



# **UNIVERSIDAD DE MURCIA**

## **ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**

Herramientas y Protocolos para la Valoración y  
Programación del Entrenamiento en Atletas de  
Medio y Alto Nivel

**D. Víctor Cerezuela Espejo**

**2020**





# **UNIVERSIDAD DE MURCIA**

**ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**

## **TESIS DOCTORAL**

### **Herramientas y protocolos para la valoración y programación del entrenamiento en atletas de medio y alto nivel**

Tesis para optar al grado de doctor presentada por:

**D. Víctor Cerezuela Espejo**

**Director:**

Dr. Jesús García Pallarés

**San Javier, julio 2020**





# **UNIVERSIDAD DE MURCIA**

**ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**

## **TESIS DOCTORAL**

**Herramientas y protocolos para la valoración y  
programación del entrenamiento en atletas de  
medio y alto nivel**

**Doctorando:**

**Director:**



*A mi familia,  
ya que gracias a los que están presentes y los que me ven desde las alturas, me habéis  
educado y habéis hecho ser quien soy en la vida. No puedo estar más orgulloso de ello.*



## I. AGRADECIMIENTOS

En este punto de inflexión en mi vida, no se puede comenzar de mejor manera este texto que agradeciendo a todas las personas que a lo largo este camino han puesto un granito de arena para que hoy este trabajo sea posible y vea la luz, por ello, quiero agradecer de corazón:

A mi director de tesis, Jesús García Pallarés, porque desde que llegué al laboratorio me adoptaste como si de una familia se tratara. Desde ese momento me has ido enseñando y guiando no solo en lo profesional sino en lo personal, has marcado cada uno de los pasos que desde ese momento he dado, me he desarrollado tanto en el ámbito de la investigación como en el ámbito profesional gracias a tu conocimiento y consejos. Han sido muchas horas, correos, madrugones, llamadas y alguna que otra reunión sobre las dos ruedas las cuales han conseguido que me unan a ti además de cómo mentor como un gran amigo. De todo corazón gracias.

A mi padre que, aunque no esté hoy presente ha sido, es y será mi referente, la persona que me lo ha dado todo y que consiguió educar a un hijo dándole y enseñándole a ser perseverante, trabajador y a buscar siempre la excelencia. Gracias estés donde estés. Esto va por ti.

A mi madre y mi hermano porque pese a no haber pasado momentos fáciles, han sabido apoyarme y ayudarme de manera incondicional, porque sois los pilares de mi vida y porque no se puede ser más afortunado de tener una familia como la mía. Me habéis enseñado a valorar las cosas y a confiar en la familia. Gracias especialmente a ti mamá por todo lo que haces por tus hijos, no se si sabré devolverte tanto que me has dado.

A Alfonso Cavas porque eres una persona de referencia y a la que admiro día a día.

A mi amigo Víctor Rodríguez Rielves, por darme la oportunidad de mejorar como profesional y por apostar por mí desde que te conocí, por ser mi compañero de batallas y una persona a la que siempre estaré agradecida.

A todos los voluntarios que han formado parte de los trabajos que se exponen, porque sin su presencia esta tesis nunca se hubiera podido llevar a cabo.

Y por último y de manera más que especial a toda mi familia de *HUMAN PERFORMANCE & SPORTS SCIENCE* (Ricardo, Alejandro, V. Rielves, Paulo, V. Cerezuela, J. Courel, J.R. Lillo, Salva , Jr y Ángel), porque cada uno de ellos han aportado algo a este trabajo y sobre todo han aportado algo más valioso que cualquier cosa que es la AMISTAD, gracias, compañeros. #PROUDTOBEPART

Sinceramente,

**¡MUCHAS GRACIAS A TODOS!**

## II. PUBLICACIONES Y DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

La Tesis Doctoral que aquí se presenta es un compendio de las tres publicaciones más relevantes del doctorando publicadas en revistas científicas internacionales (*JCR*):

**Artículo 1 Cerezuela-Espejo, V.,** Courel-Ibáñez, J., Morán-Navarro, R., Martínez-Cava, A., & Pallarés, J. G. (2018). The relationship between lactate and ventilatory thresholds in runners: Validity and reliability of exercise test performance parameters. *Frontiers in Physiology*, 9.

**Artículo 2 Cerezuela-Espejo, V.,** Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., Conesa-Ros, E., Mora-Rodríguez, R., & Pallarés, J. G. (2020). Are we ready to measure running power? Validity of five commercial technologies. *European Journal of Sport Science*, doi: 10.1080/17461391.2020.1748117

**Artículo 3 Cerezuela-Espejo, V.,** Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., Conesa-Ros, E., Martínez-Cava, A., & Pallarés, J. G. (2020). Running power meters and theoretical models based on laws of physics: Effect on environments and running conditions. *Physiology & Behavior*, In Press

Comunicaciones presentadas en formato póster o comunicaciones orales en Congresos Internacionales:

- **Cerezuela-Espejo, V.**, Martínez-Cava, A., Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., Morán-Navarro, R., Conesa-Ros, E., y Pallarés, JG. (2019). Test de campo incremental en rampa para la estimación de la capacidad aeróbica. (Congreso Internacional de Iniciación a la Investigación en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, Murcia).
- **Cerezuela-Espejo, V.**, Martínez-Cava, A., Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., Morán-Navarro, R., Conesa-Ros, E., Mora-Rodríguez, R., y Pallarés, JG. (2019). Can running power devices asses running performance? (Congreso Internacional de Iniciación a la Investigación en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, Murcia).

### III. RESUMEN

**ESTUDIO I:** *Relación entre umbrales ventilatorios y de lactato en corredores: validez y fiabilidad de los principales parámetros del rendimiento.*

Este estudio tuvo como objetivos i) establecer el grado de ajuste entre los parámetros de rendimiento ventilatorio y de lactato en la carrera y ii) la exploración de alternativas novedosas para la estimación de la velocidad aeróbica máxima (VAM) en corredores entrenados. Con dicho fin veintidós atletas masculinos ( $\text{VO}_{2\text{max}} 60.2 \pm 4.3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ) completaron tres pruebas incrementales máximas en rampa (GXT): (i) un GXT preliminar para determinar la VAM individual de cada corredor, y (ii) dos GXT experimentales, individualmente ajustados por la VAM previamente determinada, en los que se obtuvieron las velocidades asociadas a los principales eventos de transición aeróbico-anaeróbica medidos por calorimetría indirecta y lactato de sangre capilar. Además, se determinó el máximo estado estable de lactato (MLSS) a través de varias pruebas de carrera constante de 30 minutos, siguiendo procedimientos estandarizados. Los resultados del análisis de fiabilidad mostraron una alta consistencia ( $\text{CV} < 3.1\%$ ), bajo error ( $< 0.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) y alta correlación ( $\text{CCI} > 0.91$ ) en todos los hitos fisiológicos analizados, a excepción del V-Slope ( $\text{CCI} = 0.84$ ). Los resultados del análisis de validez mostraron una alta correspondencia entre el LT y el VT1 ( $-0.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; sesgo = 1.2;  $\text{CCI} = 0.90$ ;  $p = 0.57$ ), el LT + 1.0 del MLSS ( $-0.2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; sesgo = 1.2;  $\text{CCI} = 0.84$ ;  $p = 0.74$ ) y el LT + 3.0  $\text{mMol}\cdot\text{L}^{-1}$ , del VT2 ( $< 0.1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; sesgo = 1.3;  $\text{CCI} = 0.82$ ;  $p = 0.99$ ). El MLSS se identificó como un evento fisiológico único, definido como un punto intermedio entre el VT1 (sesgo =  $-2.0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) y el VT2 (sesgo =  $2.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). A partir de la velocidad máxima ( $V_{\text{pico}}$ ) alcanzada en los GXT, se define una ecuación de estimación de la VAM ( $V_{\text{AMEST}} (\text{km}\cdot\text{h}^{-1}) = V_{\text{pico}} (\text{km}\cdot\text{h}^{-1}) * 0.8348 + 2.308$ ) de muy alta precisión ( $\text{EEM} \pm 0.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). El protocolo GXT individualizado basado en la VAM de cada corredor se muestra como una herramienta eficaz y consistente para determinar parámetros fisiológicos máximos y submáximos en carrera. Los registros de umbral de lactato pueden ser una alternativa a las pruebas ventilatorias y de MLSS para identificar las cargas de trabajo en la transición del metabolismo aeróbico a anaeróbico en atletas bien entrenados. En contra de creencias tradicionales, el MLSS se muestra como un evento fisiológico único, localizado entre los umbrales VT1 y VT2. La  $V_{\text{pico}}$  o destaca como un potente predictor de la VAM.

**STUDY I:** *The relationship between lactate and ventilatory thresholds in runners: Validity and reliability of exercise test performance parameters.*

The aims of this study were (1) to establish the best fit between ventilatory and lactate exercise performance parameters in running and (2) to explore novel alternatives to estimate the maximal aerobic speed (MAS) in well-trained runners. Twenty-two trained male athletes ( $\text{VO}_{2\text{max}} 60.2 \pm 4.3 \text{ ml}\cdot\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$ ) completed three maximal graded exercise tests (GXT): (1) a preliminary GXT to determine individuals' MAS; (2) two experimental GXT individually adjusted by MAS to record the speed associated to the main aerobic–anaerobic transition events measured by indirect calorimetry and capillary blood lactate (CBL). Athletes also performed several 30 min constant running tests to determine the maximal lactate steady state (MLSS). Reliability analysis revealed low CV ( $< 3.1\%$ ), low bias ( $< 0.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ), and high correlation (CCI  $> 0.91$ ) for all determinations except V-Slope (CCI = 0.84). Validity analysis showed that LT, LT+1.0, and LT+3.0  $\text{mMol}\cdot\text{L}^{-1}$  were solid predictors of VT1 ( $-0.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; bias = 1.2; CCI = 0.90;  $p = 0.57$ ), MLSS ( $-0.2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; bias = 1.2; CCI = 0.84;  $p = 0.74$ ), and VT2 ( $< 0.1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ; bias = 1.3; CCI = 0.82;  $p = 0.919$ ), respectively. MLSS was identified as a different physiological event and a midpoint between VT1 (bias =  $-2.0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) and VT2 (bias =  $2.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). MAS was accurately estimated ( $\text{EEM} \pm 0.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) from peak velocity ( $V_{\text{peak}}$ ) attained during GXT with the equation:  $\text{MASEST} (\text{km}\cdot\text{h}^{-1}) = V_{\text{peak}} (\text{km}\cdot\text{h}^{-1}) * 0.8348 + 2.308$ . Current individualized GXT protocol based on individuals' MAS was solid to determine both maximal and submaximal physiological parameters. Lactate threshold tests can be a valid and reliable alternative to VT and MLSS to identify the workloads at the transition from aerobic to anaerobic metabolism in well-trained runners. In contrast with traditional assumption, the MLSS constituted a midpoint physiological event between VT1 and VT2 in runners. The  $V_{\text{peak}}$  stands out as a powerful predictor of MAS.

**ESTUDIO II: Artículo 2.** *¿Estamos preparados para medir la potencia en carrera? Reproducibilidad y validez concurrente de cinco tecnologías comerciales.*

La programación del entrenamiento y la monitorización de la carga en carrera se han visto beneficiadas por los nuevos datos de potencia obtenidos por tecnologías emergentes. Sin embargo, hasta la fecha, la validez y precisión de los datos de potencia de carrera (Pw) proporcionados por estas tecnologías son aún inciertos. Con el fin de aclarar este aspecto, el presente estudio tuvo como fin: i) analizar la reproducibilidad de cinco tecnologías comerciales disponibles para la estimación de la Pw de carrera, y ii) examinar la validez concurrente a través de la relación entre la Pw y el consumo de oxígeno (VO<sub>2</sub>) para cada tecnología. En dos ocasiones (test-retest), doce atletas varones llevaron a cabo tres protocolos submáximos en dos entornos distintos, en cinta (indoor) y en una pista de atletismo (outdoor), donde se manipularon las condiciones de velocidad, peso corporal y pendiente. La potencia se registró simultáneamente por diferentes dispositivos, StrydApp, StrydWatch, RunScribe, GarminRP y Polarv, mientras que el VO<sub>2</sub>, VCO<sub>2</sub> y ventilación fueron monitorizados respiración a respiración mediante un sistema de calorimetría indirecta. Los datos del test-retest de los distintos entornos (indoor y outdoor) y las diferentes condiciones (velocidad, peso corporal y pendiente) se utilizaron para el análisis de reproducibilidad, el cual incluyó el error estándar de la medida (EEM), el coeficiente de variación (CV) y el coeficiente de correlación intraclase (CCI). Para el análisis de la relación existente entre la Pw y el VO<sub>2</sub> se utilizó un modelo de regresión lineal y el error estándar de la estimación (EEE). Los resultados manifestaron que StrydApp y StrydWatch obtuvieron la mayor reproducibilidad para cada uno de los entornos y condiciones estudiadas (EEM ≤ 12.5W, CV ≤ 4.3%, CCI ≥ 0.980). Además, éstas mismas tecnologías obtuvieron la mejor validez concurrente con el VO<sub>2</sub> (r ≥ 0.911, EEE ≤ 7.3%). Por otra parte, aunque los dispositivos Polarv, GarminRP y RunScribe, tienen una cierta relación con el VO<sub>2</sub>, su escasa reproducibilidad hace cuestionarse su adecuación. Por lo tanto, Stryd puede considerarse como la herramienta más recomendable entre las analizadas para la medición de Pw.

