo total (*i.e.*, el volumen de glóbulos rojos más el volumen de plasma) y un aumento de los niveles de lactato en sangre durante el ejercicio submáximo a las mismas intensidades absolutas y relativas (Mujika y Padilla, 2000b). En el presente estudio, la disminución media (*i.e.*, la diferencia entre T4 y T3, expresada en % de T3) en el  $VO_{2max}$  fue de 8-11%. Estas disminuciones fueron similares a las de nadadores tras cinco semanas sin entrenar (-7,7%) (Ormsbee y Arciero, 2012) y piragüistas después de cuatro semanas sin entrenar (-11,3%) (García-Pallares *et al.*, 2010). Periodos mayores de interrupción del entrenamiento (12 semanas) han demostrado reducciones medias en el  $VO_{2max}$  del 16% (Coyle *et al.*, 1984). Hay pruebas sustanciales que demuestran que los ciclistas profesionales con éxito tienen altos valores de  $VO_{2max}$ , y esos valores elevados se necesitan en el rendimiento en ciclismo (Faria *et al.*, 2005b; Lucía *et al.*, 1998). También se ha demostrado que la inactividad a largo plazo puede generar una reducción de las dimensiones cardíacas y la eficiencia ventilatoria, lo cual afecta tanto al  $VO_{2max}$  como al rendimiento en resistencia de los deportistas (Giada *et al.*, 1998; Mujika y Padilla, 2000b). La disminución en el  $VO_{2max}$  es principalmente una consecuencia de una reducción del aporte de oxígeno al músculo (Bosquet y Mujika, 2012). La rápida disminución del volumen sanguíneo después de los primeros días de la interrupción del entrenamiento probablemente desempeña un papel importante en la cascada de eventos que reducen la producción cardíaca máxima y, en consecuencia, del  $VO_{2max}$  (Bosquet y Mujika, 2012; Coyle *et al.*, 1986; Coyle *et al.*, 1984). En el presente estudio, el análisis de las variables hematológicas sugiere una disminución del volumen sanguíneo debido a las reducciones en el recuento de glóbulos rojos ( $-6.6 \pm 4.8$  %) y de hemoglobina ( $-5.4 \pm 4.3$  %). En lugar de una interrupción completa del entrenamiento, los



estudios publicados han ofrecido valiosas estrategias, que generan, en lugar de desentrenamiento, un mantenimiento de las adaptaciones fisiológicas conseguidas durante los períodos de entrenamiento previos (Mujika, 1998). En efecto, se han presentado valores de  $VO_{2max}$  similares durante períodos de entrenamiento reducido (Hickson *et al.*, 1982; Madsen *et al.*, 1993). En consecuencia, teniendo en cuenta que la medición del  $VO_{2max}$  sigue recomendándose para evaluar y seleccionar a los ciclistas de élite, y que es un prerrequisito indispensable para rendir a alto nivel (Barbeau *et al.*, 1993), sería interesante adoptar estas estrategias (*i.e.*, programas de entrenamiento reducido) en deportistas que tienen que ser valorados continuamente para su selección en equipos profesionales. Un rendimiento mayor en deportes de resistencia como el ciclismo requiere sin duda valores elevados de LT1 y LT2, ya que estos han demostrado ser mejores predictores del rendimiento de resistencia que el  $VO_{2max}$  (Atkinson *et al.*, 2003). Los hallazgos del presente estudio en los datos máximos (*i.e.*,  $VO_{2max}$ ,  $W_{max}$ ) mostraron reducciones menores ( $P < 0,001$ ) que la disminución media de los valores submáximos (*i.e.*, los valores de LT y LT2), también en términos absolutos ( $-12,9 \pm 7,0\%$  para  $W_{LT}$  y  $-11,5 \pm 7,0\%$  para  $W_{OBLA}$ ). De igual modo, en un remero de élite, después de ocho semanas de interrupción del entrenamiento, se presentaron mayores disminuciones en LT1 (27%) que a una intensidad máxima (20%) (Godfrey *et al.*, 2005). Por ello, la pérdida excesiva de rendimiento en estas zonas metabólicas (*i.e.*, LT1 y LT2) fuera de temporada, en el presente estudio, pudieron tener consecuencias perjudiciales no deseadas para el rendimiento de los ciclistas en la siguiente temporada de competición. Estudios previos que investigaron la intensidad del ejercicio durante las competiciones de salida en grupo, en el ciclismo de carretera profesional, concluyeron que dominó la capacidad aeróbica y que la mayor parte del tiempo de competición durante las salidas en grupo transcurrió a intensidades próximas a LT1 (Padilla *et al.*, 2001; Vogt *et al.*, 2006). Los participantes del presente estudio cubrieron unos 25 000 km en un año, con un exceso de 50 días de competición y participación en carreras de más de tres días seguidos. No obstante, puesto que eran más jóvenes que los corredores profesionales, y en consecuencia tenía menos años de volumen de entrenamiento, la disminución en estas zonas metabólicas submáximas (*i.e.*, LT1 y LT2) después de un período sin entrenar, podrían tener un impacto mayor sobre el rendimiento, en comparación con los corredores profesionales que han experimentado un entrenamiento más habitual y estructurado. A este respecto, se ha demostrado que los individuos entrenados de mayor edad parecen tener disminuciones menores relacionadas con la edad que los más jóvenes (Hopker *et al.*, 2013). Además, la disminución de generación de potencia máxima (396 vs. 370  $W_{max}$ ,  $-6,5 \pm 3,1\%$ ; 5,8 vs. 5,3  $W \cdot kg^{-1}$ ,  $-8,5 \pm 3,3\%$  y 102,5 vs. 95,1  $W \cdot kg^{-0,32}$ ,  $-7,1 \pm 3,0\%$  y 102,5 vs. 95,1  $W \cdot kg^{-0,32}$ ,  $-7,1 \pm 3,0\%$  de T3 a T4), después de cinco semanas de interrupción en el entrenamiento, se calcula que corresponde a una reducción en la velocidad de pedaleo de 1,3  $km \cdot h^{-1}$  en una carrera de 1 hora (Bassett *et al.*, 1999). Por ello, hay pocas dudas sobre las consecuencias de la interrupción del entrenamiento sobre el rendimiento.

En los resultados fisiológicos hubo mayores disminuciones ( $P < 0,05$ ) en los cambios relativos (en relación la masa corporal) que en los cambios absolutos (Figura 27). Esta diferencia tiene relación con el aumento de masa corporal ( $15,1 \pm 23,7\%$ ,  $P = 0,16$ ) en T4. Es bien sabido que la masa corporal, y específicamente la grasa corporal, es un factor clave que limita el rendimiento en resistencia porque determina la resistencia dependiente de la gravedad, con lo que tiene una influencia mayor en el rendimiento en escalada (Padilla *et al.*, 1999). Una limitación clave del presente estudio es la falta de un grupo control que continuara con un programa de entrenamiento reducido. Un estudio previo ha demostrado que una menor intensidad del entrenamiento y un menor volumen, durante 21 días, podrían mantener las adaptaciones fisiológicas, tal como se han medido durante el ejercicio submáximo y máximo (Rietjens *et al.*, 2001).

Teniendo en cuenta que el tiempo necesario para recuperar o conseguir mejoras desde la vuelta al entrenamiento después del cese del entrenamiento es considerablemente más largo que aquel en el que se suceden las pérdidas generadas por la falta de entrenamiento (Godfrey *et al.*, 2005), se necesita programar algún estímulo de resistencia en el período de fuera de temporada para minimizar las pérdidas en las variables fisiológicas y de rendimiento en los ciclistas de alto nivel. Es evidente que, durante el descanso posterior a la temporada de competición, es necesario un estímulo de entrenamiento alternativo que incluya ejercicios que impliquen los mismos grupos musculares que en la actividad competitiva, para mantener las adaptaciones metabólicas al entrenamiento (Bosquet y Mujika, 2012).

## **Conclusiones**

En ciclistas jóvenes de alto nivel, cinco semanas de interrupción del entrenamiento generan grandes disminuciones en las variables hematológicas y fisiológicas submáximas y máximas. Este perjuicio a largo plazo es más pronunciado cuando se expresa en relación con la masa corporal mediante escalamiento alométrico, lo cual enfatiza la relevancia de la masa corporal del ciclista y su influencia sobre el rendimiento. Esto indica que el descanso en el entrenamiento debería ser más breve y que debería implementarse un programa de mantenimiento para evitar una disminución tan grande en los valores fisiológicos en los ciclistas jóvenes que aspiran a convertirse en profesionales. Interpretamos estos hallazgos como consistentes con investigaciones previas en otros deportes, insistiendo en la importancia de establecer la carga de entrenamiento óptima en cada fase del plan de entrenamiento para evitar pérdidas excesivas del rendimiento.

# Capítulo 9.

Conclusiones



### 9.1. Conclusiones generales al finalizar las cuatro etapas

- La sobrestimación de la APCB en la FPN y en la PCM con la FPN indica que esta técnica podría no utilizarse para predecir la APCB en estas dos posiciones corporales. Por el contrario, los resultados similares de la APCB en la PMM, obtenida con los métodos FPN y PC, y la correlación positiva entre ellas, implica que la FPN podría utilizarse para obtener con precisión la APCB en esta posición corporal.
- En cuanto a las diferencias entre las posiciones corporales, se descubrió que se obtuvo la APCB superior con ambos métodos en la PPF, y que se obtuvo la APCB menor con el método PC en la PCM. No obstante, la ausencia de diferencias significativas en la APCB, entre la PCM y la PMM, obtenidas con la FPN, indica que este método no es suficientemente sensible para apreciar las diferencias en la APCB que se observan con el método PC.
- Los resultados de este estudio demuestran que la relación entre los parámetros que caracterizan la técnica de pedaleo y la eficiencia metabólica durante una prueba ciclista progresiva en laboratorio, en la que se tuvieron en cuenta las diferencias fisiológicas inter-individuales, depende de la intensidad del ejercicio: (1) no se observó ninguna relación a la intensidad por debajo de la generación de potencia en la que se produjo el LT; (2) a la intensidad del ejercicio en que apareció el LT, una fuerza de torsión media superior y una mayor uniformidad de la distribución del torque fueron más eficientes metabólicamente; (3) a la intensidad en que aparece el OBLA, una fuerza de torsión media superior y una menor cadencia de pedaleo fueron más eficientes metabólicamente.
- La GE de los ciclistas sub-23 es menor que la GE observada en ciclistas de mayor edad, y no varía durante la fase más importante de la temporada de competición (es decir, de abril a julio). Además, la GE no correlacionó significativamente con el  $VO_{2max}$ . La menor cantidad de volumen e intensidad de entrenamiento en los ciclistas más jóvenes puede explicar su GE menor, en comparación con los ciclistas profesionales de mayor edad, y esta ausencia de entrenamiento no produjo mayores incrementos de la GE en ciclistas con un  $VO_{2max}$  menor.
- En ciclistas jóvenes de alto nivel, cinco semanas de interrupción del entrenamiento generan marcadas disminuciones en las variables hematológicas y fisiológicas submáximas y máximas. Este perjuicio a largo plazo es más pronunciado cuando se expresa en relación con la masa corporal mediante escalamiento alométrico, lo cual enfatiza la relevancia de la masa corporal del

ciclista y su influencia sobre el rendimiento. Esto indica que el descanso en el entrenamiento debería ser más breve y que debería implementarse un programa de mantenimiento para evitar una disminución tan grande en los valores fisiológicos en los ciclistas jóvenes que aspiran a convertirse en profesionales. Interpretamos estos hallazgos como consistentes con investigaciones previas en otros deportes, insistiendo en la importancia de establecer la carga de entrenamiento óptima en cada fase del plan de entrenamiento para evitar pérdidas excesivas del rendimiento.

## 9.2. Aplicaciones prácticas para el entrenamiento

El ciclismo es un deporte en el que una mayor eficiencia de trabajo se transforma en un aumento del rendimiento y en un mejor resultado deportivo. Muchas veces, con algunas intervenciones simples, se puede buscar esa mejora de la eficiencia y su consecuente aumento del rendimiento, especialmente enfocado para equipos y categorías que no disponen de grandes recursos económicos.

