



UNIVERSIDAD DE MURCIA
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
TESIS DOCTORAL

Aplicabilidad del perfil de potencia máximo en ciclismo profesional, valores normativos, efecto de la fatiga y desentrenamiento

D. Xabier Muriel Otegui
2022



UNIVERSIDAD DE MURCIA
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
TESIS DOCTORAL

Aplicabilidad del perfil de potencia máximo en ciclismo profesional, valores normativos, efecto de la fatiga y desentrenamiento

Autor: D. Xabier Muriel Otegui

Director/es: D. Jesús García Palarés y D. David Barranco Gil



**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD
DE LA TESIS PRESENTADA EN MODALIDAD DE COMPENDIO O ARTÍCULOS PARA
OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

Aprobado por la Comisión General de Doctorado el 19-10-2022

D./Dña. Xabier Muriel Otegui

doctorando del Programa de Doctorado en

Ciencias de la Actividad Física y del Deporte

de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Murcia, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y titulada:

Aplicabilidad del perfil de potencia máximo en ciclismo profesional, valores normativos, efecto de la fatiga y desentrenamiento.

y dirigida por,

D./Dña. Jesús García Pallarés

D./Dña. David Barranco Gil

D./Dña.

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

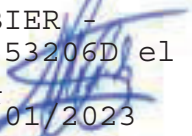
Además, al haber sido autorizada como compendio de publicaciones o, tal y como prevé el artículo 29.8 del reglamento, cuenta con:

- *La aceptación por escrito de los coautores de las publicaciones de que el doctorando las presente como parte de la tesis.*
- *En su caso, la renuncia por escrito de los coautores no doctores de dichos trabajos a presentarlos como parte de otras tesis doctorales en la Universidad de Murcia o en cualquier otra universidad.*

Del mismo modo, asumo ante la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada, en caso de plagio, de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Murcia, a 17 de 01 de 2023

Fdo.: Xabier Muriel Otegui

Firmado por
MURIEL OTEGUI
XABIER -
72453206D el
día 
17/01/2023
con un

Información básica sobre protección de sus datos personales aportados

Responsable:	Universidad de Murcia. Avenida teniente Flomesta, 5. Edificio de la Convalecencia. 30003; Murcia. Delegado de Protección de Datos: dpd@um.es
Legitimación:	La Universidad de Murcia se encuentra legitimada para el tratamiento de sus datos por ser necesario para el cumplimiento de una obligación legal aplicable al responsable del tratamiento. art. 6.1.c) del Reglamento General de Protección de Datos
Finalidad:	Gestionar su declaración de autoría y originalidad
Destinatarios:	No se prevén comunicaciones de datos
Derechos:	Los interesados pueden ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación, oposición, limitación del tratamiento, olvido y portabilidad a través del procedimiento establecido a tal efecto en el Registro Electrónico o mediante la presentación de la correspondiente solicitud en las Oficinas de Asistencia en Materia de Registro de la Universidad de Murcia

I. ESTRUCTURA TESIS POR COMPENDIO

La Tesis Doctoral que se presenta a continuación la componen tres artículos relacionados todos ellos con el análisis y aplicabilidad del perfil de potencia en el ciclismo profesional.

1. Muriel, X., Valenzuela, P. L., Mateo-March, M., Pallarés, J. G., Lucia, A., y Barranco-Gil, D. (2022). Physical demands and performance indicators in male professional cyclists during a grand tour: WorldTour versus ProTeam category. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(1), 22-30. - JCR: 4.211; 20/87 Q1
2. Muriel, X., Mateo-March, M., Valenzuela, P. L., Zabala, M., Lucia, A., Pallares, J. G., y Barranco-Gil, D. (2022). Durability and repeatability of professional cyclists during a Grand Tour. *European Journal of Sport Science*, 22(12), 1797-1804. JCR: 3.98; 24/87 Q2
3. Muriel, X., Hernández-Belmonte, A., Mateo-March, M., Valenzuela, P. L., Zabala, M., Barranco-Gil, D., y Lucia, A., y Pallarés, J. G. (2022). Is the record power profile repeatable? A practical analysis and interpretation in professional cyclists. *Journal of Strength & Conditioning Research*. In Press. JCR: 4.14; 18/87 Q1

II. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos

En este momento tan gratificante para mí, no puedo comenzar de mejor manera este manuscrito que agradeciendo a todas las personas que hicieron algo para que hoy esto sea posible:

Unos cuantos años atrás, la vida nos cruzó en el mismo camino. Por un tiempo, compartimos muchos debates, horas de trabajo, fracasos, logros y hazañas, pero sobre todo una misma visión de la vida y del deporte en particular. Desde entonces cada uno hemos recorrido un camino diferente en nuestras vidas, pero nunca hemos dejado de estar conectados, siempre hemos compartido una misma pasión, la ciencia como base de nuestro desarrollo personal. El Dr. Jesús García Pallarés, ha sido y es un ejemplo para mí. Su infinita capacidad de trabajo, su rigor, su profesionalidad, su constancia y sobre todo su humanidad es lo que hace que siga admirándole. Espero algún día ser capaz de transmitirle todo mi sincero agradecimiento y compensarle por su abnegado apoyo.

De la misma manera, el Dr. David Barranco Gil, ha sido el otro gran pilar donde me he sustentado para el desarrollo de esta Tesis. Una de las últimas personas en llegar a mi entorno, pero con la sensación de conexión de toda una vida, porque compartimos la misma sensibilidad y curiosidad. Un ejemplo de profesionalidad, dedicación y buena praxis, le estaré eternamente agradecido.

Debo asimismo agradecer a mi familia en general y a mis padres y hermano en particular por sus desvelos, su trabajo, su empeño en inculcarme conceptos como “responsabilidad”, “esfuerzo”, “compromiso”, “curiosidad” e “inconformismo”, fundamentales para lograr alcanzar un reto como este. A mi hija Nora y mi hijo Ibai por su cariño permanente y por supuesto, de forma muy especial, a mi mujer Arantza. Sin ella a mi lado, sin su ayuda en el día a día, sin su apoyo incondicional y sus ánimos permanentes, no hubiese sido posible llegar hasta aquí.

A mis amigos, a los que nos hemos visto crecer y a los que la vida me ha unido en los últimos años. Gracias por vuestra compañía y a apoyo permanente en este viaje que es la vida. Sin ellos, yo no sería la persona que soy.

A mis profesores, docentes, que algún día no fui capaz de valorar lo suficiente, como actualmente los valoro, gracias por permitirme errar y animarme a seguir, para ser lo que actualmente soy.

Como no, al grupo de investigación que hemos conformado. Un honor compartir este viaje con vosotros, Alejandro Lucía, Pedro Valenzuela, Manu Mateo March, junto a mis dos directores, David Barranco y Jesús García Pallarés. También a todos aquellos que en algún momento de este proceso han colaborado ofreciendo su inestimable apoyo, asesoramiento, opinión. Muchas gracias.

A Jon Iriberry, por abrirme el horizonte en este campo, cobijándome y guiándome en mis inicios como investigador y divulgador. A Jon Odriozola, por ayudarme a creer en mí y apostar por mí como nadie más, mil gracias.

Y por último y con gran afecto, a todos y todas los/as deportistas y técnicos que formaron parte de alguno de los estudios y han sido compañeros de viaje en esta aventura tan trepidante. Muchas gracias.

III. Resumen - Summary

RESUMEN

Introducción: Inicialmente evaluamos la repetitividad del perfil de potencia récord (RPP) a lo largo de una temporada de ciclismo profesional. Para después, poder comparar las exigencias físicas y los indicadores de rendimiento de ciclistas profesionales masculinos de dos categorías diferentes (*WorldTour* [WT] y *ProTeam* [PT]) durante una gran vuelta ciclista, realizando un análisis global, por semana, con o sin fatiga previa acumulada, analizando a su vez la durabilidad y la repetitividad de los esfuerzos. Nuestro objetivo es analizar si estos marcadores difieren entre los ciclistas profesionales de dos niveles competitivos durante una Gran Vuelta (GV).

Metodología y Resultados: Artículo I - Se estudiaron 12 ciclistas ($32,3 \pm 4,8$ años, 11 ± 5 años de experiencia en la categoría profesional, entre los que se encontraban varios corredores del top 3 y ganadores de una GV). Se evaluó la repetitividad del RPP para cada duración de esfuerzo durante diferentes períodos de la temporada (período de preparación, específico y competitivo). Una vez alcanzado el periodo específico y competitivo, el error de la medida del RPP es muy limitado para tiempos de exposición iguales o superiores a 5 min ($SEM < 4\%$). Sin embargo, para tiempos de exposición inferiores a estos, o cuando solo se tienen en cuenta registros de entrenamiento, el error se incrementa considerablemente ($SEM = 4.6 - 12.5\%$). Artículo II - Se estudiaron un equipo WT ($n = 8$; $31,4 \pm 5,4$ años) y un equipo PT ($n = 7$; $26,9 \pm 3,3$ años) que completaron "La Vuelta a España 2020". Se registró la potencia (PO) de los participantes y se calcularon los requerimientos físicos y fisiológicos (kilojulios (kJ) gastados, puntuación de estrés de entrenamiento [*Training Stress Score*, TSS], tiempo de permanencia en diferentes rangos/zonas de PO y PO máxima media [MMP] para diferentes duraciones de esfuerzo). Los ciclistas WT alcanzaron una

posición final individual superior que los PT (31 [rango intercuartil = 33] frente a 71 [59], $P = 0,004$). Los ciclistas WT mostraron valores medios de PO y gasto calórico superiores a sus compañeros PT, y pasaron más tiempo en valores de PO de alta intensidad ($> 5,25 \text{ W}\cdot\text{Kg}^{-1}$) y zonas (91%-120% del umbral de potencia funcional individualizado) ($P < 0,05$). Aunque no se encontraron diferencias en los valores de MMP en el análisis general ($P > 0,05$), los subanálisis revelaron que la diferencia entre los grupos aumentó a medida que avanzaba la GV, alcanzando los ciclistas WT mayores valores de MMP para esfuerzos de 5 min en la segunda y tercera semana ($P < 0,05$).

Artículo III - Estudiamos a 8 ciclistas WT y 7 PT que compitieron en 'La Vuelta a España 2020'. La durabilidad se evaluó con los valores medios de MMP alcanzados entre 5 s - 30 min después de completar diferentes niveles de trabajo ($0 - 35 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). La repetitividad se evaluó como la capacidad de repetir esfuerzos $> 95\%$ MMP. Aunque no se encontraron diferencias en cuanto a la durabilidad durante las tres semanas de carrera ($p = 0,209$), sí se identificó una interacción significativa en los análisis por semanas ($p = 0,011$). Así, durante la primera semana y en estado "fresco" ($0 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), los ciclistas WT solo alcanzaron valores de MMP significativamente mayores para los esfuerzos de 30 min. Sin embargo, estas diferencias aumentaron con la acumulación de niveles de fatiga (p. ej., valores de MMP significativamente superiores en los ciclistas WT para esfuerzos de 30 s, 1, 5, 20 y 30 min después de $35 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). No se encontraron diferencias entre grupos en la repetitividad para toda la carrera ($p = 0,777$), ni tampoco en análisis por semanas ($p = 0,808$). **Conclusiones:** Los resultados del primer artículo sugieren que el RPP es un parámetro repetible para monitorizar los registros de entrenamiento y competición en condiciones de campo. En el segundo y tercer estudio, hemos podido observar, que los corredores WT

pedalean más tiempo a altas intensidades, generan mayor gasto calórico y PO media que los ciclistas PT durante una GV. Aunque los valores más altos de MMP alcanzados durante toda la carrera podrían no diferenciar a los ciclistas WT de los PT en condiciones de “no fatiga”, los ciclistas WT son capaces de mantener valores superiores de MMP a medida que avanza la GV. En resumen, estos resultados apoyan el papel de la durabilidad (pero no de la repetitividad) como indicador clave de rendimiento durante las competiciones del ciclismo profesional.

SUMMARY

Introduction and Objectives: We initially evaluated the repeatability of the record power profile (RPP) over the course of a professional cycling season. We then compare the physical demands and performance indicators of male professional cyclists from 2 different categories (WorldTour [WT] and ProTeam [PT]) during a grand tour overall, for each week, with or without previous accumulated work, analysing durability and repeatability, which seem to be emerging as determinants of performance in professional cycling. Our aim is to analyse whether these markers differ between professional cyclists at two competitive levels during a Grand Tour. **Methods and Results:** Article - This study assessed the repeatability of the *record power profile* (RPP) throughout a professional cycling season. We studied 12 cyclists (age 32.3 ± 4.8 years, 11 ± 5 years of experience in the professional category, including several top-3 finishers and winners of a Grand Tour). The repeatability of the RPP for each effort duration was assessed during different periods of the season (preparation, specific, and competition period, respectively). Once the specific or competitive period has been reached, the error of the measurement associated to the RPP is very limited for long-duration efforts equal to or greater than 5 min (SEM < 4%). However, for shorter duration efforts, or when only training records are taken into account, the error considerably increases (SEM = 4.6 – 12.5%). Article 2 - We studied WT team (n = 8, 31.4 ± 5.4 y) and a PT team (n = 7; 26.9 ± 3.3 y) that completed “La Vuelta 2020” volunteered to participate. Participants’ power output (PO) was registered, and measures of physical demand and physiological performance (kilojoules spent, training stress score, time spent at different PO bands/zones, and mean maximal PO [MMP] for different exertion durations) were computed. Results: WT achieved a

higher final individual position than PT (31 [interquartile range = 33] vs. 71 [59], $P = 0,004$). WT cyclists showed higher mean PO and kilojoule values than their PT peers and spent more time at high-intensity PO values ($> 5.25 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$) and zones (91%–120% of individualized functional threshold power) ($P_s < 0,05$). Although no differences were found for MMP values in the overall analysis ($P > 0,05$), sub analyses revealed that the between-groups gap increased through the race, with WT cyclists reaching higher MMP values for 5-minute efforts in the second and third weeks ($P < 0,05$).