**STUDY II: Paper 2.** *Are we ready to measure running power? Repeatability and concurrent validity of five commercial technologies.*

Training prescription and load monitoring in running activities have benefited from power output (Pw) data obtained by new technologies. Nevertheless, to date, the suitability of Pw data provided by these tools is still uncertain. In order to clarify this aspect, the present study aimed to: i) analyze the repeatability of five commercially available technologies for running Pw estimation, and ii) examine the concurrent validity through the relationship between each technology Pw and oxygen uptake (VO<sub>2</sub>). On two occasions (test-retest), twelve endurance-trained male athletes performed on a treadmill (indoor) and an athletic track (outdoor) three submaximal running protocols with manipulations in speed, body weight and slope. Pw was simultaneously registered by the commercial technologies StrydApp, StrydWatch, RunScribe, GarminRP and Polarv, while VO<sub>2</sub> was monitored by a metabolic cart. Test-retest data from the environments (indoor and outdoor) and conditions (speed, body weight and slope) were used for repeatability analysis, which included the standard error of measurement (SEM), coefficient of variation (CV) and intraclass correlation coefficient (ICC). A linear regression analysis and the standard error of estimation (SEE) were used to examine the relationship between Pw and VO<sub>2</sub>. Stryd device was found as the most repeatable technology for all environments and conditions (SEM≤12.5W, CV≤4.3%, ICC≥0.980), besides the best concurrent validity to the VO<sub>2</sub> (r≥9.11, SEE≤7.3%). On the contrary, although the Polarv, GarminRP and RunScribe technologies maintain a certain relationship with VO<sub>2</sub>, their low repeatability questions their suitability. The Stryd can be considered as the most recommended tool, among the analyzed, for PW measurement.

**ESTUDIO II: Artículo 3. *Potenciómetros de carrera y modelos teóricos basados en las leyes de la física: Efecto del entorno y las condiciones de la carrera.***

La programación del entrenamiento y la monitorización de la carga se han beneficiado desde la aparición de nuevas tecnologías que aportan datos sobre la producción de potencia en carrera ( $P_w$ ). Sin embargo, hasta la fecha, la validez y precisión de los datos obtenidos de estas tecnologías son aún inciertos. Con el fin de aclarar este aspecto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar el nivel de acuerdo entre la  $P_w$  estimada por cinco dispositivos comercializados con este fin, y los dos principales modelos teóricos basados en las leyes de la física, en diferentes entornos y condiciones. Diez participantes llevaron a cabo tres protocolos submáximos en tapiz rodante (indoor) y en una pista de atletismo (outdoor), con cambios en la velocidad, peso corporal y pendiente. La potencia se registró simultáneamente por diferentes dispositivos, StrydApp, StrydWatch, RunScribe, GarminRP y Polarv, mientras que la potencia teórica ( $TP_w$ ) se calculó en base a los modelos matemáticos ( $TP_{w1}$  y  $TP_{w2}$ ). Los cálculos estadísticos incluyeron, entre otros, el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y el error estándar de la medida (EEM). El Polarv, y sobre todo Stryd, obtuvieron el mejor acuerdo con la  $TP_{w1}$  (Stryd:  $r \geq 0.947$ ,  $EEM \leq 11$  W; PolarV:  $r \geq 0.931$ ,  $EEM \leq 64$  W) y  $TP_{w2}$  (Stryd:  $r \geq 0.933$ ,  $EEM \leq 60$  W; Polarv:  $r \geq 0.932$ ,  $EEM \leq 24$  W), tanto en indoor como en outdoor. Por otra parte, los dispositivos GarminRP ( $r \leq 0.765$ ,  $SEM \geq 59$  W) y RunScribe. ( $r \leq 0.508$ ,  $SEM \geq 125$  W) obtuvieron el menor nivel de acuerdo con los cálculos obtenidos de los modelos  $TP_{w1}$  y  $TP_{w2}$  para cada una de las condiciones y entornos analizados. La estrecha relación observada entre las tecnologías Stryd y Polarv con los modelos  $TP_{w1}$  y  $TP_{w2}$ , sugieren que son las más sensibles, entre las analizadas, para la medición de la  $P_w$  cuando se modifica el entorno y las condiciones.

STUDY II: *Paper 3. Running power meters and theoretical models based on laws of physics: Effect of environments and running conditions.*

Training prescription and load monitoring in running activities have benefited from power output (PW) data offered by new technologies. Nevertheless, to date, the suitability of PW data provided by these tools is not still clarified. The aim of this study was to analyze the level of agreement between Pw estimated by five commercial technologies and the two main internationally theoretical models based on laws of physics, when changing environments and running conditions. Ten endurance-trained male athletes performed three submaximal running protocols on a treadmill (indoor) and an athletic track (outdoor), with changes in speed, body weight, and slope. Pw was simultaneously registered by the commercial technologies Stryd (Stryd<sub>App</sub> and Stryd<sub>Watch</sub>), RunScribe, Garmin<sub>RP</sub> and Polar<sub>v</sub>, whereas theoretical power output (TP<sub>w</sub>) was calculated by the two mathematical models (TP<sub>w1</sub> and TP<sub>w2</sub>), based on each running condition (speed, body weight, and slope). Calculations included, among others, the Pearson's correlation coefficient ( $r$ ) and standard error of measurement (SEM). Both indoor and outdoor, the Stryd and Polar<sub>v</sub> technologies showed the closest agreement with the TP<sub>w1</sub> (Stryd:  $r \geq 0.947$ , SEM  $\leq 11$  W; Polar<sub>v</sub>:  $r \geq 0.931$ , SEM  $\leq 64$  W) and TP<sub>w2</sub> (Stryd:  $r \geq 0.933$ , SEM  $\leq 60$  W; Polar<sub>v</sub>:  $r \geq 0.932$ , SEM  $\leq 24$  W). Nevertheless, the relationship between the Stryd<sub>Watch</sub> and both TP<sub>w</sub> models decreased when the slope was modified. On the other hand, the devices Garmin<sub>RP</sub> ( $r \leq 0.765$ , SEM  $\geq 59$  W) and RunScribe. ( $r \leq 0.508$ , SEM  $\geq 125$  W) showed the lowest agreement with the TP<sub>w1</sub> and TP<sub>w2</sub> models for all conditions and environments analyzed. The closest agreement of the Stryd and Polar<sub>v</sub> technologies with the TP<sub>w1</sub> and TP<sub>w2</sub> models suggest these tools as the most sensitive, among the analyzed, for Pw measurement when changing environments and running conditions.

## IV. ÍNDICE DE CONTENIDOS

I.	AGRADECIMIENTOS .....	I
II.	PUBLICACIONES Y DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	III
III.	RESUMEN.....	V
	ESTUDIO I: <i>Relación entre umbrales ventilatorios y de lactato en corredores: validez y fiabilidad de los principales parámetros del rendimiento.</i> .....	V
	STUDY I: <i>The relationship between lactate and ventilatory thresholds in runners: Validity and reliability of exercise test performance parameters.</i> .....	VI
	ESTUDIO II: <i>Artículo 2. ¿Estamos preparados para medir la potencia en carrera? Reproducibilidad y validez concurrente de cinco tecnologías comerciales.</i> .....	VII
	STUDY II: <i>Paper 2. Are we ready to measure running power? Repeatability and concurrent validity of five commercial technologies.</i> .....	VIII
	ESTUDIO II: <i>Artículo 3. Potenciómetros de carrera y modelos teóricos basados en las leyes de la física: Efecto del entorno y las condiciones de la carrera.</i> .....	IX
	STUDY II: <i>Paper 3. Running power meters and theoretical models based on laws of physics: Effect of environments and running conditions.</i> .....	X
IV.	ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	XI
	INTRODUCCIÓN .....	1
1.	INTRODUCCIÓN GENERAL DE LA TESIS .....	3
1.1.	PROLOGO .....	3
1.2.	MARCO TEÓRICO.....	4
1.3.	POTENCIA DE CARRERA, UN PARAMETRO PROMETEDOR EN LA PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LAS CARGAS .....	10
1.4.	BIBLIOGRAFÍA .....	19
2.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	35
3.	ESTUDIO I.....	39
3.1.	ARTÍCULO 1 .....	39
	RESUMEN 1: .....	39
4.	ESTUDIO II.....	43
4.1.	ARTÍCULO 2 .....	43
	RESUMEN 2: .....	43
4.2.	ARTÍCULO 3 .....	45
	RESUMEN 2: .....	45
5.	CONCLUSIONES y APLICACIONES PRÁCTICAS .....	49



# **INTRODUCCIÓN**



# **1. INTRODUCCIÓN GENERAL DE LA TESIS**

## **1.1. PROLOGO**

El objetivo de cualquier entrenador o deportista de modalidades de resistencia radica en la mejora de su capacidad funcional, al tiempo que se protege su salud física y mental. La búsqueda de los métodos de entrenamiento que permiten maximizar las adaptaciones ha sido un objetivo prioritario de la fisiología del ejercicio desde los años 60 del pasado siglo. En concreto, la programación de la intensidad del esfuerzo basado en la localización individualizada de los hitos fisiológicos ha demostrado ser el sistema más efectivo para maximizar las adaptaciones cardiorrespiratorias, neuromusculares, metabólicas y hormonales para, en definitiva, alcanzar la optimización del rendimiento funcional. Por ello, la localización, directa o indirecta, de la posición individual de estos eventos fisiológicos de la manera más válida, precisa, fiable, sensible y práctica ha sido objeto de investigación y debate en los últimos 40 años.

Para responder esta problemática, la presente Tesis Doctoral se ha diseñado en base a tres estudios interrelacionados. El objetivo principal del Estudio I es diseñar herramientas y procedimientos que permitan a los entrenadores poder detectar los principales hitos fisiológicos de la transición aeróbica-anaeróbica de una manera individualizada, sencilla y asequible, con un coste de recursos humanos y materiales muy limitado. El segundo de los estudios, Estudio II, pretende validar un test de campo que permita estimar fielmente parámetros decisivos del rendimiento cardiorrespiratorio en corredores como la velocidad aeróbica máxima y el consumo máximo de oxígeno, todo ello de nuevo a un coste de recursos humanos y materiales muy limitado. Finalmente, el Estudio III tiene por objetivo analizar la calidad de la medida de cinco novedosos dispositivos que estiman la potencia de carrera manipulando las principales variables que condicionan el resultado del trabajo mecánico (peso, pendiente, velocidad y localización Indoor vs. Outdoor). Para ello, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de la reproducibilidad (test-retest), la validez concurrente de cada dispositivo con el coste metabólico de los distintos esfuerzos, así como un estudio del acuerdo entre los registros obtenidos por cada una de estas nuevas tecnologías y los principales modelos matemáticos de predicción de la potencia de carrera publicados hasta la

fecha. Aunque la monitorización de la potencia ha resultado ser revolucionaria en el pedaleo desde su incorporación en los años 90, hasta la fecha, los dispositivos disponibles para registrar la potencia de carrera distan mucho de ser una tecnología confiable y consolidada.

## 1.2. MARCO TEÓRICO

Desde los años 60 del pasado siglo, son muchos los investigadores los que vienen intentando determinar cuáles son los factores que mayor peso tienen en la predicción del rendimiento en deportes de resistencia. Si bien es cierto que los factores bioquímicos, hormonales, fisiológicos, neuromusculares, psicológicos, técnicos y tácticos (Smith, 2003), son los grandes predominantes en este tipo de modalidades, la importancia de los mismos no es equitativa dependiendo del tiempo de exposición y modalidad deportiva que se analice (Bassett & Howley, 2000; Brandon, 1995; Dengel, Flynn, Costill, y Kirwan, 2012; Lamberts, Lambert, Swart, y Noakes, 2012; Lundby y Robach, 2015; Rønnestad, Hansen, Stensløykken, Joyner, y Lundby, 2019).

Aunque a menudo la terminología y taxonomía empleada pueda ser muy variable y confusa, existe a día de hoy cierto consenso en la literatura internacional en señalar cuatro principales factores condicionales o predictores del rendimiento en pruebas de resistencia (Allen, Seals, Hurley, Ehsani, & Hagberg, 1985; Barnes y Kilding, 2015; Billat, Sirvent, Py, Koralsztejn, y Mercier, 2003; Jones y Carter, 2000; Lucía et al., 2006; Pallarés y Moran-Navarro, 2012; Saunders, Pyne, Telford, y Hawley, 2004; Tanaka, 1990; Yoshida et al., 1990):

1. La potencia aeróbica o consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2max}$ ).
2. El nivel absoluto y la posición relativa de la transición aeróbica-anaeróbica (umbrales aeróbico y anaeróbico y máximo estado estable).
3. Eficiencia metabólica o economía de movimiento.
4. Capacidad y potencia anaeróbica.

En función del tiempo de exposición, esto es, de la duración de la prueba y de la presencia o no de cambios en la intensidad de esfuerzo, cada una de estas cuatro variables va a tener una mayor o menor relevancia, y por lo tanto capacidad predictiva, en el resultado deportivo (Lamberts et al., 2012). Conociendo la relevancia de cada una de estas variables, el siguiente paso en la planificación de cualquier técnico sería la evaluación del nivel de las

mismas en sus deportistas, para de este modo, poder controlar y evaluar el rendimiento cardiorrespiratorio y programar de la manera más precisa e individualizada las cargas de entrenamiento (Esteve-Lanao, Foster, Seiler, y Lucía, 2007; García-Pallarés, García-Fernández, Sánchez-Medina, e Izquierdo, 2010; García-Pallarés, Sánchez-Medina, Carrasco, Díaz, e Izquierdo, 2009; Lucía, Hoyos, Perez, & Chicharro, 2000). Más concretamente la programación de la intensidad del esfuerzo basada en los parámetros fisiológicos individuales, ha demostrado ser la metodología más acertada para maximizar las adaptaciones al tiempo que se disminuye la probabilidad de producir un sobreentrenamiento o una lesión. (García-Pallarés et al., 2009; Mann, Lamberts, y Lambert, 2014; Scharhag-Rosenberger, Walitzek, Kindermann, y Meyer, 2012; Wolpern, Burgos, Janot, y Dalleck, 2015).