El estudio ligado al análisis de la PC demuestra que este tipo de análisis es una herramienta muy útil para analizar el área frontal de los ciclistas: resulta interesante para realizar un análisis grupal y observar diferencias entre ciclistas de un mismo equipo, como para analizar los efectos del cambio de posición en el área frontal, que se ha demostrado determinante en la mejora aerodinámica: la disminución del área frontal es sinónimo de una mejora del rendimiento con el mismo coste, es decir, se producirá mayor potencia y desarrollará mayor velocidad con la misma intensidad de trabajo o mismo gasto energético. La PC no ofrece información tan precisa como la que se obtiene del análisis en un túnel de viento, pero en categorías inferiores será una herramienta muy al alcance de cualquiera. Además, resulta útil para que los ciclistas jóvenes puedan sensibilizarse con la importancia de la aerodinámica para el ciclismo.

El saber qué factores relacionados con la técnica de pedaleo influyen en el rendimiento, y sobre todo a intensidades tan importantes en el ciclismo como la intensidad en LT1 y LT2, hace que los ciclistas sean conscientes de su importancia y traten de mejorar este factor. El problema es que, debido a la falta de medidores de potencia del entrenamiento en esa época, hace que el análisis del torque durante el entrenamiento sea imposible de controlar. De todos modos, hoy en día se pueden analizar factores de eficiencia de pedalada (efectividad de par o suavidad de pedalada) durante el entrenamiento en dispositivos como el Garmin, o análisis más exhaustivos en Software de WKO5+, como el GPA (*Gross Power Absorbed* – Potencia Absorbida Bruta) o GPR (*Gross Power Released* - Potencia Liberada Bruta) en cada ciclo de pedalada.

El estudio de desentrenamiento fue un gran hallazgo para entrenadores que trabajan con ciclistas en edades de desarrollo. Quizás siguiendo un patrón de planificación de categorías profesionales, está bastante estandarizado que los ciclistas hagan un periodo de descanso de 4-5 semanas de inactividad. Las pérdidas a nivel fisiológico, junto con el aumento de la masa corporal, hace que las pérdidas en valores absolutos y sobre todo relativos sean muy grandes. Es por ello, que en temporadas posteriores se empezó a introducir una fase de descanso relativa con 2-3 sesiones semanales de trabajo de libre elección (caminar, natación, frontón...), siempre con volúmenes bajos y tratando de que la intensidad fuese también moderada. No hubo posibilidad de registrar datos sobre lo mencionado, pero la sensación de los ciclistas fue de una adaptación mucho más rápida con respecto a la anterior temporada.





# **Capítulo 10.**

Limitaciones del trabajo y propuestas de futuro



### 10.1. Limitaciones potenciales del trabajo

Una de las mayores limitaciones del trabajo ha sido poder contar con una muestra de participantes más amplia. Resulta muy difícil contar con deportistas de alto rendimiento dispuestos a ser testados en diferentes momentos de la temporada. Se pretendía conseguir una muestra de participantes homogénea, es decir, ciclistas hombres jóvenes de alto rendimiento y categoría sub-23; todos los ciclistas que participaron de forma voluntaria eran miembros del mismo equipo ciclista o habían pertenecido a él, y trabajaban con el mismo preparador físico (autor de la presente tesis doctoral).

A esto se debe añadir que durante la temporada algunos ciclistas pueden sufrir lesiones y no estar disponibles en el momento que se llevan a cabo las pruebas de valoración de los estudios de investigación, o también ocurre que al final del año cambian de equipo o de categoría y no resulta posible que continúen participando en el estudio. Debido a estos agravantes, la  $n$  disminuyó a medida que avanzó la temporada, como se puede observar comparando la *Etapa 1* sobre el análisis de la planimetría computarizada ( $n=19$ ) con la *Etapa 4* sobre los efectos del desentrenamiento ( $n=10$ ).

Otro factor que dificultó entender mejor los resultados de algunos estudios fue el no poder contar con la carga de trabajo exacta, debido a que los participantes utilizaron medidores de carga diferentes (e.g., Polar, Garmin, SRM o PowerTap), además de que algunos ciclistas no fueron lo suficientemente metódicos con la recogida y almacenamiento de archivos de entrenamiento. Todo ello hizo que resultara imposible tener una recogida de datos de las cargas exactas de trabajo de todos los participantes en la temporada completa; un mejor registro del volumen e intensidad de trabajo, quizás hubiese ayudado a entender mejor los datos y obtener conclusiones más claras.

### 10.2. Futuras líneas de investigación

Varios de los ciclistas que fueron analizados en este proyecto de investigación dieron el salto a la categoría profesional ( $n=8$ ), siendo algunos de ellos capacitados para participar en la categoría World Tour ( $n=6$ ) y estando aún en activo.

Sería muy interesante tener la oportunidad de poder valorar a estos ciclistas y observar la evolución que hayan podido experimentar después de 10-12 años participando en alta competición. Las siguientes son algunas de las preguntas de investigación que resultaría interesante responder, teniendo como base los estudios desarrollados en el presente proyecto:

- Analizar mediante la PC si hay cambios debido a un cambio de MC después de tantos años de trabajo.

- Analizar factores biomecánicos y evolución de la pedalada, comprobando si es más efectiva o no después de este periodo.
- Análisis fisiológico de factores máximos como  $FC_{max}$ ,  $[La]_{max}$ ,  $VO_{2max}$ ,  $W_{max}$  o valores submáximos como la potencia y la FC en LT y OBLA.
- Analizar la GE y su relación con el  $VO_{2max}$  después de este periodo de ciclismo de máximo nivel.

# Capítulo 11.

Referencias bibliográficas



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmetov, I. I., y Fedotovskaya, O. N. (2015). Current progress in sports genomics. En G. S. Makowski (Ed.), *Advances in Clinical Chemistry* (Vol. 70, pp. 247-314). DOI: 10.1016/bs.acc.2015.03.003
- Algarra, J. L., y Gorrotxategi, A. (1996). El ciclista y su mundo. En *Ciclismo total - 1. Fundamentos del Ciclismo*. Grada Gymnos.
- Algarra, J. L., y Gorrotxategi, A. (2012). *El entrenamiento en el ciclismo de ruta. Competición y ciclodeportistas. Nuevas tecnologías*. Biocorp Europa.
- Allen, H., y Coggan, A. (2014). *Entrenar y correr con potenciómetro*. Editorial Paidotribo México.
- Arkesteijn, M., Jobson, S. A., Hopker, J., y Passfield, L. (2013). Effect of gradient on cycling gross efficiency and technique. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(5), 920-926. DOI: 10.1249/MSS.0b013e31827d1bdb
- Arratibel-Imaz, I., Calleja-González, J., Emparanza, J. I., Terrados, N., Mjaanes, J. M., y Ostojic, S. M. (2016). Lack of concordance amongst measurements of individual anaerobic threshold and maximal lactate steady state on a cycle ergometer. *Physician and Sportsmedicine*, 44(1), 34-45. DOI: 10.1080/00913847.2016.1122501
- Astrand, P. O., Cuddy, T. E., Saltin, B., y Stenberg, J. (1964). Cardiac output during submaximal and maximal work. *Journal of Applied Physiology*, 19, 268-274. DOI: 10.1152/jappl.1964.19.2.268
- Atkinson, G., Davison, R., Jeukendrup, A., y Passfield, L. (2003). Science and cycling: current knowledge and future directions for research. *Journal of Sports Sciences*, 21(9), 767-787. DOI: 10.1080/0264041031000102097
- Barbeau, P., Serresse, O., y Boulay, M. R. (1993). Using maximal and submaximal aerobic variables to monitor elite cyclists during a season. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(9), 1062-1069.
- Barranco, D., y Murillo, E. (2021). Factores determinantes del rendimiento en ciclismo en carretera.
- Barry, N., Burton, D., Sheridan, J., Thompson, M., y Brown, N. A. T. (2014). Aerodynamic performance and riding posture in road cycling and triathlon. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 229(1), 28-38. DOI: 10.1177/1754337114549876
- Bassett, D. R., Jr., y Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 70-84. DOI: 10.1097/00005768-200001000-00012
- Bassett, D. R., Jr., Kyle, C. R., Passfield, L., Broker, J. P., y Burke, E. R. (1999). Comparing cycling world hour records, 1967-1996: modeling with empirical data. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(11), 1665-1676. DOI: 10.1097/00005768-199911000-00025

- Baum, B. S., y Li, L. (2003). Lower extremity muscle activities during cycling are influenced by load and frequency. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(2), 181-190. DOI: 10.1016/s1050-6411(02)00110-4
- Beaver, W. L., Wasserman, K., y Whipp, B. J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* (1985), 60(6), 2020-2027. DOI: 10.1152/jappl.1986.60.6.2020
- Bell, P. G., Furber, M. J., Van Someren, K. A., Antón-Solanas, A., y Swart, J. (2017). The physiological profile of a multiple Tour de France winning cyclist. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49(1), 115-123. DOI: 10.1249/mss.0000000000001068
- Beneke, R., Hütler, M., y Leithäuser, R. M. (2000). Maximal lactate-steady-state independent of performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(6), 1135-1139. DOI: 10.1097/00005768-200006000-00016
- Bentley, D. J., McNaughton, L. R., Thompson, D., Vleck, V. E., y Batterham, A. M. (2001). Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(12), 2077-2081. DOI: 10.1097/00005768-200112000-00016
- Bentley, D. J., Newell, J., y Bishop, D. (2007). Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Medicine*, 37(7), 575-586. DOI: 10.2165/00007256-200737070-00002
- Bentley, D. J., Wilson, G. J., Davie, A. J., y Zhou, S. (1998). Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 38(3), 201-207.
- Bertucci, W. M., Betik, A. C., Duc, S., y Grappe, F. (2012). Gross efficiency and cycling economy are higher in the field as compared with on an Axiom stationary ergometer. *Journal of Applied Biomechanics*, 28(6), 636-644. DOI: 10.1123/jab.28.6.636
- Billat, V. L., Sirvent, P., Py, G., Koralsztein, J. P., y Mercier, J. (2003). The concept of maximal lactate steady state: a bridge between biochemistry, physiology and sport science. *Sports Medicine*, 33(6), 407-426. DOI: 10.2165/00007256-200333060-00003
- Binder, R. K., Wonisch, M., Corra, U., Cohen-Solal, A., Vanhees, L., Saner, H., y Schmid, J. P. (2008). Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation*, 15(6), 726-734. DOI: 10.1097/HJR.0b013e328304fed4
- Bini, R., Carpes, F., y Diefenthaler, F. (2009). Effects of knee frontal plane position on pedal forces during cycling: A preliminary study. *Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano*, 11.
- Bini, R., y Priego-Quesada, J. (2022). Methods to determine saddle height in cycling and implications of changes in saddle height in performance and injury risk: A systematic review. *Journal of Sports Sciences*, 40(4), 386-400. DOI: 10.1080/02640414.2021.1994727
- Bini, R. R., y Carpes, F. P. (2014). *Biomechanics of cycling*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-05539-8



- Bini, R. R., y Diefenthaler, F. (2010). Kinetics and kinematics analysis of incremental cycling to exhaustion. *Sports Biomechanics*, 9(4), 223-235. DOI: 10.1080/14763141.2010.540672
- Borszcz, F. K., Tramontin, A. F., Bossi, A. H., Carminatti, L. J., y Costa, V. P. (2018). Functional threshold power in cyclists: validity of the concept and physiological responses. *International Journal of Sports Medicine*, 39(10), 737-742. DOI: 10.1055/s-0044-101546
- Bosquet, L., Léger, L., y Legros, P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Medicine*, 32(11), 675-700. DOI: 10.2165/00007256-200232110-00002
- Bosquet, L., y Mujika, I. (2012). Detraining. En I. Mujika (Ed.), *Endurance training: Science and Practice* (1 ed., pp. 99-106). Iñigo Mujika S.L.U.
- Bouchard, C., An, P., Rice, T., Skinner, J. S., Wilmore, J. H., Gagnon, J., ... Rao, D. C. (1999). Familial aggregation of VO<sub>2</sub>max response to exercise training: results from the HERITAGE Family Study. *Journal of Applied Physiology*, 87(3), 1003-1008. DOI: 10.1152/jappl.1999.87.3.1003
- Boyd, T. F., Neptune, R. R., y Hull, M. L. (1997). Pedal and knee loads using a multi-degree-of-freedom pedal platform in cycling. *Journal of Biomechanics*, 30(5), 505-511. DOI: 10.1016/s0021-9290(96)00152-2
- Broxterman, R. M., Craig, J. C., y Richardson, R. S. (2018). The respiratory compensation point and the deoxygenation break point are not valid surrogates for critical power and maximum lactate steady state. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 50(11), 2379-2382. DOI: 10.1249/MSS.0000000000001699
- Buskirk, E. R., y Hodgson, J. L. (1987). Age and aerobic power: the rate of change in men and women. *Federation Proceedings*, 46(5), 1824-1829.
- Candau, R. B., Grappe, F., Menard, M., Barbier, B., Millet, G. Y., Hoffman, M. D., ... Rouillon, J. D. (1999). Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(10), 1441-1447. DOI: 10.1097/00005768-199910000-00013
- Candotti, C. T., Ribeiro, J., Soares, D. P., De Oliveira, A. R., Loss, J. F., y Guimaraes, A. C. (2007). Effective force and economy of triathletes and cyclists. *Sports Biomechanics*, 6(1), 31-43. DOI: 10.1080/14763140601058490
- Cannon, D. T., Kolkhorst, F. W., y Cipriani, D. J. (2007). Effect of pedaling technique on muscle activity and cycling efficiency. *European Journal of Applied Physiology*, 99(6), 659-664. DOI: 10.1007/s00421-006-0391-6
- Capelli, C., Rosa, G., Butti, F., Ferretti, G., Veicsteinas, A., y di Prampero, P. E. (1993). Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 67(2), 144-149. DOI: 10.1007/BF00376658
- Cardoso Marques, M. A., y Gonzalez-Badillo, J. J. (2006). In-season resistance training and detraining in professional team handball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(3), 563-571.