Article 3 - We studied 8 WT and 7 PT cyclists who competed in 'La Vuelta 2020'. Durability was assessed with the mean maximal power (MMP) values attained between 5 s - 30 min after different levels of mechanical work done ($0 - 35 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Repeatability was assessed as the ability to repeat efforts $> 95\%$ MMP. Although no differences were found for durability during the whole race ($p = 0,209$), a significant interaction effect was found in separate analyses by week ($p = 0,011$). Thus, during the first week and in the 'fresh' state ($0 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), WT cyclists solely attained significantly higher MMP values for 30-min efforts. However, these differences enlarged with accumulating levels of fatigue (e.g., significantly higher MMP values in WT cyclists for 30-sec, 1-min, 5-min, 20-min and 30-min efforts after $35 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). On the other hand, no between-group differences were found in repeatability for the whole race ($P = 0,777$) or in separate analyses by week ($P = 0.808$).

Conclusions: The findings of this first study suggest that the RPP is a repeatable parameter for monitoring field-based repeatable outcomes under similar conditions. In the second and third, we have observed, WT cyclists spend more time at high intensities and show higher kilojoules and mean PO than their PT referents during a grand tour. Although the highest MMP values attained during the whole race might not differentiate between

WT and PT cyclists in “non-fatigued” conditions, the former achieves higher MMP values as the race progresses. In summary, the present results support the role of durability (but not of repeatability) as a performance indicator during professional cycling races.

IV. Tabla de contenido

I.	ESTRUCTURA TESIS POR COMPENDIO.....	III
II.	AGRADECIMIENTOS.....	VII
III.	RESUMEN – SUMMARY.....	XI
IV.	TABLA DE CONTENIDO.....	XIX
1.	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
1.1.	El ciclismo de competición.....	3
1.1.1.	El uso de la potencia como indicador de carga en el ciclismo y la importancia de la calidad en la medida.....	7
1.1.2.	La potencia y el uso de datos como indicadores de rendimiento en ciclismo.....	12
1.2.	Repetitividad y validez del perfil de potencia máximo obtenido en situaciones campo en ciclismo profesional.....	22
1.3.	El uso del análisis de datos de potencia durante una Gran Vuelta: categoría <i>WorldTour</i> versus <i>ProTeam</i>	24
2.	OBJETIVOS.....	29
3.	ARTÍCULO I	33
4.	ARTÍCULO II.....	37
5.	ARTÍCULO III	41
6.	CONCLUSIONES	45
7.	REFERENCIAS.....	50
8.	Anexos.....	67

1. Introducción General

1. Introducción general

1.1. El ciclismo de competición

El uso de la bicicleta es una de las formas más eficientes de locomoción humana, requiere menos energía por unidad de masa y por unidad de distancia que cualquier otra forma de transporte terrestre (Brooks, 1989). La bicicleta sigue siendo el principal medio de transporte en muchos países del mundo y como deporte recreativo y de competición, sigue aumentando su popularidad (Faria et al., 2005), mostrándose en nuestro país como una de las modalidades deportivas más frecuentes (Ministerio Cultura y Deporte, 2020).

Tal y como describe Passfield (2017), los organizadores del Tour de Francia calculan que unos 3,5 billones de personas de todo el planeta ven su carrera cada año. Aunque quizá sea cuestionable que la mitad de la población mundial vea la carrera por televisión, varios millones de personas están lo suficientemente cautivadas como para acudir a la carretera y apoyar el mayor evento deportivo anual del mundo. Parece que como científicos del deporte y el ejercicio tenemos un alcance potencial envidiable para nuestro trabajo.

En la presente Tesis Doctoral me centraré en el ciclismo de competición en su modalidad de ruta. El ciclismo de competición federado está regulado y controlado por la Unión Ciclista Internacional (UCI) y las Federaciones Nacionales y Territoriales (UCI, 2022). Dentro de las modalidades competitivas, hay varias disciplinas que engloban el ciclismo de competición, que tienen unas características y demandas físicas y fisiológicas diferentes según cada disciplina y/o modalidad. Bajo el paraguas de la UCI podemos encontrar entre otras disciplinas: ciclocrós, ciclismo en pista, ciclismo de montaña, trial, BMX y ciclismo de ruta, cada una de ellas con sus respectivas sub-disciplinas; presentando cada una de ellas esfuerzos fisiológicos que van desde los 10 s (200 m en ciclismo en pista), hasta las 6 - 7 h de las grandes clásicas de un día del ciclismo en ruta (Cesanelli y Indaburu, 2021; Craig y Norton, 2001; Jeukendrup et al., 2000; Lievens et al., 2020; Mujika y Padilla 2001; Too, 1990).

Normalmente se compite por separado en función del sexo, aunque hay modalidades donde se compite conjuntamente, como el *team relay* (relevos por equipos) del ciclismo de montaña, o las contrarrelojes por equipos mixtas, implantadas recientemente en los campeonatos del mundo de ciclismo en ruta. De la misma manera, según la edad y el nivel competitivo, hay competiciones diferenciadas. La UCI define en el reglamento tres categorías relacionadas con la edad; los ciclistas juniors (17 a 18 años), sub23 (19 a 22 años) y élite (> 22 años), mientras que los grupos de edad inferiores a los juniors (< 17 años) se rigen por las federaciones nacionales de ciclismo (UCI, 2022). A partir de la categoría junior, un ciclista podría ser considerado como ciclista profesional, si adquiere un contrato con un equipo de esta categoría.

Un ciclista enrolado en un equipo profesional podrá participar en competiciones profesionales. Dentro de este nivel competitivo también hay diferentes categorías de carreras. Según la denominación de la UCI, las competiciones inicialmente se separan si son de un día (1.) o una vuelta por etapas (2.). El nivel más bajo donde podrá competir un ciclista profesional, serán las denominadas .2, esto es 1.2 o 2.2. En estas competiciones, podrán participar los ciclistas profesionales y ciclistas no profesionales federados. A partir de este nivel, esto es, igual o superior a .1, esto es ≥ 1.1 o 2.1, solo pueden participar ciclistas pertenecientes a equipos profesionales. Por el contrario, un ciclista no profesional, no podrá participar en competiciones profesionales (exceptuando las de la categoría .2). En este caso, su calendario será federado, pero no profesional. (UCI, 2022).

Dentro de los equipos profesionales, también hay una división según la categoría del equipo. Masculino: *World Tour Team* (categoría máxima, pueden participar en todas las competiciones excepto en las .2), *ProTeam* (categoría intermedia, pueden participar en todas las competiciones), *Continental Team* (categoría más baja, pueden participar en todas las competiciones profesionales excepto las carreras denominadas *World Tour* (WT)). Femenino: *World Tour Team* (categoría más alta) y *Continental UCI Team* (el resto de los equipos profesionales) (UCI, 2022).

Al analizar las competiciones de ciclismo en ruta, en todas las categorías y edades descritas, podemos encontrarnos con diferentes especialidades o tipos de

competición: salidas masivas en competiciones de ruta en línea, contrarrelojes individuales o por equipos y critériums. Estas competiciones, independientemente del nivel (profesional o no), se caracterizan por las diferencias orográficas (llanas, medio montañosas o de montaña) y por la agrupación o no de los días de competición en una clasificación general: competiciones de un día o vueltas por etapas (Lucía et al., 2001b, Sanders y van Erp, 2021; Vogt et al., 2006; 2007; Weber et al., 2005).

En función a todas estas variables, las demandas fisiológicas para cada una de ellas serán diferentes (Ebert et al., 2006; Lucía et al., 2001a; Padilla et al., 1999; Phillips y Hopkins, 2020; Sanders et al., 2018; Sanders y Heijboer, 2019; Sanders y van Erp, 2021; Santalla et al., 2012; Vogt et al., 2007). Dentro de las vueltas por etapas, las más estudiadas son las denominadas grandes vueltas: Giro de Italia, Tour de Francia y Vuelta a España, tradicionalmente con una duración de 21 días de competición. Lucía et al. (2000; 2001a) y Padilla et al. (2000; 2001), fueron quizás los investigadores pioneros en describir las demandas de las grandes vueltas. A día de hoy, la mayoría de los estudios están realizados con ciclistas masculinos, tanto en carreras de un día como en vueltas por etapas. Aunque comienzan a existir ciertas experiencias científicas en el ámbito del ciclismo femenino (van Erp y Lamberts, 2022; van Erp et al., 2019 ; 2022), existe a día de hoy un amplio campo de investigación por realizar.

Las competiciones más comunes en ciclismo de ruta en línea pueden tener una duración aproximada de 1 a 5 h, mientras que las carreras de varias etapas se caracterizan por varios días seguidos de carrera que consisten en etapas de salida masiva y contrarreloj individual y/o por equipos. Los ciclistas profesionales deben ser capaces de tolerar altas cargas de trabajo durante largos períodos de hasta tres semanas de duración (Faria et al., 2005).

Además, aunque las competiciones en ruta se describen a menudo como un ejercicio en estado estable, a diferencia de una contrarreloj, se trata de un evento dinámico caracterizado por períodos de producción de potencia sostenida, con períodos alternos de alta y baja intensidad, cuya combinación puede ser infinitamente variable. Como resultado, el ciclista que tiene el mayor VO_{2max} , o la mayor producción de potencia sostenible en un período determinado de tiempo, no es necesariamente el que tiene más probabilidades de triunfar en una carrera debido a su naturaleza

técnico-táctica y a la influencia del *drafting* y del terreno. Los resultados de una competición de ciclismo en ruta con salida masiva se definen normalmente en un período o períodos críticos durante la carrera (Quod et al., 2010).

El número de variables a tener en cuenta en un deporte como el ciclismo es muy variado, entre otras, podríamos destacar: la orografía del terreno, la distancia, los componentes tácticos, etc., que hacen que existan diferentes tipos de ciclistas especializados para cada resultante de estas variables (Lucía et al., 2001a; Menaspà et al., 2017; Mujika y Padilla, 2001; Pinot y Grappe, 2011; Vogt et al., 2007). Dentro de las diferentes clasificaciones de tipologías de ciclistas que podemos encontrar, destacan tanto para hombres como para mujeres: escaladores, esprinters, contrarrelojistas, todo terrenos y aspirantes a ganar clasificaciones generales finales (también conocidos como líderes). Hay estudios que amplían estas tipologías de especialización y añaden a *puncheurs* y *domestiques*, ciclistas especializados en pruebas de un día y ciclistas que tienen como cometido principal ayudar a los compañeros, respectivamente (Filho et al., 2015; Macarteny et al., 2021; Wang et al., 2022). La línea de separación entre cada tipología tiene un componente subjetivo importante. De hecho, tal y como indican Phillips y Hopkins (2020), esta variedad de factores en cuanto al rol a desempeñar dentro del equipo puede resultar en diferentes comportamientos competitivos.

La mayoría de los estudios en ciclismo han tenido como base la propia competición (Lucía et al., 2001a; Menaspà et al., 2017; Mujika y Padilla, 2001; Quod et al., 2010; Sanders y van Erp, 2021; Vogt et al., 2007), pero en los últimos años, gracias al avance de la tecnología y la aparición de los medidores de potencia portátiles, se está poniendo la atención también en los entrenamientos (Gallo et al., 2022; Leo et al., 2020; 2021a; 2022; Pinot y Grappe, 2011). Estos nuevos registros están abriendo un nuevo horizonte en el análisis de los perfiles de potencia y especializaciones fisiológicas, tanto en competición como en entrenamiento. En contraste con las competiciones, hay relativamente poca información o análisis de los datos de entrenamiento con medidores de potencia, especialmente para los ciclistas de élite a lo largo de una o varias temporadas (Passfield et al., 2017).

Así pues, en la presente Tesis Doctoral, intentaremos dar respuesta a las diferencias existentes entre los diferentes ciclistas por la diferencia de categoría, dentro del ciclismo en ruta, con ciclistas de alto nivel (equipos *World Tour Team* o *ProTeam*), teniendo como referencia los datos de potencia desarrollada en competición y/o entrenamiento, y todos sus análisis y métricas derivadas.

1.1.1. El uso de la potencia como indicador de carga en el ciclismo y la importancia de la calidad en la medida.

Tal y como lo describen Newton y Kraemer (1994): la potencia se puede definir como la fuerza aplicada multiplicada por la velocidad de movimiento. Como el trabajo realizado es igual a la fuerza por la distancia recorrida; y la velocidad es la distancia recorrida dividida por el tiempo empleado, la potencia también puede expresarse como el trabajo realizado por unidad de tiempo (el ritmo de realización del trabajo).