Por lo tanto, y en base a lo anteriormente expuesto, se hace imperativa la correcta evaluación de los principales hitos fisiológicos de la transición aeróbica-anaeróbica definidos por Skinner y Mclellan (1980), primer umbral ventilatorio ( $VT_1$ ) y segundo umbral ventilatorio ( $VT_2$ ), junto con el  $VO_{2max}$  y el Máximo Estado Estable de Lactato (MLSS), entendiéndose este como un evento fisiológico diferenciado según se ha demostrado en publicaciones recientes (Pallarés, Morán-Navarro, Ortega, Fernández-Elías, y Mora-Rodríguez, 2016; Peinado et al., 2016).

Para la evaluación de estos eventos relacionados con el rendimiento en ciclistas o corredores, es común el uso de test incrementales en rampa (GXT) en cicloergómetro o tapiz rodante, respectivamente. Estas pruebas consisten en una serie de etapas o palieres de intensidad creciente que suelen oscilar entre 1 y 5 minutos de duración. Las diferencias en la duración de cada una de estos palieres y la magnitud del incremento de la carga de los mismos pueden alterar de manera significativa la respuesta cardiorrespiratoria y metabólica y, por lo tanto, todos los resultados obtenidos de este (Bentley, Newell, y Bishop, 2007; Julio, Panissa, Shiroma, y Franchini, 2017). Como sugieren estudios tradicionales (Buchfuhrer et al., 1983; Lukaski, Bolonchuk, y Klevay, 1989), otros más recientes (Midgley, McNaughton, Polman, y Marchant, 2007), e incluso revisiones (Julio et al., 2017), los test GXT más tradicionales que suelen tener una duración media de 20 a 30 minutos para determinar los diferentes umbrales, o que utilizan incrementos con duraciones comprendidas entre los 3 y 5 minutos, van a impedir a los deportistas alcanzar de manera fidedigna (Julio et al., 2017) su verdadera Velocidad Aeróbica Máxima (VAM), definida como la primera velocidad que propicia el  $VO_{2max}$  (Lacour, Padilla-Magunacelaya, Chatard, Arsac, y Barthélémy, 1991), ni tampoco la Velocidad Pico ( $V_{pico}$ ) real, definida como la velocidad más alta alcanzada al final de este tipo de test (Kuipers, Rietjens, Verstappen, Schoenmakers, y Hofman, 2003). La

principal causa de este impedimento recae sobre la aparición de fatiga periférica debido a la acidosis muscular (Pallarés et al., 2016), o incluso la deriva cardíaca (Dawson et al., 2005). La correcta obtención de estos parámetros es algo sumamente importante a la hora de crear protocolos, ya que, hasta la fecha, la VAM es la principal variable empleada para la programación de la intensidad del entrenamiento en corredores (Billat y Koralsztein, 1996; Jones y Carter, 2000). Algunos estudios realizados con ciclistas demuestran que protocolos con duraciones más reducidas (12-14 min), e incrementos de la intensidad en palieres de un minuto, son alternativas válidas tanto para la estimación de los principales puntos de inflexión ventilatorios y de lactato, así como para la identificación de valores reales de  $VO_{2max}$  y potencia aeróbica máxima (PAM) (Gaskill et al., 2001; Lucía, Hoyos, Pérez, y Chicharro, 2000; Lucía, Sánchez, Carvajal, y Chicharro, 1999; Midgley, McNaughton, & Carroll, 2007; Pallarés et al., 2016). Sin embargo, estas evidencias que se han reportado al comparar distintas duraciones del test incremental en ciclismo no se han confirmado en carrera, por lo que existe un importante vacío de conocimiento sobre esta cuestión extremadamente importante para la programación del entrenamiento y valoración del rendimiento en este modo de ejercicio.

Tradicionalmente, y debido a los altos niveles de precisión, validez y fiabilidad requeridos para la identificación de las principales respuestas fisiológicas de la vía aeróbica en los GXT, la monitorización de la ventilación *respiración a respiración* mediante la calorimetría indirecta se ha propuesto como el criterio referencia (Carter y Jeukendrup, 2002; Gaskill et al., 2001; Kawakami, Nozaki, Matsuo, y Fukunaga, 1992; Lucía et al., 2000; Pallarés et al., 2016). Estos sistemas basan su funcionamiento en el intercambio gaseoso con el fin de identificar el primer y segundo umbral ventilatorio (VT1 y VT2) y hacia el final de la prueba, el  $VO_{2max}$  del deportista. En la intensidad asociada a VT1, el  $VO_2$  y la producción de dióxido de carbono ( $VCO_2$ ) aumentan proporcionalmente, mientras que el  $HCO_3^-$  actúa de tamponador para amortiguar la concentración de ácido láctico en la sangre (Coso, Hamouti, Aguado-Jimenez, y Mora-Rodriguez, 2009; Wasserman, Whipp, Koyal, Beaver, 1973); esta intensidad se recomienda para trabajos extensivos donde predomina el alto volumen y la baja intensidad (Stöggl y Sperlich, 2014). A su vez, en VT2, la acumulación de lactato en sangre aumenta de manera desproporcionada provocando una inestabilidad metabólica y produciendo un colapso del sistema de tamponamiento del bicarbonato, el cual regula la función homeostática acido-base (Jones, Wilkerson, DiMenna, Fulford, y Poole, 2007; Wasserman, Whipp, Koyal, Beaver, 1973); esta intensidad supone una barrera crítica a partir de la cual el entrenamiento será considerado de alta intensidad (Stöggl y Sperlich, 2014).

Hacia el final de la prueba encontramos el  $VO_{2max}$ , un parámetro de gran valor y aplicación práctica en el ámbito del rendimiento deportivo como se ha justificado anteriormente. Este fue definido por primera vez en 1923 por Hill y Lupton, y corresponde a la cantidad más elevada de oxígeno que el organismo es capaz de absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo (López-Chicharro y Fernández-Vaquero, 2006), además representa la máxima producción de energía por la vía aeróbica y se considera como uno de los mejores predictores del rendimiento aeróbico (Jones y Carter, 2000). Pese a utilizarse como patrón de referencia, dado su grado de precisión y sensibilidad, los sistemas de calorimetría indirecta con intercambio de gases suponen el uso de equipamiento sumamente costosos, además de unas condiciones de laboratorio específicas que la mayoría de los entrenadores y atletas no poseen o son incapaces de pagar.

Aunque con una menor calidad de la medida (menor precisión y sensibilidad principalmente), las muestras del lactato en sangre capilar (CBL) conforman un método alternativo para la localización de la intensidad individual del ejercicio (Beneke, Leithäuser, y Ochentel, 2011; Lucía et al., 2000; Pallarés et al., 2016). Varios autores han definido diferentes hitos fisiológicos asociados a intensidades específicas de ejercicio como el umbral de lactato (LT), definido como la velocidad más alta previa a un aumento sobre los niveles de lactato por encima de la línea de base (Wasserman, Whipp, Koyal, Beaver, 1973; Weltman et al., 1990), el MLSS (Beneke y von Duvillard, 1996), el OBLA (onset of blood lactate accumulation), (Sjödín y Jacobs, 1981) o el DMAX (Cheng et al., 1992). La detección precisa del MLSS es realmente importante dado que se considera la máxima intensidad en la cual los depósitos de glucógeno son el mayor factor limitante ante la aparición de fatiga (Coyle, Coggan, Hemmert, y Ivy, 1986) además de que es una intensidad sumamente utilizada en la preparación de deportistas de distintos niveles de rendimiento (García-Pallarés et al., 2010, 2009). Pese a que estos métodos son usados a menudo por entrenadores para establecer las cargas individuales de entrenamiento, la relación entre los umbrales ventilatorios (VTs) reconocidos como patrones de referencia (Wolpern et al., 2015) y aquellos parámetros basados en el lactato, tradicionalmente ha sido causa de debate. Recientemente un estudio realizado con ciclistas ha intentado esclarecer dicha relación, reportando una alta validez y reproducibilidad en las siguientes relaciones: i)  $VT_1$  y LT, ii)  $VT_2$  y  $LT+2 \text{ mMol}\cdot\text{L}^{-1}$  y iii) MLSS y  $LT+0.5 \text{ mMol}\cdot\text{L}^{-1}$  (Pallarés et al., 2016). Estos resultados corroboran los hallazgos obtenidos en ciclistas profesionales, donde la relación era prácticamente absoluta entre el  $VT_1$  y el LT (Lucía et al., 2000) y donde se definía el MLSS como un punto intermedio entre umbrales (Peinado et al., 2016). Sin embargo, para nuestro conocimiento, esta posible

relación o correspondencia entre umbrales ventilatorios y lácticos no se ha investigado hasta la fecha en corredores. Además, ante el extendido uso de esta metodología por sus ventajas económicas y materiales en la práctica profesional, es necesario esclarecer, no solo si existe relación entre ambas determinaciones para cada hito fisiológico, sino también si existen diferencias en las correspondencias Lactato vs. Ventilación entre carrera y pedaleo. Ante la falta de estas evidencias, en la práctica real, gran número de corredores y entrenadores están aplicando las relaciones detectadas en ciclismo para este modo de ejercicio. En este sentido, están bien documentado que existen diferencias entre el gesto técnico del pedaleo y de la carrera, habiéndose registrado diferentes respuestas cardiorrespiratorias y metabólicas para el mismo hito fisiológico ( $FC_{max}$ ,  $VO_{2max}$ , etc.) explicado, entre otras causas, por las diferencias en la masa muscular implicada en el movimiento, por la capacidad oxidativa de la misma, o las diferencias evidentes en la eficiencia delta de cada modalidad de desplazamiento (Bijker, de Groot, & Hollander, 2002; Millet, Vleck, y Bentley, 2009). En base a estas evidencias, parece obvio pensar que, si aplicamos los valores y correspondencias entre umbrales ventilatorios y lácticos obtenidos para el ciclismo en el entrenamiento de corredores, la evaluación o propuestas de intensidades podría ser errónea.

Otro tipo de evaluaciones altamente utilizadas son las desarrolladas en espacios abiertos conocidos en inglés como *outdoor*, normalmente en pistas atletismo. Estos test se caracterizan por los escasos requerimientos materiales y humanos necesarios para llevarlos a cabo, así como su sencillez en la ejecución. Por el contrario, los resultados que se obtienen de estas valoraciones son estimaciones más o menos precisas del rendimiento real del deportista, no son medidas directas de los cambios cardiorrespiratorios y metabólicos que permiten identificar la posición de los distintos hitos fisiológicos. Normalmente hay dos marcadores de rendimiento que son de gran interés para los entrenadores cuando realizan test en pista, éstas son la  $V_{pico}$  y la VAM. Esta VAM se utiliza como valor de referencia a la hora de determinar las intensidades y la distribución de las cargas en deportes de resistencia basado en los límites del rendimiento aeróbico (Stöggl y Sperlich, 2014). Dado el estrecho parecido entre las dos intensidades, los test en pista utilizan la  $V_{pico}$  para la estimación de la VAM (Berthoin et al., 1994; Berthon et al., 1997; Léger y Boucher, 1980) cuando no existe la posibilidad de monitorizar el intercambio gaseoso. Por lo tanto, tal y como se ha expuesto anteriormente, resulta de suma importancia diseñar test indirectos de campo que permitan a los atletas alcanzar su máximo potencial aeróbico (gasto cardiaco máximo,  $VO_{2max}$ , y por ende la verdadera VAM) para poder obtener indicadores de rendimiento de alta calidad y que

a su vez permitan programar la intensidad de las sesiones de entrenamiento venideras los más precisas e individualizadas posibles.

Dentro de los test de estimación en carrera, el protocolo de la Universidad de Montreal (UMTT) es la prueba más conocida y ampliamente utilizada para la estimación de los principales parámetros del rendimiento en carrera en test de campo (Léger y Boucher, 1980). Esta valoración se define como un test escalonado que sigue un protocolo GXT de varias etapas con incrementos de 1 km·h<sup>-1</sup> cada 2 minutos para estimar el VO<sub>2max</sub> y la VAM mediante la Vpico alcanzada. En este test, la VAM se estima a partir del último palier completado (Lacour et al., 1991). En base a este cálculo, numerosos autores han publicado sus propias modificaciones del UMTT, incluyendo variaciones en los procedimientos como la distancia existente entre los conos o marcas, la duración de los palieres o la velocidad de calentamiento (Billat, Hill, Pinoteau, Petit, y Koralsztejn, 1996; Cazorla, 1990; Cazorla y Leger, 1993).