- Carpes, F. P., Mota, C. B., y Faria, I. E. (2010). On the bilateral asymmetry during running and cycling - a review considering leg preference. *Physical Therapy in Sport* 11(4), 136-142. DOI: 10.1016/j.ptsp.2010.06.005
- Castronovo, A. M., Conforto, S., Schmid, M., Bibbo, D., y D'Alessio, T. (2013). How to assess performance in cycling: the multivariate nature of influencing factors and related indicators. *Frontiers in Physiology*, 4, 116, Article 116. DOI: 10.3389/fphys.2013.00116
- Chamari, K., y Padulo, J. (2015). 'Aerobic' and 'Anaerobic' terms used in exercise physiology: a critical terminology reflection. *Sports Med Open*, 1(1), 9. DOI: 10.1186/s40798-015-0012-1
- Charkoudian, N., y Joyner, M. J. (2004). Physiologic considerations for exercise performance in women. *Clinics in Chest Medicine*, 25(2), 247-255. DOI: 10.1016/j.ccm.2004.01.001
- Chavarren, J., y Calbet, J. A. (1999). Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 80(6), 555-563. DOI: 10.1007/s004210050634
- Coast, J. R., y Welch, H. G. (1985). Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 53(4), 339-342. DOI: 10.1007/BF00422850
- Conley, D. L., y Krahenbuhl, G. S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(5), 357-360.
- Costan, R., y Pantea, C. (2010). Electromyography assesment of muscles involved in a pedal cycle. *Timisoara Physical Education and Rehabilitation Journal*, 2(4), 29-36.
- Costill, D. L., Fink, W. J., y Pollock, M. L. (1976). Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Medicine and Science in Sports*, 8(2), 96-100.
- Coyle, E. F. (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *Journal of Applied Physiology*, 98(6), 2191-2196. DOI: 10.1152/jappphysiol.00216.2005
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., . . . Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(1), 93-107.
- Coyle, E. F., Hemmert, M. K., y Coggan, A. R. (1986). Effects of detraining on cardiovascular responses to exercise: role of blood volume. *Journal of Applied Physiology*, 60(1), 95-99. DOI: 10.1152/jappl.1986.60.1.95
- Coyle, E. F., Martin, W. H., 3rd, Sinacore, D. R., Joyner, M. J., Hagberg, J. M., y Holloszy, J. O. (1984). Time course of loss of adaptations after stopping prolonged intense endurance training. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 57(6), 1857-1864. DOI: 10.1152/jappl.1984.57.6.1857

- Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Horowitz, J. F., y Beltz, J. D. (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type-I muscle-fibers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(7), 782-788.
- Craig, J. C., Broxterman, R. M., y Barstow, T. J. (2015). Considerations for Identifying the Boundaries of Sustainable Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(9), 1997. DOI: 10.1249/mss.0000000000000676
- Crouch, T. N., Burton, D., LaBry, Z. A., y Blair, K. B. (2017). Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics. *Sports Engineering*, 20(2), 81-110. DOI: 10.1007/s12283-017-0234-1
- Cusick, T., y Coggan, A. (s.f.). *An overview of WKO's power-duration model*. WKO.
- Czuba, M., Maszczyk, A., Gerasimuk, D., Roczniok, R., Fidos-Czuba, O., Zajac, A., . . . Langfort, J. (2014). The effects of hypobaric hypoxia on erythropoiesis, maximal oxygen uptake and energy cost of exercise under normoxia in elite biathletes. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13(4), 912-920.
- Davis, J. A., Vodak, P., Wilmore, J. H., Vodak, J., y Kurtz, P. (1976). Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *Journal of Applied Physiology*, 41(4), 544-550. DOI: 10.1152/jappl.1976.41.4.544
- de Lucas Rogero, I., Fernández Alba, J., y Carabantes, A. (2022). *Perfil de potencia record en ciclismo: valores de referencia en categorías inferiores*. <https://fmciclismo.com/index.php/es/smartweb/seccion/noticia/madrid/ultimas-formacion/47345-Perfil-de-potencia-record-en-ciclismo-Valores-de-referencia-en-categorias-inferiores>
- De Pauw, K., Roelands, B., Cheung, S. S., de Geus, B., Rietjens, G., y Meeusen, R. (2013). Guidelines to classify subject groups in sport-science research. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(2), 111-122. DOI: 10.1123/ijsp.8.2.111
- Debraux, P., Bertucci, W., Manolova, A. V., Rogier, S., y Lodini, A. (2009). New method to estimate the cycling frontal area. *International Journal of Sports Medicine*, 30(4), 266-272. DOI: 10.1055/s-0028-1105940
- Denham, J., Scott-Hamilton, J., Hagstrom, A. D., y Gray, A. J. (2020). Cycling power outputs predict functional threshold power and maximum oxygen uptake. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(12), 3489-3497. DOI: 10.1519/jsc.0000000000002253
- di Prampero, P. E. (2000). Cycling on Earth, in space, on the Moon. *European Journal of Applied Physiology*, 82(5-6), 345-360. DOI: 10.1007/s004210000220
- di Prampero, P. E. (2003). Factors limiting maximal performance in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 90(3-4), 420-429. DOI: 10.1007/s00421-003-0926-z
- di Prampero, P. E., Cortili, G., Mognoni, P., y Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 47(1), 201-206. DOI: 10.1152/jappl.1979.47.1.201

- Domínguez, R., Garnacho-Castaño, M., y Maté-Muñoz, J. (2015). Metodología de determinación de la transición aeróbica-anaeróbica en la evaluación funcional. *Archivos de Medicina del Deporte*, 32, 395-401.
- Du Bois, D., y Du Bois, E. F. (1916). Clinical calorimetry: tenth paper a formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Archives of Internal Medicine*, 17(6\_2), 863-871. DOI: 10.1001/archinte.1916.00080130010002
- Duncan, G. E., Howley, E. T., y Johnson, B. N. (1997). Applicability of VO<sub>2</sub>max criteria: discontinuous versus continuous protocols. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(2), 273-278. DOI: 10.1097/00005768-199702000-00017
- Ebert, T. R., Martin, D. T., McDonald, W., Victor, J., Plummer, J., y Withers, R. T. (2005). Power output during women's World Cup road cycle racing. *European Journal of Applied Physiology*, 95(5-6), 529-536. DOI: 10.1007/s00421-005-0039-y
- Edwards, L. M., Jobson, S. A., George, S. R., Day, S. H., y Nevill, A. M. (2009). Whole-body efficiency is negatively correlated with minimum torque per duty cycle in trained cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 27(4), 319-325, Article Pii 907925459. DOI: 10.1080/02640410802526916
- Ericson, M. (1986). On the biomechanics of cycling. A study of joint and muscle load during exercise on the bicycle ergometer. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine. Supplement*, 16, 1-43.
- Ericson, M. O. (1984). *Varus and valgus loads on the knee joint during ergometer cycling* (Vol. 6).
- Eskurza, I., Donato, A. J., Moreau, K. L., Seals, D. R., y Tanaka, H. (2002). Changes in maximal aerobic capacity with age in endurance-trained women: 7-yr follow-up. *Journal of Applied Physiology*, 92(6), 2303-2308. DOI: 10.1152/jappphysiol.01124.2001
- Ettema, G., y Loras, H. W. (2009). Efficiency in cycling: a review. *European Journal of Applied Physiology*, 106(1), 1-14. DOI: 10.1007/s00421-009-1008-7
- Faria, E. W. (2009). Recent advances in specific training for cycling. *International Sportmed Journal*, 10(1), 16-32.
- Faria, E. W., Parker, D. L., y Faria, I. E. (2005a). The science of cycling: factors affecting performance - part 2. *Sports Medicine*, 35(4), 313-337. DOI: 10.2165/00007256-200535040-00003
- Faria, E. W., Parker, D. L., y Faria, I. E. (2005b). The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Medicine*, 35(4), 285-312. DOI: 10.2165/00007256-200535040-00002
- Faria, I., y Cavanagh, P. R. (1978). *The physiology and biomechanics of cycling*. Wiley.
- Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Billing, J. E., y Costill, D. L. (1979). Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Medicine and Science in Sports*, 11(4), 338-344.

- Faude, O., Kindermann, W., y Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Medicine*, 39(6), 469-490. DOI: 10.2165/00007256-200939060-00003
- Fernandez-Rodriguez, E., Romero Ramos, O., Merino-Marban, R., y Cañas, A. (2019). Umbral Anaeróbico. Problemas conceptuales y aplicaciones prácticas en deportes de resistencia. *Retos*, 36, 521-528. DOI: 10.47197/retos.v36i36.61883
- Ferrer-Roca, V., Rivero-Palomo, V., Ogueta-Alday, A., Rodríguez-Marroyo, J. A., y García-López, J. (2017). Acute effects of small changes in crank length on gross efficiency and pedalling technique during submaximal cycling. *Journal of Sports Sciences*, 35(14), 1328-1335. DOI: 10.1080/02640414.2016.1215490
- Fitzgerald, M. D., Tanaka, H., Tran, Z. V., y Seals, D. R. (1997). Age-related declines in maximal aerobic capacity in regularly exercising vs. sedentary women: a meta-analysis. *Journal of Applied Physiology*, 83(1), 160-165. DOI: 10.1152/jappl.1997.83.1.160
- Fonda, B. Š., Nejc. (2012). Biomechanics and energetics of uphill cycling: a review. *Kinesiology*, 44(1), 5-17.
- Fox, R. W., y McDonald, A. T. (1973). *Introduction of fluid mechanics* (H. Wiley, Ed.). Mitchell, J.W.
- Gaesser, G. A., y Brooks, G. A. (1975). Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *Journal of Applied Physiology*, 38(6), 1132-1139. DOI: 10.1152/jappl.1975.38.6.1132
- Galán-Rioja, M., González-Mohino, F., Poole, D. C., y González-Ravé, J. M. (2020). Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(10), 1771-1783. DOI: 10.1007/s40279-020-01314-8
- Gallo, G., Filipas, L., Tornaghi, M., Garbin, M., Codella, R., Lovecchio, N., y Zaccaria, D. (2021). Thresholds power profiles and performance in youth road cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(7), 1049-1051. DOI: 10.1123/ijsp.2020-0579
- García López, J. (2009). Valoración biomecánica I. En *Medicina y fisiología del ciclismo* (Vol. 1, Cap. 3.3, pp. 532-631). Badalona, Barcelona : Nexus Médica, 2009-2010.
- García López, J., Peleteiro López, J., Rodríguez Marroyo, J. A., Friend Monasterio, E., González Hernández, M. Á., Córdova Martínez, A., y Villa Vicente, J. G. (2002). Influencia de la postura y la utilización del casco en la resistencia aerodinámica del ciclista. *Archivos de Medicina del Deporte*, 19(89), 209-220.
- García-López, J., Díez-Leal, S., Ogueta-Alday, A., Larrazabal, J., y Rodríguez-Marroyo, J. A. (2016). Differences in pedalling technique between road cyclists of different competitive levels. *Journal of Sports Sciences*, 34(17), 1619-1626. DOI: 10.1080/02640414.2015.1127987
- García-Pallares, J., Sánchez-Medina, L., Pérez, C. E., Izquierdo-Gabarrén, M., y Izquierdo, M. (2010). Physiological effects of tapering and detraining in world-class kayakers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(6), 1209-1214. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3181c9228c