- El trabajo mecánico de una fuerza se corresponde con el producto de la fuerza (f , medida en Nm) en relación con la distancia (d) sobre la que se aplica (medida en m) ($W = F \cdot d$), a esta ecuación le aplicamos el contexto del tiempo, por lo que: " $W \cdot t^{-1} = Fd \cdot t^{-1}$ ".
- La potencia producida puede ser expresada como el producto de la fuerza por la velocidad (v , $m \cdot s^{-1}$), con la siguiente ecuación: " $P = F \cdot V$ "
- O, dicho de otra manera, el trabajo es igual a la fuerza por la distancia, la *velocidad* así mismo, es la distancia dividida por el tiempo empleado, *distancia/tiempo*, siendo la potencia, el producto de la *fuerza* por la *velocidad*, como acabamos de ver, también se podrá expresar como (Cronin y Sleivert, 2005; Newton y Kraemer, 1994):

Potencia: fuerza · (distancia · tiempo⁻¹): (trabajo · tiempo⁻¹) o W: Nm · (rad · s⁻¹):

J · s⁻¹

De esta manera, ya desde la última década del siglo XX, el trabajo mecánico externo que realiza un ciclista se puede medir directamente, puesto que se han desarrollado potenciómetros que miden la fuerza y velocidad que aplican los ciclistas a los pedales. La instrumentación para poder medirlo, es decir, los denominados potenciómetros de medida de carga externa, han sido utilizados en laboratorios especializados como cicloergómetros desde el siglo XX (Vandewalle y Driss, 2015). No obstante, no fue hasta los años 90 cuando se desarrollaron los primeros potenciómetros portátiles, los cuales se podían colocar en la propia bicicleta del ciclista, avance que supuso una completa revolución en el ciclismo y la fisiología del ejercicio, puesto que permitía medir con precisión la carga externa durante el propio entrenamiento y la competición (Jones y Passfield, 1998; Nimmerichter et al., 2017).

Con la irrupción de los potenciómetros, Atkinson et al. (2003) pronosticaban ya el devenir de la ciencia en el ciclismo, ya que, desde el punto de vista de los científicos del deporte, los ciclistas profesionales representan una oportunidad única para poder investigar las adaptaciones que se producen en respuesta a una sobrecarga masiva de un ejercicio de resistencia sin comparación alguna. Esta sobrecarga es probablemente mayor que la de cualquier otro atleta.

Lamentablemente en esa época, hasta que los estudios de Lucía et al. (1998,1999, 2000; 2001a y 2001b) y Padilla et al. (2000; 2001) fueron publicados, el ciclismo de carretera profesional era un área relativamente poco investigada y muchas preguntas seguían sin respuesta. La disponibilidad de medidores de potencia en la bicicleta y los dispositivos de registro de frecuencia cardíaca (FC) ofrecen la oportunidad de realizar más estudios sobre las respuestas fisiológicas en el ciclismo de carretera, especialmente en una primera fase, analizando lo que ocurre en circunstancias de competición (Atkinson et al., 2003).

Hasta el desarrollo de los medidores de potencia, los estudios publicados sobre la competición en ciclismo de carretera tenían como referencia la FC, que, al contrario de la potencia, está influenciada por factores externos, ya que la FC responde con un cierto desfase temporal a los cambios de intensidad (Allen y Coggan, 2010). La respuesta de la FC experimenta cierta variabilidad, en función a factores como la altitud, temperatura, estado de hidratación del deportista, la fatiga muscular, ingesta

de fármacos, los ritmos circadianos, la variabilidad biológica, la posición del ciclista en la bici, etc. (Achten y Jeukendrup, 2003; Ebert et al., 2006; Jeukendrup y Van Diemen, 1998; Lucía et al., 2000; Vogt et al., 2007). Además, debemos conocer que puede haber un problema al asumir las relaciones FC-potencia-rendimiento, determinadas usando cargas “estables” progresivamente crecientes en pruebas de laboratorio para predecir la potencia desarrollada en un ejercicio de naturaleza poco predecible como son las competiciones de ciclismo en carretera. Esto se debe a que existe un desfase entre las respuestas de la FC del ciclista y las demandas de potencia en la competición (Ebert et al., 2006).

Ambos indicadores de intensidad, externa en el caso de la potencia e interna en el caso de la FC, no se deben considerar excluyentes el uno del otro, son marcadores de intensidad complementarios. El registro de la intensidad externa mediante la potencia permite medir más objetivamente el rendimiento en ciclismo, ya que responde de una manera inmediata a los cambios de intensidad, y además se puede cuantificar directamente la energía producida a cualquier intensidad (p. ej., por encima del VO_{2max}). No obstante, tal y como lo demuestran en trabajos previos (Lucía et al., 2000; García-Pallarés et al., 2009; 2010), a diferentes hitos fisiológicos: primer umbral ventilatorio (VT_1), segundo umbral ventilatorio (VT_2) y potencia aeróbica máxima (PAM); los valores de FC, durante el transcurso de un año completo de entrenamiento, permanecieron estables, a pesar de las adaptaciones fisiológicas producidas por el entrenamiento. Sin embargo, dentro de la propia sesión, ya en 1998, Jeukendrup y Van Diemen (1998) mostraron un desacople de la potencia para mantener la FC constante.

El primer potenciómetro portátil y a día de hoy todavía considerado como el patrón de oro, es el de la marca SRM (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Welldorf, Germany). Fue creado por el ingeniero alemán Ulrich Schoberer en 1986, y por su calidad de fabricación y procesamiento continúa siendo a día de hoy el referente de medida. En este modelo, el potenciómetro está integrado en la biela de la bicicleta. Cuando el ciclista ejerce fuerza sobre el pedal, las galgas extensiométricas colocadas en la biela se deforman, produciendo así una diferencia en el potencial eléctrico que se traduce en la medida de fuerza. La velocidad se medirá según la velocidad angular

que se obtenga, en este caso, de la biela sobre el eje del pedalier. La precisión de este modelo viene dada por la cantidad de galgas que tenga (desde 4 hasta 20 en los modelos científicos).

La validez y reproducibilidad de este dispositivo ha sido ampliamente probada de forma científica, se ha utilizado por muchos investigadores y se ha convertido en el dispositivo móvil de referencia para la medición de potencia (Jones y Passfield, 1998; Maier et al., 2017; Martin et al., 1998; Paton y Hopkins, 2001). Los resultados de medición de potencia a través de este dispositivo eran incluso superiores en calidad a los de los cicloergómetros de laboratorio, ya que el error obtenido en su medida era prácticamente despreciable (Paton y Hopkins, 2001). Por esta razón, se sigue empleando a día de hoy como referencia para comprobar la validez de nuevos potenciómetros que surgen en el mercado (Gardner et al., 2004).

En los últimos años, el mercado de los medidores de potencia se ha desarrollado considerablemente, y a día de hoy hay varios fabricantes que producen dispositivos (p. ej., Cycleops Powertap, Stages Cycling Powermeter, Garmin Vector, Favero Assioma). Sus enfoques tecnológicos para la medición de la potencia varían, pero el método más común es el uso de galgas extensométricas para medir el torque o par generado por el ciclista. La potencia desarrollada puede medirse desde varios puntos del sistema de transmisión de la bicicleta. Así, los medidores de potencia pueden derivar su medición a través de la zapatilla (p. ej., Zone DPMX), el pedal (p. ej., Garmin Vector o Favero Assioma), la biela (p. ej., Stages Powermeter), el eje del pedalier (p. ej., Rotor INpower), la cadena (p. ej., Wattbike) o el buje (p. ej., Cycleops Powertap) (Montalvo-Pérez, 2021; Passfield et al., 2017; Rodríguez-Rielves et al., 2021).

En este sentido, ya que los potenciómetros actuales no miden todos en el mismo lugar o mecanismo, a la hora de comparar datos de diferentes dispositivos, hay que tomar en consideración que, aunque ambos estén midiendo la misma realidad, y estando ambos correctamente calibrados, la lectura puede ser sensiblemente distinta. Aun así, y como apuntan en su estudio Maier et al. (2017), donde comparan diferentes dispositivos ante una misma unidad de medida; la precisión parece variar considerablemente entre los medidores de potencia actuales utilizados por los

ciclistas de élite y los recreativos, incluso cuando los dispositivos son del mismo fabricante. Sin embargo, para estos autores, la precisión es generalmente alta, excepto en los dispositivos de Stages, que muestran una precisión menor que los dispositivos de SRM y PowerTap.

La fiabilidad de los equipos está vinculada con la eficacia de la información obtenida. Sin un alto nivel de fiabilidad en la medición de potencia, no se pueden determinar los cambios reales en el rendimiento (García-López et al., 2016; Hopkins, 2000). Para la evaluación mediante la medición de la potencia del efecto del entrenamiento o desentrenamiento, es importante conocer la variación debida al error técnico del medidor de potencia (Bertucci et al., 2005). En concreto, se ha sugerido que el rango de error técnico en la medida de potencia de cicloergómetros o potenciómetros portátiles debería ser inferior al 5% (Vanpraagh et al., 1992). Cuando se usa un medidor de potencia para evaluar deportistas de alto nivel, incluso sería aconsejable que este error técnico estuviese más cerca del 2%, debido a que los ciclistas de élite tienen una variación típica de $\sim 1\%$ para pruebas con una duración aproximada de 1 hora (Paton y Hopkins, 2001), e incluso que ese medidor sea siempre calibrado antes del entrenamiento y/o la competición.

No obstante, aunque numerosos estudios han centrado la atención en esclarecer el error de medida de los diferentes potenciómetros (Rodríguez-Rielves et al., 2021), salvo algunas aproximaciones (Leo et al., 2021c), existe todavía un vacío de conocimiento sobre el error asociado al propio procedimiento utilizado para la definición del perfil de potencia, es decir, la repetitividad y precisión que puede tener esta determinación para identificar el verdadero valor del potencial físico de un corredor. En este sentido, y con el objetivo de dar respuesta a estas posibles interrogantes, en la presente Tesis Doctoral hemos querido comprobar, en qué medida y momento un cambio puede ser considerado como una modificación del rendimiento, más allá de las diferencias propias que pueda darnos la instrumentación.

Ante esta pregunta de investigación sobre la repetitividad y precisión del perfil de potencia máximo obtenido en situaciones de campo en ciclismo profesional, hemos realizado un primer artículo de investigación; “¿El perfil de potencia récord es repetible? Un análisis e interpretación prácticos”. Es necesario saber cómo y cuándo

la medida ha variado lo suficiente, para tomarla en consideración y que calidad de medida debe tener. Además de la variabilidad derivada de la propia instrumentación, o por la toma de datos en diferentes momentos de la temporada, diferentes momentos del estado funcional, o por la propia variabilidad inter sujetos. El primer trabajo de investigación pretende ahondar un poco más en este sentido.

1.1.2. La potencia y el uso de datos como indicadores de rendimiento en ciclismo.

Entrenar y competir con un medidor de potencia se ha convertido hoy en día en la norma de muchos ciclistas de élite, lo que permite disponer fácilmente de los datos de potencia (Pinot y Grappe, 2011).

Los primeros estudios que publicaron datos de potencia de ciclismo en competición se limitaban a describir la potencia media en vatios (w) de una carrera (Golich y Broker, 1996). Posteriormente se comenzaron a detallar también los valores de potencia máxima (W_{max}) en diversos estudios de Jeukendrup y Van Diemen (1998) y Jeukendrup et al. (2000) obtenida en distintas competiciones y recorridos. Lim et al. (2002) comparaban la potencia media con la FC según el tipo de etapas: critériums, etapas en línea o circuitos y prólogos. Más adelante Weber et al. (2005), mostraron las diferencias existentes entre etapas en línea, según si estaban englobadas dentro de una gran vuelta o eran clásicas de un día, en el caso de ciclistas profesionales de alto nivel. Vogt et al. (2006) sumaron nuevos conceptos, como el trabajo desarrollado o gasto energético medido en julios (J) derivado de la potencia, la potencia media relativa al peso corporal (W/kg) y las diferentes zonas de potencia y FC obtenidas con estímulos de competición basadas en los parámetros obtenidos en pruebas de laboratorio (Vogt et al., 2006). Tal y como se puede observar en la Figura 1, Ebert et al. (2006) publicaron datos de potencia de 31 ciclistas australianos durante 6 años y 207 competiciones en la prueba por etapas del *Tour Down Under* (Australia), donde analizaron, entre otros, los datos de potencia en el tiempo, la hipérbole intensidad-duración (1-300 s), en función del tipo de carrera: en circuito (CRIT), montaña (HILLY) o llana (FLAT).

Vogt et al. (2007) publicaron un artículo muy referenciado posteriormente, gracias al nuevo enfoque y al nivel de la muestra analizada, describiendo los datos de potencia desarrollada por 15 corredores en el *Tour* de Francia del 2005. En este artículo aparecen nuevas métricas como el promedio de la potencia media máxima (*Mean Maximum Power*, MMP) para diferentes duraciones de tiempo, desde 15 a 1800 s o la distribución del esfuerzo según rangos de potencia (<100 W; de 100 a 300 W; de 300 a 500 W; > 500 W).