Pese a su implantación masiva en los centros y grupos de entrenamiento relacionados con la carrera, los resultados y estimaciones de los parámetros de rendimiento obtenidos en este test continúan suscitando ciertas dudas respecto a su validez. Éstas dudas se fundamentan, como se ha comentado anteriormente, en la metodología de realización de los mismos, especialmente en la elección de los incrementos de velocidad, ya que hacen correr a los deportistas largos periodos de tiempo (unos 24 min para un deportista con una VAM de 19 km/h), lo que puede provocar que los atletas no sean capaces de alcanzar su Vpico real y el verdadero gasto cardiaco máximo (Buchfuhrer et al., 1983; Julio et al., 2017; Lukaski et al., 1989; Midgley, McNaughton, y Carroll, 2007). Además, también sería razonable dudar de la idoneidad de los protocolos de laboratorio utilizados para validar este UMTT en los estudios originales, ya que también se realizaron test incrementales máximos con largos palieres, lo que puede evidentemente afectar a que en esas pruebas utilizadas de criterio tampoco se alcanzaran los verdaderos valores máximos, aunque en ellas se monitorizase el intercambio gaseoso mediante calorimetría indirecta (Billat et al., 1996; Cazorla, 1990; Georges Cazorla y Léger, 1993). Finalmente, otro aspecto metodológico que requiere clarificación es el efecto que puede tener el diseño del incremento de la carga sobre la respuesta cardiorrespiratoria, ya que cambios de la velocidad cada minuto puede provocar una respuesta sustancialmente distinta a los cambios en rampa total, es decir, cambios de velocidad constantes e imperceptibles para el atleta (Myers et al., 1991).

### 1.3. POTENCIA DE CARRERA, UN PARAMETRO PROMETEDOR EN LA PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LAS CARGAS

La intensidad del entrenamiento de resistencia es quizás el componente de la carga que en mayor medida va a condicionar el tipo de adaptaciones que se produce en el atleta (Vesterinen et al., 2016), es decir, será la intensidad del esfuerzo la que oriente las mejoras hacia estructuras o sistemas más centrales (volumen sistólico, volemia, diferencia arterio-venosa de O<sub>2</sub>, etc.) o periféricas (ej. densidad capilar y mitocondrial, enzimas glucolíticas u oxidativas, aumento de miofibrillas, etc.)(García-Pallarés e Izquierdo, 2011).

Como se ha venido introduciendo, la intensidad indica el esfuerzo relativo al que está sometido un individuo respecto a un valor de referencia individual, generalmente a un máximo. Esta intensidad puede definirse de acuerdo a indicadores de carga interna o externa, o incluso, ya que todas ellas tienen sus ventajas, pero también sus inconvenientes, es más recomendable programar la intensidad del esfuerzo en base a una combinación de ambas (internas y externas) (Mora-Rodríguez, Pallarés, y Ortega, 2019).

Dentro de las variables de carga externa destaca, por su precisión en la medida del trabajo realizado y el gasto energético en un determinado esfuerzo, la potencia, que desde un punto de vista físico se define como el producto de la fuerza por la velocidad, o también el tiempo requerido para realizar un determinado trabajo.

$$\text{Potencia (W)} = \text{Trabajo (J)} \cdot \text{Tiempo}^{-1} (\text{s}^{-1}) = \text{Fuerza (N)} \cdot \text{Velocidad (m/s)} = \text{Masa (kg)} \cdot \text{Aceleración (m/s}^2) \cdot \text{Velocidad (m/s)}$$

Existen infinidad de tecnologías accesibles en las ciencias del ejercicio destinadas a la monitorización en deportes de resistencia, ejemplo de ellas son, las destinadas a cuantificar el desplazamiento de los deportistas (ej. GPS), o destinadas al control de variables de carga interna (ej. Pulsómetros), pero actualmente solo contamos con dispositivos para medir la fuerza aplicada (ej. plataforma dinamométrica, galgas extensiométricas, galgas de presión o cintas instrumentadas) en movimientos analíticos y con una complejidad técnica baja (Cavanagh y Lafortune, 1980; Challis, 2001; Kram, Griffin, Donelan, y Chang, 1998; Nicol, Komi, y Marconnet, 2007). Por ello la medición de la potencia en los movimientos cíclicos, aunque pueda tener infinidad de aplicaciones prácticas, hasta la fecha únicamente se ha conseguido implantar con un error mínimo en la medida para el gesto técnico del pedaleo (cicloergómetro) (Jones & Passfield, 1998; Passfield Doust, 2000; Reiser, Meyer,

Kindermann, y Daug, 2000; Vandewalle y Driss, 2015) . Pese a que este sistema de del trabajo se incorporó al pedaleo en bicicleta estática a principios del siglo XX, no ha sido hasta principios del siglo XXI, con la aparición de nuevos materiales más resistentes y livianos, cuando se han podido diseñar potenciómetros portátiles para incorporar de forma masiva estos sistemas en la propia bicicleta del ciclista o del triatleta (Bouillod, Pinot, Soto-Romero, Bertucci, y Grappe, 2017; Lillo-Bevia y Pallarés, 2018; Pallarés y Lillo-Bevia, 2018).

Esta variable de control de la carga externa es la más precisa que podemos utilizar para controlar y conocer el comportamiento de los esfuerzos de un deportista dadas sus diversas aplicaciones prácticas:

- A través de la medición del trabajo mecánico producido y la estimación de la eficiencia, podemos conocer, con un error menor al 2%, el gasto calórico total que ha tenido una determina actividad medida con potenciómetro (Mora-Rodríguez et al., 2019).
- En conjunto con la calorimetría indirecta, la medida de potencia nos permite cuantificar si el entrenamiento está provocando una mejora en la eficiencia del movimiento, es decir, los cambios en relación entre la energía suministrada y la energía convertida en trabajo (Coyle et al., 1986).
- Dada la estrecha relación que existe entre la potencia y el consumo de oxígeno (Arts y Kuipers, 1994; Muniz-Pumares, Pedlar, Godfrey, y Glaister, 2017), y que no le afectan negativamente otras variables contaminantes como la deriva cardiaca, el componente lento y rápido del oxígeno, el viento, la temperatura o la pendiente del terreno, la potencia está considerada como el mejor indicador de carga externa de un determinado esfuerzo (Helgerud et al., 2007; Lucía et al., 2000; Lucía et al., 1999; Rønnestad y Hansen, 2016).
- La potencia relativa al peso corporal que un individuo es capaz de desarrollar, especialmente cuando hay cambios en la altitud o ascensión vertical, representa un valor real del rendimiento a esa intensidad de carga interna, máxima o submáxima ( $VO_2$ ), por lo que los valores se pueden comparar perfectamente en el tiempo para uno mismo, o en cualquier momento entre distintos individuos, por lo que nos permite diferenciar su nivel competitivo (H. Allen y Coggan, 2006).

Como se ha mencionado, el uso de potenciómetros en deportes como el ciclismo está ya extendido, no solo a laboratorios, sino que es accesible a deportistas para el uso en sus

propias bicicletas (Rainmaker,2019). No obstante, en otros deportes cíclicos tales como la natación o la carrera a pie, la obtención de la medida de potencia continúa siendo muy compleja, dada la imposibilidad técnica principal de medir la fuerza aplicada, y, por lo tanto, se han seguido utilizando otros indicadores de carga externa para el control de la intensidad del entrenamiento como la velocidad (Berthoin, Pelayo, LenseCorbeil, Robin, y Gerbeaux, 1996; Berthon et al., 1997; Dekerle, Sidney, Hespel, y Pelayo, 2002).

La popularización y el auge que ha sufrido la carrera a pie en la última década (Kennedy, Baker, Jordan, y Funk, 2019) en los sectores del rendimiento, la recreación y la salud, ha promovido el interés y el desarrollo de nuevos dispositivos y tecnologías para el control de la intensidad de este modo de ejercicio, tanto a nivel de parámetros técnicos como de la carga del entrenamiento (intensidad principalmente). Entre estos nuevos *gadgets* destacan una serie de dispositivos que, mediante distintos sensores y el registro de diferentes métricas, aspiran a estimar el valor de potencia mecánica de carrera. Tratando de alcanzar las aplicaciones prácticas que presentan actualmente los potenciómetros de pedaleo, estos potenciómetros de carrera pretenden optimizar el control de la carga externa minimizando las principales desventajas que conlleva la monitorización y programación de la intensidad del esfuerzo mediante la velocidad, ritmo o tiempo de paso, como son los cambios en la orografía, la intensidad y dirección del viento o el tipo de superficie. Estos nuevos dispositivos, también conocidos como *weareables*, presentan ventajas como una mayor versatilidad, practicidad y funcionamiento, y tienen en común el uso de IMUS (inertial motion units) (Luinge, 2002), que cuentan principalmente con acelerómetros, magnetómetros y giroscopios, los cuales, obtienen en la mayoría de los casos la información necesaria para medir o predecir el valor de una variable por si solos. En determinadas ocasiones, los IMUS necesitan de información complementaria proveniente de otras unidades externas para estimar así de una manera más precisa la variable objeto, un ejemplo claro es la integración de los sistemas inerciales que encontramos en nuestros dispositivos móviles con la vinculación de sistemas de posicionamiento global (GPS). En la actualidad la integración de estos sistemas en plantillas, footpods, bandas torácicas o relojes entre otros, permiten llevar a la calle parámetros que hasta hace pocos años, solo se podían medir en laboratorio con materiales sumamente costosos e inaccesibles a entrenadores y corredores (plataformas de fuerzas, cintas instrumentadas, unidades ópticas 3D, etc.), y en unas condiciones muy distintas a las de entrenamiento o competición, es decir, se ha avanzado notablemente en la mejora de la validez ecológica de estas medidas (Degroote, DeSmet, De Bourdeaudhuij, Van Dyck, y Crombez, 2020; Reilly, Morris, y Whyte, 2009).

En sus inicios, las primeras unidades de sensores inerciales (Kim, 1997) comenzaron a utilizarse como predictores de la carga de entrenamiento, midiendo los cambios de aceleración en el desplazamiento (Meijer, Westerterp, y Verstappen, 1999). A consecuencia de lo anteriormente mencionado, estos dispositivos se han colocado tradicionalmente en la cadera, espalda o muñeca, y han registrado las cuentas o número de cambios en la aceleración por minuto (p. ej. volumen de actividad física). La aplicación práctica de estos sensores inerciales ha sido la estimación del gasto calórico de un sujeto en una actividad mediante el cálculo de MTETs o equivalente metabólico (Trost et al., 1998), pero esta variable no esclarece fielmente la intensidad a la que se realiza la actividad, impidiendo la correcta programación de la misma y las adaptaciones cardiorrespiratorias o neuromusculares que se pretendían conseguir con el entrenamiento. En los últimos años, este tipo de dispositivos se han utilizado principalmente para la medición de parámetros biomecánicos, como aspectos espaciotemporales y variables del análisis de la marcha (Brayne, Barnes, Heller, y Wheat, 2018; García-Pinillos, Chicano-Gutiérrez, Ruiz-Malagón, y Roche-Seruendo, 2020; Hollis, Koldenhoven, Resch, y Hertel, 2019; Jaén-Carrillo et al., 2020; Koldenhoven y Hertel, 2018). Un nuevo paradigma parece crearse a partir de los avances tecnológicos y el estudio de sus algoritmos, los que posibilitan la estimación de la potencia mecánica en deportes como la carrera, siendo esto un punto de inflexión en la programación de la intensidad del entrenamiento tanto para deportistas como entrenadores (Vance, 2016).

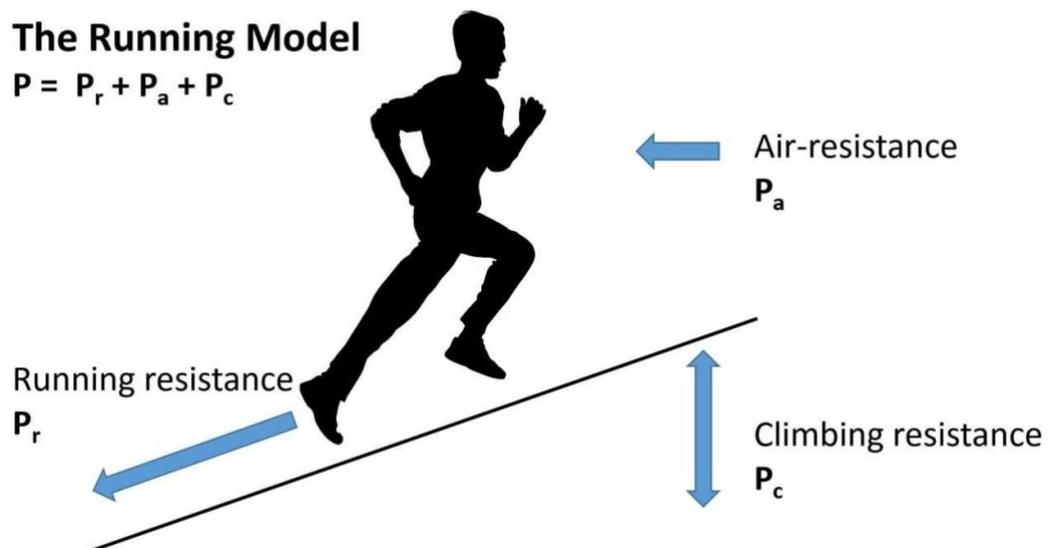
El estudio de los algoritmos y modelos matemáticos que utilizan estos dispositivos para la estimación de la potencia mecánica de la carrera se iniciaron en los primeros años de la década de los 70, donde Cavagna, Komarek, y Mazzoleni (1971) analizaban los factores que parecían incidir la producción de potencia en corredores de sprint. Siguiendo esta misma línea de investigación, años más tarde aparecieron trabajos que tenían en común las premisas que se habían expuesto en este primer estudio, en las que a un aumento de velocidad iba ligado un aumento lineal y proporcional de la potencia mecánica y que, por lo tanto, el consumo máximo de oxígeno también seguiría ésta tendencia y estrecha relación (Coyle et al., 1983; Kaneko, 1990; Martin, Heise, y Morgan, 1993; Savolainen y Visuri, 1994; Williams y Cavanagh, 1983). Diferentes autores intentaron aportar modelos que permitieran calcular la potencia mecánica a través de los datos que ofrecían tanto plataforma de fuerzas como otros parámetros cinemáticos como tiempos de contacto, tiempo de vuelo o el grado de impacto a la hora de hacer contacto con el suelo (Cavagna, Mantovani, Willems, y Musch, 1997; Cavanagh y Lafortune, 1980; Clark, Ryan, y Weyand, 2017; Samozino et al., 2016). Hoy en día, y pese no existir un consenso sobre el tema, se sigue investigando en la mejora de

estos modelos matemáticos para la predicción de la potencia (Dijk y Megen, 2017; Mulligan, Adam, y Emig, 2018; Skiba, 2006; Vandewalle, 2018).