- García-Tabar, I., y Gorostiaga, E. M. (2019). Considerations regarding maximal lactate steady state determination before redefining the gold-standard. *Physiol Rep*, 7(22), e14293. DOI: 10.14814/phy2.14293
- García-Tabar, I., y Gorostiaga, E. M. (2021). Comment on: "Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: systematic review and meta-analysis". *Sports Medicine*, 51(9), 2011-2013. DOI: 10.1007/s40279-021-01497-8
- Giada, F., Bertaglia, E., De Piccoli, B., Franceschi, M., Sartori, F., Raviele, A., y Pascotto, P. (1998). Cardiovascular adaptations to endurance training and detraining in young and older athletes. *International Journal of Cardiology*, 65(2), 149-155. DOI: 10.1016/s0167-5273(98)00102-8
- Godfrey, R. J., Ingham, S. A., Pedlar, C. R., y Whyte, G. P. (2005). The detraining and retraining of an elite rower: a case study. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 8(3), 314-320. DOI: 10.1016/s1440-2440(05)80042-8
- Gorostiaga, E. M., Sánchez-Medina, L., y García-Tabar, I. (2022). Over 55 years of critical power: fact or artifact? *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 32(1), 116-124. DOI: 10.1111/sms.14074
- Grappe, F., Candau, R., Belli, A., y Rouillon, J. D. (1997). Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics*, 40(12), 1299-1311. DOI: 10.1080/001401397187388
- Green, H. J., Roy, B., Grant, S., Hughson, R., Burnett, M., Otto, C., . . . Johnson, M. (2000). Increases in submaximal cycling efficiency mediated by altitude acclimatization. *Journal of Applied Physiology*, 89(3), 1189-1197. DOI: 10.1152/jappl.2000.89.3.1189
- Gregor, R. J., Broker, J. P., y Ryan, M. M. (1991). The biomechanics of cycling. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 19, 127-169.
- Gregor, R. J., y Wheeler, J. B. (1994). Biomechanical factors associated with shoe/pedal interfaces. Implications for injury. *Sports Medicine*, 17(2), 117-131. DOI: 10.2165/00007256-199417020-00004
- Gronek, P., Holdys, J., Krysiak, J., y Stanislawski, D. (2013). CKM Gene G (Ncoi-) allele has a positive effect on maximal oxygen uptake in caucasian women practicing sports requiring aerobic and anaerobic exercise metabolism. *Journal of Human Kinetics*, 39(1), 137-145. DOI: 10.2478/hukin-2013-0076
- Gross, A. C., Kyle, C. R., y Malewicki, D. J. (1983). The aerodynamics of human-powered land vehicles. *Scientific American*, 249(6), 142-152. DOI: 10.1038/scientificamerican1283-142
- Gutierrez, M. (1994). Biomecánica y ciclismo. *Revista Motricidad*, 1, 77-94.
- Hagberg, J. M., y Coyle, E. F. (1983). Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive racewalkers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 15(4), 287-289. DOI: 10.1249/00005768-198315040-00006

- Hagberg, J. M., Moore, G. E., y Ferrell, R. E. (2001). Specific genetic markers of endurance performance and VO<sub>2</sub>max. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 29(1), 15-19. DOI: 10.1097/00003677-200101000-00004
- Hagberg, J. M., Mullin, J. P., Giese, M. D., y Spitznagel, E. (1981). Effect of pedaling rate on submaximal exercise responses of competitive cyclists. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 51(2), 447-451. DOI: 10.1152/jappl.1981.51.2.447
- Hahn, A. G., y Gore, C. J. (2001). The effect of altitude on cycling performance: a challenge to traditional concepts. *Sports Medicine*, 31(7), 533-557. DOI: 10.2165/00007256-200131070-00008
- Harriss, D. J., y Atkinson, G. (2009). International Journal of Sports Medicine - ethical standards in sport and exercise science research. *International Journal of Sports Medicine*, 30(10), 701-702. DOI: 10.1055/s-0029-1237378
- Hawley, J. A., y Noakes, T. D. (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 65(1), 79-83. DOI: 10.1007/bf01466278
- Heath, G. W., Hagberg, J. M., Ehsani, A. A., y Holloszy, J. O. (1981). A physiological comparison of young and older endurance athletes. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 51(3), 634-640. DOI: 10.1152/jappl.1981.51.3.634
- Heil, D. P. (2001). Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 85(3-4), 358-366. DOI: 10.1007/s004210100424
- Heil, D. P. (2002). Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *European Journal of Applied Physiology*, 87(6), 520-528. DOI: 10.1007/s00421-002-0662-9
- Heil, D. P. (2005). Body size as a determinant of the 1-h cycling record at sea level and altitude. *European Journal of Applied Physiology*, 93(5-6), 547-554. DOI: 10.1007/s00421-004-1256-5
- Hernández Moreno, J., González Romero, F., Sánchez Caballero, A., Del Toro Vega, G., Trujillo Moreno, F., y Vega Rodríguez, G. (2001). Análisis de la estrategia motriz deportiva del ciclismo en ruta. *EF deportes*, Año 7(34).
- Hettinga, F. J., De Koning, J. J., de Vrijer, A., Wust, R. C., Daanen, H. A., y Foster, C. (2007). The effect of ambient temperature on gross-efficiency in cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 101(4), 465-471. DOI: 10.1007/s00421-007-0519-3
- Hickson, R. C., Dvorak, B. A., Gorostiaga, E. M., Kurowski, T. T., y Foster, C. (1988). Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *Journal of Applied Physiology*, 65(5), 2285-2290. DOI: 10.1152/jappl.1988.65.5.2285
- Hickson, R. C., Kanakis, C., Jr., Davis, J. R., Moore, A. M., y Rich, S. (1982). Reduced training duration effects on aerobic power, endurance, and cardiac growth. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 53(1), 225-229. DOI: 10.1152/jappl.1982.53.1.225

- Holdys, J., Gronek, P., Krysciak, J., y Stanislawski, D. (2013). Genetic variants of uncoupling proteins-2 and -3 in relation to maximal oxygen uptake in different sports. *Acta Biochimica Polonica*, 60(1), 71-75.
- Holmes, J. C., Pruitt, A. L., y Whalen, N. J. (1994). Lower extremity overuse in bicycling. *Clinics in Sports Medicine*, 13(1), 187-205.
- Hoogeveen, A. R. (2000). The effect of endurance training on the ventilatory response to exercise in elite cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 82(1-2), 45-51. DOI: 10.1007/s004210050650
- Hopker, J., Coleman, D., Jobson, S. A., y Passfield, L. (2012). Inverse relationship between VO<sub>2</sub>max and gross efficiency. *International Journal of Sports Medicine*, 33(10), 789-794. DOI: 10.1055/s-0032-1304640
- Hopker, J., Coleman, D., y Passfield, L. (2009). Changes in cycling efficiency during a competitive season. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(4), 912-919. DOI: 10.1249/MSS.0b013e31818f2ab2
- Hopker, J., Coleman, D., Passfield, L., y Wiles, J. (2010). The effect of training volume and intensity on competitive cyclists' efficiency. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 35(1), 17-22. DOI: 10.1139/H09-124
- Hopker, J., Passfield, L., Coleman, D., Jobson, S., Edwards, L., y Carter, H. (2009). The effects of training on gross efficiency in cycling: a review. *International Journal of Sports Medicine*, 30(12), 845-850. DOI: 10.1055/s-0029-1237712
- Hopker, J. G., Coleman, D. A., Gregson, H. C., Jobson, S. A., Von der Haar, T., Wiles, J., y Passfield, L. (2013). The influence of training status, age, and muscle fiber type on cycling efficiency and endurance performance. *Journal of Applied Physiology*, 115(5), 723-729. DOI: 10.1152/jappphysiol.00361.2013
- Horowitz, J. F., Sidossis, L. S., y Coyle, E. F. (1994). High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *International Journal of Sports Medicine*, 15(3), 152-157. DOI: 10.1055/s-2007-1021038
- Houmard, J. A., Hortobagyi, T., Johns, R. A., Bruno, N. J., Nute, C. C., Shinebarger, M. H., y Welborn, J. W. (1992). Effect of short-term training cessation on performance measures in distance runners. *International Journal of Sports Medicine*, 13(8), 572-576. DOI: 10.1055/s-2007-1024567
- Hug, F., y Dorel, S. (2009). Electromyographic analysis of pedaling: a review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(2), 182-198. DOI: 10.1016/j.jelekin.2007.10.010
- Hughson, R. L., y Green, H. J. (1982). Blood acid-base and lactate relationships studied by ramp work tests. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(4), 297-302. DOI: 10.1249/00005768-198204000-00008
- Hureau, T. J., Romer, L. M., y Amann, M. (2018). The 'sensory tolerance limit': a hypothetical construct determining exercise performance? *Eur J Sport Sci*, 18(1), 13-24. DOI: 10.1080/17461391.2016.1252428



- Iannetta, D., Inglis, E. C., Fullerton, C., Passfield, L., y Murias, J. M. (2018). Metabolic and performance-related consequences of exercising at and slightly above MLSS. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 28(12), 2481-2493. DOI: 10.1111/sms.13280
- Iannetta, D., Ingram, C. P., Keir, D. A., y Murias, J. M. (2022). Methodological reconciliation of CP and MLSS and their agreement with the maximal metabolic steady state. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 54(4), 622-632. DOI: 10.1249/mss.0000000000002831
- Ito, T., Takamata, A., Yaegashi, K., Itoh, T., Yoshida, T., Kawabata, T., ... Morimoto, T. (2001). Role of blood volume in the age-associated decline in peak oxygen uptake in humans. *Japanese Journal of Physiology*, 51(5), 607-612. DOI: 10.2170/jjphysiol.51.607
- Jacobs, I. (1986). Blood lactate. Implications for training and sports performance. *Sports Medicine*, 3(1), 10-25. DOI: 10.2165/00007256-198603010-00003
- Jameson, C., y Ring, C. (2000). Contributions of local and central sensations to the perception of exertion during cycling: effects of work rate and cadence. *Journal of Sports Sciences*, 18(4), 291-298. DOI: 10.1080/026404100365027
- Jamnack, N. A., Botella, J., Pyne, D. B., y Bishop, D. J. (2018). Manipulating graded exercise test variables affects the validity of the lactate threshold and [Formula: see text]. *PloS One*, 13(7), e0199794. DOI: 10.1371/journal.pone.0199794
- Jamnack, N. A., Pettitt, R. W., Granata, C., Pyne, D. B., y Bishop, D. J. (2020). An examination and critique of current methods to determine exercise intensity. *Sports Medicine*, 50(10), 1729-1756. DOI: 10.1007/s40279-020-01322-8
- Jeukendrup, A. E., y Martin, J. (2001). Improving cycling performance: how should we spend our time and money. *Sports Medicine*, 31(7), 559-569. DOI: 10.2165/00007256-200131070-00009
- Jobson, S. A., Hopker, J. G., Korff, T., y Passfield, L. (2012). Gross efficiency and cycling performance: a brief review. *Journal of Science and Cycling*, 1(1), 3-8.
- Jones, A. M., y Burnley, M. (2009). Oxygen uptake kinetics: an underappreciated determinant of exercise performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4(4), 524-532. DOI: 10.1123/ijsp.4.4.524
- Jones, A. M., Burnley, M., Black, M. I., Poole, D. C., y Vanhatalo, A. (2019). The maximal metabolic steady state: redefining the 'gold standard'. *Physiol Rep*, 7(10), e14098. DOI: 10.14814/phy2.14098
- Jones, A. M., y Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Medicine*, 29(6), 373-386. DOI: 10.2165/00007256-200029060-00001
- Joyner, M. J., y Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *Journal of Physiology*, 586(1), 35-44. DOI: 10.1113/jphysiol.2007.143834