Con la evolución del estudio de los datos de potencia desarrollada en entrenamientos y competiciones, y de la mano de la evolución de los dispositivos que almacenan y cuantifican los datos, a día de hoy, se están publicando datos muy diversos y nuevos conceptos de carga de entrenamiento: *Training Stress Score* (TSS) y las derivadas del mismo (valor total, por kilómetro, por semana o por día), gasto energético (kJ), potencia generada después de determinado gasto energético absoluto (kJ) o relativo al peso del ciclista(kJ/kg), perfiles de potencia directos y modelados en base al número de estímulos recogidos en un período de tiempo determinado, MMP a diferentes duraciones, análisis de torque, zonas de entrenamiento en potencia relativa ($W \cdot kg^{-1}$), potencia crítica (CP), cantidad de trabajo una vez superada la CP (W'), umbral de potencia funcional o *functional threshold power* (FTP), etc. (Allen y Coggan, 2010; Leo et al., 2020; Leo et al., 2021c; Menaspà et al., 2017; Novak et al., 2019; Pinot y Grappe, 2011; van Erp et al., 2020; 2021; Quot et al., 2010).

$$TSS = (s \cdot NP \cdot IF) \cdot ((FTP \cdot 3600))^{-1} \cdot 100$$

Donde, s = segundos; NP = potencia normalizada (W); IF = factor de intensidad (ua);
 FTP = umbral de potencia funcional (W).

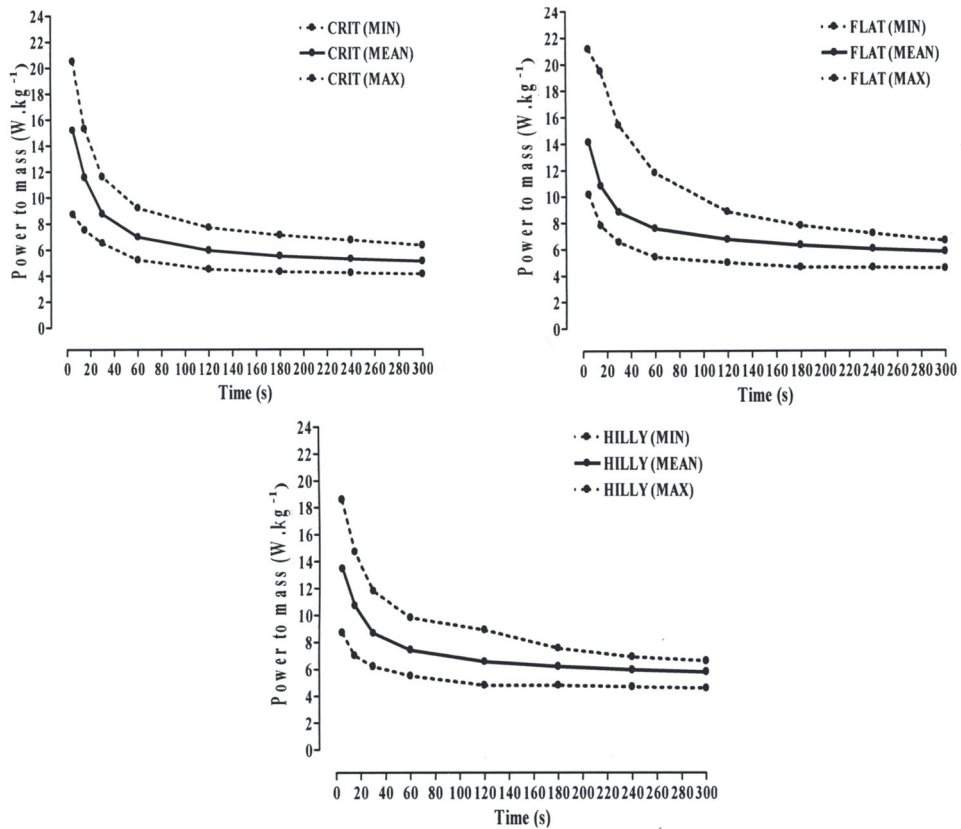


Figura 1: Potencia media máxima (MMP) relativa ($W \cdot kg^{-1}$: media (MEAN), mínima (MIN) y máxima (MAX)) para etapas en circuito (CRIT) llanas (FLAT) y de montaña (HILLY) (Tomado de Ebert et al., 2006).

La evolución del análisis de los datos de potencia ha supuesto un nuevo paradigma en la valoración y control de las competiciones y los entrenamientos. Al no ser métodos invasivos, no alteran directamente el día a día del deportista y no influyen en su rendimiento, lo que facilita el acceso a los datos de cualquier ciclista integrante del pelotón. Gracias a este aspecto, ha comenzado un campo de estudio donde los parámetros analizados son cada vez más amplios y profundos. En concreto, en la última década ha habido una proliferación en las publicaciones al respecto, incluidos los trabajos presentados en la presente Tesis Doctoral.

Actualmente muchos de los análisis de rendimiento en ciclismo vienen determinados por la relación entre el esfuerzo realizado (potencia) para un determinado tiempo; con carácter general se toma el mejor dato medio de potencia (el más alto) para un tiempo en concreto. Estudios como los de Ebert et al. (2006) y

Quot et al. (2010), ya describieron el ciclismo de competición con este enfoque, pero Pinot y Grappe (2011), fueron de los primeros autores en desarrollar este concepto en ciclismo como tal, denominándolo Perfil de Potencia. Estudios previos como los de Larrazabal et al., (2006), ya habían mostrado la relación hiperbólica que se crea entre la potencia máxima y el tiempo en ciclismo profesional de competición; aunque algunos autores previos (Allen y Coggan, 2006; Weber et al., 2005) ya habían publicado en medios más reducidos y de menor difusión científica un concepto similar.

Como apuntan Passfield et al. (2017), con el desarrollo de los medidores de potencia en ciclismo, el registro del perfil de potencia y la información derivada de esta variable (en particular la potencia media máxima [de las siglas en inglés MMP] alcanzada para diferentes duraciones de esfuerzo), ha ganado importancia como una alternativa práctica para monitorizar el rendimiento de los ciclistas en sustitución de las pruebas de laboratorio o de campo más clásicas.

En este sentido, en muchas publicaciones, incluso en las del presente trabajo, los conceptos de *mean maximal power* (MMP) y *record power profile* (RPP) se usan indistintamente. Desde un punto de vista estricto, la MMP se refiere según indica su propia denominación, a la potencia media máxima, para un tiempo de exposición determinado, por ejemplo, MMP de cinco min (MMP₅). En su caso, el perfil o la curva potencia (RPP) descrito por Pinot y Grappe (2011) correspondería a la relación potencia-tiempo de exposición descrito por un número concreto de valores MMP (p ej., MMP₁, MMP₅, MMP₂₀, MMP₄₀ y MMP₆₀). En cambio, cuando hablamos de RPP damos por entendido que nos estamos refiriendo al mejor dato o record absoluto de todos los registros de potencia del deportista para crear su perfil como ciclista; la curva MMP, serán únicamente los mejores datos en un espacio de tiempo determinado (capacidad máxima de rendimiento actual), pudiendo ser o no los RPP. Aunque como hemos nombrado anteriormente, podemos verlos usados indistintamente en la literatura.

Aunque podamos pensar que este tipo de relaciones entre la intensidad y/o el esfuerzo vinculado a un determinado espacio de tiempo puedan parecer novedosas, a comienzos del siglo XX, uno de los primeros autores en publicar sobre esta temática fue, Hill (1925) que, utilizando los récords mundiales de carrera y natación en una

variedad de distancias en categorías masculina y femenina, definió por primera vez la relación hiperbólica entre la velocidad y la duración. Sin embargo, no fue hasta la aparición del concepto de potencia crítica (CP) (Monod y Scherrer, 1965), cuando se ideó un marco matemático sencillo para la curva de potencia-duración, basado en los dos parámetros de una reserva de energía fija y una tasa máxima de reconstitución de energía:

$$Wlim = A + B \times Tlim$$

Donde, Wlim = límite de trabajo (J); A = reserva de energía fija (J); B = potencia crítica (W); Tlim = límite de tiempo (s).

De esta forma podríamos obtener el tiempo que pueda permanecer un deportista a una intensidad concreta, o la intensidad que pueda mantener para una duración de tiempo concreta, ambos factores, según muestran algunos autores pueden considerarse aspectos clave en la prescripción del entrenamiento de resistencia (Seiler y Sjursen 2004; Seiler 2010; Stöggl y Sperlich, 2015). Los tiempos límite de duración del ejercicio o esfuerzo máximo están inversamente relacionados con la intensidad del esfuerzo, tanto si se mide por potencia (en el caso del ciclismo) o por velocidad (en la carrera, el remo o la natación) (Pallarés et al., 2020).

La relación entre la intensidad (bien en potencia, bien en velocidad) y el tiempo hasta la extenuación ha sido analizada de forma repetida por la literatura científica desde principios del siglo XX, pero en los años 90 hubo un auge en el estudio de esta relación, destacando los estudios de Billat y su grupo de investigación (Billat et al., 1994a; 1994b; 1996). Más allá estos estudios más analíticos en laboratorio, otros autores han tratado de establecer la relación entre carga externa y durabilidad mediante distintos modelos matemáticos que ayuden a simplificar las dificultades logísticas y materiales que conllevan la medida directa. Trabajos como los Modelos de la Ley de la Potencia (Garcia-Manso et al., 2012), la Función del Decaimiento Exponencial (Weyand, et al., 2006) y los modelos hiperbólicos, comúnmente conocidos como CP, el primero el recientemente mencionado en este trabajo de Monod y Scherrer, (1965) y después los modelos de Moritani et al. (1981) o Morton (2006).

Una vez surgidos estos modelos matemáticos, especialmente el de CP, se han intentado buscar las relaciones existentes entre este parámetro y los clásicos marcadores de rendimiento fisiológicos, no estando exenta la polémica a la hora de determinar dónde se puede encontrar este valor. Los diferentes test de potencia crítica pueden incluir desde una única prueba (Constantini et al., 2014; Vanhatalo et al., 2007) hasta 3 o 4 (Pallarés et al., 2020), siendo además las duraciones de los esfuerzos también variadas, encontrando esfuerzos desde 1 hasta 20 min (Valenzuela et al., 2021). Toda esta posible capacidad de diferentes combinaciones (en cuanto a número de esfuerzos, duración de los mismos e incluso descanso entre estímulos) ha mostrado que el valor de CP, puede verse infraestimado o sobreestimado en función del protocolo utilizado (Mattioni Maturana et al., 2018; Pallarés et al., 2020), sugiriéndose recientemente que la recomendación más adecuada podría ser incluir en la prueba de CP al menos 3 test, y que incluyan entre esas determinaciones al menos dos esfuerzos contrarreloj de entre 12 y 20 min (Mattioni Maturana et al., 2018).

Pallarés et al. (2020), compararon en ciclistas entrenados el tiempo hasta la extenuación (TTE) a las intensidades de: Test de Wingate (WAnT), VO_{2max} , VT_2 y máximo estado estable de lactato (MLSS) obtenido en pruebas de laboratorio, con el tiempo de extenuación modelado según la CP de dos puntos. Tal y como se puede observar en la Figura 2, se sobreestima el TTE en MLSS y WAnT y subestima en gran medida la TTE en la potencia desarrollada a VT_2 en comparación a cuando se mide utilizando una prueba de ejercicio incremental escalonado en laboratorio de $25 \text{ w}\cdot\text{min}^{-1}$.

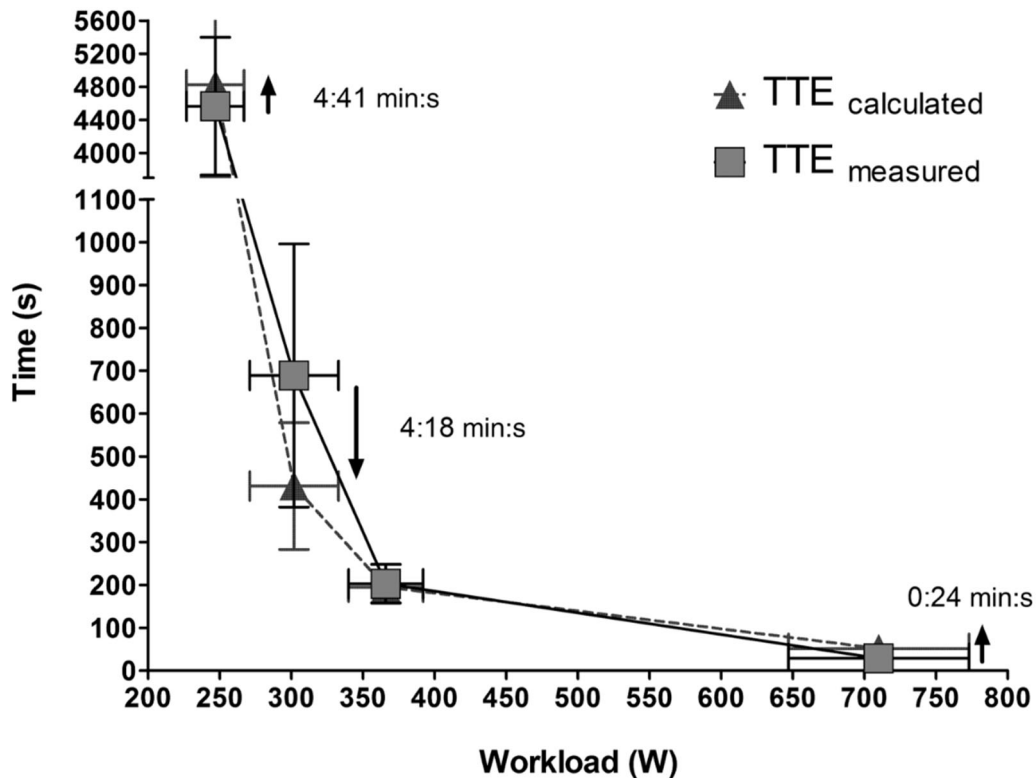


Figura 2: Relación entre el tiempo hasta el agotamiento y la producción de potencia. Los datos son las medias \pm (DE) de las 4 pruebas de potencia constante para 14 ciclistas entrenados en resistencia cuando se calculan utilizando la fórmula de 2 parámetros de la potencia crítica (CP). (Tomado de Pallarés et al., 2020).

Jones et al. (2010), en un artículo de revisión de los fundamentos históricos de la relación existente entre la potencia y el tiempo hasta la extenuación, definieron 3 dominios de intensidad de acuerdo con el concepto de CP: la zona de intensidad de ejercicio severa (alta intensidad) para valores de tiempo hasta la extenuación de entre aproximadamente 2 y 15 min (es decir, CP), la zona de intensidad de ejercicio intensa, entre el umbral de lactato (LT) y CP y, la zona de ejercicio de intensidad moderada por debajo de LT. La CP presenta el límite superior del dominio de ejercicio intenso y el límite inferior del dominio de intensidad de ejercicio severo (Pinot y Grappe, 2011).

Burnley y Jones (2018), también inciden en esta línea, afirmando, que no hay una respuesta clara a la pregunta de qué modelo matemático es el que mejor encaja con la relación entre tiempo y potencia desarrollada. Para intentar mejorar esta respuesta, estos autores definen 4 dominios, añadiendo uno por encima de los

propuestos por Jones et al. (2010), lo denominan dominio “extremo” (moderado, intenso, severo y extremo).

Leo et al. (2022), al comparar varios modelos de la curva hiperbólica existente entre la intensidad y la duración en ciclismo, de acuerdo con otros autores, no encuentran un único modelo preciso que dé respuesta a todos los dominios por igual. Aconsejan, que para derivar unos parámetros lo más correctos posibles con el objetivo de modelar una curva de potencia-duración, un protocolo de test debe incluir un esfuerzo de sprint (es decir, $\sim 10-15$ s) y al menos tres esfuerzos máximos de entre 2 y 15 min, de acuerdo con otros autores (Karsten et al., 2015; Leo, et al., 2021c; Muniz-Pumares et al., 2019; Sanders y Heijboer, 2019). La relación en la curva potencia-TTE, en función a los modelajes o la obtención del PC y W' , normalmente es testada con esfuerzos de 2 a 15 min. Vantahalo et al. (2011), consideraban que deberían ser suficientes para eventos de mayor duración, pero no se medían en laboratorio.

Toda esta controversia con respecto a la CP ha suscitado diferentes estudios de revisión que intentan dilucidar las posibles causas que motivan las discrepancias en los resultados obtenidos (Dotan, 2022), o incluso la necesidad de reevaluar el concepto como un artefacto matemático más que como un marcador de rendimiento en deportes de resistencia (Gorostiaga et al., 2022).

En este sentido, para el presente trabajo de Tesis Doctoral hemos tenido en consideración los datos reales, de la potencia para duraciones determinadas, en función a cada estudio; es decir, hemos medido la MMP para diferentes tiempos, tal y como hicieron inicialmente Allen y Coggan (2006), Weber et al. (2005), Vogt et al. (2007) o Pinot y Grappe (2011). Nuestras investigaciones en comparación a las citadas, destacan por el alto nivel de los sujetos analizados, ciclistas de categoría WT o PT (ganadores y pódiums de grandes vueltas y ganadores de etapas de un día, los conocidos como “monumentos del ciclismo”).

Aun así, tal y como lo recogen Leo et al. (2022) y nosotros mismos en las limitaciones de nuestros estudios, la obtención de los datos MMP, de no ser recogidos de un test específico para tal efecto, puede presentar ciertas limitaciones:

- Cuando acotamos un tiempo, por ejemplo 1 min, nosotros obtenemos el mejor dato de 1 min, de ese ciclista en ese día, mes, competición, etc. Pero si no ha realizado una prueba específica de ese tiempo, no podremos saber con exactitud, si ese mejor dato de 1 min, viene de un esfuerzo de 58 s al límite con 2 s de recuperación, o el mejor esfuerzo de 1 min está dentro de un esfuerzo máximo de 1 min y 5 s.
- Tampoco controlaremos que los factores externos sean los supuestamente ideales, para que se dé el mejor dato de potencia para ese tiempo. Por ejemplo, no hay un control específico de la temperatura, humedad, orografía, altitud, etc.
- Además, deberemos tener en cuenta, que la fatiga acumulada, bien durante el mismo día o por días sucesivos, puede hacer al ciclista no desarrollar todo su potencial para ese tiempo, en comparación a condiciones de total recuperación.
- O consideraciones tácticas o roles de equipo, que permitan al ciclista desarrollar todo su potencial para un determinado tiempo.

También hay que tener en consideración que existe una importante variabilidad inter e intra-sujeto. La variabilidad inter-sujeto ha sido ampliamente estudiada a diferentes intensidades y en distintos deportes, pero hay un número reducido de estudios de investigación que han analizado la variabilidad intra-sujeto en ciclismo (Costa et al., 2011; Faude et al., 2017; Higgins et al., 2014; McLellan et al., 1995; Jeukendrup et al., 1996; Laursen et al., 2003). Si la variabilidad intra-sujeto es amplia, no nos permitiría interpretar como mejora o empeoramiento del rendimiento del atleta cuando observemos cambios en el TTE a una determinada intensidad, o la máxima potencia media mantenida en un tiempo concreto. Por ello, la elevada cantidad y calidad de datos de estos estudios que presento a continuación, elevan la potencia estadística de los resultados.

De acuerdo con Allen y Coggan (2006) y Pinot y Grappe (2011), atendiendo a la MMP de diferentes duraciones (denominada por estos como RPP) teniendo en cuenta los resultados de pruebas específicas y/o en función a los mejores registros de

entrenamiento y competición para duraciones concretas de esfuerzos, los ciclistas pueden categorizarse en función a la tipología de su curva individual, identificar sus fortalezas y debilidades funcionales, o estimar la durabilidad hasta la extenuación en cualquier rango de intensidades en base a los tiempos medidos.

Allen y Coggan (2006), propusieron que la valoración del estado de forma de un ciclista se podría obtener en función del mejor valor de potencia media que puede alcanzar en contrarrelojes de cuatro duraciones concretas: 5 s, 1 min, 5 min y 60 min. Ha este concepto se le ha denominado “establecer el perfil de potencia del ciclista” (del inglés *power profile*). De hecho, estos mismos autores, han establecido diferentes tipologías de ciclistas en función a las características del perfil de potencia.

Una vez mostrada la importancia e implementación del MMP y el RPP en el contexto del ciclismo actual, parece importante poder determinar los récords más cercanos a los límites fisiológicos para esta medida.

En este contexto, realizamos dos nuevos estudios, los cuales los englobamos dentro del “Análisis del Perfil de Potencia en una Gran Vuelta de tres semanas de duración, categoría WT versus PT”. Con el objetivo de comparar los datos derivados de potencia y sobre todo el perfil de potencia de dos equipos de niveles diferentes que participaron en una misma competición. Concretamente, un equipo del máximo nivel, WT y otro del siguiente nivel, PT (segunda categoría del ciclismo), en la “Vuelta a España del 2020”. Analizando el mejor perfil de potencia medio de la vuelta de cada equipo, así como otras posibles variables del rendimiento y como afecta la fatiga al perfil de potencia.

Al existir la capacidad de poder enfrentar las muestras de los dos equipos y además en las mismas condiciones de competición, que no estratégicas, podríamos comprobar si somos capaces de establecer diferencias de nivel en ambos equipos con el análisis del mejor perfil de potencia o si debemos profundizar en las diferencias que se puedan dar por la acumulación de la fatiga, ya sea por la suma de esfuerzos día tras día o dentro de cada propia etapa.

Teniendo en cuenta estos posibles resultados, surgen interrogantes tales como: ¿podríamos predecir si un ciclista va a tener un mejor resultado que otro en

competición? ¿qué diferencia a los buenos de los mejores? un ciclista, gracias a su mayor habilidad, entrenamiento y nutrición, ¿tiene el potencial de generar la mayor potencia durante una carrera y aun así puede que no sea el ganador de la misma (Atkinson et al., 2003)? La complejidad intrínseca del ciclismo y el número de variables a controlar es tan alta, que quizás nunca sepamos qué parámetro es el definitorio para conseguir una victoria aun estando en el mejor momento de forma posible. De hecho, dependiendo de la naturaleza de la carrera, el ganador podría ser aquel ciclista que produzca la menor potencia media a lo largo de toda la duración de la prueba, produciendo únicamente un esfuerzo máximo superior al de sus competidores en un momento o momentos críticos (Quod et al., 2010).

1.2. Repetitividad y validez del perfil de potencia máximo obtenido en situaciones campo en ciclismo profesional

El perfil de potencia récord o máximo (RPP en inglés) es la mayor potencia (PO) desarrollada que puede alcanzar un ciclista durante una duración determinada en condiciones de campo (entrenamiento o competición) (Hopkins et al., 2001). Desde el desarrollo de los sensores de PO, el método de RPP ha ganado una creciente atención como medio para monitorizar el rendimiento de los ciclistas, permitiendo también comparaciones entre diferentes categorías de ciclismo o roles de equipo (Pinot y Grappe, 2011).

La información derivada de esta variable (en particular, la potencia media máxima (MMP) alcanzada para diferentes duraciones de esfuerzo) ha ganado atención como una alternativa práctica para monitorizar el rendimiento de resistencia de los ciclistas en sustitución de las pruebas de rendimiento más clásicas (Passfield et al., 2017). Por ejemplo, la MMP determinada durante el entrenamiento o la competición permite diferenciar entre los ciclistas en función de su nivel de competición o su función específica en el equipo (Pinot y Grappe, 2011; Valenzuela et al., 2022b).

Hasta la fecha, las investigaciones se han centrado en los efectos de diferentes variables independientes (p. ej., el entrenamiento y/o desentrenamiento, la fatiga

(Mateo-March et al., 2022), las condiciones ambientales (Valenzuela et al., 2022a), los tipos de carrera (van Erp et al., 2021) o el nivel competitivo (Valenzuela et al., 2022b) y el período de la temporada en cuestión (p. ej., preparatorio vs. específico) (Leo et al., 2020). Sin embargo, los entrenadores pocas veces tienen acceso a muestras de atletas lo suficientemente grandes como para permitirles aplicar dichas técnicas, lo que dificulta la interpretación práctica de los cambios individuales en el RPP. Además, una interpretación correcta de los cambios en el RPP sólo es posible si este indicador proporciona mediciones fiables (Hopkins et al., 2001). De hecho, un requisito esencial para cualquier variable relacionada con el rendimiento es la capacidad de proporcionar resultados repetibles en condiciones similares (Hopkins, 2000). De lo contrario, los entrenadores no podrían determinar si una determinada modificación del RPP refleja la variabilidad inherente al propio RPP o un cambio real en el rendimiento del ciclista (Courel-Ibáñez et al., 2019). Esta cuestión es especialmente relevante si se tiene en cuenta que en los deportes de élite pequeñas variaciones en el rendimiento fisiológico marcan la diferencia entre el ganador de una carrera y el resto de los competidores con un nivel muy similar. Por ejemplo, ¿podría un entrenador confiar en que el rendimiento de un ciclista ha cambiado realmente al detectar una variación aparentemente sutil (p. ej., $\leq 0,30 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el RPP para un esfuerzo de 20 minutos?

La repetitividad del RPP también podría estar influenciada por los diferentes periodos de la temporada, ya que el número de esfuerzos máximos que realizan los ciclistas de élite para una duración determinada está condicionado por las tácticas del equipo, el calendario competitivo o la programación del entrenamiento, entre otros factores que también pueden variar a lo largo de la temporada (Lucia et al., 2000). Así, es posible que la variación mínima en el RPP que los entrenadores tienen que detectar para suponer un cambio real en el rendimiento fisiológico difiera entre las distintas fases de una temporada de ciclismo profesional.

Los valores de MMP derivados del campo también pueden utilizarse para inferir la curva de potencia-duración (Karsten et al., 2015), con los parámetros derivados de esta curva, la llamada potencia crítica (CP, o "umbral de fatiga" definido como la tasa más alta sostenible de metabolismo aeróbico sin una pérdida continua

de homeostasis)(Jones et al., 2008) y W' (la capacidad de un atleta para ejercitarse bajo niveles crecientes de fatiga causados por su propia utilización) (Ferguson et al., 2010), siendo potencialmente aplicables para monitorizar el rendimiento y determinar las cargas de entrenamiento.