Los dos modelos más utilizados tanto en la literatura internacional como en la aplicación de los dispositivos que hoy en día existen en el mercado son los modelos de (Dijk y Megen, 2017; Skiba, 2006).

Comenzando con el modelo propuesto por Dijk y Megen (2017), diferencian claramente tres factores:

- Potencia necesaria para vencer la propia resistencia de la carrera, (*running-resistance*,  $P_r$ )
- Potencia necesaria para vencer la resistencia del aire (*air-resistance*,  $P_a$ )
- Potencia necesaria para vencer un desnivel (*climbing-resistance*,  $P_c$ )



**Figura 1** Representación de los factores que afectan a la producción de potencia en el modelo de Van Dijk y Van Megen (tomado de Dijk y Megen,2017).

- **Running Resistance**

Teóricamente se puede calcular la cantidad de potencia necesaria para vencer la resistencia propia del gesto de la carrera ( $P_r$ ), conociendo el coste energético de la carrera, el peso del sujeto y la velocidad.

$$P_r = cmv$$

Donde,  $c$ , es el coste energético específico de la carrera a pie en kJ/kg/km, el cual establecen como constante en 0.98 kJ/kg/km, este valor es justificado por los autores en el trabajo de Léger y Mercier (1984), ya que es ampliamente utilizado en la literatura. Esta fórmula muestra como la potencia requerida es directamente proporcional a la masa del sujeto.

- **Air Resistance**

La potencia para vencer la resistencia del aire depende de la densidad del aire ( $\rho$ , en kg/m<sup>3</sup>), el factor de la resistencia aerodinámica ( $c_d A$ , en m<sup>2</sup>), la velocidad ( $v$ , en m/s) y la velocidad del viento ( $v_w$ , en m/s):

$$P_a = 0.5 \rho c_d A (v + v_w)^2 v$$

Como se puede observar los mejores atletas tendrán que vencer mucha más resistencia que otras que corran a menor intensidad. O también podemos ver que para la misma potencia la velocidad en lugares con mayor altitud, y por lo tanto una densidad del aire menor, la velocidad será mayor.

- **Climbing Resistance**

Este factor depende del gradiente ( $i$ , expresado en %), el peso corporal ( $m$ , en kg) y la velocidad ( $v$ , en m/s)

$$P_c = (i/100) m g v$$

La resistencia de ascenso ( $P_c$ ) aumenta proporcionalmente con la velocidad y el gradiente. Por lo que la resistencia a la carrera también crece de manera proporcional con la velocidad, de esta forma la ratio  $P_c/P_r$  solo depende del gradiente.

Dentro de este aspecto también entra en juego lo que en la literatura internacional conocemos como “*hill factor*”. En la literatura muchos investigadores han establecido que la resistencia de ascenso es mucho menor que la que se esperaría de la fórmula teórica. Esto explica la diferencia de la potencia muscular la cual es mayor cuando la pendiente es positiva y menor cuando la potencia es negativa.

Para resolver esta problemática (Minetti, Moia, Roi, Susta, y Ferretti, 2002) midieron el coste energético de ascenso y descenso en pendientes extremas, desde los -45% al 45%, proponiendo la siguiente fórmula:

$$\eta = 45.6 + 1.1622i$$

Por lo que la  $P_c$  real sería la siguiente:

$$P_c = (i/100)mg(45.6 + 1.1622i)$$

La suma de los tres factores dará lugar a la potencia teórica ( $TP_{w1}$ ) del sujeto, esta potencia teórica será la utilizada durante el ESTUDIO III como referencia para la comparación con el resto de los dispositivos.

Otro modelo basado en las demandas energéticas es el desarrollado por Skiba (2006) donde proponen un modelo con el fin de poder cuantificar la carga del entrenamiento en actividades atléticas, y dar respuestas a las limitaciones presentadas en modelos tradicionales (Allen y Coggan, 2006; Morton, Fitz-Clarke, y Banister, 1990) con un modelo propio el GOVSS. Esta estimación de las demandas energéticas de la carrera, utilizando como base principal tres factores:

- $C_i$ , coste energético específico de una pendiente.
  - $C_{aero}$ , coste energético para superar la resistencia aerodinámica.
  - $C_{kin}$ , coste energético vinculado a los cambios de velocidad.
- **$C_i$ , coste energético específico de una pendiente**

Esta se calcula con una regresión múltiple de 5º grado formulada por Minetti et al. (2002) donde (i) corresponde a la pendiente en % de la superficie donde se está corriendo. Esta ecuación nos proporciona los requerimientos totales de energía sin tener en cuenta la eficiencia para la conversión del coste metabólico a coste mecánico, para obtener el valor absoluto de potencia debemos de multiplicarlo por un factor de eficiencia (n), este factor ha sido ampliamente estudiado sin llegar a presentar un consenso científico como expone (Arsac y Locatelli, 2002) este autor propone como el modelo más completo el propuesto por (Cavagna y Kaneko, 1977) establecen este factor en la suma de la eficiencia de un 25% y del coste del balanceo tanto de los brazos como de la rotación del cuerpo, dependiente este de manera lineal con la velocidad de desplazamiento de el atleta obtenemos así la siguiente ecuación:

$$C_i = 155.4i^5 - 30.4i^4 - 43.3i^3 + 46.3i^2 + 19.5i + 3.6$$

$$n = (0.25 + 0.054v) \cdot (1 - 0.5v/8.33)$$

$$m = \text{peso del sujeto}$$

- **$C_{aero}$ , coste energético para superar la resistencia aerodinámica**

Esta parte de la formula atiende a la cantidad de energía que un individuo necesita para vencer la resistencia aerodinámica la cual está influenciada por los factores ambientales como la densidad del aire ( $\rho$ ), coeficiente aerodinámico ( $C_d$ ) y el área frontal del deportista ( $A_f$ ) todos ellos en conjunto, conforman las variables que son necesarias para el calculo del coste a la resistencia aerodinámica:

$$C_{aero}=0.5\rho(C_dA_f)v^2$$

$\rho$  = density of the air (1.2 kg/m<sup>3</sup>)

$C_d$  = coefficient of aerodynamism= (0.9)

$A_f$  = frontal area (0.2025 · 0.266h<sup>0.725</sup>m<sup>0.425</sup>)

$h$  = height (m)

- **C<sub>kin</sub>, coste energético vinculado a los cambios de velocidad**

Esta parte de la ecuación atiende a la energía requerida ante los cambios de velocidad o aceleraciones dadas durante un periodo de tiempo, así:

$$C_{kin}=(0.5(v_2-v_0)^2)/d$$

$v$  = velocidad final (m/s)

$v_0$  = velociad inicial (m/s)

$d$  = distancia (m)

Todos estos factores dan lugar así a la siguiente ecuación:

$$P(W)=(155.4i_5-30.4s_4-43.3i_3+46.3i_2+19.5i+3.6)nm+0.5\rho(C_dA_f)v^2+(0.5(v_2-v_0)^2/d))v$$

La integración de los algoritmos matemáticos a unidades con sistemas inerciales ha permitido trasladar la obtención de medidas de potencia de carrera fuera del laboratorio (Aubry, Power, y Burr, 2018). Estos potenciómetros pueden clasificarse en función de la cantidad de planos de los cuales obtienen información, por una parte, tenemos los dispositivos bidimensionales (2D) y los tridimensionales (3D). Otro aspecto diferenciador de los mismos es la manera que tienen de mostrar la información a los usuarios, estos pueden aportar la potencia absoluta o un desglose del total de la potencia de los diferentes planos analizados (Vance, 2016). El futuro más cercano acerca del desarrollo de estos IMUS nos permitirá estimar las direcciones de los vectores de fuerzas de aplicación en una zancada. Recientemente se han incluido en algunos de estos dispositivos o en los algoritmos que los

regulan mediciones o estimaciones del viento y su dirección, (Stryd, Inc., Boulder, CO, USA) (Garmin Running Power, Olathe, Kansas, USA), para obtener unos datos más precisos y realistas dependientes de las condiciones.

La potencia total ofrecida por puede subdividirse en tres potencias correspondientes a cada uno de los planos de movimiento (Vance, 2016):

- **Potencia horizontal:** Esta es la medida con la que más familiarizados estamos, ésta no es más que el efecto de acción-reacción de la tercera Ley de Newton, la resultante de la fuerza aplicada en el suelo y que nos hace que nos desplacemos hacia adelante.
- **Potencia vertical:** está relacionada con el movimiento vertical del deportista, cuando corremos no hacemos otra cosa que realizar una serie de saltos donde nos desplazamos hacia delante pero también hacia arriba, por lo que este tipo de potencia atiende a la energía utilizada para realizar ese movimiento vertical. Los deportistas de elite presentan valores de potencia vertical mucho menores que los deportistas amateurs, aprovechando esa potencia en el desplazamiento horizontal.
- **Potencia lateral:** no todo lo que hacemos mientras corremos es movernos arriba-abajo, hacia delante-atrás, sino que tenemos movimientos laterales incluyendo cierta rotación de las caderas y de los brazos, codos, hombros, rodillas y pies. En el total de la potencia generada a la hora de correr, los movimientos laterales se llevan la menor parte, pero son de suma importancia para evitar lesiones y ser más eficientes, estos movimientos medidos a nivel del pie suponen un 2% del total de la potencia generada.

Para el cálculo de esta potencia total los potenciómetros de carrera basan sus cálculos principalmente en la velocidad, como hemos visto en los modelos propuestos por (Dijk y Megen, 2017; Skiba, 2006). Por lo general estos dispositivos pese a tener la capacidad de obtener sus propias mediciones de velocidad a través de algoritmos internos con sus sensores midiendo el ciclo de la zancada, suelen apoyarse en un receptor de señal GPS, situado normalmente en un reloj que además funcionará como display para mostrar la información, para obtener este parámetro. Por ello, la correcta colocación de los dispositivos puede afectar notablemente a la calidad de la medida de estos dispositivos (García-Pinillos et al., 2020).

Una vez conocido el funcionamiento y la gran aplicación práctica que esta variables y dispositivos podrían tener en la programación y el control del entrenamiento (Cross, Brughelli, Samozino, y Morin, 2017; Passfield, Hopker, Jobson, Friel, y Zabala, 2017), es

importante cuestionarse la calidad de la medida (validez, fiabilidad, precisión y sensibilidad) que ofrecen los distintos fabricantes (Aubry et al., 2018; García-Pinillos, Latorre-Román, Roche-Seruendo, y García-Ramos, 2019). Para el estudio de validez, tanto, en esta como en cualquier otra tecnología o procedimiento, resulta necesario analizar el grado de acuerdo existente entre los datos obtenidos con los proporcionados por una herramienta que se utiliza como criterio o “gold standard”. Esta herramienta de referencia está muy clara en el ciclismo, donde tradicionalmente se han usado los valores obtenidos por el dispositivo SRM® como criterio ante la aparición de nuevos potenciómetros, tanto para ergómetros como para su uso en exteriores (Jones y Passfield, 1998; Passfield y Doust, 2000). Sin embargo, no existe claramente definido un patrón de referencia para la carrera a pie, pese a que las plataformas de fuerzas se podrían considerar válidas para este fin (Kram et al., 1998)

Hasta la fecha solo se tiene constancia de un número reducido de investigaciones que hayan analizado la relación entre la potencia de carrera estimada por IMUS y los parámetros fisiológicos como el VO<sub>2</sub> o la economía de carrera (Aubry et al., 2018; Austin, Hokanson, McGinnis, y Patrick, 2018), así como con la propia velocidad de carrera (García-Pinillos et al., 2019; García-Pinillos, Soto-Hermoso, Latorre-Román, Párraga-Montilla, y Roche-Seruendo, 2019). Debido a esta escasez de resultados experimentales, y a menudo de dudosa interpretación (Snyder, Mohrman, Williamson, y Li, 2018), actualmente existe la necesidad de esclarecer la verdadera aplicación práctica que pueden tener estos dispositivos comercializados para la medida de potencia en carrera. Para alcanzar este objetivo se hace necesario diseñar un ambicioso proyecto que permita analizar la calidad de la medida de todos los dispositivos disponibles en el mercado actualmente para la estimación de potencia de carrera, manipulando todos aquellos factores que los modelos matemáticos han predicho que van a afectar a la medida del trabajo mecánico (Dijk y Megen, 2017; Skiba, 2016), analizando estos registros desde todas las perspectivas y tratamientos de datos más avanzados (Courel et al., 2019; Hopkins, 2000).

#### **1.4. BIBLIOGRAFÍA**

Allen, H., & Coggan, A. (2006). *Training and racing with a power meter*. Boulder, CO: VeloPress.

Allen, W. K., Seals, D. R., Hurley, B. F., Ehsani, A. A., & Hagberg, J. M. (1985). Lactate threshold and distance-running performance in young and older endurance athletes.