- Karlsson, J., y Jacobs, I. (1982). Onset of blood lactate accumulation during muscular exercise as a threshold concept. I. Theoretical considerations. *International Journal of Sports Medicine*, 3(4), 190-201. DOI: 10.1055/s-2008-1026087
- Karsten, B., Petrigna, L., Klose, A., Bianco, A., Townsend, N., y Triska, C. (2021). Relationship between the critical power test and a 20-min functional threshold power test in cycling. *Frontiers in Physiology*, 11(613151). DOI: 10.3389/fphys.2020.613151
- Kasch, F. W., Boyer, J. L., Van Camp, S. P., Verity, L. S., y Wallace, J. P. (1990). The effect of physical activity and inactivity on aerobic power in older men (a longitudinal study). *Physician and Sportsmedicine*, 18(4), 73-83. DOI: 10.1080/00913847.1990.11710022
- Kautz, S. A., Feltner, M. E., Coyle, E. F., y Baylor, A. M. (1991). The pedaling technique of elite endurance cyclists: changes with increasing workload at constant cadence. *International Journal of Sport Biomechanics*, 7(1), 29-53. DOI: 10.1123/ijsb.7.1.29
- Keir, D. A., Fontana, F. Y., Robertson, T. C., Murias, J. M., Paterson, D. H., Kowalchuk, J. M., y Pogliaghi, S. (2015). Exercise intensity thresholds: identifying the boundaries of sustainable performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(9), 1932-1940. DOI: 10.1249/mss.0000000000000613
- Keir, D. A., Mattioni Maturana, F., Iannetta, D., y Murias, J. M. (2021). Comment on: "Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: systematic review and meta-analysis". *Sports Medicine*, 51(2), 367-368. DOI: 10.1007/s40279-020-01365-x
- Kindermann, W., Simon, G., y Keul, J. (1979). The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 42(1), 25-34. DOI: 10.1007/BF00421101
- Kolumbet, A. N., Bazulyuk, T. A., Dudorova, L. Y., Chernovsky, S. M., y Maximovich, N. Y. (2017). Efficiency of the bicycle operation under various tactical variants. *Physical education of students*, 21(5), 219-224. DOI: 10.15561/20755279.2017.0504
- Korff, T., Romer, L. M., Mayhew, I., y Martin, J. C. (2007). Effect of pedaling technique on mechanical effectiveness and efficiency in cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(6), 991-995. DOI: 10.1249/mss.0b013e318043a235
- Koundourakis, N. E., Androulakis, N. E., Malliaraki, N., Tsatsanis, C., Venihaki, M., y Margioris, A. N. (2014). Discrepancy between exercise performance, body composition, and sex steroid response after a six-week detraining period in professional soccer players. *PloS One*, 9(2), e87803, Article e87803. DOI: 10.1371/journal.pone.0087803
- Kristoffersen, M., Gundersen, H., Leirdal, S., y Iversen, V. V. (2014). Low cadence interval training at moderate intensity does not improve cycling performance in highly trained veteran cyclists. *Frontiers in Physiology*, 5, 34, Article 34. DOI: 10.3389/fphys.2014.00034
- Kuipers, H., Verstappen, F. T., Keizer, H. A., Geurten, P., y van Kranenburg, G. (1985). Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiologic correlates. *International Journal of Sports Medicine*, 6(4), 197-201. DOI: 10.1055/s-2008-1025839
- Kyle, C. (1989). The aerodynamics of handlebars and helmets. *Cycling Science*, 1(1), 22-25.

- Kyle, C. (1990). Wind tunnel tests of bicycle wheels and helmets. *Cycling Science*, 2(1), 27-30.
- Kyle, C. R. (2003). Selecting cycling equipment. *High Tech Cycling*.
- LaFortune, M. A., y Cavanagh, P. R. (1983). Cavanagh PReffectiveness and efficiency during bicycle riding. *International Series on Biomechanics*, 928-936.
- Larsen, H. B. (2003). Kenyan dominance in distance running. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 136(1), 161-170. DOI: 10.1016/s1095-6433(03)00227-7
- Leirdal, S., y Ettema, G. (2011a). Pedaling technique and energy cost in cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(4), 701-705. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3181f6b7ea
- Leirdal, S., y Ettema, G. (2011b). The relationship between cadence, pedalling technique and gross efficiency in cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 111(12), 2885-2893. DOI: 10.1007/s00421-011-1914-3
- Leo, P., Spragg, J., Podlogar, T., Lawley, J. S., y Mujika, I. (2022). Power profiling and the power-duration relationship in cycling: a narrative review. *European Journal of Applied Physiology*, 122(2), 301-316. DOI: 10.1007/s00421-021-04833-y
- Levine, B. D. (2008). VO<sub>2</sub>max: what do we know, and what do we still need to know? *Journal of Physiology*, 586(1), 25-34. DOI: 10.1113/jphysiol.2007.147629
- Li, L., y Baum, B. S. (2004). Electromechanical delay estimated by using electromyography during cycling at different pedaling frequencies. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14(6), 647-652. DOI: 10.1016/j.jelekin.2004.04.004
- Lievens, E., Bellinger, P., Van Vossel, K., Vancompernelle, J., Bex, T., Minahan, C., y Derave, W. (2021). Muscle Typology of World-Class Cyclists across Various Disciplines and Events. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 53(4), 816-824. DOI: 10.1249/mss.0000000000002518
- López Chicharro, J., y Fernández Vaquero, A. (2001). *Fisiología del ejercicio*. Editorial Médica Panamericana.
- Lucía, A., Earnest, C., y Arribas, C. (2003). The Tour de France: a physiological review. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 13(5), 275-283. DOI: 10.1034/j.1600-0838.2003.00345.x
- Lucía, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., Gomez-Gallego, F., San Juan, A. F., Santiago, C., . . . Foster, C. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31(5), 530-540. DOI: 10.1139/h06-029
- Lucía, A., Hoyos, J., y Chicharro, J. L. (2001a). Physiology of professional road cycling. *Sports Medicine*, 31(5), 325-337. DOI: 10.2165/00007256-200131050-00004

- Lucía, A., Hoyos, J., y Chicharro, J. L. (2001b). Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(8), 1361-1366. DOI: 10.1097/00005768-200108000-00018
- Lucía, A., Hoyos, J., Pardo, J., y Chicharro, J. L. (2000). Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: a longitudinal study. *Japanese Journal of Physiology*, 50(3), 381-388. DOI: 10.2170/jjphysiol.50.381
- Lucía, A., Hoyos, J., Pérez, M., y Chicharro, J. L. (2000). Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(10), 1777-1782. DOI: 10.1097/00005768-200010000-00018
- Lucía, A., Hoyos, J., Perez, M., Santalla, A., y Chicharro, J. L. (2002). Inverse relationship between VO<sub>2</sub>max and economy/efficiency in world-class cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(12), 2079-2084. DOI: 10.1249/01.MSS.0000039306.92778.DF
- Lucía, A., Pardo, J., Durantez, A., Hoyos, J., y Chicharro, J. L. (1998). Physiological differences between professional and elite road cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 19(5), 342-348. DOI: 10.1055/s-2007-971928
- Lucía, A., San Juan, A. F., Montilla, M., CaNete, S., Santalla, A., Earnest, C., y Perez, M. (2004). In professional road cyclists, low pedaling cadences are less efficient. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(6), 1048-1054. DOI: 10.1249/01.mss.0000128249.10305.8a
- Lusk, G. (1928). *The elements of the science of nutrition*. W. B. Saunders.
- Luttrell, M. D., y Potteiger, J. A. (2003). Effects of short-term training using powercranks on cardiovascular fitness and cycling efficiency. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(4), 785-791. DOI: 10.1519/1533-4287(2003)017<0785:eostup>2.0.co;2
- MacDougall, J. D., Hicks, A. L., MacDonald, J. R., McKelvie, R. S., Green, H. J., y Smith, K. M. (1998). Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training. *Journal of Applied Physiology*, 84(6), 2138-2142. DOI: 10.1152/jappl.1998.84.6.2138
- MacInnis, M. J., Thomas, A. C. O., y Phillips, S. M. (2018). The reliability of 4-min and 20-min time trials and their relationships to functional threshold power in trained cyclists. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1-27. DOI: 10.1123/ijsp.2018-0100
- MacIntosh, B. R., Neptune, R. R., y Horton, J. F. (2000). Cadence, power, and muscle activation in cycle ergometry. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(7), 1281-1287. DOI: 10.1097/00005768-200007000-00015
- Madsen, K., Pedersen, P. K., Djurhuus, M. S., y Klitgaard, N. A. (1993). Effects of detraining on endurance capacity and metabolic changes during prolonged exhaustive exercise. *Journal of Applied Physiology*, 75(4), 1444-1451. DOI: 10.1152/jappl.1993.75.4.1444
- Mansilla, I. (1995). *Conocer el ciclismo*. Gymnos.

- Marín-Pagán, C., Dufour, S., Freitas, T. T., y Alcaraz, P. E. (2021). Performance profile among age categories in young cyclists. *Biology (Basel)*, 10(11). DOI: 10.3390/biology10111196
- Marsh, A. P., y Martin, P. E. (1993). The association between cycling experience and preferred and most economical cadences. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(11), 1269-1274.
- Marsh, A. P., y Martin, P. E. (1995). The relationship between cadence and lower-extremity EMG in cyclists and noncyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27(2), 217-225.
- Martin, J. C., Gardner, A. S., Barras, M. y Martin, D. T. (2006). Aerodynamic drag area of cyclists determined with field-based measures. *Sport Science*, 10, 68-69.
- Martin, J. C., Milliken, D. L., Cobb, J. E., McFadden, K. L., y Coggan, A. R. (1998). Validation of a mathematical model for road cycling power. *Journal of Applied Biomechanics*, 14(3), 276-291. DOI: 10.1123/jab.14.3.276
- McDaniel, J., Durstine, J. L., Hand, G. A., y Martin, J. C. (2002). Determinants of metabolic cost during submaximal cycling. *Journal of Applied Physiology*, 93(3), 823-828. DOI: 10.1152/jappphysiol.00982.2001
- Menaspà, P., Sassi, A., y Impellizzeri, F. M. (2010). Aerobic fitness variables do not predict the professional career of young cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(4), 805-812. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3181ba99bc
- Meyer, T., Lucía, A., Earnest, C. P., y Kindermann, W. (2005). A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters--theory and application. *International Journal of Sports Medicine*, 26 Suppl 1, S38-48. DOI: 10.1055/s-2004-830514
- Mezzani, A., Hamm, L. F., Jones, A. M., McBride, P. E., Moholdt, T., Stone, J. A., . . . Williams, M. A. (2012). Aerobic exercise intensity assessment and prescription in cardiac rehabilitation: a joint position statement of the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation, the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation, and the Canadian Association of Cardiac Rehabilitation. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention*, 32(6), 327-350. DOI: 10.1097/HCR.0b013e3182757050
- Michalczyk, M., Klapcinska, B., Sadowska-Krepa, E., Jagsz, S., Pilis, W., Szoltysek-Boldys, I., . . . Kempa, K. (2008). Evaluation of the blood antioxidant capacity in two selected phases of the training cycle in professional soccer players. *Journal of Human Kinetics*, 19, 93-108.
- Michalczyk, M., Poprzecki, S., Czuba, M., Zydek, G., Jagsz, S., Sadowska-Krepa, E., y Zajac, A. (2015). Blood antioxidant status in road cyclists during progressive (VO<sub>2</sub>max) and constant cyclist intensity test (MLSS). *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 55(9), 855-864.
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., y Jones, A. M. (2007). Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Medicine*, 37(10), 857-880. DOI: 10.2165/00007256-200737100-00003