A pesar de su aplicabilidad práctica, la validez del MMP para reflejar las capacidades máximas reales de un ciclista sigue sin estar clara. Algunos autores han sugerido que el MMP (y la CP y W' derivados) pueden considerarse sustitutos prácticos del rendimiento determinado con pruebas específicas, como las pruebas de contrarrelojes simuladas (TT) diseñadas *ad hoc* para evaluar las capacidades máximas de los ciclistas (Karsten et al., 2015; Quod et al., 2010). Sin embargo, estos hallazgos no han sido corroborados en otros estudios, al menos cuando se consideran los datos del MMP obtenidos durante el período de preparación (Leo et al., 2021a). Por lo que todavía no sabemos con toda seguridad si los datos de campo son representativos de la capacidad de rendimiento máxima del ciclista y si la medida es repetible y en qué cuantía debe cambiar para ser considerada como válida y fiable.

1.3 El uso del análisis de datos de potencia durante una Gran Vuelta: categoría *WorldTour* versus *ProTeam*.

El ciclismo profesional de carretera es un deporte complejo en el que numerosas variables (como las condiciones ambientales, las características de la carrera o las tácticas del equipo) pueden afectar o condicionar el rendimiento individual (Phillips y Hopkins, 2020). Gracias a los avances tecnológicos, especialmente al desarrollo de los medidores de potencia para ciclismo, ahora es posible cuantificar las cargas externas reales que soportan los ciclistas en las competiciones de ciclismo profesional y durante los entrenamientos. En la última década, diferentes estudios han analizado las demandas físicas (energía mecánica) y los indicadores de rendimiento (potencia desarrollada) de las competiciones de ciclismo profesional atendiendo a diferentes variables como las características de la competición (competiciones de un solo día frente a competiciones de varios días, etapas llanas frente a etapas de montaña, etc.) (Sanders y van Erp, 2021; Santalla et al., 2012).

En lo que respecta a las grandes vueltas, se han publicado datos de PO (n = 9-20 ciclistas) durante el Giro de Italia, el Tour de Francia o la Vuelta a España (Sanders et al., 2018; Sanders y Heijboer, 2019; Vogt et al., 2007). Vogt et al. (2007) describieron los valores medios de PO alcanzados durante el Tour de Francia por 15 ciclistas que no obtuvieron una clasificación general muy buena. Sanders et al. (2018) analizaron los datos de 12 ciclistas de un equipo *WorldTour* (WT) que compitieron en el Giro de Italia o en la Vuelta a España durante el 2016, aparte de los valores medios de PO, también publicaron otras medidas de demanda física (p. ej., cargas de entrenamiento internas y externas). Después, Sanders y Heijboer (2019) describieron el perfil de PO y otros marcadores de rendimiento en 9 ciclistas que compitieron en el Giro de Italia del año 2016. Más recientemente, van Erp y Sanders (2021) publicaron los datos de competición de un período de 4 años (incluyendo competiciones de un solo día y de varios días) en 20 ciclistas de un equipo WT.

Sin embargo, se dispone de escasos datos sobre las variables asociadas a un mayor rendimiento durante el ciclismo, tal y como se ha puesto de manifiesto en una reciente revisión (van Erp y Sanders, 2021). Son pocos los estudios que han aportado información sobre las variables asociadas al éxito en el ciclismo profesional, entre otras, parece que un mayor tiempo a una alta PO o un mayor número de esfuerzos cortos de alta intensidad podrían ser condicionantes de un mejor rendimiento (Menaspà et al., 2017). No obstante, faltan pruebas sobre si las exigencias físicas y los indicadores de rendimiento durante las competiciones y, en particular, las grandes vueltas, difieren entre las distintas categorías profesionales de la UCI (WT frente a PT), que suelen tener objetivos diferentes (ganar la clasificación general frente a ganar algunas etapas, respectivamente) y alcanzan un rendimiento diferente durante la carrera.

Además de la necesidad de investigar este parámetro, algunos autores han añadido la importancia de una nueva variable, recientemente definida, la durabilidad, es decir, la capacidad de evitar la disminución del rendimiento asociada a la fatiga durante el ejercicio prolongado (Maunder et al., 2021). En este sentido, van Erp, et al. (2021) y Leo et al. (2021b) observaron que los ciclistas con un mayor nivel de rendimiento (es decir, los ciclistas WT de éxito frente a los menos exitosos, o los

ciclistas profesionales frente a los sub 23, respectivamente) fueron capaces de atenuar el descenso de los valores de MMP después de acumular niveles de fatiga (es decir, después de una cierta cantidad de trabajo mecánico, en kJ o $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). En conjunto, estos resultados sugerirían, al menos en parte, que la capacidad de producir valores elevados de MMP en condiciones de fatiga es un factor determinante del rendimiento en las competiciones ciclistas profesionales.

Dada la naturaleza poco predecible de las competiciones ciclistas (p. ej., con corredores frecuentemente motivados a formar una escapada) la capacidad de repetir esfuerzos de alta intensidad, aquí definida como "repetitividad", también podría considerarse un determinante potencial del rendimiento (Maunder et al., 2021). Por ejemplo, estudios anteriores han informado de que las ciclistas capaces de alcanzar un mayor rendimiento en carrera (posición top 5) son también los que pueden realizar un mayor número de esfuerzos cortos de alta intensidad (≥ 10 s a más $7,5 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$) durante competiciones de 1 día (Menaspà et al., 2017).

En el presente estudio nos propusimos comparar los indicadores de durabilidad (determinada por la capacidad de producir valores elevados de MMP con niveles de fatiga acumulativos) y de repetitividad (la capacidad de repetir esfuerzos con cargas de trabajo correspondientes, o cercanas, a la MMP) durante una Gran Vuelta de tres semanas de duración en ciclistas profesionales integrados unos, en un equipo WT y otros en un PT.

2. OBJETIVOS

2. Objetivos

Una vez realizada la revisión bibliográfica y conocido el marco teórico, nos planteamos los siguientes objetivos generales y específicos de investigación:

1. Analizar la calidad de la medida del perfil de potencia máximo obtenido con registros de entrenamiento y competición en las distintas fases y períodos de la temporada del ciclismo profesional.
 - 1.1. Examinar la repetitividad de los registros de potencia media máxima para los distintos tiempos de exposición en ciclistas profesionales de categoría mundial a lo largo de una temporada.
 - 1.2. Examinar la validez de los registros de potencia media máxima obtenidos en entrenamiento y competición como predictor del máximo potencial físico del ciclista profesional.
2. Describir y comparar las exigencias físicas y los indicadores de rendimiento del ciclismo profesional masculino en función de la categoría de competición durante una gran vuelta.
 - 2.1. Analizar las diferencias, si las hubiese, en el perfil de potencia máximo, los niveles de carga y la distribución de intensidades de los ciclistas masculinos de las categorías *ProTeam* y *World Tour* durante las tres semanas de una gran vuelta.
 - 2.2. Identificar si la capacidad de mantener valores elevados del perfil de potencia bajo condiciones de fatiga durante las tres semanas de una gran vuelta puede ser discriminativo del nivel competitivo en el ciclismo profesional.
 - 2.3. Identificar si la capacidad de repetir esfuerzos con cargas de trabajo próximas al perfil de potencia máximo del ciclista durante las tres semanas de una gran vuelta puede ser discriminativo del nivel competitivo en el ciclismo profesional.

3. Artículo I

Artículo I: Muriel, X., Valenzuela, P. L., Mateo-March, M., Pallarés, J. G., Lucia, A., y Barranco-Gil, D. (2022). Physical demands and performance indicators in male professional cyclists during a grand tour: WorldTour versus ProTeam category. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(1), 22-30.

ABSTRACT

Purpose: To compare the physical demands and performance indicators of male professional cyclists of 2 different categories (Union Cycliste Internationale WorldTour [WT] and ProTeam [PT]) during a cycling grand tour. **Methods:** A WT team (n = 8, 31.4 [5.4] y) and a PT team (n = 7, 26.9 [3.3] y) that completed "La Vuelta 2020" volunteered to participate. Participants' power output (PO) was registered, and measures of physical demand and physiological performance (kilojoules spent, training stress score, time spent at different PO bands/zones, and mean maximal PO [MMP] for different exertion durations) were computed. **Results:** WT achieved a higher final individual position than PT (31 [interquartile range = 33] vs 71 [59], P = .004). WT cyclists showed higher mean PO and kilojoule values than their PT peers and spent more time at high-intensity PO values (>5.25 W·kg⁻¹) and zones (91%-120% of individualized functional threshold power) (Ps < .05). Although no differences were found for MMP values in the overall analysis (P > .05), subanalyses revealed that the between-groups gap increased through the race, with WT cyclists reaching higher MMP values for ≥5-minute efforts in the second and third weeks (Ps < .05). **Conclusions:** Despite the multifactorial nature of cycling performance, WT cyclists spend more time at high intensities and show higher kilojoules and mean PO than their PT referents during a grand tour. Although the highest MMP values attained during the whole race might not differentiate between WT and PT cyclists, the former achieve higher MMP values as the race progresses.

Keywords: cycling; endurance; power meter; training load.

Link: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34343966/>

4. Artículo II

Artículo II: Muriel, X., Mateo-March, M., Valenzuela, P. L., Zabala, M., Lucia, A., Pallares, J. G., y Barranco-Gil, D. (2022). Durability and repeatability of professional cyclists during a Grand Tour. *European Journal of Sport Science*, 22(12), 1797-1804.

ABSTRACT

Durability and repeatability (i.e. the ability to sustain high power output values under fatigue and to endure repeated high-intensity efforts, respectively) are emerging as cycling performance determinants. We aimed to analyze whether these markers differ between professional cyclists of two competition levels (WorldTour [WT] and Proteam [PT]) during a Grand Tour. We studied 8 WT and 7 PT cyclists who competed in "La Vuelta 2020". Durability was assessed with the mean maximal power (MMP) values attained between 5 sec-30 min after different levels of mechanical work done (0-35 kJ·kg⁻¹). Repeatability was assessed as the ability to repeat efforts >95% MMP. Although no differences were found for durability during the whole race ($p = 0.209$), a significant interaction effect was found in separate analyses by week ($p = 0.011$). Thus, during the first week and in the "fresh" state (0 kJ·kg⁻¹), WT cyclists solely attained significantly higher MMP values for 30-min efforts. However, these differences enlarged with accumulating levels of fatigue (e.g. significantly higher MMP values in WT cyclists for 30-sec, 1-min, 5-min, 20-min and 30-min efforts after 35 kJ·kg⁻¹). On the other hand, no between-group differences were found in repeatability for the whole race ($p = 0.777$) or in separate analyses by week ($p = 0.808$). In summary, the present results support the role of durability (but not of repeatability) as a performance indicator during professional cycling races.

Keywords: Performance; cycling; endurance; fatigue; power output; power profile.

Link: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34586952/>

5. Artículo III

Artículo III: Muriel, X., Hernández-Belmonte, A., Mateo-March, M., Valenzuela, P. L., Zabala, M., Barranco-Gil, D., y Lucia, A., y Pallarés, J. G. (2022). Is the record power profile repeatable? A practical analysis and interpretation in professional cyclists. *Journal of Strength & Conditioning Research*. In Press.

ABSTRACT

This study assessed the repeatability of the record power profile (RPP, i.e., the highest power output that a cyclist can attain for different effort durations under field-based conditions). We registered the RPP of 12 professional cyclists (age 32 ± 5 years) for efforts lasting between 30 s and 60 min during three periods of a season, each of 23-day duration: preparation (including training data only), specific (training and competition data), and competition period (competition data only). Repeatability was assessed using the highest two (RPP2), three (RPP3), and five (RPP5) values of mean maximum power obtained by the cyclists for each effort duration in each of the three periods. Smaller standard errors of measurement (SEM) were found as the competitive period approached, especially for short-duration efforts (i.e., 30 s, 1 min, and 5 min, where SEM ranged from 4.3% to 12.5%, 4.1% to 8.5%, and 2.6% to 7.0% in the preparation, specific and competition periods, respectively). On the other hand, similar SEM values were found in the three periods for RPP2, RPP3, or RPP5. In conclusion, the RPP appears as a repeatable parameter for monitoring field-based performance within the different phases of the season in professional cyclists.

Keywords: cycling, power output, endurance, performance, assessment

Link: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36607237/>

6. CONCLUSIONES

6. Conclusiones

- i. El perfil de potencia puede considerarse un método reproducible y preciso para programar y monitorizar las cargas de entrenamiento a lo largo de las diferentes fases de una temporada de ciclismo profesional. No obstante, la calidad de esta métrica cae sustancialmente y por lo tanto debemos desaconsejar su uso para la estimación del potencial físico del ciclista en tiempos de exposición cortos (≤ 1 min) y cuando se dispone únicamente de registros de sesiones entrenamiento (sin competiciones), como suele ser habitual en las fases de pretemporada. Para estos tiempos de exposición cortos parece necesario la realización de test específicos con el objetivo de que el perfil de potencia muestre el potencial físico del ciclista.

- ii. Las exigencias físicas y los indicadores de rendimiento registrados en el trascurso de una gran vuelta, discriminan el nivel competitivo del ciclista profesional (*ProTeam* o *WorldTour*), especialmente el perfil de potencia máximo a medida que avanza la carrera (2ª y 3ª semana), tanto en condiciones de reposo, como bajo condiciones de fatiga acumulada. Por su parte, la capacidad del corredor para repetir esfuerzos con rendimientos muy próximos a su propio perfil de potencia máximo bajo condiciones de fatiga o repetitividad, no parece ser un factor discriminativo del nivel competitivo en el ciclismo profesional.

Fruto del trabajo de investigación y divulgación de este proyecto de tesis de Xabier Muriel Otegui, se han publicado siete artículos en revistas internacionales.

- I. Muriel, X., Hernández-Belmonte, A., Mateo-March, M., Valenzuela, P. L., Zabala, M., Barranco-Gil, D., y Lucia, A., y Pallarés, J. G. (2022). Is the record power profile repeatable? A practical analysis and interpretation in professional cyclists. *Journal of Strength & Conditioning Research*. In Press.
- II. Pallares, J. G., Hernández-Belmonte, A., Valenzuela, P. L., Muriel, X., Mateo-March, M., Barranco-Gil, D., y Lucia, A. (2022). Field-Derived Maximal Power Output in Cycling: An Accurate Indicator of Maximal Performance Capacity?. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 27, 1-7.
- III. Valenzuela, P. L., Muriel, X., van Erp, T., Mateo-March, M., Gandia-Soriano, A., Zabala, M., Lamberts R. P., Lucia, A. Barranco-Gil, D. y 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.
- IV. Mateo-March, M., van Erp, T., Muriel, X., Valenzuela, P. L., Zabala, M., Lamberts, R. P., Lucia, A. Barranco-Gil, D. y Pallarés, J. G. (2022). The record power profile in professional female cyclists: normative values obtained from a large database. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(5), 682-686.
- V. Muriel, X., Valenzuela, P. L., Mateo-March, M., Pallarés, J. G., Lucia, A., y Barranco-Gil, D. (2022). Physical demands and performance indicators in male professional cyclists during a grand tour: WorldTour versus ProTeam category. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(1), 22-30.
- VI. Muriel, X., Mateo-March, M., Valenzuela, P. L., Zabala, M., Lucia, A., Pallares, J. G., y Barranco-Gil, D. (2022). Durability and repeatability of professional cyclists during a Grand Tour. *European Journal of Sport Science*, 22(12), 1797-1804.
- VII. Muriel, X., Courel-Ibáñez, J., Cerezuela-Espejo, V., y Pallarés, J. G. (2020). Training load and performance impairments in professional cyclists during COVID-19 lockdown. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(5), 738-

7. Referencias

7. Referencias

- Allen, H., y Coggan, A.R., (2006). *Training and racing with a power meter*. Boulder, CO: VeloPress.
- Allen, H., y Coggan, A. R., (2010). Chapter 3: Power-based training. *Training and Racing With a Power Meter*. Boulder, CO: Velopress, 39-52.
- 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. <https://doi.org/10.1080/0264041031000102097>
- Bertucci, W., Duc, S., Villerius, V., y Grappe, F. (2005). Validity and reliability of the axiom powertrain cycle ergometer when compared with an SRM powermeter. *International Journal of Sports Medicine*, 26(1), 59–65. <https://doi.org/10.1055/s-2004-817855>
- Billat, V., Bernard, O., Pinoteau, J., Petit, B., y Koralsztejn, J. P. (1994). Time to exhaustion at VO₂max and lactate steady-state velocity in sub elite long-distance runners. *Archives Internationales De Physiologie De Biochimie Et De Biophysique*, 102(3), 215–219. <https://doi.org/10.3109/13813459409007541>
- Billat, V., Dalmay, F., Antonini, M. . T., y Chassain, A. P. (1994). A method for determining the maximal steady-state of blood lactate concentration from 2 levels of submaximal exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 69(3), 196–202. <https://doi.org/10.1007/bf01094788>
- Billat, V., Faina, M., Sarderella, F., Marini, C., Fanton, F., Lupo, S., ... Dalmonte, A. (1996). A comparison of time to exhaustion at VO₂max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics*, 39(2), 267–277. <https://doi.org/10.1080/00140139608964457>
- Brooks, A.N. (1989): Energy consumption of high efficiencyvehicles. *Cycling Science* 1:6-9
- Burnley, M., y Jones, A. M. (2018). Power-duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European journal of sport science*, 18(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249524>
- Cesanelli, L., e Indaburu, A. (2021). Evaluation of strategy and tactics in cycling: a systematic review of evaluation methods and possible performance implications. *The Journal of*

sports medicine and physical fitness, 61(6), 810–817. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.11397-5>

Constantini, K., Sabapathy, S., & Cross, T. J. (2014). A single-session testing protocol to determine critical power and W' . *European journal of applied physiology*, 114(6), 1153–1161. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2827-8>

Costa, V., Matos, D. G., Pertence, L., Martins, J., y Lima, J. (2011). Reproducibility of Cycling Time to Exhaustion at VO₂ Max in Competitive Cyclists. *Journal of Exercise Physiology*, 14(1), 28–34.

Cronin, J., y Sleivert, G. (2005). Challenges in understanding the influence of maximal power training on improving athletic performance. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(3), 213–234. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535030-00003>

Courel-Ibáñez, J., Martínez-Cava, A., Morán-Navarro, R., Escribano-Peñas, P., Chavarren-Cabrero, J., González-Badillo, J. J., y Pallarés, J. G. (2019). Reproducibility and Repeatability of Five Different Technologies for Bar Velocity Measurement in Resistance Training. *Annals of biomedical engineering*, 47(7), 1523–1538. <https://doi.org/10.1007/s10439-019-02265-6>

Craig, N. P., y Norton, K. I. (2001). Characteristics of track cycling. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(7), 457–468. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131070-00001>

Dotan R. (2022). A critical review of critical power. *European journal of applied physiology*, 122(7), 1559–1588. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-04922-6>

Ebert, T. R., Martin, D. T., Stephens, B., y Withers, R. T. (2006). Power output during a professional men's road-cycling tour. *International journal of sports physiology and performance*, 1(4), 324–335. <https://doi.org/10.1123/ijsp.1.4.324>

Faria, E. W., Parker, D. L., y Faria, I. E. (2005). The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(4), 285–312. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535040-00002>

Faude, O., Hecksteden, A., Hammes, D., Schumacher, F., Besenius, E., Sperlich, B., y Meyer, T. (2017). Reliability of time-to-exhaustion and selected psycho-physiological variables during constant-load cycling at the maximal lactate steady-state. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 42(2), 142–147. <https://doi.org/10.1139/apnm-2016-0375>

- Ferguson, C., Rossiter, H. B., Whipp, B. J., Cathcart, A. J., Murgatroyd, S. R., & Ward, S. A. (2010). Effect of recovery duration from prior exhaustive exercise on the parameters of the power-duration relationship. *Journal of applied physiology*, *108*(4), 866-874.
- Filho, E., di Fronso, S., Forzini, F., Murgia, M., Agostini, T., Bortoli, L., Robazza, C., y Bertollo, M. (2015). Athletic performance and recovery-stress factors in cycling: An ever changing balance. *European journal of sport science*, *15*(8), 671–680. <https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1048746>
- Gallo, G., Leo, P., March, M. M., Giorgi, A., Faelli, E., Ruggeri, P., Mujika, I., & Filipas, L. (2022). Differences in Training Characteristics Between Junior, Under 23 and Professional Cyclists. *International journal of sports medicine*, 10.1055/a-1847-5414. Advance online publication. <https://doi.org/10.1055/a-1847-5414>
- García-Lopez, J., Diez-Leal, S., Ogueta-Alday, A., Larrazabal, J., y Rodriguez-Marroyo, J. A. (2016). Differences in pedalling technique between road cyclists of different competitive levels. *Journal of Sports Sciences*, *34*(17), 1619–1626. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1127987>
- García-Manso, J. M., Martin-Gonzalez, J. M., Vaamonde, D., y Da Silva-Grigoletto, M. E. (2012). The limitations of scaling laws in the prediction of performance in endurance events. *Journal of Theoretical Biology*, *300*, 324–329. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.01.028>
- García-Pallarés, J., Sanchez-Medina, L., Carrasco, L., Diaz, A., y Izquierdo, M. (2009). Endurance and neuromuscular changes in world-class level kayakers during a periodized training cycle. *European Journal of Applied Physiology*, *106*(4), 629–638. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1061-2>
- García-Pallarés, J., Sanchez-Medina, L., Esteban Perez, C., Izquierdo-Gabarren, 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. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181c9228c>
- Gardner, A. S., Stephens, S., Martin, D. T., Lawton, E., Lee, H., y Jenkins, D. (2004). Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *36*(7), 1252–1258. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000132380.21785.03>

- Golich, D., y Broker, J. (1996). SRM bicycle instrumentation and the power output of elite male cyclists during the 1994 Tour Du Pont. *Performance Conditionin Cycling*, 2:6-8.
- Gorostiaga, E. M., Sánchez-Medina, L., & Garcia-Tabar, I. (2022). Over 55 years of critical power: Fact or artifact?. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 32(1), 116–124. <https://doi.org/10.1111/sms.14074>
- Higgins, M. F., James, R. S., y Price, M. J. (2014). Familiarisation to and reproducibility of cycling at 110% peak power output. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 54(2), 139–146. Retrieved from %3CGo
- Hill, A. V. (1925). The physiological basis of athletic records. *The Scientific Monthly*, 21(4), 409-428.
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 30(1), 1–15. <https://doi.org/10.2165/00007256-200030010-00001>
- Hopkins, W. G., Schabert, E. J., y Hawley, J. A. (2001). Reliability of power in physical performance tests. *Sports Medicine*, 31(3), 211–234. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131030-00005>
- Jeukendrup, A. E., Craig, N. P., y Hawley, J. A. (2000). The bioenergetics of World Class Cycling. *Journal of science and medicine in sport*, 3(4), 414–433. [https://doi.org/10.1016/s1440-2440\(00\)80008-0](https://doi.org/10.1016/s1440-2440(00)80008-0)
- Jeukendrup, A., Saris, W. H. M., Brouns, F., y Kester, A. D. M. (1996). A new validated endurance performance test. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(2), 266–270. <https://doi.org/10.1097/00005768-199602000-00017>
- Jeukendrup, A., & VanDiemen, A. (1998). Heart rate monitoring during training and competition in cyclists. *Journal of sports sciences*, 16 Suppl, S91–S99. <https://doi.org/10.1080/026404198366722>
- Jones, A. M., Wilkerson, D. P., DiMenna, F., Fulford, J., y Poole, D. C. (2008). Muscle metabolic responses to exercise above and below the “critical power” assessed using P-31-MRS. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 294(2), R585–R593. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00731.2007>
- Jones, S., y Passfield, L. (1998). Dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. *The Engineering of Sport*, 265–274.

- Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., y Poole, D. C. (2010). Critical power: implications for determination of $\dot{V}O_2\text{max}$ and exercise tolerance. *Medicine and science in sports and exercise*, 42(10), 1876–1890. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181d9cf7f>
- Karsten, B., Jobson, S. A., Hopker, J., Stevens, L., y Beedie, C. (2015). Validity and reliability of critical power field testing. *European journal of applied physiology*, 115(1), 197–204. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3001-z>
- Larrazabal, I., Iriberry, J., y Muriel, X. (2006). Power output related to exposure time in professional road cycling. In *Endurance Sports Science Conference, Birmingham*.
- Laursen, P. B., Ahern, S. M., Herzig, P. J., Shing, C. M., y Jenkins, D. G. (2003). Physiological responses to repeated bouts of high-intensity ultraendurance cycling - a field study case report. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 6(2), 176–186. [https://doi.org/10.1016/s1440-2440\(03\)80253-0](https://doi.org/10.1016/s1440-2440(03)80253-0)
- 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. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002518>
- Lim AC, Turner BM, Sweeney LR, Byrnes WC. (2002). Defining the demands of a national caliber cycling stage race using power and heart rate. *Medicine and science in sports and exercise* .34: S274.
- Leo, P., Spragg, J., Mujika, I., Giorgi, A., Lorang, D., Simon, D., y Lawley, J. S. (2021). Power profiling, workload characteristics, and race performance of U23 and professional cyclists during the multistage race Tour of the Alps. *International journal of sports physiology and performance*, 16(8), 1089-1095.
- Leo, P., Spragg, J., Mujika, I., Menz, V., y Lawley, J. S. (2021). Power Profiling in U23 Professional Cyclists During a Competitive Season. *International journal of sports physiology and performance*, 16(6), 881–889. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0200>
- Leo, P., Spragg, J., Simon, D., Lawley, J. S., y Mujika, I. (2020). Training characteristics and power profile of professional U23 cyclists throughout a competitive season. *Sports*, 8(12), 167.