- Journal of Applied Physiology*, 58(4), 1281–1284. doi: 10.1152/jappl.1985.58.4.1281.
- Arsac, L. M., & Locatelli, E. (2002). Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions. *Journal of Applied Physiology*, 92(5), 1781–1788. doi: 10.1152/japplphysiol.00754.2001.
- Arts, F., & Kuipers, H. (1994). The Relation Between Power Output, Oxygen Uptake and Heart Rate in Male Athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 15(05), 228–231. doi: 10.1055/s-2007-1021051.
- Aubry, R. L., Power, G. A., & Burr, J. F. (2018). An Assessment of Running Power as a Training Metric for Elite and Recreational Runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(8), 1. doi: 10.1519/JSC.0000000000002650.
- Austin, C., Hokanson, J., McGinnis, P., & Patrick, S. (2018). The Relationship between Running Power and Running Economy in Well-Trained Distance Runners. *Sports*, 6(4), 142. doi: 10.3390/sports6040142.
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015, December 1). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine - Open*, Vol. 1. doi: 10.1186/s40798-015-0007-y.
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 70–84. doi: 10.1097/00005768-200001000-00012.
- Beneke, R., Leithäuser, R. M., & Ochentel, O. (2011, March 1). Blood lactate diagnostics in exercise testing and training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, Vol. 6, pp. 8–24. doi: 10.1123/ijsp.6.1.8.
- Beneke, R., & von Duvillard, S. P. (1996). Determination of maximal lactate steady state response in selected sports events. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(2), 241–246. doi:10.1097/00005768-199602000-00013.
- Bentley, D. J., Newell, J., & Bishop, D. (2007). Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(7), 575–586. doi: 10.2165/00007256-200737070-00002.
- Berthoin, S., Gerbeaux, M., Turpin, E., Guerrin, F., Linsel-Corbeil, G., & Vandendorpe, F. (1994). Comparison of two field tests to estimate maximum aerobic speed. *Journal of*

- Sports Sciences*, 12(4), 355–362. doi: 10.1080/02640419408732181.
- Berthoin, S., Pelayo, P., LenseleCorbeil, G., Robin, H., & Gerbeaux, M. (1996). Comparison of maximal aerobic speed as assessed with laboratory and field measurements in moderately trained subjects. *International Journal of Sports Medicine*, 17(7), 525–529. doi: 10.1055/s-2007-972889.
- Berthon, P., Fellmann, N., Bedu, M., Beaune, B., Dabonneville, M., Coudert, J., & Chamoux, A. (1997). A 5-min running field test as a measurement of maximal aerobic velocity. *European Journal of Applied Physiology*, 75(3), 233–238. doi: 10.1007/s004210050153.
- Bijker, K. E., de Groot, G., & Hollander, A. P. (2002). Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(6), 556–561. doi: 10.1007/s00421-002-0663-8.
- Billat, V. L., Hill, D. W., Pinoteau, J., Petit, B., & Koralsztein, J. P. (1996). Effect of protocol on determination of velocity at  $\dot{V}O_2$  max and on its time to exhaustion. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 104(3), 313–321. doi: 10.1076/apab.104.3.313.12908.
- Billat, V. L., & Koralsztein, J. P. (1996, August). Significance of the velocity at  $\dot{V}O_{2max}$  and time to exhaustion at this velocity. *Sports Medicine*, Vol. 22, pp. 90–108. doi: 10.2165/00007256-199622020-00004.
- Billat, V. L., Sirvent, P., Py, G., Koralsztein, J. P., & Mercier, J. (2003). The concept of maximal lactate steady state: A bridge between biochemistry, physiology and sport science. *Sports Medicine*, Vol. 33, pp. 407–426. doi: 10.2165/00007256-200333060-00003
- Bouillod, A., Pinot, J., Soto-Romero, G., Bertucci, W., & Grappe, F. (2017). Validity, Sensitivity, Reproducibility, and Robustness of the PowerTap, Stages, and Garmin Vector Power Meters in Comparison With the SRM Device. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(8), 1023–1030. doi: 10.1123/ijsp.2016-0436.
- Bramble, D. M., & Lieberman, D. E. (2004). Endurance running and the evolution of Homo. *Nature*, 432(7015), 345–352. doi: 10.1038/nature03052.
- Brandon, L. J. (1995). Physiological Factors Associated with Middle Distance Running Performance. *Sports Medicine*, Vol. 19, pp. 268–277. doi: 10.2165/00007256-199519040-00004.
- Brayne, L., Barnes, A., Heller, B., & Wheat, J. (2018). Using a wireless consumer

- accelerometer to measure tibial acceleration during running: agreement with a skin-mounted sensor. *Sports Engineering*, 21(4), 487–491. doi: 10.1007/s12283-018-0271-4.
- Buchfuhrer, M. J., Hansen, J. E., Robinson, T. E., Sue, D. Y., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1983). Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *Journal of Applied Physiology*, 55(5), 1558–1564. doi: 10.1152/jappl.1983.55.5.1558.
- Carter, J., & Jeukendrup, A. E. (2002). Validity and reliability of three commercially available breath-by-breath respiratory systems. *European Journal of Applied Physiology*, 86(5), 435–441. doi: 10.1007/s00421-001-0572-2.
- Cavagna, G. A., & Kaneko, M. (1977). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *The Journal of Physiology*, 268(2), 467–481. doi: 10.1113/jphysiol.1977.sp011866.
- Cavagna, G. A., Mantovani, M., Willems, P. A., & Musch, G. (1997). The resonant step frequency in human running. *Pflugers Archiv European Journal of Physiology*, 434(6), 678–684. doi: 10.1007/s004240050451.
- Cavagna, Giovanni A., Komarek, L., & Mazzoleni, S. (1971). The mechanics of sprint running. *The Journal of Physiology*, 217(3), 709–721. doi: 10.1113/jphysiol.1971.sp009595.
- Cavanagh, P. R., & LaFortune, M. A. (1980). Ground reaction forces in distance running. *Journal of Biomechanics*, 13(5), 397–406. doi: 10.1016/0021-9290(80)90033-0.
- Cazorla, G. (1990). Tests de terrain pour évaluer la capacité aérobie et la vitesse maximale aérobie. In G. Cazorla & G. Robert (Eds.), *L'évaluation en activité physique et en sport* (pp. 151–174). Cestas: AREAPS.
- Cazorla, G., & Leger, L. (1993). *Comment évaluer et développer vos capacités aérobies: épreuve progressive de course navette, épreuve progressive de course sur piste VAMEVAL*. AREAPS (Association Recherche et Evaluation en Activité Physique et en Sport).
- Challis, J. H. (2001). The variability in running gait caused by force plate targeting. *Journal of Applied Biomechanics*, 17(1), 77–83. doi: 10.1123/jab.17.1.77.
- Cheng, B., Kuipers, H., Snyder, A. C., Keizer, H. A., Jeukendrup, A., & Hesselink, M. (1992). A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds. *International Journal of Sports Medicine*, 13(7), 518–522. doi: 10.1055/s-2007-

1021309.

- Clark, K. P., Ryan, L. J., & Weyand, P. G. (2017). A general relationship links gait mechanics and running ground reaction forces. *Jeb.Biologists.Org*. doi: 10.1242/jeb.138057.
- Courel-Ibáñez, J., Martínez-Cava, A., Morán-Navarro, R., Escribano-Peñas, P., Chavarren-Cabrero, J., González-Badillo, J. J., & Pallarés, J. G. (2019). Reproducibility and repeatability of five different technologies for bar velocity measurement in resistance training. *Annals of Biomedical Engineering*. doi: 10.1007/s10439-019-02265-6
- Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hemmert, M. K., & Ivy, J. L. (1986). Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 61(1), 165–172. doi: 10.1152/jappl.1986.61.1.165.
- Coyle, E. F., Martin, W. H., Ehsani, A. A., Hagberg, J. M., Bloomfield, S. A., Sinacore, D. R., & Holloszy, J. O. (1983). Blood lactate threshold in some well-trained ischemic heart disease patients. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 54(1), 18–23. doi: 10.1152/jappl.1983.54.1.18.
- Cross, M. R., Brughelli, M., Samozino, P., & Morin, J.-B. (2017). Methods of power-force-velocity profiling during sprint running: A narrative review. *Sports Medicine*, 47(7), 1255–1269. doi: 10.1007/s40279-016-0653-3.
- Dawson, E. A., Shave, R., George, K., Whyte, G., Ball, D., Gaze, D., & Collinson, P. (2005). Cardiac drift during prolonged exercise with echocardiographic evidence of reduced diastolic function of the heart. *European Journal of Applied Physiology*, 94(3), 305–309. doi: 10.1007/s00421-005-1318-3.
- Degroote, L., DeSmet, A., De Bourdeaudhuij, I., Van Dyck, D., & Crombez, G. (2020, March 10). Content validity and methodological considerations in ecological momentary assessment studies on physical activity and sedentary behaviour: a systematic review. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, Vol. 17, p. 35. doi: 1186/s12966-020-00932-9.
- Dekerle, J., Sidney, M., Hespel, J. M., & Pelayo, P. (2002). Validity and reliability of critical speed, critical stroke rate, and anaerobic capacity in relation to front crawl swimming performances. *International Journal of Sports Medicine*, 23(2), 93–98. doi: 10.1055/s-

2002-20125.

Del Coso, J., Hamouti, N., Aguado-Jimenez, R., & Mora-Rodriguez, R. (2009). Respiratory compensation and blood pH regulation during variable intensity exercise in trained versus untrained subjects. *European Journal of Applied Physiology*, *107*(1), 83–93. doi: 10.1007/s00421-009-1101-y.

Dengel, D., Flynn, M., Costill, D. L., & Kirwan, J. P. (n.d.). *Determinants of Success during Triathlon Competition Effects of UCC118 on Intestinal Permeability in Healthy Endurance Runners View project PAH and metabolism View project*. doi: 10.1080/02701367.1989.10607445.

Dijk, & Megen. (2017). *The secret of running : maximum performance gains through effective power metering and training analysis*. 477. Meyer & Meyer Sport.

Esteve-Lanao, J., Foster, C., Seiler, S., & Lucía, A. (2007). Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *21*(3), 943. doi: 10.1519/R-19725.1.

García-Pallarés, J., García-Fernández, M., Sánchez-Medina, L., & Izquierdo, M. (2010). Performance changes in world-class kayakers following two different training periodization models. *European Journal of Applied Physiology*, *110*(1), 99–107. doi: 10.1007/s00421-010-1484-9.

García-Pallarés, J., & Izquierdo, M. (2011). Strategies to optimize concurrent training of strength and aerobic fitness for rowing and canoeing. *Sports Medicine*, *41*(4), 329–343. doi: 10.2165/11539690-000000000-00000.

García-Pallarés, J., Sánchez-Medina, L., Carrasco, L., Díaz, A., & 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. doi: 10.1007/s00421-009-1061-2.

García-Pinillos, F., Chicano-Gutiérrez, J. M., Ruiz-Malagón, E. J., & Roche-Seruendo, L. E. (2020). Influence of RunScribetm placement on the accuracy of spatiotemporal gait characteristics during running. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, *234*(1), 11–18. doi: 10.1177/1754337119876513.

García-Pinillos, F., Latorre-Román, P. Á., Roche-Seruendo, L. E., & García-Ramos, A.

- (2019). Prediction of power output at different running velocities through the two-point method with the Stryd™ power meter. *Gait & Posture*, 68, 238–243. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.11.037.
- García-Pinillos, F., Soto-Hermoso, V. M., Latorre-Román, P., Párraga-Montilla, J. A., & Roche-Seruendo, L. E. (2019). How does power during running change when measured at different time intervals? *International Journal of Sports Medicine*, 40(9), 609–613. doi: 10.1055/a-0946-2159.
- Gaskill, S. E., Ruby, B. C., Walker, A. J., Sanchez, O. A., Serfass, R. C., & Leon, A. S. (2001). Validity and reliability of combining three methods to determine ventilatory threshold. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(11), 1841–1848. doi: 10.1097/00005768-200111000-00007.
- Helgerud, J., Høydal, K., Wang, E., Karlsen, T., Berg, P., Bjerkaas, M., ... Hoff, J. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve  $\dot{V}O_{2\max}$  more than moderate training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(4), 665–671. doi: 10.1249/mss.0b013e3180304570.
- Hill, A. V., & Lupton, H. (1923). Muscular Exercise, Lactic Acid, and the Supply and Utilization of Oxygen. *QJM, os-16*(62), 135–171. doi: 10.1093/qjmed/os-16.62.135
- Hollis, C. R., Koldenhoven, R. M., Resch, J. E., & Hertel, J. (2019). Running biomechanics as measured by wearbale sensors: effects of speed and surface. *Sports Biomechanics*. doi: 10.1080/14763141.2019.1579366.
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of Reliability in Sports Medicine and Science. *Sports Medicine*, 30(1), 1–15. doi:10.2165/00007256-200030010-00001.
- Jaén-Carrillo, D., García-Pinillos, F., Cartón-Llorente, A., Almenar-Arasanz, A. J., Bustillo-Pelayo, J. A., & Roche-Seruendo, L. E. (2020). Test–retest reliability of the OptoGait system for the analysis of spatiotemporal running gait parameters and lower body stiffness in healthy adults. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. doi: 10.1177/1754337119898353
- Jones, A. M., & Carter, H. (2000, June). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Medicine*, Vol. 29, pp. 373–386. doi: 10.2165/00007256-200029060-00001
- Jones, A. M., Wilkerson, D. P., DiMenna, F., Fulford, J., & Poole, D. C. (2007). Muscle