- Mijovic, B., Ujevic, D., y Baksa, S. (2001). Visualization of anthropometric measures of workers in computer 3D modeling of work place. *Collegium Antropologicum*, 25(2), 639-650.
- Morgan, P. T., Black, M. I., Bailey, S. J., Jones, A. M., y Vanhatalo, A. (2019). Road cycle TT performance: relationship to the power-duration model and association with FTP. *Journal of Sports Sciences*, 37(8), 902-910. DOI: 10.1080/02640414.2018.1535772
- Mornieux, G., Gollhofer, A., y Stapelfeldt, B. (2010). Muscle coordination while pulling up during cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 31(12), 843-846. DOI: 10.1055/s-0030-1263140
- Mornieux, G., Stapelfeldt, B., Gollhofer, A., y Belli, A. (2008). Effects of pedal type and pull-up action during cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 29(10), 817-822. DOI: 10.1055/s-2008-1038374
- Moseley, L., Achten, J., Martin, J. C., y Jeukendrup, A. E. (2004). No differences in cycling efficiency between world-class and recreational cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 25(5), 374-379. DOI: 10.1055/s-2004-815848
- Moseley, L., y Jeukendrup, A. E. (2001). The reliability of cycling efficiency. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(4), 621-627. DOI: 10.1097/00005768-200104000-00017
- Mujika, I. (1998). The influence of training characteristics and tapering on the adaptation in highly trained individuals: a review. *International Journal of Sports Medicine*, 19(7), 439-446. DOI: 10.1055/s-2007-971942
- Mujika, I. (2012). The cycling physiology of Miguel Indurain 14 years after retirement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 7(4), 397-400. DOI: 10.1123/ijsp.7.4.397
- Mujika, I. (2017). Quantification of training and competition loads in endurance sports: methods and applications. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl 2), 9-17. DOI: 10.1123/ijsp.2016-0403
- Mujika, I., y Padilla, S. (2000a). Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I: short term insufficient training stimulus. *Sports Medicine*, 30(2), 79-87. DOI: 10.2165/00007256-200030020-00002
- Mujika, I., y Padilla, S. (2000b). Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part II: long term insufficient training stimulus. *Sports Medicine*, 30(3), 145-154. DOI: 10.2165/00007256-200030030-00001
- Mujika, I., y Padilla, S. (2001). Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports Medicine*, 31(7), 479-487. DOI: 10.2165/00007256-200131070-00003
- Mujika, I., y Padilla, S. (2003). Physiological and performance consequences of training cessation in athletes: detraining. En W. R. Frontera (Ed.), *Rehabilitation of Sports Injuries: Scientific Basis* (pp. 117-143). Blackwell Science.

- Neptune, R. R., Kautz, S. A., y Hull, M. L. (1997). The effect of pedaling rate on coordination in cycling. *Journal of Biomechanics*, 30(10), 1051-1058. DOI: 10.1016/s0021-9290(97)00071-7
- Neumann, G. (1992). Cycling. *Endurance in Sport*.
- Nimmerichter, A. (2018). *Elite youth cycling*. Routledge. DOI: 10.4324/9781315110776
- Nimmerichter, A., Prinz, B., Haselsberger, K., Novak, N., Simon, D., y Hopker, J. G. (2015). Gross efficiency during flat and uphill cycling in field conditions. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(7), 830-834. DOI: 10.1123/ijsp.2014-0373
- Olds, T. (1998). The mathematics of breaking away and chasing in cycling. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 77(6), 492-497. DOI: 10.1007/s004210050365
- Olds, T., y Olive, S. (1999). Methodological considerations in the determination of projected frontal area in cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 17(4), 335-345. DOI: 10.1080/026404199366046
- Olds, T. S., Norton, K. I., y Craig, N. P. (1993). Mathematical model of cycling performance. *Journal of Applied Physiology*, 75(2), 730-737. DOI: 10.1152/jappl.1993.75.2.730
- Olds, T. S., Norton, K. I., Lowe, E. L., Olive, S., Reay, F., y Ly, S. (1995). Modeling road-cycling performance. *Journal of Applied Physiology*, 78(4), 1596-1611. DOI: 10.1152/jappl.1995.78.4.1596
- Olive, S. (1996). *The effect of body size on cycling performance* [Thesis of Master of Sport Sciences, University of New South Wales]. Sydney.
- Ormsbee, M. J., y Arciero, P. J. (2012). Detraining increases body fat and weight and decreases VO<sub>2</sub>peak and metabolic rate. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(8), 2087-2095. DOI: 10.1519/JSC.0b013e31823b874c
- Padilla, S., Mujika, I., Angulo, F., y Goiriena, J. J. (2000). Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *Journal of Applied Physiology*, 89(4), 1522-1527. DOI: 10.1152/jappl.2000.89.4.1522
- Padilla, S., Mujika, I., Cuesta, G., y Goiriena, J. J. (1999). Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(6), 878-885. DOI: 10.1097/00005768-199906000-00017
- Padilla, S., Mujika, I., Orbananos, J., y Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(4), 850-856. DOI: 10.1097/00005768-200004000-00019
- Padilla, S., Mujika, I., Orbananos, J., Santisteban, J., Angulo, F., y Jose Goiriena, J. (2001). Exercise intensity and load during mass-start stage races in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(5), 796-802. DOI: 10.1097/00005768-200105000-00019

- Padilla, S., Mujika, I., Santisteban, J., Impellizzeri, F. M., y Goiriena, J. J. (2008). Exercise intensity and load during uphill cycling in professional 3-week races. *European Journal of Applied Physiology*, 102(4), 431-438. DOI: 10.1007/s00421-007-0602-9
- Pallares, J. G., Moran-Navarro, R., Ortega, J. F., Fernandez-Elias, V. E., y Mora-Rodriguez, R. (2016). Validity and reliability of ventilatory and blood lactate thresholds in well-trained cyclists. *PloS One*, 11(9), e0163389. DOI: 10.1371/journal.pone.0163389
- Passfield, L., y Doust, J. H. (2000). Changes in cycling efficiency and performance after endurance exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(11), 1935-1941. DOI: 10.1097/00005768-200011000-00018
- Pate, R. R., y Kriska, A. (1984). Physiological basis of the sex difference in cardiorespiratory endurance. *Sports Medicine*, 1(2), 87-98. DOI: 10.2165/00007256-198401020-00001
- Paton, C. D., y Hopkins, W. G. (2005). Combining explosive and high-resistance training improves performance in competitive cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(4), 826-830. DOI: 10.1519/R-16334.1
- Patterson, R. P., y Moreno, M. I. (1990). Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(4), 512-516.
- Peinado, A. B., Romero-Parra, N., Rojo-Tirado, M. A., Cupeiro, R., Butragueno, J., Castro, E. A., . . . Benito, P. J. (2018). Physiological profile of an uphill time trial in elite cyclists. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(3), 268-273. DOI: 10.1123/ijsp.2016-0768
- Peinado Lozano, A. B., Benito Peinado, P. J., Díaz Molina, V., González Barbera, C., García Zapico, A., Álvarez Sánchez, M., . . . Calderón Montero, F. J. (2011). Discriminant analysis of the speciality of elite cyclists. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6(3), 480-489. DOI: 10.4100/jhse.2011.63.01
- Pérez-Landaluce, J., Fernández-García, B., Rodríguez-Alonso, M., García-Herrero, F., García-Zapico, P., Patterson, A. M., y Terrados, N. (2002). Physiological differences and rating of perceived exertion (RPE) in professional, amateur and young cyclists. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 42(4), 389-395.
- Pfeiffer, R. (1993). Injuries in NORBA Pro/elite category off-road bicycle competitors. *Cycling Science*, 5(1), 21-24.
- Phillips, K. E., y Hopkins, W. G. (2020). Determinants of cycling performance: a review of the dimensions and features regulating performance in elite cycling competitions. *Sports Med Open*, 6(1), 23. DOI: 10.1186/s40798-020-00252-z
- Pimentel, A. E., Gentile, C. L., Tanaka, H., Seals, D. R., y Gates, P. E. (2003). Greater rate of decline in maximal aerobic capacity with age in endurance-trained than in sedentary men. *Journal of Applied Physiology*, 94(6), 2406-2413. DOI: 10.1152/jappphysiol.00774.2002
- Pinot, J., y Grappe, F. (2011). The record power profile to assess performance in elite cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 32(11), 839-844. DOI: 10.1055/s-0031-1279773



- Pitre, B. (2000). Blood lactate transition thresholds: concepts and controversies. En *Physiological Tests for Elite Athletes* (Vol. Capítulo 4, Cap. 4, pp. 50-65).
- Polishuk, D. A. (1993). *El ciclismo. Preparación, teoría y práctica*. Paidotribo.
- Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B., y Jones, A. M. (2016). Critical power: an important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2320-2334. DOI: 10.1249/mss.0000000000000939
- Racinais, S., Periard, J. D., Karlsen, A., y Nybo, L. (2015). Effect of heat and heat acclimatization on cycling time trial performance and pacing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(3), 601-606. DOI: 10.1249/MSS.0000000000000428
- Ramos-Ortega, J., Domínguez, G., Castillo, J. M., Fernández-Seguín, L., y Munuera, P. V. (2014). Angular position of the cleat according to torsional parameters of the cyclist's lower limb. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 24(3), 251-255. DOI: 10.1097/jsm.0000000000000027
- Rebeggiani, L. (2016). The organization of the cycling calendar. En D. Van Reeth y D. J. Larson (Eds.), *The economics of professional road cycling* (Vol. 11, Cap. 3.1, pp. 17-20). Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-22312-4
- Redfield, R., y Hull, M. L. (1986). On the relation between joint moments and pedalling rates at constant power in bicycling. *Journal of Biomechanics*, 19(4), 317-329. DOI: 10.1016/0021-9290(86)90008-4
- Rietjens, G. J., Keizer, H. A., Kuipers, H., y Saris, W. H. (2001). A reduction in training volume and intensity for 21 days does not impair performance in cyclists. *British Journal of Sports Medicine*, 35(6), 431-434. DOI: 10.1136/bjbm.35.6.431
- Rodas, G., Ventura, J. L., Cadefau, J. A., Cussó, R., y Parra, J. (2000). A short training programme for the rapid improvement of both aerobic and anaerobic metabolism. *European Journal of Applied Physiology*, 82(5-6), 480-486. DOI: 10.1007/s004210000223
- Rodríguez-Marroyo, J. A., García Lopez, J., Avila, C., Jiménez, F., Cordova, A., y Villa Vicente, J. G. (2003). Intensity of exercise according to topography in professional cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(7), 1209-1215. DOI: 10.1249/01.MSS.0000074562.64053.4F
- Rønnestad, B. R., Hansen, E. A., y Raastad, T. (2011). Strength training improves 5-min all-out performance following 185 min of cycling. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21(2), 250-259. DOI: 10.1111/j.1600-0838.2009.01035.x
- Rønnestad, B. R., Hansen, J., Hollan, I., y Ellefsen, S. (2015). Strength training improves performance and pedaling characteristics in elite cyclists. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25(1), e89-98. DOI: 10.1111/sms.12257
- Ruby, P., Hull, M. L., y Hawkins, D. (1992). Three-dimensional knee joint loading during seated cycling. *Journal of Biomechanics*, 25(1), 41-53. DOI: 10.1016/0021-9290(92)90244-u

- Sanderson, D. J. (1991). The influence of cadence and power output on the biomechanics of force application during steady-rate cycling in competitive and recreational cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 9(2), 191-203, Article Pii 785366738. DOI: 10.1080/02640419108729880
- Santalla, A., Earnest, C. P., Marroyo, J. A., y Lucía, A. (2012). The Tour de France: an updated physiological review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 7(3), 200-209. DOI: 10.1123/ijsp.7.3.200
- Santalla, A., Naranjo, J., y Terrados, N. (2009). Muscle efficiency improves over time in world-class cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(5), 1096-1101. DOI: 10.1249/MSS.0b013e318191c802
- Sarre, G., Lepers, R., Maffiuletti, N., Millet, G., y Martin, A. (2003). Influence of cycling cadence on neuromuscular activity of the knee extensors in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4-5), 476-479. DOI: 10.1007/s00421-002-0738-6
- Sassi, A., Impellizzeri, F. M., Morelli, A., Menaspa, P., y Rampinini, E. (2008). Seasonal changes in aerobic fitness indices in elite cyclists. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 33(4), 735-742. DOI: 10.1139/H08-046
- Schutte, N. M., Nederend, I., Hudziak, J. J., Bartels, M., y de Geus, E. J. (2016). Twin-sibling study and meta-analysis on the heritability of maximal oxygen consumption. *Physiological Genomics*, 48(3), 210-219. DOI: 10.1152/physiolgenomics.00117.2015
- Sidossis, L. S., Horowitz, J. F., y Coyle, E. F. (1992). Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency. *International Journal of Sports Medicine*, 13(5), 407-411. DOI: 10.1055/s-2007-1021289
- Silberman, M. R., Webner, D., Collina, S., y Shiple, B. J. (2005). Road bicycle fit. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 15(4), 271-276. DOI: 10.1097/01.jsm.0000171255.70156.da
- Sjödin, B., y Jacobs, I. (1981). Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *International Journal of Sports Medicine*, 2(1), 23-26. DOI: 10.1055/s-2008-1034579
- Skinner, J. S., y McLellan, T. M. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51(1), 234-248. DOI: 10.1080/02701367.1980.10609285
- Smekal, G., von Duvillard, S. P., Hörmandinger, M., Moll, R., Heller, M., Pokan, R., . . . Arciero, P. (2015). Physiological demands of simulated off-road cycling competition. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(4), 799-810.
- Spragg, J., y van Bon, M. (2020). *Optimal talent development in cycling: a guide for parents and coaches*. Independently Published.
- Stebbins, C. L., Moore, J. L., y Casazza, G. A. (2014). Effects of cadence on aerobic capacity following a prolonged, varied intensity cycling trial. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13(1), 114-119.