- Leo, P., Spragg, J., Podlogar, T., Lawley, J. S., y Mujika, I. (2021). Power profiling and the power-duration relationship in cycling: a narrative review. *European Journal of Applied Physiology*, 1-16.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04833-y>
- Lucía, A., Hoyos, J., y Chicharro, J. L. (2001). Physiology of professional road cycling. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(5), 325–337. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131050-00004>
- Lucía, A., Hoyos, J., y Chicharro, J. L. (2001). Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 33(8), 1361–1366. <https://doi.org/10.1097/00005768-200108000-00018>
- 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. <https://doi.org/10.1097/00005768-200010000-00018>
- Lucía, A., Pardo, J., Durántez, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (1998). Physiological differences between professional and elite road cyclists. *International journal of sports medicine*, 19(5), 342–348. <https://doi.org/10.1055/s-2007-971928>
- Lucía, A., Sánchez, O., Carvajal, A., y Chicharro, J. L. (1999). Analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography. *British Journal of Sports Medicine*, 33(3), 178–185. <https://doi.org/10.1136/BJSM.33.3.178>
- Macartney, M.J., Hesselting, M., Ortolano, R., McLennan, P.L., Peoples, G. (2021). Evaluating the effect of a fish oil supplement on the Omega-3 Index of three professional cyclists competing in the Tour de France: a case study. *Journal of Science and Cycling*, 10:01. <https://doi.org/10.28985/1221.jsc.05>
- Maier, T., Schmid, L., Müller, B., Steiner, T., y Wehrlin, J. P. (2017). Accuracy of Cycling Power Meters against a Mathematical Model of Treadmill Cycling. *International journal of sports medicine*, 38(6), 456–461. <https://doi.org/10.1055/s-0043-102945>

- 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. Retrieved from %3CGo
- Mateo-March, M., Valenzuela, P. L., Muriel, X., Gandia-Soriano, A., Zabala, M., Lucía, A., Pallarés, J. G., y Barranco-Gil, D. (2022). The Record Power Profile of Male Professional Cyclists: Fatigue Matters. *International journal of sports physiology and performance*, 17(6), 926–931. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0403>
- Maunder, E., Seiler, S., Mildenhall, M. J., Kilding, A. E., y Plews, D. J. (2021). The importance of ‘durability’ in the physiological Pro"ling of endurance athletes. *Sports Medicine*, 51(8), 1619– 1628.
- Mattioni Maturana, F., Fontana, F. Y., Pogliaghi, S., Passfield, L., y Murias, J. M. (2018). Critical power: How different protocols and models affect its determination. *Journal of science and medicine in sport*, 21(7), 742–747. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.11.015>
- McLellan, T. M., Cheung, S. S., y Jacobs, I. (1995). Variability of time to exhaustion during submaximal exercise. *Canadian Journal of Applied Physiology-Revue Canadienne De Physiologie Appliquee*, 20(1), 39–51. Retrieved from %3CGo
- Menaspà, P., Sias, M., Bates, G., y La Torre, A. (2017). Demands of World Cup Competitions in Elite Women's Road Cycling. *International journal of sports physiology and performance*, 12(10), 1293–1296. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0588>
- Ministerio Cultura y Deporte. (2020). <https://www.csd.gob.es/sites/default/files/media/files/2021-06/encuesta-de-habitos-deportivos-2020.pdf>
- Monod, H., y Scherrer, J. (1965). The Work Capacity of a Synergistic Muscular Group. *Ergonomics*, 8(3), 329–338. <https://doi.org/10.1080/00140136508930810>
- Montalvo-Pérez, A., Alejo, L. B., Valenzuela, P. L., Castellanos, M., Gil-Cabrera, J., Talavera, E., Lucía, A., & Barranco-Gil, D. (2021). Validity of the Favero Assioma Duo Power Pedal System for Measuring Power Output and Cadence. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(7), 2277. <https://doi.org/10.3390/s21072277>
- Moritani, T., Nagata, A., Devries, H. A., y Muro, M. (1981). Critical power as a measure of

- physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24(5), 339–350.
<https://doi.org/10.1080/00140138108924856>
- Morton, R. H. (2006). The critical power and related whole-body bioenergetic models. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 339–354.
<https://doi.org/10.1007/s00421-005-0088-2>
- Mujika, I., y Padilla, S. (2001). Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(7), 479–487.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200131070-00003>
- Muniz-Pumares, D., Karsten, B., Triska, C., y Glaister, M. (2019). Methodological Approaches and Related Challenges Associated With the Determination of Critical Power and Curvature Constant. *Journal of strength and conditioning research*, 33(2), 584–596.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002977>
- Newton, R. U., y Kraemer, W. J. (1994). Developing Explosive Muscular Power: Implications for a Mixed Methods Training Strategy. *Strength y Conditioning Journal*, 16(5), 20-31.
- Nimmerichter, A., Schnitzer, L., Prinz, B., Simon, D., y Wirth, K. (2017). Validity and Reliability of the Garmin Vector Power Meter in Laboratory and Field Cycling. *International Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1055/s-0043-101909>
- Novak, A. R., Bennett, K. J., Pluss, M. A., Fransen, J., Watsford, M. L., y Dascombe, B. J. (2019). Power profiles of competitive and noncompetitive mountain bikers. *The Journal of Strength y Conditioning Research*, 33(2), 538-543.
- 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. <https://doi.org/10.1097/00005768-199906000-00017>
- Padilla, S., Mujika, I., Orbañanos, J., Santisteban, J., Angulo, F., y José 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.
<https://doi.org/10.1097/00005768-200105000-00019>
- Padilla, S., Mujika, I., Orbañanos, 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. <https://doi.org/10.1097/00005768-200004000-00019>

Pallarés, J. G., Lillo-Bevia, J. R., Morán-Navarro, R., Cerezuela-Espejo, V., y Mora-Rodriguez, R. (2020). Time to exhaustion during cycling is not well predicted by critical power calculations. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 45(7), 753–760. <https://doi.org/10.1139/apnm-2019-0637>

Passfield L. (2017). Cycling Science. *Journal of sports sciences*, 35(14), 1327. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1313625>

Passfield, L., Hopker, J. G., Jobson, S., Friel, D., y Zabala, M. (2017). Knowledge is power: Issues of measuring training and performance in cycling. *Journal of sports sciences*, 35(14), 1426–1434. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1215504>

Paton, C., y Hopkins, W. (2001). Tests of cycling performance. *Sports Medicine*, 31(7), 489–496. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131070-00004>

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 medicine - open*, 6(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s40798-020-00252-z>

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. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1279773>

Quod, M. J., Martin, D. T., Martin, J. C., y Laursen, P. B. (2010). The power profile predicts road cycling MMP. *International Journal of Sports Medicine*, 31(06), 397-401.

Rodríguez-Rielves, V., Lillo-Beviá, J. R., Buendía-Romero, Á., Martínez-Cava, A., Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., & Pallarés, J. G. (2021). Are the Assioma Favero Power Meter Pedals a Reliable Tool for Monitoring Cycling Power Output?. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(8), 2789. <https://doi.org/10.3390/s21082789>

Sanders, D., y Heijboer, M. (2019). The anaerobic power reserve and its applicability in professional road cycling. *Journal of sports sciences*, 37(6), 621–629. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1522684>

Sanders, D., Heijboer, M., Hesselink, M., Myers, T., y Akubat, I. (2018). Analysing a cycling grand tour: Can we monitor fatigue with intensity or load ratios?. *Journal of sports*

sciences, 36(12), 1385–1391. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1388669>

Sanders, D., y van Erp, T. (2021). The Physical Demands and Power Profile of Professional Men's Cycling Races: An Updated Review. *International journal of sports physiology and performance*, 16(1), 3–12. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0508>

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. <https://doi.org/10.1123/ijsp.7.3.200>

Seiler, S. (2010). What is Best Practice for Training Intensity and Duration Distribution in Endurance Athletes? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 276–291. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.3.276>

Seiler, S., y Sjursen, J. E. (2004). Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scandinavian journal of medicine y science in sports*, 14(5), 318–325. <https://doi.org/10.1046/j.1600-0838.2003.00353.x>

Stöggl, T. L., y Sperlich, B. (2015). The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Frontiers in Physiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00295>

Too D. (1990). Biomechanics of cycling and factors affecting performance. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 10(5), 286–302. <https://doi.org/10.2165/00007256-199010050-00002>

Union Internationale de Cyclisme. (2022): *Regulations* <https://www.uci.org/regulations/3MyLDDrwJCJJ0BGGOFzOat>

Valenzuela, P. L., Alejo, L. B., Montalvo-Pérez, A., Gil-Cabrera, J., Talavera, E., Lucía, A., y Barranco-Gil, D. (2021). Relationship Between Critical Power and Different Lactate Threshold Markers in Recreational Cyclists. *Frontiers in physiology*, 12, 676484. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.676484>

Valenzuela, P. L., Mateo-March, M., Zabala, M., Muriel, X., Lucía, A., Barranco-Gil, D., y Pallarés, J. G. (2022). Ambient Temperature and Field-Based Cycling Performance: Insights From Male and Female Professional Cyclists. *International journal of sports physiology and performance*, 17(7), 1025–1029. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0508>

- Valenzuela, P. L., Muriel, X., van Erp, T., Mateo-March, M., Gandia-Soriano, A., Zabala, M., Lamberts, R. P., Lucía, A., Barranco-Gil, D., y 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. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0263>
- Vandewalle, H., y Driss, T. (2015). Friction-loaded cycle ergometers: Past, present and future. *Cogent Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1029237>
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(3), 548–555. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31802dd3e6>
- 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. <https://doi.org/10.1123/ijsp.6.1.128>
- van Erp, T., Hoozemans, M., Foster, C., y DE Koning, J. J. (2020). Case Report: Load, Intensity, and Performance Characteristics in Multiple Grand Tours. *Medicine and science in sports and exercise*, 52(4), 868–875. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002210>
- van Erp, T., y Lamberts, R. P. (2022). Performance Characteristics of TOP5 Versus NOT-TOP5 Races in Female Professional Cycling. *International journal of sports physiology and performance*, 17(7), 1070–1076. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0488>
- van Erp, T., y Sanders, D. (2021). Demands of professional cycling races: Influence of race category and result. *European journal of sport science*, 21(5), 666–677. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1788651>
- van Erp, T., Sanders, D., y de Koning, J. J. (2019). Training Characteristics of Male and Female Professional Road Cyclists: A 4-Year Retrospective Analysis. *International journal of sports physiology and performance*, 1–7. Advance online publication. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0320>
- van Erp, T., Sanders, D., y Lamberts, R. P. (2021). Maintaining Power Output with Accumulating Levels of Work Done Is a Key Determinant for Success in Professional Cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 53(9), 1903–1910. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002656>

- van Erp, T., van der Hoorn, T., Hoozemans, M., Foster, C., & de Koning, J. J. (2022). Various Workload Models and the Preseason Are Associated With Injuries in Professional Female Cyclists. *International journal of sports physiology and performance*, 17(2), 210–215. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0144>
- Van Praagh, E., Bedu, M., Roddier, P., y Coudert, J. (1992). A simple calibration method for mechanically braked cycle ergometers. *International journal of sports medicine*, 13(1), 27–30. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021229>
- 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. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000183196.63081.6a>
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Roecker, K., Dickhuth, H. H., Schoberer, U., Schmid, A., y Heinrich, L. (2007). Power Output during the Tour de France. *International journal of sports medicine*, 28(9), 756–761. <https://doi.org/10.1055/s-2007-964982>
- Wang, Y., Wang, L., y Ge, J. (2022). Best Pacing Strategy: Time Trial Optimization with Physiological and Power Simulation. *Frontiers in Sport Research*; 4, 35-43, DOI: 10.25236/FSR.2022.040407
- Weber, S., Hartung, S., y Platen P. (2005). Characteristics of power output in professional cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 37, S80-S81.
- Weyand, P. G., Lin, J. E., y Bundle, M. W. (2006). Sprint performance-duration relationships are set by the fractional duration of external force application. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 290(3), R758–R765. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00562.2005>

8. ANEXOS

ANEXO I

Aprobación Comité Ética de la Universidad de Murcia

INFORME DE LA COMISIÓN DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE MURCIA

Jaime Peris Riera, Catedrático de Universidad y Secretario de la Comisión de Ética de Investigación de la Universidad de Murcia,

CERTIFICA:

Que D. Jesús García Pallarés ha presentado la memoria de trabajo del Proyecto de Investigación titulado "*Estudios de las exigencias físicas del ciclismo profesional masculino y femenino*", a la Comisión de Ética de Investigación de la Universidad de Murcia.

Que dicha Comisión analizó toda la documentación presentada, y de conformidad con lo acordado el día ocho de junio de dos mil veintiuno¹, por unanimidad, se emite INFORME FAVORABLE, desde el punto de vista ético de la investigación.

Y para que conste y tenga los efectos que correspondan firmo esta certificación con el visto bueno de la Presidenta de la Comisión.

Vº Bº
LA PRESIDENTA DE LA COMISIÓN
DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA
UNIVERSIDAD DE MURCIA

Fdo.: María Senena Corbalán García

ID: 3482/2021

¹A los efectos de lo establecido en el art. 19.5 de la Ley 40/2015 de 1 de octubre de Régimen Jurídico del Sector Público (B.O.E. 02-10), se advierte que el acta de la sesión citada está pendiente de aprobación