- metabolic responses to exercise above and below the “critical power” assessed using P-31-MRS. *AJP: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 294(2), R585–R593. doi: 10.1152/ajpregu.00731.2007
- Jones, S., & Passfield, L. (1998). The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. *The Engineering of Sport*, 265–274.
- Julio, U. F., Panissa, V. L. G., Shiroma, S. A., & Franchini, E. (2017). Effect of Protocol Manipulation for Determining Maximal Aerobic Power on a Treadmill and Cycle Ergometer: A Brief Review. *Strength and Conditioning Journal*, 5(39), 58–71. doi: 10.1519/SSC.0000000000000350.
- Kaneko, M. (1990). Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. *Journal of Biomechanics*, 23(SUPPL. 1), 57–63. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(90\)90041-Z](https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90041-Z).
- Kawakami, Y., Nozaki, D., Matsuo, A., & Fukunaga, T. (1992). Reliability of measurement of oxygen uptake by a portable telemetric system. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 65(5), 409–414. doi: 10.1007/BF00243506.
- Kennedy, H., Baker, B. J., Jordan, J. S., & Funk, D. C. (2019). Running recession: A trend analysis of running involvement and runner characteristics to understand declining participation. *Journal of Sport Management*, 33(3), 215–228. doi: 10.1123/jsm.2018-0261.
- Kim, C. H., & Coach Dr., Lafayette, C. (1997). Method of Training Physical Skills Using Digital Motion Analyzer and An Accelerometer. Patent and Trademark Office.
- Koldenhoven, R. M., & Hertel, J. (2018). Validation of a Wearable Sensor for Measuring Running Biomechanics. *Digital Biomarkers*, 2(2), 74–78. doi: 10.1159/000491645.
- Kona Bike Count 2019 Power Meter Analysis: 10 Years of Data | DC Rainmaker. (n.d.). Retrieved April 29, 2020, from <https://www.dcrainmaker.com/2019/10/kona-bike-count-2019-power-meter-analysis-10-years-of-data.html>.
- Kram, R., Griffin, T. M., Donelan, J. M., & Chang, Y. H. (1998). Force treadmill for measuring vertical and horizontal ground reaction forces. *Journal of Applied Physiology*, 85(2), 764–769. doi: 10.1152/jappl.1998.85.2.764.
- Kuipers, H., Rietjens, G., Verstappen, F., Schoenmakers, H., & Hofman, G. (2003). Effects of

- stage duration in incremental running tests on physiological variables. *International Journal of Sports Medicine*, 24(7), 486–491. doi: 810.1055/s-2003-42020.
- Lacour, J. R., Padilla-Magunacelaya, S., Chatard, J. C., Arsac, L., & Barthélémy, J. C. (1991). Assessment of running velocity at maximal oxygen uptake. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 62(2), 77–82. doi: 10.1007/BF00626760.
- Lamberts, R. P., Lambert, M. I., Swart, J., & Noakes, T. D. (2012). Allometric scaling of peak power output accurately predicts time trial performance and maximal oxygen consumption in trained cyclists. *British Journal of Sports Medicine*, 46(1), 36–41. doi: 10.1136/bjism.2010.083071.
- Léger, L., & Boucher, R. (1980). An indirect continuous running multistage field test: The Université de Montreal Track Test. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 5(2), 77–84.
- Léger, L., & Mercier, D. (1984). Gross energy cost of horizontal treadmill and track running. *Sports Medicine*, 1(4), 270–277. doi: 10.2165/00007256-198401040-00003.
- Lillo-Bevia, J. R., & Pallarés, J. G. (2018). Validity and reliability of the Cycleops hammer cycle ergometer. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(7), 853–859. doi: 10.1123/ijsp.2017-0403
- López Chicharro, J., & Fernández Vaquero, A. (2006). *Fisiología del ejercicio*. Médica Panamericana.
- Lucía, A., Hoyos, J., Pérez, M., & Chicharro, J. L. (2000). Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(10), 1777–1782. doi: 10.1097/00005768-200010000-00018
- Lucía, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., et al. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners: exceptional running economy. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31(5), 530–540. doi: 10.1139/h06-029.
- Lucía, A., Sánchez, O., Carvajal, A., & 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. doi: 10.1136/bjism.33.3.178.

- Luinge, H. J. (2002). *Inertial sensing of human movement*. (2079-2089). Enschede: Twente University Press.
- Lukaski, H. C., Bolonchuk, W. W., & Klevay, L. M. (1989). Comparison of metabolic responses and oxygen cost during maximal exercise using three treadmill protocols. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 29(3), 223–229.
- Lundby, C., & Robach, P. (2015). Performance enhancement: What are the physiological limits? *Physiology*, 30(4), 282–292. doi: 10.1152/physiol.00052.2014.
- Mann, T. N., Lamberts, R. P., & Lambert, M. I. (2014). High responders and low responders: Factors associated with individual variation in response to standardized training. *Sports Medicine*, 44(8), 1113–1124. doi: 10.1007/s40279-014-0197-3.
- Martin, P. E., Heise, G. D., & Morgan, D. W. (1993). Interrelationships between mechanical power, energy transfers, and walking and running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(4), 508–515. doi: 10.1249/00005768-199304000-00014.
- Meijer, E. P., Westerterp, K. R., & Verstappen, F. T. J. (1999). Effect of exercise training on total daily physical activity in elderly humans. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 80(1), 16–21. doi: 10.1007/s004210050552.
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., & Carroll, S. (2007). Time at VO<sub>2</sub>max during intermittent treadmill running: Test protocol dependent or methodological artefact? *International Journal of Sports Medicine*, 28(11), 934–939. doi: 10.1055/s-2007-964972.
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., Polman, R., & Marchant, D. (2007). Criteria for determination of maximal oxygen uptake: A brief critique and recommendations for future research. *Sports Medicine*, Vol. 37, pp. 1019–1028. doi: 10.2165/00007256-200737120-00002.
- Millet, G. P., Vleck, V. E., & Bentley, D. J. (2009). Physiological differences between cycling and running: Lessons from triathletes. *Sports Medicine*, 39(3), 179–206. doi: 10.2165/00007256-200939030-00002.
- Minetti, A. E., Moia, C., Roi, G. S., Susta, D., & Ferretti, G. (2002). Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *Journal of Applied Physiology*, 93(3), 1039–1046. doi: 10.1152/jappphysiol.01177.2001.

- Mora-Rodríguez, R., Pallarés, J. ., & Ortega, J. . (2019). *Fisiología del deporte y el ejercicio Prácticas de campo y laboratorio*. (2ª ed.); Médica Panamericana Madrid.
- Morton, R. H., Fitz-Clarke, J. R., & Banister, E. W. (1990). Modeling human performance in running. *Journal of Applied Physiology*, *69*(3), 1171–1177. doi: 10.1152/jappl.1990.69.3.1171.
- Mujika, I. (2017). Quantification of Training and Competition Loads in Endurance Sports: Methods and Applications. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(Suppl 2), S2-9-S2-17. doi: 10.1123/ijsp.2016-0403.
- Mulligan, M., Adam, G., & Emig, T. (2018). A minimal power model for human running performance. *PloS One*, *13*(11). doi: 10.1371/journal.pone.0206645.
- Muniz-Pumares, D., Pedlar, C., Godfrey, R., & Glaister, M. (2017). The effect of the oxygen uptake-power output relationship on the prediction of supramaximal oxygen demands. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *57*(1–2), 1–7. doi: 10.23736/S0022-4707.16.05948-X.
- Myers, J., Buchanan, N., Walsh, D., Kraemer, M., McAuley, P., Hamilton-Wessler, M., & Froelicher, V. F. (1991). Comparison of the ramp versus standard exercise protocols. *Journal of the American College of Cardiology*, *17*(6), 1334–1342. doi: 10.1016/S0735-1097(10)80144-5.
- Nicol, C., Komi, P. V., & Marconnet, P. (2007). Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *1*(1), 10–17. doi: 10.1111/j.1600-0838.1991.tb00265.x.
- Pallarés, J G, & Moran-Navarro, R. (2012). Propuesta metodológica para el entrenamiento de la resistencia cardiorrespiratoria. *Journal of Sport and Health Research*, *4*(2), 119–136.
- Pallarés, J G, Morán-Navarro, R., Ortega, J. F., Fernández-Elías, V. E., & Mora-Rodriguez, R. (2016). Validity and reliability of ventilatory and blood lactate thresholds in well-trained cyclists. *PLoS ONE*, *11*(9), e0163389. doi: 10.1371/journal.pone.0163389.
- Pallarés, J. G., & Lillo-Bevia, J. R. (2018). Validity and reliability of the PowerTap P1 pedals power meter. *Journal of sports science & medicine*, *17*(2), 305.
- Passfield, L., & Doust, J. H. (2000). Changes in cycling efficiency and performance after endurance exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *32*(11), 1935–1941.

doi: 10.1097/00005768-200011000-00018.

- Passfield, L., Hopker, J. G., Jobson, S., Friel, D., & Zabala, M. (2017). Knowledge is power: Issues of measuring training and performance in cycling. *Journal of Sports Sciences*, 35(14), 1426–1434. doi: 10.1080/02640414.2016.1215504.
- Peinado, A. B., Filho, D. P., Díaz, V., Benito, P. J., Álvarez-Sánchez, M., Zapico, A. G., & Calderón, F. J. (2016). The midpoint between ventilatory thresholds approaches maximal lactate steady state intensity in amateur cyclists. *Biology of Sport*, 33(4), 373–380. doi: 10.5604/20831862.1221812.
- Reilly, T., Morris, T., & Whyte, G. (2009, April). The specificity of training prescription and physiological assessment: A review. *Journal of Sports Sciences*, Vol. 27, pp. 575–589. doi: 10.1080/02640410902729741.
- Reiser, M., Meyer, T., Kindermann, W., & Dausgs, R. (2000). Transferability of workload measurements between three different types of ergometer. *European Journal of Applied Physiology*, 82(3), 245–249. doi: 10.1007/s004210050678.
- Rønnestad, B. R., & Hansen, J. (2016). Optimizing interval training at power output associated with peak oxygen uptake in well-trained cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(4), 999–1006. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182a73e8a.
- Rønnestad, B. R., Hansen, J., Stensløyken, L., Joyner, M. J., & Lundby, C. (2019). Case studies in physiology: Temporal changes in determinants of aerobic performance in individual going from alpine skier to world junior champion time trial cyclist. *Journal of Applied Physiology*, 127(2), 306–311. doi: 10.1152/jappphysiol.00798.2018.
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., & Morin, J. B. (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 26(6), 648–658. doi: 10.1111/sms.12490.
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine*, Vol. 34, pp. 465–485. doi: 10.2165/00007256-200434070-00005.
- Savolainen, S., & Visuri, R. (1994). A Review of Athletic Energy Expenditure, Using Skiing as a Practical Example. *Journal of Applied Biomechanics*, 10(3), 253–269. doi: 10.1123/jab.10.3.253.

- Scharhag-Rosenberger, F., Walitzek, S., Kindermann, W., & Meyer, T. (2012). Differences in adaptations to 1 year of aerobic endurance training: individual patterns of nonresponse. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 22(1), 113–118. doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01139.x.
- Sjödin, B., & Jacobs, I. (1981). Onset of Blood Lactate Accumulation and Marathon Running Performance. *International Journal of Sports Medicine*, 02(01), 23–26. doi: 10.1055/s-2008-1034579.
- Skiba, P. F. (2006). Calculation of power output and quantification of training stress in distance runners: the development of the GOVSS algorithm. *Revised Sep*, 3–16.
- Skinner, J. S., & McLellan, T. H. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51(1), 234–248.
- Snyder, K. L., Mohrman, W. P., Williamson, J. A., & Li, K. (2018). Methodological Flaws in Aubry, RL, Power, GA, and Burr, JF. An Assessment of Running Power as a Training Metric for Elite and Recreational Runners. *J Strength Cond Res* 32: 2258–2264, 2018. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(12), e61. doi: 10.1519/JSC.0000000000002894
- Stöggl, T., & Sperlich, B. (2014). Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Frontiers in Physiology*, 5, 33. doi: 10.3389/fphys.2014.00033.
- Tanaka, K. (1990). Lactate-related factors as a critical determinant of endurance. *Annals of Physiological Anthropology*, 9(2), 191–202. doi: 10.2114/ahs1983.9.191.
- Trost, S. G., Ward, D. S., Moorehead, S. M., Watson, P. D., Riner, W., & Burke, J. R. (1998). Validity of the computer science and applications (CSA) activity monitor in children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(4), 629–633. doi: 10.1097/00005768-199804000-00023.
- Vance, J. (2016). *Run with power: The complete guide to power meters for running*.
- Vandewalle, H. (2018). Modelling of Running Performances: Comparisons of Power-Law, Hyperbolic, Logarithmic, and Exponential Models in Elite Endurance Runners. *BioMed Research International*, 2018, 1–23. doi: 10.1155/2018/8203062.
- Vandewalle, H., & Driss, T. (2015). Friction-loaded cycle ergometers: Past, present and

future. *Cogent Engineering*, Vol. 2. doi: 10.1080/23311916.2015.1029237.

Vesterinen, V., Häkkinen, K., Laine, T., Hynynen, E., Mikkola, J., & Nummela, A. (2016). Predictors of individual adaptation to high-volume or high-intensity endurance training in recreational endurance runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(8), 885–893. doi: 10.1111/sms.12530.

Wasserman, K. Whipp, B.J. Koyal, S.N. Beaver, W. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 35(2). 10.1152/jappl.1973.35.2.236.