- Støren, Ø., Rønnestad, B. R., Sunde, A., Hansen, J., Ellefsen, S., y Helgerud, J. (2014). A time-saving method to assess power output at lactate threshold in well-trained and elite cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(3), 622-629. DOI: 10.1519/JSC.0b013e3182a73e70
- Sunde, A., Storen, O., Bjerkaas, M., Larsen, M. H., Hoff, J., y Helgerud, J. (2010). Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(8), 2157-2165. DOI: 10.1519/JSC.0b013e3181aeb16a
- Suzuki, S., Watanabe, S., y Homma, S. (1982). EMG activity and kinematics of human cycling movements at different constant velocities. *Brain Research*, 240(2), 245-258. DOI: 10.1016/0006-8993(82)90220-7
- Swain, D. P. (1994). The influence of body mass in endurance bicycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26(1), 58-63.
- Swain, D. P., Coast, J. R., Clifford, P. S., Milliken, M. C., y Stray-Gundersen, J. (1987). Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *Journal of Applied Physiology*, 62(2), 668-672. DOI: 10.1152/jappl.1987.62.2.668
- Swart, J., y Holliday, W. (2019). Cycling biomechanics optimization-the (R) evolution of bicycle fitting. *Current Sports Medicine Reports*, 18(12), 490-496. DOI: 10.1249/JSR.0000000000000665
- Tabata, I., Nishimura, K., Kouzaki, M., Hirai, Y., Ogita, F., Miyachi, M., y Yamamoto, K. (1996). Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO<sub>2</sub>max. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(10), 1327-1330. DOI: 10.1097/00005768-199610000-00018
- Theurel, J., Crepin, M., Foissac, M., y Temprado, J. J. (2012). Effects of different pedalling techniques on muscle fatigue and mechanical efficiency during prolonged cycling. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 22(6), 714-721. DOI: 10.1111/j.1600-0838.2011.01313.x
- UCI. (2022a). *Categories of riders*. Unión Ciclista Internacional. Consultado en noviembre del 2022 en <https://assets.ctfassets.net/76117gh5x5an/wQympSG6EWIKq6o6HKw9E/e83b27986a326223b4d0fa051d3837f2/1-GEN-20221017-E.pdf>
- UCI. (2022b). *Cycling disciplines*. Unión Ciclista Internacional. Consultado en mayo del 2022 en <https://www.uci.org/disciplines/all/2tLnZMo6WrUBplRXDxyEi7>
- UCI. (2022c). *Road cycling competitions*. Unión Ciclista Internacional. Consultado en mayo del 2022 en <https://www.uci.org/discipline/road/6TBjsDD8902tud440iv1Cu?tab=discover>
- Valenzuela, P. L., Morales, J. S., Foster, C., Lucía, A., y de la Villa, P. (2018). Is the functional threshold power a valid surrogate of the lactate threshold? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1-6. DOI: 10.1123/ijsp.2018-0008
- Valenzuela, P. L., Muriel, X., van Erp, T., Mateo-March, M., Gandía-Soriano, A., Zabala, M., . . . Pallarés, J. G. (2022). The record power profile of male professional cyclists: normative

- values obtained from a large database. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(5), 701-710. DOI: 10.1123/ijsp.2021-0263
- Vanhatalo, A., Jones, A. M., y Burnley, M. (2011). Application of critical power in sport. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(1), 128-136. DOI: 10.1123/ijsp.6.1.128
- Velasco, I. (2018). *Chris Froome en la Finestre y la ley universal que persigue al ciclista: La Gravedad*. Zikloland. Consultado en diciembre de 2021 en <https://www.zikloland.com/chris-froome-la-finestre-la-ley-universal-persigue-al-ciclista-la-gravedad/>
- Vercruyssen, F., y Brisswalter, J. (2010). Which factors determine the freely chosen cadence during submaximal cycling? *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2), 225-231. DOI: 10.1016/j.jsams.2008.12.631
- Vogt, S., Heinrich, L., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H. H., y Schmid, A. (2006). Power output during stage racing in professional road cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(1), 147-151. DOI: 10.1249/01.mss.0000183196.63081.6a
- Wasserman, K., y McIlroy, M. B. (1964). Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *American Journal of Cardiology*, 14, 844-852. DOI: 10.1016/0002-9149(64)90012-8
- Watson, G., y Swensen, T. (2006). Effects of altering pedal cadence on cycling time-trial performance. *International Journal of Sports Medicine*, 27(4), 296-300. DOI: 10.1055/s-2005-865654
- Weltman, A., Snead, D., Seip, R., Schurrer, R., Levine, S., Rutt, R., . . . Rogol, A. (1987). Prediction of lactate threshold and fixed blood lactate concentrations from 3200-m running performance in male runners. *International Journal of Sports Medicine*, 8(6), 401-406. DOI: 10.1055/s-2008-1025694
- Wilber, R. L., Zawadzki, K. M., Kearney, J. T., Shannon, M. P., y Disalvo, D. (1997). Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(8), 1090-1094. DOI: 10.1097/00005768-199708000-00015
- Williams, C. J., Williams, M. G., Eynon, N., Ashton, K. J., Little, J. P., Wisloff, U., y Coombes, J. S. (2017). Genes to predict VO<sub>2</sub>max trainability: a systematic review. *BMC Genomics*, 18(Suppl 8), 831. DOI: 10.1186/s12864-017-4192-6
- Winter, E. M., y Nevill, A. M. (2009). Scaling: adjusting for differences in body size. En R. E. y T. Reilly (Ed.), *Kinanthropometry and exercise physiology laboratory manual* (3 ed., Vol. 2: Anthropometry, pp. 300-320).
- Zabala, M., y Cheung, S. S. (2018). *La ciencia del ciclismo*. Ediciones Tutor, S.A.
- Zameziati, K., Mornieux, G., Rouffet, D., y Belli, A. (2006). Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power. *European Journal of Applied Physiology*, 96(3), 274-281. DOI: 10.1007/s00421-005-0077-5

Zoladz, J. A., Rademaker, A. C., y Sargeant, A. J. (1995). Non-linear relationship between O<sub>2</sub> uptake and power output at high intensities of exercise in humans. *Journal of Physiology*, 488 ( Pt 1)(Pt 1), 211-217. DOI: 10.1113/jphysiol.1995.sp020959



# Capítulo 12.



Anexos





## ANEXOS

### 12.1. Anexo 1. Consentimiento informado

 <p>eman ta zabal zazu</p> <p>Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea</p>	<p>JARDUERA FISIKOAREN ETA KIROLAREN ZIENTZIEN FAKULTATEA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ACTIVIDAD FISICA Y DEL DEPORTE</p>	 <p>Departamento de Educación Física y Deportiva Gorputz eta Kirol Hezkuntzako Salla</p>
<b>KIROL ERRENDIMENDUAREN ANALISIAREN LABORATEGIA</b>	<b>LABORATORIO DE ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DEPORTIVO</b>	
<b><u>BAIMEN INFORMATUA</u></b>	<b><u>CONSENTIMIENTO INFORMADO</u></b>	
<b><u>Parte hartzen duenaren datuak</u></b>	<b><u>Datos del participante</u></b>	
D./D <sup>a</sup> _____ <b>Jauna/Andrea</b>		
DNI: _____ <b>NAN zenbakiarekin.</b>		
<b>IKERKUNTZAREN DESKRIBAPENA</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</b>	
<p>TITULUA / TÍTULO:</p> <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div>		
<b>Ikerkuntzaren arduradunak</b>	<b>Responsables de la investigación</b>	
	<i>Dr. Jesús Cámara Tobalina</i>	
	<i>Dra. Sara Maldonado Martín</i>	
	<i>D. Xabier Artetxe Gezuraga</i>	
Dirección: Lasarteko Atea, z/g 01007 VITORIA-GASTEIZ Tel.- 945 01 3547/3549/3500	1	



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

JARDUERA FISIKOAREN ETA KIROLAREN  
ZIENTZIEN FAKULTATEA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DE LA ACTIVIDAD FÍSICA Y DEL DEPORTE



Departamento de Educación Física y Deportiva  
Gorputz eta Kirol Hezkuntzako Saila

**Emaitzen konfidentziasuna:** emaitzen konfidentziasun osoa bermatzen da. Horrela, parte hartzen duenaren baimen(ar)ik gabe ezin izango da proiektu honetan bere partaidetza ezagutarazi.

**Ikerkuntzan izan litezkeen arriskuak.** Esfortzu proba maximo(an) eta submaximoetan zehar organismoan aldaketa batzuk gertatuko dira, tentsio arterialaren eta bihotz-maiztasunaren aldaketak, besteak beste. Ahal diren esfortzu guztiak egingo dira izan litezkeen arriskuak minimizatzeko. Nola? Osasunari eta egoera fisikoari buruzko informazio aurretikoaren ebaluaketaren bitartez eta proban zehar egindako behaketekin. Beste prozeduren arriskuak minimoak dira.

**Ikerkuntzak izan ditzazkeen onurak:** Proba guztiak bukatzerakoan subjektuek bere potentzia maximo aerobikoari, potentzia ezberdinetan pedalei eragitearen eraginkortasunari eta balio zinematikoei buruzko informazioa izango dute. Hori guztia norbere egoeraren ezagupen hobea izateko.

#### **Oharpenak**

1. Parte hartzen duenak edozein momentutan idatziz bere baimena libreki atzera bota dezakeela jakin badaki.
2. Parte hartzen duenak dokumentu honen kopia sinatuta eskatzeko eskubidea duela jakin badaki.
3. Parte hartzen duenak bere partaidetzarekin ikerkuntzan lortutako emaitza zehatzak ikertzaile nagusiei idatziz eska dezakeela jakin badaki.

**Confidencialidad de los resultados:** Se garantiza la absoluta confidencialidad de los resultados, de forma que en ningún caso, sin consentimiento previo del participante, se dará a conocer su participación en este proyecto.

**Riesgos potenciales de la investigación.** Durante la prueba de esfuerzo máxima y submáximas se producirán ciertos cambios en el organismo entre los que se incluyen alteración de la tensión arterial, frecuencia cardíaca etc. Se harán todos los esfuerzos posibles para minimizar los riesgos potenciales mediante la evaluación de la información preliminar concerniente a su salud y condición física, y mediante las observaciones que se hagan durante la prueba. Los riesgos del resto de procedimiento son mínimos.

**Beneficios potenciales de la investigación:** Después de la realización de las diferentes pruebas los sujetos podrán tener información sobre su potencia aeróbica máxima, eficiencia de pedaleo a diferentes potencias y valores cinemáticos para un mejor conocimiento de las condiciones individuales.

#### **Advertencias**

1. El participante es advertido de que puede revocar libremente por escrito su consentimiento en cualquier momento.
2. El participante es advertido de su derecho a que se le dé una copia del documento firmado.
3. El participante puede solicitar por escrito dirigido a los investigadores principales del proyecto los resultados concretos obtenidos en su participación en el estudio.

Dirección: Lasarteko Atea, z/g  
01007 VITORIA-GASTEIZ  
Tel.- 945 01 3547/3549/3500

Ikerkuntza honetan parte hartzeko egingo ditudan probeei buruzko informazio zehatza jaso dut. Izan litezkeen arriskuak eta onurak ulertu ditut; eta baita edozein momentutan probak atzera botatzeko libre ere naizela. Osasun-galdeketa bete dudala, eta ikerkuntza honetarako behar den esfortzu-proban parte hartzeko egoera fisikoa egokian nagoela baieztatzen dut.