Weltman, A., Snead, D., Stein, P., Seip, R., Schurrer, R., Rutt, R., & Weltman, J. (1990). Reliability and validity of a continuous incremental treadmill protocol for the determination of lactate threshold, fixed blood lactate concentrations, and VO<sub>2</sub>max. *International Journal of Sports Medicine*, 11(1), 26–32. doi: 10.1055/s-2007-1024757.

Williams, K. R., & Cavanagh, P. R. (1983). A model for the calculation of mechanical power during distance running. *Journal of Biomechanics*, 16(2), 115–128. doi: 10.1016/0021-9290(83)90035-0.

Wolpern, A. E., Burgos, D. J., Janot, J. M., & Dalleck, L. C. (2015). Is a threshold-based model a superior method to the relative percent concept for establishing individual exercise intensity? a randomized controlled trial. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 7(1), 16. doi: 10.1186/s13102-015-0011-z.

Yoshida, T., Udo, M., Iwai, K., Chida, M., Ichioka, M., Nakadomo, F., & Yamaguchi, T. (1990). Significance of the contribution of aerobic and anaerobic components to several distance running performances in female athletes. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 60(4), 249–253. doi: 10.1007/BF00379391.

# **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**



## 2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Ante esta problemática, el objetivo de esta Tesis Doctoral es múltiple, y se plantea en diferentes estudios, pero complementarios entre sí.

En una primera investigación, de carácter descriptivo, el objetivo general es dotar a los científicos y técnicos herramientas y procedimientos accesibles para la localización individualizada, válida y precisa de los principales hitos fisiológicos de la vía aeróbica. Los sistemas y procedimientos necesarios actualmente para las determinaciones Gold Standard o de referencia presentan un elevado coste económico, requieren una alta dedicación temporal, e incluso, muy a menudo, una distorsión notable del programa de intervención.

El segundo lugar se analizará la calidad de la medida de los distintos potenciómetros de carrera disponibles hasta la fecha en el mercado. Al igual que ocurre actualmente con la potencia de pedaleo, en caso de que estas herramientas obtengan un nivel satisfactorio de validez, la medida de potencia en carrera como principal indicador de carga externa puede encontrar numerosas aplicaciones prácticas en el campo de la investigación, el entrenamiento, la valoración, y por supuesto, en la competición.

Estos objetivos generales se presentan a continuación de manera más concreta.

- i. Localizar el test de estimación en carrera mediante la cinética de lactato en sangre que mayores índices de validez alcance para predecir la carga del umbral aeróbico y umbral anaeróbico.
- ii. Confirmar en carrera que el máximo estado estable de lactato es un hito fisiológico distinto del umbral aeróbico y el anaeróbico.
- iii. Describir los índices de reproducibilidad absoluta y relativa de todos los umbrales lácticos y ventilatorios más importantes descritos en la literatura internacional para la carrera a pie.
- iv. Encontrar un algoritmo de estimación de la velocidad aeróbica máxima para un test incremental máximo sin requerimiento de calorimetría indirecta.
- v. Confirmar los niveles de validez del test de la Universidad de Montreal (UMTT) para la estimación de los principales indicadores de rendimiento aeróbico de atletas bien entrenados.

- vi. Diseñar y validar un nuevo test en pista de atletismo para la estimación de los principales parámetros del rendimiento aeróbico máximo en corredores ( $VO_{2max}$  y VAM), sin la necesidad de obtener muestras de lactato capilar ni calorimetría indirecta.
- vii. Analizar la reproducibilidad intra- dispositivo de las diferentes tecnologías disponibles en el mercado diseñadas para la estimación de la potencia de carrera mediante un diseño test-retest.
- viii. Comparar el grado de acuerdo existente entre la potencia obtenida por cada uno de los dispositivos disponibles en el mercado para la estimación de potencia con los valores obtenidos por los dos principales modelos matemáticos para el cálculo de la potencia teórica.
- ix. Comprobar el grado de acuerdo existente entre la potencia de carrera obtenidas a través de distintas tecnologías y el consumo de oxígeno, con el fin de poder controlar y predecir el rendimiento deportivo en corredores mediante un análisis de la validez concurrente.

# **ESTUDIO I**



## 3. ESTUDIO I

### 3.1. ARTÍCULO 1

**TÍTULO:** The relationship between lactate and ventilatory thresholds in runners: Validity and reliability of exercise test performance parameters.

**REVISTA:** *Frontiers in Physiology*

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6167480/>

#### RESUMEN 1:

The aims of this study were (1) to establish the best fit between ventilatory and lactate exercise performance parameters in running and (2) to explore novel alternatives to estimate the maximal aerobic speed (MAS) in well-trained runners. Twenty-two trained male athletes ( $VO_{2max}$   $60.2 \pm 4.3$  ml·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>) completed three maximal graded exercise tests (GXT): (1) a preliminary GXT to determine individuals' MAS; (2) two experimental GXT individually adjusted by MAS to record the speed associated to the main aerobic–anaerobic transition events measured by indirect calorimetry and capillary blood lactate (CBL). Athletes also performed several 30 min constant running tests to determine the maximal lactate steady state (MLSS). Reliability analysis revealed low CV (< 3.1%), low bias (< 0.5 km·h<sup>-1</sup>), and high correlation (CCI > 0.91) for all determinations except V-Slope (CCI = 0.84). Validity analysis showed that LT, LT+1.0, and LT+3.0 mMol·L<sup>-1</sup> were solid predictors of VT1 (–0.3 km·h<sup>-1</sup>; bias = 1.2; CCI = 0.90; p = 0.57), MLSS (–0.2 km·h<sup>-1</sup>; bias = 1.2; CCI = 0.84; p = 0.74), and VT2 (< 0.1 km·h<sup>-1</sup>; bias = 1.3; CCI = 0.82; p = 0.919), respectively. MLSS was identified as a different physiological event and a midpoint between VT1 (bias = –2.0 km·h<sup>-1</sup>) and VT2 (bias = 2.3 km·h<sup>-1</sup>). MAS was accurately estimated (EEM  $\pm$  0.3 km·h<sup>-1</sup>) from peak velocity (V<sub>peak</sub>) attained during GXT with the equation: MASEST (km·h<sup>-1</sup>) = V<sub>peak</sub> (km·h<sup>-1</sup>) \* 0.8348 + 2.308. Current individualized GXT protocol based on individuals' MAS was solid to determine both maximal and submaximal physiological parameters. Lactate threshold tests can be a valid and reliable alternative to VT and MLSS to identify the workloads at the transition from aerobic to anaerobic metabolism in well-

trained runners. In contrast with traditional assumption, the MLSS constituted a midpoint physiological event between VT1 and VT2 in runners. The Vpeak stands out as a powerful predictor of MAS

# **ESTUDIO II**



## 4. ESTUDIO II

### 4.1. ARTÍCULO 2

**TIUTLO:** Are we ready to measure running power? repeatability and concurrent validity of five commercial technologies.

**REVISTA:** *European Journal of Sports Sciences*.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17461391.2020.1748117?journalCode=tejs20>

#### RESUMEN 2:

Training prescription and load monitoring in running activities have benefited from power output (Pw) data obtained by new technologies. Nevertheless, to date, the suitability of Pw data provided by these tools is still uncertain. In order to clarify this aspect, the present study aimed to: i) analyze the repeatability of five commercially available technologies for running Pw estimation, and ii) examine the concurrent validity through the relationship between each technology Pw and oxygen uptake (VO<sub>2</sub>). On two occasions (test-retest), twelve endurance-trained male athletes performed on a treadmill (indoor) and an athletic track (outdoor) three submaximal running protocols with manipulations in speed, body weight and slope. Pw was simultaneously registered by the commercial technologies StrydApp, StrydWatch, RunScribe, GarminRP and Polarv, while VO<sub>2</sub> was monitored by a metabolic cart. Test-retest data from the environments (indoor and outdoor) and conditions (speed, body weight and slope) were used for repeatability analysis, which included the standard error of measurement (SEM), coefficient of variation (CV) and intraclass correlation coefficient (ICC). A linear regression analysis and the standard error of estimation (SEE) were used to examine the relationship between Pw and VO<sub>2</sub>. Stryd device was found as the most repeatable technology for all environments and conditions (SEM≤12.5W, CV≤4.3%, ICC≥0.980), besides the best concurrent validity to the VO<sub>2</sub> (r≥9.11, SEE≤7.3%). On the contrary, although the Polarv, GarminRP and RunScribe technologies maintain a certain relationship with VO<sub>2</sub>, their low repeatability questions their suitability. The Stryd can be considered as the most recommended tool, among the analyzed, for PW measurement.



## 4.2. ARTÍCULO 3

**Título: Running power meters and theoretical models based on laws of physics: effects of environments and running conditions.**

**Revista: *Physiology & Behavior*.**

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031938420302869>

### RESUMEN 2:

Training prescription and load monitoring in running activities have benefited from power output (PW) data offered by new technologies. Nevertheless, to date, the suitability of PW data provided by these tools is not still clarified. The aim of this study was to analyze the level of agreement between Pw estimated by five commercial technologies and the two main internationally theoretical models based on laws of physics, when changing environments and running conditions. Ten endurance-trained male athletes performed three submaximal running protocols on a treadmill (indoor) and an athletic track (outdoor), with changes in speed, body weight, and slope. Pw was simultaneously registered by the commercial technologies Stryd (Stryd<sub>App</sub> and Stryd<sub>Watch</sub>), RunScribe, Garmin<sub>RP</sub> and Polar<sub>V</sub>, whereas theoretical power output (TP<sub>W</sub>) was calculated by the two mathematical models (TP<sub>W1</sub> and TP<sub>W2</sub>), based on each running condition (speed, body weight, and slope). Calculations included, among others, the Pearson's correlation coefficient ( $r$ ) and standard error of measurement (SEM). Both indoor and outdoor, the Stryd and Polar<sub>V</sub> technologies showed the closest agreement with the TP<sub>W1</sub> (Stryd:  $r \geq 0.947$ , SEM  $\leq 11$  W; Polar<sub>V</sub>:  $r \geq 0.931$ , SEM  $\leq 64$  W) and TP<sub>W2</sub> (Stryd:  $r \geq 0.933$ , SEM  $\leq 60$  W; Polar<sub>V</sub>:  $r \geq 0.932$ , SEM  $\leq 24$  W). Nevertheless, the relationship between the Stryd<sub>Watch</sub> and both TP<sub>W</sub> models decreased when the slope was modified. On the other hand, the devices Garmin<sub>RP</sub> ( $r \leq 0.765$ , SEM  $\geq 59$  W) and RunScribe. ( $r \leq 0.508$ , SEM  $\geq 125$  W) showed the lowest agreement with the TP<sub>W1</sub> and TP<sub>W2</sub> models for all conditions and environments analyzed. The closest agreement of the Stryd and Polar<sub>V</sub> technologies with the TP<sub>W1</sub> and TP<sub>W2</sub> models suggest these tools as the most sensitive, among the analyzed, for Pw measurement when changing environments and running conditions.



**CONCLUSIONES Y  
APLICACIONES  
PRÁCTICAS**



## 5. CONCLUSIONES Y APLICACIONES PRÁCTICAS

Una vez analizados los diferentes estudios, se enumeran a continuación de forma esquemática las principales conclusiones y aplicaciones prácticas de esta Tesis Doctoral:

1. Los altos niveles de reproducibilidad y validez encontrados para las determinaciones directas e indirectas de la transición aeróbica-anaeróbica y el  $VO_{2max}$ , sugieren que los test incrementales máximos, con una duración comprendida entre 12 y 14 min, es una metodología apropiada para identificar los principales parámetros de rendimiento en corredores de medio y alto nivel.
2. Al igual que se ha evidenciado en ciclismo, el máximo estado estable constituye un hito fisiológico diferenciado de los umbrales aeróbico y anaeróbico.
3. La identificación de los principales hitos fisiológicos a través de concentraciones fijas del lactato en sangre capilar, son una muy buena alternativa a los ventilatorios, debido a los altos valores de validez, fiabilidad, reproducibilidad y la accesibilidad que presentan para todos los entrenadores y corredores.
4. Existe una estrecha relación entre la velocidad pico alcanzada en un test individualizado incremental en rampa, con una duración no superior a los 14 minutos, con la velocidad aeróbica máxima y la predicción del consumo máximo de oxígeno.
5. El test de la Universidad de Montreal presenta importantes limitaciones, ya que parece infraestimar la velocidad aeróbica máxima y sobrestimar el  $VO_{2max}$ , parámetros ambos fundamentales para programación y valoración del rendimiento en carrera.
6. El test individualizado de Velocidad Aeróbica Máxima, con una duración de entre 12 y 14 minutos, se postula como una mejor alternativa que el UMTT para la evaluación y estimación de los principales parámetros del rendimiento aeróbico en corredores de medio y alto nivel.
7. De las cinco dispositivos examinadas, únicamente el potenciómetro Stryd presenta unos niveles de reproducibilidad lo suficientemente elevados para la estimación adecuada de la potencia en carrera a pie, siendo sensible a los

cambios en el peso, la pendiente y la velocidad, tanto en condiciones de laboratorio (tapiz rodante) como en externas al aire libre.

8. Los registros de potencia obtenidos por el dispositivo Stryd en situaciones indoor, y los dispositivos Polar Vantage V y Stryd en condiciones outdoor, son los que mayor acuerdo alcanzan con respecto a los dos modelos teóricos de predicción de la potencia de carrera.
9. Del análisis de la validez concurrente, al comparar los registros de los diferentes potenciómetros con el consumo de oxígeno, se desprende que el footpod Stryd puede considerarse como el dispositivo más sensible a los cambios que la pendiente, el peso y la velocidad pueden producir sobre la exigencia metabólica y la demanda energética de la carrera a pie.