He tenido información detallada de las pruebas que voy a realizar para participar en esta investigación. He entendido los posibles riesgos y beneficios de las pruebas, y que soy totalmente libre para revocar las pruebas en cualquier momento. Confirmando que he completado el cuestionario de salud, y que estoy en la condición física necesaria para participar en la prueba de esfuerzo requerida en el estudio.

Izena/Nombre: .....

Sinatuta/Firmado: .....

Data/Fecha: .....

Tutorearen izena/Nombre del tutor\*: .....

Sinatuta/Firmado\*: .....

Data/Fecha\* .....

Ebaluatzailea/Evaluador: .....

Sinatuta/Firmado: ..... Data/Fecha: .....

\*Bete behar da bakarrik parte hartzen duena 18 urte baino gutxiago izanez gero/ Deberá ser completado en caso de que el participante sea menor de 18 años.

Ikertzailea / Investigador(a)

Sinadura / Firma

Data / Fecha

Dirección: Lasarteko Atea, z/g  
01007 VITORIA-GASTEIZ  
Tel.- 945 01 3547/3549/3500



JARDUERA FISIKOAREN ETA KIROLAREN  
ZIENTZIEN FAKULTATEA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DE LA ACTIVIDAD FISICA Y DEL DEPORTE



Ikerkuntza honi buruzko informazio gehigarria nahi izanez gero, Jesus Cámara Doktoareari ([jesus.camara@ehu.es](mailto:jesus.camara@ehu.es)) edota Sara Maldonado Doktoareari ([sara.maldonado@ehu.es](mailto:sara.maldonado@ehu.es)) posta elektronikoaren bitartez idatzi edo deitu JFKZFko telefono luzapenei (orrialdeko oinean adierazita).

Si en algún momento desea obtener información adicional sobre este proyecto puede contactar con el Dr. Jesús Cámara ([jesus.camara@ehu.es](mailto:jesus.camara@ehu.es)) o la Dra. Sara Maldonado ([sara.maldonado@ehu.es](mailto:sara.maldonado@ehu.es)) a través de sus correos electrónicos o extensiones telefónicas (indicadas a pie de página) en la facultad de CCAFD.

## 12.2. Anexo 2. Cuestionario Salud



### CUESTIONARIO DE SALUD

El objetivo de este cuestionario es recoger información en relación con tu salud y estilo de vida. Esta información se utilizará para decidir si eres elegible para participar en las pruebas que voluntariamente has aceptado. Es importante que respondas las preguntas con total sinceridad. La información que facilitas se tratará con confidencialidad. El cuestionario se guardará en lugar seguro durante 5 años y después será destruido.

El responsable de la prueba ha completado la sección 1, la cual proporciona información básica en relación con la prueba en la que vas a participar de forma voluntaria. Las secciones 2 a la 7 las debes completar tu mismo: por favor, rodea con un círculo la respuesta que consideres apropiada o escribe tu respuesta en el espacio que se te proporciona. Por favor, completa también la sección 8. Las secciones 9 y 10 las completará el responsable de la prueba después de que hayas completado las secciones 2 a la 8.

#### SECCIÓN 1: La prueba (completar por el responsable)

Para completar la prueba en la que participarás de forma voluntaria será necesario que realices:

Ejercicio de intensidad moderada (i.e., tipo de ejercicio que te hace respirar más fuerte que lo que normalmente haces en reposo, pero no tan fuerte para que no seas capaz de mantener una conversación).

Ejercicio de intensidad alta (i.e., ejercicio que te hace respirar tan fuerte que no eres capaz de mantener una conversación).

La prueba conlleva:

ANDAR	<input type="checkbox"/>	Generando o absorbiendo altas fuerzas a través de tus brazos	<input type="checkbox"/>
CORRER	<input type="checkbox"/>	Generando o absorbiendo altas fuerzas a través de tus hombros	<input type="checkbox"/>
PEDALEAR	<input type="checkbox"/>	Generando o absorbiendo altas fuerzas a través de tu tronco	<input type="checkbox"/>
REMAR	<input type="checkbox"/>	Generando o absorbiendo altas fuerzas a través de tus caderas	<input type="checkbox"/>
NADAR	<input type="checkbox"/>	Generando o absorbiendo altas fuerzas a través de tus piernas	<input type="checkbox"/>
SALTAR	<input type="checkbox"/>		



## Sección 2: Información general

Nombre: ..... Sexo: M F Edad: .....

Altura (aprox.): ..... Peso (aprox.): .....

## Sección 3: Consideraciones iniciales

1. Responde SI o NO.

- a) Tengo VIH, Hepatitis A, Hepatitis B o Hepatitis C.
- b) Estoy embarazada.
- c) Tengo un problema muscular o articular que podría verse agravado por la prueba descrita en la sección 1.

(Si has respondido SI en la pregunta 1 ve directamente a la sección 8)

## Sección 4: Actividad física habitual

2a. ¿Realizas normalmente ejercicio de intensidad moderada (definido en la sección 1) durante 20 minutos o más al menos dos días a la semana? Si No

2b. ¿Has realizado este tipo de ejercicio durante los últimos 10 días? Si No

3a. ¿Realizas normalmente ejercicio de intensidad alta (definido en la sección 1) al menos un día a la semana? Si No

3b. ¿Has realizado este tipo de ejercicio durante los últimos 10 días? Si No

### Sección 5: Condición médica

4. Responde SI o NO.
- a) He sufrido de diabetes, insulínico dependiente, durante más de 15 años.
  - b) Sufro diabetes, insulínico dependiente y soy mayor de 30 años.
  - c) No sufro de diabetes insulínico dependiente y soy mayor de 35 años.
5. ¿Has tenido alguna vez un derrame cerebral? Si No
6. ¿Te ha comentado alguna vez tu médico que tengas algún problema cardiaco? Si No
7. ¿Respondes de forma afirmativa a las siguientes aseveraciones? Si No
- a) Tomo medicación para el asma.
  - b) He experimentado dificultad para respirar durante las últimas 4 semanas
8. ¿Padeces alguna de las siguientes enfermedades: cáncer, enfermedad pulmonar crónica obstructiva, fibrosis cística, otra enfermedad pulmonar, enfermedad hepática o renal, enfermedad mental, osteoporosis, artritis severa, problema tiroideo? Si No

(Si has respondido "Si" a alguna de las preguntas en la sección 5, vete directamente a la sección 8)

### Sección 6: Signos y síntomas

9. ¿Tienes a menudo dolor en el área torácica, cerca del corazón o alrededores? Si No
10. ¿Has experimentado falta de aliento, ya sea en reposo o durante ejercicio de mediana intensidad? Si No



11. ¿Sientes a menudo mareos o desmayos? Si No
12. ¿Has experimentado en los últimos 12 meses dificultad para respirar cuando estabas tumbado o te has despertado por la noche con dificultad para respirar? Si No
13. ¿Has notado hinchazón o retención de líquidos alrededor de tus tobillos? Si No
14. ¿Sientes a menudo que tu corazón salta latidos, ya sea en reposo o durante el ejercicio? Si No
15. ¿Sientes con regularidad dolor en tus pantorrillas durante el ejercicio que no sea debido a rigidez muscular (agujetas)? Si No
16. ¿Te ha comentado tu medico que tengas un soplo cardiaco? Si No
17. ¿Experimentas fatiga inusual o falta de aliento durante las actividades diarias? Si No

(Si has respondido "Si" a alguna de las preguntas en la sección 6, vete directamente a la sección 8)



### Sección 7: Factores de riesgo

18. Responde SI o NO.

- a) Fumo tabaco diariamente. Si No  
b) He dejado de fumar tabaco diariamente hace menos de 6 meses. Si No

19. ¿Te ha comentado alguna vez tu medico que tienes la presión arterial alta?

Si No

20. ¿Te ha comentado alguna vez tu medico que tienes el colesterol alto? Si No

21. ¿Ha sufrido tu padre o algún hermano un ataque cardiaco, cirugía cardiaca, o derrame cerebral antes de los 55 años? Si No

22. ¿Ha sufrido tu madre o alguna hermana un ataque cardiaco, cirugía cardiaca, o derrame cerebral antes de los 65 años? Si No

23. Responde SI o NO.

- a) He sufrido diabetes insulínico dependiente durante menos de 15 años. Si No  
b) Sufro diabetes insulínico dependiente y soy menor de 30 años. Si No  
c) No sufro diabetes insulínico dependiente y tengo 35 años o menos. Si No

### Sección 8: Firmas

Participante: ..... Fecha: .....

Tutor\*: ..... Fecha: .....  
(\*Necesario solamente si el participante es menor de 18 años)



**Sección 9: Factores de riesgo adicionales (a completar por el responsable de la prueba si lo cree relevante)**

24. ¿El índice de masa corporal del participante es  $>30 \text{ kg/m}^2$ ?      Si      No
25. ¿Ha respondido el participante NO a las preguntas 2a y 3a?      Si      No

**Sección 10: Elegibilidad (a completar por el responsable de la prueba)**

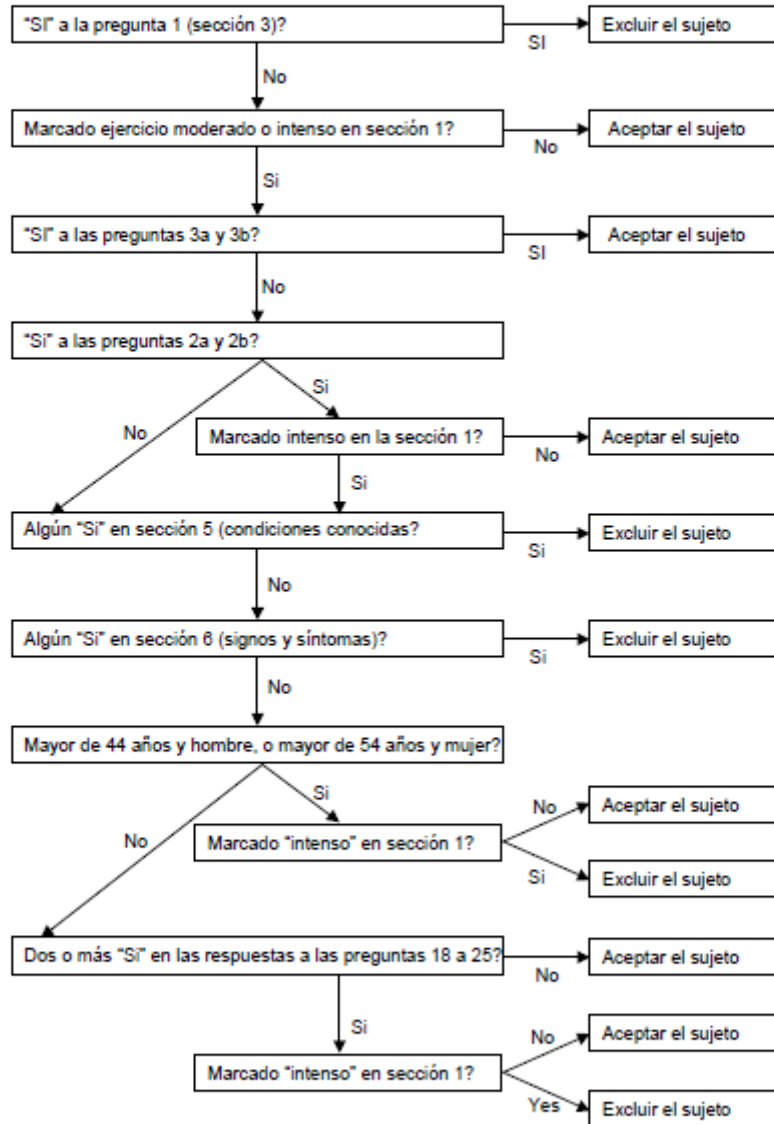
26. ¿Es el participante elegible para la prueba?      Si      No

Nombre del responsable de la prueba: .....

Firma: .....

Fecha: .....

PROCESO DEL CUESTIONARIO COMPLETADO – DIAGRAMA DE FLUJO







17

eman la zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea