

Efectos agudos de una sesión de entrenamiento basada en la PC y una sesión basada en el FTP sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los parámetros ventilatorios, respiratorios y metabólicos evaluados en los umbrales ventilatorios VT1 y VT2 en paratletas

Julie Joan Acevedo Ramirez

Cristian Alejandro Valbuena Rubiano

Tutor:

Jairo Alejandro Fernández

Universidad Pedagógica Nacional

Maestría en ciencias del deporte y la actividad física

2026

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRAC.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
Capítulo 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
Antecedentes.....	17
Pregunta problema.....	22
Objetivo general.....	22
Objetivos específicos.....	22
Justificación.....	23
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO.....	26
Potencia como indicador de carga externa en el ciclismo.....	26
Cuantificación del esfuerzo en ciclismo.....	29
Potencia Crítica (PC).....	32
Umbral de potencia funcional (Functional Threshold Power FTP).....	35
Indicadores de las expresiones y respuestas fisiológicas y bioquímicos.....	39
Consumo de oxígeno como determinante de la respuesta fisiológica al ejercicio....	41
Umbral ventilatorio.....	43
Primer umbral ventilatorio (VT 1).....	45
Segundo umbral ventilatorio (VT 2).....	48
Bases fisiológicas del control autonómico cardíaco.....	52
Variabilidad de la frecuencia cardíaca.....	54
Paracycling.....	58
Capítulo 3. METODOLOGÍA.....	59
Población.....	59
Criterios de inclusión.....	60
Criterios de exclusión.....	61
Aspectos éticos de la investigación.....	62
Análisis de riesgos.....	65

Confidencialidad y almacenamiento de la información.....	65
Protección de la identidad.....	66
Consentimiento y asentimiento informado	67
Conflicto de intereses.....	67
Instrumentos.....	67
Cicloergómetro.....	68
Ergoespirómetro.....	68
Frecuencia cardíaca.....	68
Desarrollo metodológico.....	69
Fase I. Evaluación fisiológica inicial.....	70
Fase II. Fase experimental.....	71
Protocolos de evaluación fisiológica y experimental.....	73
Evaluación del consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx), umbrales ventilatorios (VT1 y VT2) y cociente respiratorio (RER).....	74
Determinación del Functional Threshold Power (FTP).....	76
Determinación de la Potencia Crítica (PC).....	78
Desarrollo de las sesiones experimentales.....	80
Evaluación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HVR).....	81
Capítulo 4. RESULTADOS.....	82
Capítulo 5. DISCUSIÓN.....	109
Capítulo 6. CONCLUSIONES.....	120
REFERENCIAS.....	124
ANEXOS.....	131
Anexo 1. Plantilla Consentimiento informado.....	131
Anexo 2. Planilla de registro variabilidad de la frecuencia cardíaca (HVR).....	135

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Protocolo para la determinación del Functional Threshold Power (FTP)</i>	78
Tabla 2. <i>Características generales de los paratletas</i>	83
Tabla 3. <i>Resultados de las variables fisiológicas y de rendimiento obtenidas durante la prueba de esfuerzo máximo por los cuatro deportistas</i>	84
Tabla 4. <i>Resultados individuales de la prueba de potencia funcional umbral.(FTP)</i>	85
Tabla 5. <i>Resultados individuales de las pruebas de 3, 7 y 12 minutos utilizadas para determinar la potencia crítica</i>	86
Tabla 6. <i>Comparación individual de la potencia y la frecuencia cardíaca entre PC y FTP</i>	89
Tabla 7. <i>Comparación de las respuestas fisiológicas en VT1, VT2 y respuesta pico/máxima entre las sesiones prescritas por FTP y potencia crítica (PC) paratleta 1</i>	89
Tabla 8. <i>Comparación de las respuestas fisiológicas en VT1, VT2 y respuesta pico/máxima entre las sesiones prescritas por FTP y potencia crítica (PC) paratelta 2</i>	910
Tabla 9. <i>Comparación de las respuestas fisiológicas en VT1, VT2 y respuesta pico/máxima entre las sesiones prescritas por FTP y potencia crítica (PC) partleta 3</i>	921
Tabla 10. <i>Comparación de las respuestas fisiológicas en VT1, VT2 y respuesta pico/máxima entre las sesiones prescritas por FTP y potencia crítica (PC) partleta 4</i>	92
Tabla 11. <i>Resultado de la relación grupal de las respuestas fisiológicas entre las sesiones mediante FTP y potencia crítica en el primer umbral ventilatorio</i>	93
Tabla 12. <i>Resultado de la relación grupal de las respuestas fisiológicas entre las sesiones mediante FTP y potencia crítica en el segundo umbral ventilatorio</i>	94
Tabla 13. <i>Comparación grupal de las respuestas fisiológicas pico o máximas entre las sesiones prescritas mediante FTP y potencia crítica</i>	95
Tabla 14. <i>Comparación de las respuestas fisiológicas y de potencia entre CPET, FTP y PC en VT1</i>	96
Tabla 15. <i>Comparación de las respuestas fisiológicas y de potencia entre CPET, FTP y PC en VT2</i>	98

Tabla 16. <i>Valores individuales de RMSSD y LF/HF durante las sesiones FTP y PC del paratleta 1</i>	103
Tabla 17. <i>Valores individuales de RMSSD y LF/HF durante las sesiones FTP y PC del paratleta 2</i>	101
Tabla 18. <i>Valores individuales de RMSSD y LF/HF durante las sesiones FTP y PC del paratleta 3</i>	102
Tabla 19. <i>Valores individuales de RMSSD y LF/HF durante las sesiones FTP y PC del paratleta 4</i>	103
Tabla 20. <i>Comparación grupal del RMSSD entre las sesiones basadas en FTP y PC</i>	104
Tabla 21. <i>Comparación grupal de la relación LF/HF entre las sesiones basadas en FTP y PC</i>	106

Lista de figuras

Figura 1. <i>Umbrales ventilatorios y transición de VT1 a VT2.....</i>	<i>47</i>
Figura 2. <i>Fases y procedimientos de la investigación.....</i>	<i>73</i>
Figura 3. <i>Diferencias porcentuales de las respuestas fisiológicas y de potencia de FTP y PC respecto al CPET en VT1.....</i>	<i>97</i>
Figura 4. <i>Diferencias porcentuales de las respuestas fisiológicas y de potencia de FTP y PC respecto al CPET en VT2.....</i>	<i>99</i>
Figura 5. <i>Cambios porcentuales del RMSSD entre las sesiones basadas en FTP y PC.....</i>	<i>1</i>
Figura 6. <i>Cambios porcentuales de la relación LF/HF entre las sesiones basadas en FTP y PC.....</i>	<i>107</i>

DEDICATORIA

Esta parte de mi vida, este camino de formación profesional y crecimiento personal se lo dedico a mi hijo Angel David quien ha sido el que ha batallado y acompañado noches, días y meses de un sin fin de emociones para ver esta realidad, un camino que termina pero muchos que comienzan para seguir marcando huella junto a él.

A mi mamá quien siempre ha estado para apoyarme en lo que he necesitado con detalles que nunca faltan y hacen seguir dando un impulso, a mi padre y hermano quienes con una palabra un gesto humano logran motivar por seguir y culminar este reto que me propuse.

A todos los deportistas entrenadores y compañeros de universidad que también estuvieron con ocurrencias, risas, abrazos y noches frías que entre lecturas, debates y reflexiones pude consolidar no sólo nuevos conocimientos sino crecimiento personal que ha sido indispensable para estar en el camino que es y considero que el correcto por donde se edifican los sueños y un rumbo de muchas alegrías y triunfos.

Por último a mi compañera de proyecto, esta relación académica que logró a buen término, le agradezco su paciencia, su compromiso y a enseñarme algo valioso que es el lado humano que se puede marcar día a día y a enamorarme más del deporte paralímpico.

Cristian Alejandro Valbuena Rubiano

A mis padres y a mi hermano, la luz de mi vida y mi principal motor, por acompañarme en cada sueño y por ser la fuerza que me impulsa a alcanzar cada meta.

A los deportistas de paracycling de Bogotá y Cundinamarca, por hacer parte de esta complicidad académica, por permitirme aprender de ustedes y por reafirmar mi pasión por el paracycling y el deporte. Gracias a ustedes confirmé que no me equivoqué al elegir el deporte paralímpico y la discapacidad como mi campo de desarrollo académico y profesional, pues este camino ha traído a mi vida unas de mis mayores alegrías, aprendizajes y satisfacciones.

A los entrenadores Marco Tulio Ruiz y Maicol Cárdenas, por su disposición y apoyo durante este proceso; a Gloria Muñoz, por su apoyo institucional; a Eulices León, por su conocimiento, orientación y por esas largas conversaciones que ayudaron a darle forma a esta investigación; y a Anderson Flores, por su constante disposición para colaborar.

A mi compañero de tesis, por compartir este camino, por el compromiso, el trabajo conjunto y por acompañar cada reto que implicó hacer realidad esta investigación.

Julie Joan Acevedo Ramirez

RESUMEN

La planificación del entrenamiento en deportes de resistencia requiere estrategias claras que permitan individualizar la carga de acuerdo con las respuestas fisiológicas de cada paratleta. En el paraciclismo, esta necesidad adquiere relevancia debido a las diferencias funcionales asociadas a la discapacidad, las cuales pueden modificar la relación entre la carga externa y su relación frente a las respuestas fisiológicas en el ejercicio. En este contexto, el Funcional Threshold Power (FTP) y la Potencia Crítica (PC) constituyen dos de los métodos más utilizados para determinar la intensidad que se debe tener en el entrenamiento; sin embargo, existe aún escasa evidencia sobre las respuestas fisiológicas que estos estímulos generan en los paratletas.

El objetivo de la presente investigación fue determinar los efectos agudos de una sesión de entrenamiento basada mediante el valor de Potencia Crítica (PC) y otra basada con el valor del Funcional Threshold Power (FTP) sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los parámetros ventilatorios, respiratorios y cardíacos evaluados en los umbrales ventilatorios VT1 y VT2 en paratletas. Se desarrolló un estudio de casos de carácter exploratorio con cuatro paratletas de paraciclismo, quienes realizaron una evaluación fisiológica inicial mediante ergoespiometría para determinar el consumo máximo del oxígeno, los umbrales ventilatorios, el FTP y la PC. Posteriormente, cada paratleta completo dos sesiones experimentales, una valorada con FTP y otra con PC. Durante las sesiones se registraron variables ventilatorias, respiratorias, cardíacas como también de

variabilidad de la frecuencia cardíaca, los cuales fueron analizadas mediante estadística descriptiva y tamaño del efecto de Hedges para las medidas relacionadas.

Los resultados mostraron que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las sesiones planificadas mediante FTP y PC en las variables ventilatorias, respiratorias, cardíacas y autonómicas evaluadas de forma grupal. No obstante, el análisis individual evidenció una elevada variabilidad fisiológica entre paratletas. En algunos la sesión establecida mediante PC reprodujo con mayor proximidad las respuestas cardiorrespiratorias observadas durante la prueba de esfuerzo y la frecuencia cardíaca aunque en otros participantes estas diferencias fueron mínimas o favorecieron al FTP. En cuanto a la variabilidad de la frecuencia cardíaca, ambas sesiones generaron una marcada disminución del RMSSD durante el ejercicio, sin observarse un patrón consistente que permitiera atribuir una recuperación autonómica superior en alguno de los dos métodos establecidos.

Se concluye que, en esta serie de casos, la sesión planificada mediante FTP y PC produjo respuestas fisiológicas globalmente similares; sin embargo, las diferencias observadas a nivel individual indican que la relación entre la carga externa y las respuestas fisiológicas dependen de las características funcionales de cada paratleta. Estos hallazgos respaldan la necesidad de complementar lo que se establece en cada entrenamiento teniendo en cuenta los indicadores fisiológicos, la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los parámetros ventilatorios, con el fin de favorecer una planificación del entrenamiento más individualizada en el paraciclismo.

Palabras clave: paraciclismo, potencia crítica, functional threshold power, variabilidad de la frecuencia cardíaca, umbrales ventilatorios.

ABSTRACT

Training prescription in endurance sports requires clear strategies to individualize training load according to each para-athlete's physiological responses. In para-cycling, this need is particularly relevant because the functional impairments associated with disability may modify the relationship between external workload and the physiological responses elicited during exercise. In this context, Functional Threshold Power (FTP) and Critical Power (CP) are two of the most widely used methods for determining training intensity. However, evidence regarding the physiological responses induced by these training stimuli in para-athletes remains limited.

The aim of this study was to determine the acute effects of a training session prescribed using Critical Power (CP) and another prescribed using Functional Threshold Power (FTP) on heart rate variability and ventilatory, respiratory, and cardiovascular parameters assessed at the first and second ventilatory thresholds (VT1 and VT2) in para-cyclists. An exploratory case study was conducted involving four para-cyclists who underwent an initial cardiopulmonary exercise test to determine maximal oxygen uptake ($\text{VO}_{2\text{max}}$), ventilatory thresholds, FTP, and CP. Subsequently, each participant completed two experimental training sessions, one prescribed using FTP and the other using CP.

During the sessions, ventilatory, respiratory, cardiovascular, and heart rate variability variables were recorded and analyzed using descriptive statistics, and Hedges' effect size for paired measures.

The results showed no statistically significant differences between the FTP- and CP-based training sessions in ventilatory, respiratory, cardiovascular, and autonomic variables at the group level. Nevertheless, individual analysis revealed considerable physiological variability among the para-athletes. In some participants, the CP-based session elicited cardiorespiratory responses that more closely resembled those observed during the cardiopulmonary exercise test, including heart rate responses, whereas in others the differences were minimal or favored FTP. Regarding heart rate variability, both training sessions produced a marked reduction in RMSSD during exercise, with no consistent pattern indicating superior autonomic recovery following either training prescription.

It is concluded that, in this exploratory case series, FTP- and CP-based training sessions produced overall similar physiological responses. However, the individual differences observed suggest that the relationship between external workload and physiological responses depends on the functional characteristics of each para-athlete. These findings support the incorporation of physiological indicators, including heart rate variability and ventilatory parameters, to complement power-based training prescription and promote a more individualized approach to training in para-cycling.

Keywords: para-cycling; critical power; functional threshold power; heart rate variability; ventilatory thresholds.

INTRODUCCIÓN

La planificación del entrenamiento constituye uno de los pilares fundamentales del rendimiento deportivo, se logra organizar y dosificar las cargas de trabajo con el propósito de generar adaptaciones fisiológicas específicas y a su vez optimizar el desempeño de los paratletas. En disciplinas de resistencia como el ciclismo y el paracycling, la adecuada planificación de las cargas en el ejercicio resulta determinante para favorecer el desarrollo de la capacidad aeróbica, y coadyuvar los procesos de homeostasis para evitar la fatiga y mejorar el rendimiento competitivo. En este contexto, los avances tecnológicos asociados al uso de medidores de potencia han transformado la forma en que los entrenadores e investigadores cuantifican la carga externa y las diferentes respuestas fisiológicas para la adaptación y planificar el entrenamiento cada vez mejor.

Entre los métodos más empleados para planificar las cargas en el entrenamiento se encuentran el Funcional Threshold Power (FTP) y la Potencia Crítica (PC). El FTP ha sido ampliamente utilizado por su facilidad de aplicación y por constituir una aproximación práctica de la potencia que un ciclista puede sostener durante un esfuerzo prolongado. Por otra parte, la Potencia Crítica se fundamenta en un modelo fisiológico y matemático que representa el límite entre los dominios de intensidad pesado y severo del ejercicio, razón por lo cual ha cada vez más se ha puesto de interés individualizar el entrenamiento. Aunque ambos métodos son utilizados con el mismo propósito, sus fundamentos fisiológicos son diferentes, por lo que es posible que las respuestas fisiológicas sean distintas aun cuando la carga externa sea similar.

La mayor parte de la evidencia científica disponible sobre estos modelos de planificación ha sido desarrollada en ciclistas sin discapacidad, mientras que las investigaciones en paratletas continúan siendo limitadas. Esta situación resulta particularmente relevante debido a que las características funcionales propias de cada discapacidad pueden modificar la respuesta cardíaca, ventilatoria y autonómica frente al ejercicio, haciendo que la relación entre la carga externa y la respuesta fisiológica sea distante a la observada por los deportistas convencionales. En consecuencia, traer a colación los diferentes criterios de entrenamiento desarrollados con población sin discapacidad podría no reflejar con precisión las necesidades fisiológicas de los paratletas.

Desde la perspectiva, la evaluación de la respuesta fisiológica al ejercicio adquiere un sentido importante para comprender cómo diferentes métodos de planificación del entrenamiento modifican el comportamiento del organismo. Variables como el consumo de oxígeno, los umbrales ventilatorios, la frecuencia cardíaca, la variabilidad de la frecuencia cardíaca permiten caracterizar la carga interna generada durante el ejercicio y proporciona información objetiva sobre los procesos de adaptación, recuperación y fatiga. Su análisis integrado favorece una interpretación más completa de los efectos fisiológicos del entrenamiento y contribuye a una mayor individualización de la preparación deportiva.

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo determinar los efectos agudos de dos sesiones de entrenamiento planificado mediante Funcional Threshold Power (FTP) y Potencia Crítica (PC) sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) y las respuestas ventilatorias, respiratorias y cardíacas en paratletas de paracycling. Para ello se

desarrolló un estudio de casos de carácter exploratorio con cuatro sujetos, quienes realizaron una evaluación fisiológica inicial mediante prueba de esfuerzo cardiopulmonar (CPET), seguida de dos sesiones experimentales planificadas mediante ambas metodologías. Las respuestas fisiológicas obtenidas fueron analizadas desde la perspectiva de la carga interna del entrenamiento, considerando tanto el comportamiento grupal como las respuestas individuales de cada participante.

El principal aporte de esta investigación radica en proporcionar evidencia sobre la respuesta fisiológica generada por dos de los métodos más utilizados en ciclismo analizados específicamente en una población de paratletas. Más que establecer la superioridad de una metodología sobre otra, este estudio busca apartar elementos que permitan comprender la variabilidad individual de la respuesta fisiológica del ejercicio y fortalecer la toma de decisiones relacionada con el entrenamiento y su planificación en paracycling, contribuyendo así al desarrollo de procesos del entrenamiento más individualizados y fundamentados en criterios fisiológicos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planificación del entrenamiento constituye uno de los pilares del rendimiento deportivo, ya que permite organizar y dosificar las cargas del trabajo con el propósito de generar adaptaciones fisiológicas específicas y optimizar el desempeño del deportista. En disciplinas deportivas de resistencia como el paracycling, la individualización de la carga adquiere especial relevancia debido a las diferencias funcionales derivadas de la discapacidad, las cuales pueden modificar la respuesta fisiológica frente a un mismo estímulo de entrenamiento. En este contexto, el control y la adecuación de las cargas representa un elemento fundamental para diseccionar la planificación del ejercicio y así monitorear y llevar un registro detallado de las adaptaciones dadas por el entrenamiento.

Las diferentes mediciones de la potencia ha transformado la planificación del entrenamiento en el ciclismo y para este caso que se hablara de paracycling, permitiendo cuantificar con mayor precisión la carga externa. Entre los métodos más utilizados para establecer la intensidad del ejercicio se encuentran el Umbral Funcional de Potencia en adelante (FTP) y la Potencia Crítica en adelante (PC). Aunque ambos buscan estimar la máxima intensidad sostenible en un esfuerzo dado y orientar de esta forma la planificación y adecuación del entrenamiento, difieren en sus fundamentos fisiológicos y en los procedimientos empleados para su determinación. Mientras el FTP constituye una estimación práctica derivada del rendimiento en una prueba contrarreloj, la PC se fundamenta en un modelo fisiológico que representa el límite entre los dominios de intensidades altas y severas.

A pesar de que ambas métricas que se utilizan son ampliamente utilizadas por entrenadores en los procesos de entrenamiento deportivo, aún no existe una conversación unificada sobre su generan respuestas fisiológicas equivalentes cuando se emplean para prescribir la intensidad del ejercicio. La mayoría de las investigaciones se han centrado en comparar indicadores de rendimiento o en validar cada método de forma independiente; sin embargo, es limitada la evidencia que analice de manera integrada la respuesta cardiorrespiratoria, metabólica y autonómica inducida por ambos protocolos, especialmente en deportistas con discapacidad.

La evaluación conjunta de las variables como la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los umbrales ventilatorios permiten comprender la carga interna generada por el ejercicio y valorar las adaptaciones fisiológicas derivadas de diferentes métodos de prescripción. Estas variables proporcionan información complementaria sobre la regulación autonómica, la respuesta cardiorrespiratoria y el comportamiento del metabolismo energético, constituyendo una ruta de acción que sea relevante para la individualización del entrenamiento y su planificación.

En el paracycling este vacío de conocimiento es aún más evidente, debido a que las características funcionales propias de cada deportista pueden modificar la relación entre la carga externa y la respuesta fisiológica. En consecuencia, continúa siendo incierto si la prescripción basada en FTP y la basada en PC generan respuestas fisiológicas similares o diferentes cuando se analiza desde una perspectiva integrada. Esta limitación dificulta

fundamentalmente la planificación del entrenamiento sobre criterios fisiológicos específicos para esta población.

En este contexto, la presente investigación se plantea como un estudio de casos de carácter exploratorio orientado a describir y comparar la respuesta cardiorrespiratoria orientada a describir y comparar la respuesta cardio respiratoria y autonómica de cuatro paratletas durante las sesiones establecidas mediante FTP y PC. Los resultados buscan aportar evidencia descriptiva que contribuya a comprender el comportamiento fisiológico individual frente a ambos métodos y sirva como base para futuras investigaciones en población paralímpica.

Antecedentes

Los antecedentes revisados para la presente investigación muestran que la mayoría de investigación se han centrado en validar la PC y el FTP, como herramientas para la prescripción del entrenamiento en ciclismo convencional. Sin embargo, la evidencia en el paraciclismo en la actualidad es limitada, especialmente en estudios que integren variables cardiorrespiratorias, metabólicas y autonómicas dentro de un mismo protocolo de evaluación como el propuesto en este caso. A continuación, se presentan los principales estudios relacionados con el problema de investigación, en donde se destacan los diferentes hallazgos, los aportes y limitaciones que presentan y la forma en que sustentan el desarrollo del presente estudio de casos de carácter exploratorio.

En relación con la PC Burnley y Jones (2018) consolidan el modelo de potencia duración al explicar la interacción de la PC y la capacidad del trabajo anaeróbico, describiendo esta última como una reserva finita de energía cuya disminución y recuperación determinan la tolerancia al ejercicio por encima de la PC. Los autores en este caso demostraron que el modelo propuesto permite observar el rendimiento en esfuerzos continuos e intermitentes seguido para poder representar la fatiga de manera dinámica, constituyéndose en una herramienta sólida para la preparación y estructuración del entrenamiento.

Los diferentes hallazgos fueron respaldados por Dekerle et al. (2015), quienes evidenciaron que la PC presenta una mayor relación con el tiempo de agotamiento respecto a los indicadores tradicionales como el VO₂máx y los umbrales ventilatorios. Los autores determinaron que la PC representa de forma precisa la capacidad funcional del deportista para sostener esfuerzos prolongados.

Por otro lado, Carita et al. (2013) encontraron que la respuesta fisiológica durante ejercicios realizados a intensidad de PC no es similar entre individuos aunque los deportistas entrenados presentaron un rendimiento del VO₂ más eficiente, el tiempo hasta el agotamiento fue similar entre grupos, lo que deja ver que la tolerancia al ejercicio depende de factores individuales además del nivel de entrenamiento.

Los diferentes estudios presentados coinciden al reconocer que la PC como un indicador fisiológicamente robusto para la planificación y prescripción del ejercicio y el entrenamiento deportivo; sin embargo, todos los estudios se centran en el análisis en

ciclistas convencionales y no incorporan las variables autonómicas, como la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV), ni con poblaciones con discapacidad. Este vacío justifica la necesidad de explorar la respuesta fisiológica de la PC en contextos diferentes, como en este caso el paraciclismo.

Respecto a la comparación de la FTP y la PC diferentes estudios e investigaciones orientan su objetivo a establecer cuál de los dos métodos representa una mayor precisión en el estado fisiológico del deportista. Valenzuela et al. (2018) en el cual observaron que el FTP presenta errores de estimación entre $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$, los cuales de forma inevitable afecta la clasificación de la intensidad del ejercicio.

Del mismo modo, Leo et al. (2020) demuestran que la PC presenta un menor error sistemático respecto al FTP para estimar el MLSS, planteando que constituye un indicador más adecuado del estado estable metabólico.

Por su parte, en el estudio de meta análisis de Galan et al. (2020) dejó ver que, aunque la PC mantiene correlaciones significativas con el MLSS y los umbrales ventilatorios estos indicadores no son congruentes y representan momentos fisiológicos diferentes. De manera complementaria, Souza et al. (2016) deja en claro que algunos métodos indirectos para estimar la PC presentan una elevada variabilidad individual, limitando de esta manera su aplicación cuando se requiere una cuantificación precisa de la intensidad.

Desde esta perspectiva, estas investigaciones apoyan lo positivo de la utilidad de la PC como método de prescripción, aunque persisten diferencias sobre la similitud o relación con otros indicadores fisiológicos. Además, la mayoría de estos estudios se desarrollaron en ciclistas sin discapacidad y evaluaron principalmente variables de rendimiento o metabólicas, dejando limitada la evidencia sobre las respuestas autonómicas y sobre su aplicación en población paralímpica.

En el ámbito del paraciclismo la evidencia relacionada con la aplicación de la PC en este deporte para personas con discapacidad aún es reducida. Faupin et al. (2010) mostraron la validez del uso del modelo de PC en handcycling, aunque señalaron que las características mecánicas propias de esta modalidad modifican la estimación de la capacidad de trabajo anaeróbico.

Seguidamente, Goosey Tolfrey et al. (2016) escribieron que las limitaciones neuromusculares y la reducción de la masa muscular activa pueden alterar la relación entre la potencia desarrollada y la respuesta fisiológica durante el ejercicio. En este sentido Stone et al. (2019) dejaron ver que la PC permite diferenciar perfiles fisiológicos entre distintas clases funcionales, resaltando su objetividad para individualizar la planificación del entrenamiento.

Aunque todos estos estudios representan un avance constante y sólido en el conocimiento del rendimiento en el paracycling, ninguno comparó la respuesta fisiológica producida por protocolos establecidos con FTP ni PC y no siquiera incorporando variables cardio respiratorias, metabólicas y autonómicas. Por lo anteriormente mencionado continúa

existiendo una limitada comprensión del comportamiento integrado de estas respuestas en deportistas con discapacidad.

En conjunto y para ir determinando y dando solidez a los objetivos que se plantean para esta investigación se da cuenta que la literatura revisada, evidencia que la PC constituye un indicador fisiológico válido para planificación y prescripción del entrenamiento y que, los diferentes contextos, se presentan ventajas respecto al FTP. Sin embargo, la mayor parte de la evidencia proviene de estudios realizados en ciclistas convencionales y se ha centrado principalmente en variables de rendimiento, consumo de oxígeno o metabolismo del lactato.

Afirmando con esto que son escasas las investigaciones que describen conjuntamente la respuesta cardiorrespiratoria, metabólica y autonómica durante protocolos prescritos mediante FTP y PC en la población paralímpica. Asimismo, la literatura disponible se ha orientado principalmente hacia diseños experimentales y comparaciones grupales, siendo limitada la evidencia que permita comprender la respuesta fisiológica individual de los deportistas.

Como ya se ha mencionado a lo largo de todo este recorrido y las diferentes evidencias y contextos que se han planteado se puede demostrar que la presente investigación aporta evidencia desde el estudio de casos de carácter exploratorio, describiendo y comparando la respuesta fisiológica de cuatro paratletas frente a dos modelos de prescripción del entrenamiento (FTP y PC). Si bien los resultados no pretenden establecer un punto exacto de partida para el trabajo futuro en la población paralímpica,

ofrecen información que contribuye a comprender el comportamiento individual de variables cardiorrespiratorias y autonómicas; con esto generar una base para futuras investigaciones con muestras más amplias y diseños analíticos.

Pregunta problema:

Cuáles son los efectos agudos de una sesión de entrenamiento basada en la PC y una sesión basada en el FTP sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los parámetros ventilatorios, respiratorios y metabólicos evaluados en los umbrales ventilatorios.

Objetivo General

Determinar los efectos agudos de una sesión de entrenamiento basada en PC y una basada en el FTP sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los parámetros ventilatorios, respiratorios y metabólicos evaluados en los umbrales ventilatorios VT1 y VT2 en paratletas.

Objetivos específicos

En una población de paratletas identificar:

- La línea de base de la PC y el FTP.
- La línea de base de los parámetros parámetros ventilatorios, respiratorios y metabólicos

- Los parámetros ventilatorios, respiratorios y metabólicos evaluados en los umbrales ventilatorios VT1 y VT2 durante una sesión de entrenamiento basada en la PC.
- Los parámetros ventilatorios, respiratorios y metabólicos evaluados en los umbrales ventilatorios VT1 y VT2 durante una sesión de entrenamiento basada en la FTP.
- La VFC antes y después de una sesión de entrenamiento basada en la PC.
- La VFC antes y después de durante una sesión de entrenamiento basada en la FTP

Justificación

El crecimiento del deporte paralímpico ha impulsado avances importantes en los procesos de entrenamiento, la clasificación funcional y el desarrollo tecnológico aplicado al rendimiento deportivo. En disciplinas como el paracycling, estos avances han incrementado la necesidad de fundamentar la planificación del entrenamiento en evidencia científica que considere las características fisiológicas y funcionales propias de los paratletas. Sin embargo la mayor parte del conocimiento disponible en fisiología del ejercicio continúa derivándose de investigaciones realizadas en deportistas sin discapacidad, lo que ha favorecido la extrapolación de modelos de planificación cuya aplicabilidad en población paralímpica aún no ha sido suficientemente estudiada (Goosey Tolfrey et al., 2018).

En el paracycling, las características funcionales asociadas a cada tipo de discapacidad pueden modificar la relación entre la carga externa y la respuesta fisiológica

al ejercicio, afectando proceso como la regulación autonómica, la respuesta cardiorrespiratoria, el metabolismo energético y la recuperación posterior al esfuerzo realizado (Bhambhani, 2002). En consecuencia, la utilización de modelos de prescripción desarrollados para ciclistas convencionales podría no reflejar sólida precisión para la carga interna experimentada por los paratletas, por ende limita la individualización del entrenamiento.

Desde esta perspectiva, la presente investigación adquiere relevancia científica porque explora la respuesta fisiológica generada por dos de los métodos de prescripción más utilizados en ciclismo FTP y PC. Más que establecer la superioridad de uno sobre otro, el estudio busca describir si ambos protocolos producen respuestas cardio respiratorias, metabólicas y autonómicas similares o diferentes en los deportistas participantes. Esta aproximación resulta pertinente debido a la escasa evidencia disponible sobre la integración de estas variables en población con discapacidad.

El principal aporte científico de este trabajo consiste en contribuir al conocimiento de la respuesta fisiológica del ejercicio desde una perspectiva integradora, considerando simultáneamente indicadores de regulación autonómica de la variabilidad de la frecuencia cardíaca y de la respuesta ventilatoria de los umbrales ventilatorios. Esta integración permite una caracterización más completa de la carga interna inducida por diferentes estrategias de prescripción del entrenamiento y amplía la evidencia disponible en fisiología del ejercicio aplicada al deporte paralímpico.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación se desarrolla mediante un estudio de casos de carácter exploratorio, lo que permite describir de manera detallada la respuesta fisiológica individual de cuatro deportistas frente a dos modelos de prescripción del entrenamiento. Este enfoque resulta apropiado debido al reducido número de atletas disponibles en el deporte paralímpico de alto rendimiento y busca con esto generar una evidencia inicial que sirva como base para futuras investigaciones con muestras más amplias y diseños analíticos.

Finalmente, la investigación posee una relevancia práctica para entrenadores, preparadores físicos, fisiólogos del ejercicio y demás profesionales vinculados al paraciclismo, al aportar información que puede contribuir a la individualización de la carga de entrenamiento a partir de la respuesta fisiológica de cada paratleta. Asimismo, los resultados podrán orientar futuras investigaciones sobre planificación y prescripción del ejercicio en población paralímpica y favorecer el desarrollo de estrategias en los procesos fundamentadas en criterios fisiológicos específicos para esta población.

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el marco teórico en donde se planteó y definió los diferentes conceptos teóricos que dan claridad de las variables y referencias conceptuales que tuvo lugar en la investigación.

Potencia como indicador de carga externa en el ciclismo.

La cuantificación de la carga de entrenamiento constituye uno de ellos principios fundamentales para la planificación y el control del rendimiento deportivo, particularmente en disciplinas de resistencia donde pequeñas variaciones en la intensidad del ejercicio pueden modificar de manera significativa la respuesta fisiológica y las adaptaciones inducidas por el entrenamiento (Impellizzeri Et al, 2019) En este contexto la potencia mecánica se ha consolidado como el principal indicador de la carga externa en el ciclismo, debido a que permite cuantificar objetivamente el trabajo realizado por el deportista durante el pedaleo y establecer con precisión la intensidad del esfuerzo desarrollado (Allen y Coggan, 2010).

En el ámbito del rendimiento deportivo, particularmente en el ciclismo, el concepto de potencia representa la medida más objetiva y directa del esfuerzo mecánico realizado por un atleta. Desde la perspectiva de la física clásica, la potencia se define como la tasa a la cual se realiza un trabajo mecánico, expresada matemáticamente como $P = W/t$ W es el trabajo y t es el tiempo. En el contexto biomecánico específico del ciclismo, esta variable se cuantifica midiendo la fuerza o el torque aplicado a los pedales o biela multiplicado por la velocidad angular conocida como cadencia (Allen et al., 2019). Esta producción de energía

mecánica se mide en vatios (W) y refleja el costo metabólico y el esfuerzo neuromuscular instantáneo requerido para vencer las resistencias externas, tales como la resistencia aerodinámica, la gravedad y la fricción (Faria et al., 2005).

La incorporación de medidores de potencia ha transformado la planificación del entrenamiento en el ciclismo al permitir una cuantificación objetiva, continua y altamente reproducible de la carga externa durante el entrenamiento y la competencia (Passfield et al., 2017). Esta posibilidad ha favorecido el desarrollo de modelos de prescripción basados en intensidad relativa, facilitando la individualización de las cargas de entrenamiento y el seguimiento longitudinal de las adaptaciones inducidas por el ejercicio. En consecuencia, la potencia no solo constituye un indicador del rendimiento mecánico, sino también una herramienta para establecer zonas de entrenamiento, evaluar la tolerancia al esfuerzo y controlar la progresión de la carga durante diferentes fases de la preparación deportiva (Allen y Coggan, 2010).

No obstante, aunque la potencia representa con elevada precisión el trabajo mecánico realizado por el ciclista, esta variable describe exclusivamente la magnitud de la carga externa y no la respuesta fisiológica generada por dicho estímulo. Las adaptaciones al entrenamiento dependen de la interacción entre múltiples sistemas fisiológicos, cardiovascular, autonómico, ventilatorio y metabólico cuya respuesta puede variar entre individuos aun cuando la potencia desarrollada sea similar (Impellizzeri et al., 2019; Buchheit, 2014). En consecuencia, la interpretación aislada de la potencia resulta insuficiente para comprender el estrés fisiológico inducido por el ejercicio, razón por la

cual su utilización debe complementarse con indicadores de carga interna que permitan valorar la magnitud de la respuesta biológica frente al entrenamiento.

Esta relación entre carga externa y carga interna constituye uno de los fundamentos de la planificación contemporánea del entrenamiento y explica por qué diferentes modelos de prescripción basados en potencia, como el FTP y PC han adquirido un papel central dentro del ciclismo de alto rendimiento. Ambos buscan establecer intensidades de ejercicio fisiológicamente representativas; sin embargo, difieren en sus fundamentos conceptuales y en la forma en que estiman la intensidad sostenible durante esfuerzos prolongados, aspecto que ha generado un creciente interés científico por comprender cuál de estas métricas representa con mayor precisión la respuesta fisiológica inducida por el entrenamiento.

La relevancia de la potencia en el ciclismo trasciende su definición mecánica como la relación entre el trabajo realizado y el tiempo empleado para ejecutarlo. Desde una perspectiva funcional, la producción de potencia refleja la capacidad del sistema neuromuscular para transformar la energía química obtenida a partir de los procesos metabólicos en trabajo mecánico útil durante el pedaleo, constituyéndose en un indicador directo del rendimiento mecánico del ciclista (Cunningham et al., 2020). En este sentido, la eficiencia del movimiento puede entenderse como la relación entre la energía metabólica utilizada y la energía mecánica efectivamente producida, de manera que una mayor eficiencia permite sostener una determinada producción de potencia con un menor costo energético, aspecto determinante en las pruebas de resistencia de mediana y larga duración.

La producción de potencia depende de la interacción entre factores biomecánicos y fisiológicos, entre los que se destacan la magnitud de la fuerza aplicada sobre los pedales, la cadencia de pedaleo, la coordinación neuromuscular y la técnica de ejecución. Una distribución más uniforme de la fuerza a lo largo del ciclo de pedaleo favorece una mayor eficiencia mecánica, optimiza la transferencia de fuerza hacia la bicicleta y reduce el costo energético asociado al movimiento, contribuyendo al mantenimiento de esfuerzos prolongados (Smith et al., 2021). En consecuencia, la capacidad para producir y sostener elevados niveles de potencia constituye uno de los principales determinantes del rendimiento en el ciclismo de resistencia, razón por la cual durante las últimas décadas se han desarrollado diferentes modelos fisiológicos orientados a identificar las intensidades de ejercicio que mejor representan la capacidad funcional del deportista y permitan una prescripción más precisa del entrenamiento. Entre estos modelos destacan el FTP y PC, métricas que han adquirido un papel central en la planificación del entrenamiento y cuyo fundamento fisiológico será abordado en los apartados siguientes.

Cuantificación del esfuerzo en ciclismo

La cuantificación objetiva de la intensidad del ejercicio constituye uno de los principales desafíos en la planificación y el control del entrenamiento deportivo, ya que de ella depende la adecuada dosificación de la carga y, en consecuencia, la magnitud de las adaptaciones fisiológicas inducidas por el entrenamiento. Históricamente, el esfuerzo en el ciclismo se estimó mediante indicadores subjetivos, como la percepción subjetiva del esfuerzo (Rating of Perceived Exertion, RPE), y mediante respuestas fisiológicas indirectas,

principalmente la frecuencia cardíaca. Aunque estas herramientas continúan siendo ampliamente utilizadas por su utilidad práctica y bajo costo, presentan limitaciones importantes cuando se pretende cuantificar con precisión la intensidad del ejercicio, especialmente durante esfuerzos intermitentes o de alta intensidad.

La frecuencia cardíaca, por ejemplo, representa una respuesta fisiológica secundaria al ejercicio y no una medida directa del trabajo realizado. Su comportamiento está condicionado por la cinética de activación del sistema cardiovascular y presenta un retardo temporal para responder a cambios bruscos en la intensidad del esfuerzo. Adicionalmente, puede verse influenciada por múltiples factores extrínsecos e intrínsecos, como la temperatura ambiental, el grado de hidratación, la altitud, el estrés psicológico, el estado de fatiga, la recuperación previa e incluso el consumo de sustancias estimulantes, lo que puede limitar su precisión como indicador exclusivo para la prescripción del entrenamiento (Friel, 2015; Achten y Jeukendrup, 2003).

El desarrollo de los medidores de potencia representó un cambio sustancial en la cuantificación del esfuerzo en el ciclismo, al permitir medir de forma objetiva, continua y en tiempo real el trabajo mecánico desarrollado durante el pedaleo. Estos dispositivos, basados en galgas extensiométricas de alta precisión, registran la fuerza aplicada y la velocidad angular para calcular la potencia mecánica expresada en vatios, proporcionando una medida directa de la carga externa independiente de la respuesta fisiológica inmediata del deportista (Jobson et al., 2009; Passfield et al., 2017). Esta capacidad de cuantificar con alta precisión la intensidad del ejercicio ha consolidado la potencia como el principal

referente para la planificación, el monitoreo y la prescripción del entrenamiento en el ciclismo contemporáneo.

No obstante, aunque la potencia constituye el método más preciso para cuantificar la carga externa, su interpretación debe realizarse de manera complementaria con indicadores de carga interna. Una misma producción de potencia no necesariamente genera una respuesta fisiológica equivalente entre deportistas, ni siquiera en un mismo individuo bajo diferentes condiciones de entrenamiento, recuperación o fatiga (Impellizzeri et al., 2019). En consecuencia, la integración de la potencia con variables fisiológicas como la variabilidad de la frecuencia cardíaca, la respuesta ventilatoria y la concentración de lactato permite una interpretación más completa del esfuerzo realizado y proporciona una base más sólida para la individualización del entrenamiento.

Bajo este contexto, la evolución de los sistemas de cuantificación del esfuerzo condujo al desarrollo de modelos fisiológicos basados en potencia, entre los cuales destacan el FTP y la PC, ambos han sido ampliamente utilizados para establecer zonas de entrenamiento y prescribir la intensidad del ejercicio; sin embargo, difieren en sus fundamentos fisiológicos y en la forma en que representan la capacidad funcional del deportista, aspecto que ha generado un creciente interés científico y que constituye el eje central de la presente investigación.

Potencia crítica (PC)

El concepto de Potencia Crítica (PC) fue introducido originalmente por Monod y Scherrer, quienes describieron la existencia de una relación hiperbólica entre la potencia desarrollada y el tiempo hasta el agotamiento. A partir de este modelo demostraron que, conforme aumenta la intensidad del ejercicio, disminuye de manera predecible el tiempo durante el cual dicha intensidad puede mantenerse, permitiendo identificar un valor asintótico denominado Potencia Crítica, acompañado por una capacidad finita de trabajo realizada por encima de este límite, representada por el parámetro W' (Monod & Scherrer, 1965; Morton, 2006). Aunque inicialmente este modelo fue propuesto desde una perspectiva matemática, las investigaciones desarrolladas durante las últimas décadas han demostrado que la Potencia Crítica trasciende una simple relación entre potencia y tiempo, constituyéndose en uno de los indicadores fisiológicos más robustos para comprender la tolerancia al ejercicio de alta intensidad (Jones et al., 2019; Poole et al., 2016).

Desde una perspectiva fisiológica, la Potencia Crítica representa el límite superior del dominio pesado del ejercicio y la transición hacia el dominio severo, definiendo la mayor intensidad en la que el organismo mantiene un equilibrio dinámico entre el aporte de oxígeno, la producción de energía aeróbica y la demanda metabólica impuesta por el ejercicio (Poole et al., 2016; Burnley y Jones, 2018). En este dominio, aunque existe participación simultánea de los sistemas aeróbico y anaeróbico, predominan los procesos oxidativos y es posible alcanzar un estado estable del consumo de oxígeno (VO_2), de la concentración de lactato y de otras variables fisiológicas relacionadas con la homeostasis.

Por esta razón, la Potencia Crítica no debe interpretarse únicamente como un indicador del rendimiento, sino como un umbral fisiológico que delimita la capacidad del organismo para sostener el equilibrio metabólico durante esfuerzos prolongados.

Cuando la intensidad del ejercicio supera la Potencia Crítica, la respuesta fisiológica cambia de manera sustancial. El consumo de oxígeno deja de estabilizarse y aparece el denominado componente lento del VO_2 , fenómeno caracterizado por un incremento progresivo del consumo de oxígeno a pesar de que la carga externa permanezca constante (Poole & Jones, 2012; Poole et al., 2016). Paralelamente, aumenta el reclutamiento de fibras musculares tipo II, menos eficientes desde el punto de vista metabólico, se acelera la utilización de fosfocreatina, se incrementa la glucólisis anaeróbica y la producción de lactato supera progresivamente su capacidad de aclaramiento. Como consecuencia, el equilibrio ácido-base comienza a alterarse, la fatiga periférica se desarrolla de forma acelerada y el ejercicio solo puede mantenerse hasta el agotamiento, una vez se consume la capacidad de trabajo representada por W' (Burnley y Jones, 2018; Jones et al., 2019).

Esta capacidad para diferenciar el comportamiento fisiológico del organismo a ambos lados de la Potencia Crítica ha permitido establecer una clasificación de los dominios de intensidad del ejercicio ampliamente aceptada en la fisiología del ejercicio. En el dominio moderado, el consumo de oxígeno y la concentración de lactato alcanzan rápidamente un estado estable sin producir perturbaciones importantes de la homeostasis. En el dominio pesado, aunque las respuestas fisiológicas son mayores, el organismo aún logra estabilizar variables como el VO_2 y el lactato tras un periodo de ajuste. Sin embargo,

al superar la Potencia Crítica se ingresa al dominio severo, caracterizado por la imposibilidad de alcanzar un estado estable del consumo de oxígeno y por el desarrollo continuo de alteraciones metabólicas que culminan con el agotamiento. Finalmente, en el dominio extremo, la intensidad del ejercicio es tan elevada que ni siquiera se alcanza el consumo máximo de oxígeno antes de finalizar el esfuerzo (Jones et al., 2019; Poole et al., 2016).

La importancia fisiológica de la Potencia Crítica radica precisamente en que representa el límite funcional donde el organismo pierde la capacidad de mantener la homeostasis durante el ejercicio. En consecuencia, numerosos estudios han demostrado su estrecha relación con otros indicadores fisiológicos ampliamente utilizados para evaluar el rendimiento aeróbico, entre ellos el máximo estado estable de lactato (MLSS), el segundo umbral ventilatorio (VT2) y la cinética del consumo de oxígeno, aunque dichos marcadores no representan un mismo fenómeno fisiológico ni son completamente intercambiables (Jones et al., 2019; Poole et al., 2016; Burnley y Jones, 2018). Esta diferencia resulta particularmente relevante, ya que pequeñas variaciones en la intensidad relativa del ejercicio alrededor de la Potencia Crítica pueden inducir respuestas autonómicas, ventilatorias y metabólicas significativamente diferentes, aspecto que explica el creciente interés por utilizar este modelo como referencia para la prescripción individualizada del entrenamiento.

Desde el punto de vista metodológico, la estimación de la PC ha evolucionado desde el modelo hiperbólico original hacia modelos lineales que facilitan su aplicación en

contextos experimentales y deportivos. Actualmente, uno de los procedimientos más utilizados consiste en realizar varios esfuerzos máximos de duración conocida habitualmente de 3, 7 y 12 minutos para establecer la relación entre el trabajo realizado y el tiempo hasta el agotamiento, permitiendo calcular simultáneamente la Potencia Crítica y la capacidad de trabajo anaeróbico (W') mediante regresión lineal (Morton, 2006; Vanhatalo et al., 2011). Esta metodología ha demostrado una elevada reproducibilidad y una sólida fundamentación fisiológica, favoreciendo su utilización tanto en investigación como en el control del entrenamiento deportivo.

En el ciclismo contemporáneo, la incorporación de medidores de potencia ha permitido trasladar este modelo desde el laboratorio hacia escenarios reales de entrenamiento y competencia, facilitando la utilización de la PC como herramienta para la planificación del entrenamiento, la delimitación de zonas de intensidad y el seguimiento del rendimiento. No obstante, debido a la complejidad metodológica requerida para su determinación, en la práctica cotidiana muchos entrenadores recurren al Umbral de potencia funcional (FTP) como una alternativa operativamente más sencilla. Esta situación ha originado un amplio debate científico sobre la equivalencia fisiológica entre ambas métricas y sobre su capacidad para representar la verdadera intensidad sostenible durante el ejercicio prolongado, aspecto que será desarrollado en el siguiente apartado.

Umbral de potencia funcional

El crecimiento del entrenamiento basado en potencia generó la necesidad de disponer de herramientas que permitieran estimar la intensidad sostenible del ejercicio de

manera práctica, reproducible y fácilmente aplicable en el contexto cotidiano del entrenamiento. Aunque la Potencia Crítica posee un sólido fundamento fisiológico y constituye uno de los modelos más robustos para delimitar los dominios de intensidad del ejercicio, su determinación requiere la realización de múltiples esfuerzos máximos y la aplicación de modelos matemáticos específicos, condiciones que limitan su utilización rutinaria fuera del laboratorio (Jones et al., 2019; Vanhatalo et al., 2016). En respuesta a esta necesidad surgió el umbral de potencia funcional (FTP), propuesto como una alternativa operativamente más sencilla para estimar la intensidad de referencia utilizada en la planificación del entrenamiento basado en potencia (Allen y Coggan, 2010).

Allen y Coggan (2010) definieron el FTP como la mayor potencia media que un ciclista puede mantener en un estado fisiológico cuasi estable durante aproximadamente una hora sin que se produzca una fatiga progresiva que comprometa la continuidad del ejercicio. Bajo esta premisa, el FTP se consolidó rápidamente como una herramienta práctica para entrenadores y deportistas, debido a que permite establecer zonas de entrenamiento individualizadas mediante porcentajes relativos de dicha potencia, facilitando el seguimiento de la carga externa y la programación del entrenamiento en diferentes fases de la preparación deportiva.

Desde una perspectiva fisiológica, el FTP ha sido tradicionalmente relacionado con el concepto de máximo estado estable de lactato (MLSS), definido como la mayor intensidad del ejercicio en la que la producción y el aclaramiento de lactato permanecen en un equilibrio dinámico (Beneke, 2003). Esta asociación ha favorecido su utilización como una estimación indirecta de la intensidad sostenible durante esfuerzos prolongados,

particularmente porque la determinación directa del MLSS requiere múltiples pruebas de laboratorio, repetidas mediciones de lactato y un considerable tiempo de evaluación. Sin embargo, es importante reconocer que el FTP no constituye una medición fisiológica directa del MLSS, sino una aproximación funcional cuyo comportamiento puede variar entre individuos dependiendo de factores como el nivel de entrenamiento, la eficiencia mecánica, la capacidad anaeróbica y las características propias del protocolo utilizado para su estimación (Leo et al., 2022; Karsten et al., 2015).

Esta condición explica una de las principales diferencias entre el FTP y la Potencia Crítica. Mientras la Potencia Crítica deriva de un modelo fisiológico sustentado en la relación entre potencia, tiempo hasta el agotamiento y capacidad de trabajo anaeróbico (W'), el FTP corresponde a una estimación funcional obtenida a partir del rendimiento alcanzado durante una prueba máxima. En consecuencia, ambas métricas pueden presentar una elevada correlación y, aun así, no representar exactamente el mismo fenómeno fisiológico (Jones et al., 2019; Poole et al., 2016). Esta diferencia ha motivado un creciente interés científico por determinar hasta qué punto ambas estrategias de prescripción inducen respuestas fisiológicas equivalentes.

En la práctica deportiva, la determinación del FTP suele realizarse mediante el protocolo propuesto por Allen y Coggan (2010), consistente en una prueba máxima de veinte minutos, cuya potencia media se multiplica por un factor de corrección del 95 % para estimar la potencia funcional sostenible durante aproximadamente una hora. Aunque este procedimiento ha demostrado una elevada aplicabilidad en el entrenamiento cotidiano, diferentes investigaciones han cuestionado la utilización universal de dicho factor de

corrección, argumentando que la reducción fija del cinco por ciento no contempla la importante variabilidad fisiológica existente entre deportistas y puede conducir a sobreestimaciones o subestimaciones del verdadero umbral funcional (Karsten et al., 2015).

Estas limitaciones adquieren una relevancia aún mayor cuando el FTP es utilizado como referencia para la prescripción del entrenamiento en poblaciones con características fisiológicas particulares, como ocurre en el paracycling. Las diferencias en la masa muscular activa, la eficiencia mecánica, el reclutamiento neuromuscular y la respuesta cardiovascular derivadas de las distintas condiciones de discapacidad podrían modificar la relación entre la potencia desarrollada y la respuesta fisiológica inducida por el ejercicio. En consecuencia, asumir que el FTP representa con la misma precisión la intensidad fisiológica en deportistas con discapacidad que en ciclistas convencionales constituye un supuesto que, hasta el momento, carece de suficiente evidencia científica.

A pesar de estas limitaciones, el FTP continúa siendo una de las herramientas más utilizadas para la planificación del entrenamiento en el ciclismo moderno debido a su facilidad de implementación, su integración con plataformas tecnológicas y su utilidad para monitorizar la evolución del rendimiento (Sanders et al., 2017). No obstante, precisamente por su amplia utilización, resulta necesario determinar si la intensidad prescrita mediante esta métrica reproduce realmente la respuesta fisiológica esperada o si existen diferencias respecto a modelos fisiológicamente más robustos, como la Potencia Crítica. Esta interrogante constituye uno de los fundamentos científicos que sustentan la presente investigación.

Indicadores de las expresiones y respuestas fisiológicas y bioquímicas

La cuantificación de la carga de entrenamiento mediante variables mecánicas, como la potencia, constituye un elemento esencial para la planificación y el control del rendimiento deportivo. Sin embargo, la carga externa, por sí sola, no permite explicar la magnitud del estrés fisiológico inducido por el ejercicio ni las adaptaciones que este genera en el organismo. Desde la fisiología del ejercicio, se reconoce que las respuestas biológicas al entrenamiento dependen de la interacción entre múltiples sistemas cardiovascular, autonómico, respiratorio, metabólico y neuromuscular, cuya activación determina la denominada carga interna, entendida como la respuesta funcional que experimenta el deportista frente a un estímulo determinado (Impellizzeri et al., 2019; Buchheit, 2014; Bourdon et al., 2017).

En este contexto, los indicadores fisiológicos y bioquímicos constituyen herramientas fundamentales para evaluar la respuesta aguda al ejercicio, el estado funcional del deportista y los procesos de adaptación inducidos por el entrenamiento. Estas variables permiten cuantificar de manera objetiva las modificaciones que ocurren en el organismo como consecuencia de una determinada carga de trabajo, aportando información sobre el comportamiento del sistema nervioso autónomo, la respuesta cardiovascular, la regulación ventilatoria, el metabolismo energético y los mecanismos de recuperación (Halsen, 2014; Bourdon et al., 2017).

A diferencia de la carga externa, que representa el trabajo mecánico realizado, los indicadores fisiológicos y bioquímicos permiten identificar cómo dicho estímulo es

procesado por el organismo. En consecuencia, deportistas sometidos a una misma producción de potencia pueden presentar respuestas autonómicas, metabólicas y ventilatorias diferentes, reflejando una importante variabilidad interindividual asociada con factores como el nivel de entrenamiento, el estado de fatiga, la capacidad funcional, las características morfofuncionales y la eficiencia fisiológica (Foster et al., 2001; Seiler, 2010). Esta situación adquiere una relevancia particular en el deporte adaptado, donde la diversidad funcional propia de los para-atletas puede modificar la relación entre la carga externa y la carga interna, haciendo necesaria una evaluación integral de la respuesta fisiológica.

En este sentido, la interpretación de la carga interna no debe fundamentarse en un único marcador fisiológico, sino en la integración de variables que reflejen diferentes dimensiones de la respuesta al ejercicio. Entre los indicadores más utilizados se encuentran la variabilidad de la frecuencia cardíaca, como expresión de la regulación del sistema nervioso autónomo; la respuesta ventilatoria, que permite identificar las transiciones fisiológicas asociadas con los diferentes dominios de intensidad del ejercicio; y la concentración de lactato sanguíneo, considerada un marcador del comportamiento del metabolismo energético durante el esfuerzo (Wasserman et al., 2012). El análisis conjunto de estas variables proporciona una visión más completa del estrés fisiológico inducido por el entrenamiento y permite comprender con mayor precisión las adaptaciones derivadas de diferentes estrategias de prescripción de la carga.

Bajo esta perspectiva, la presente investigación adopta un enfoque integrador de la respuesta fisiológica, considerando que la variabilidad de la frecuencia cardíaca, los umbrales ventilatorios y la concentración de lactato no representan fenómenos aislados, sino manifestaciones complementarias de la carga interna inducida por el ejercicio. Este enfoque constituye el fundamento para los apartados siguientes, en los cuales se desarrollarán los principales indicadores fisiológicos y bioquímicos empleados para analizar la respuesta aguda al entrenamiento prescrito mediante FTP y PC.

Consumo de oxígeno como determinante de la respuesta fisiológica al ejercicio

El consumo de oxígeno (VO_2) constituye uno de los principales indicadores de la respuesta fisiológica al ejercicio y representa la velocidad con la que el organismo capta, transporta y utiliza oxígeno para satisfacer las demandas energéticas del metabolismo aeróbico (Bassett y Howley, 2000; Ferretti, 2014). Desde la fisiología del ejercicio, el comportamiento del VO_2 refleja la capacidad funcional integrada de los sistemas respiratorio, cardiovascular y muscular para mantener la producción de adenosín trifosfato (ATP) mediante procesos oxidativos, razón por la cual se considera una de las variables fundamentales para comprender el rendimiento en deportes de resistencia.

El transporte y utilización del oxígeno dependen de una secuencia coordinada de procesos fisiológicos que incluyen la ventilación pulmonar, el intercambio gaseoso a nivel alveolar, el transporte de oxígeno por la circulación sanguínea y su utilización final en la mitocondria mediante la fosforilación oxidativa (Ferretti, 2014; Chicharro y Vaquero, 2006). La eficiencia con la que estos mecanismos interactúan determina la capacidad del

organismo para sostener esfuerzos prolongados y condiciona tanto la producción aeróbica de energía como la aparición de la fatiga durante el ejercicio.

Tradicionalmente, la capacidad aeróbica ha sido representada mediante el consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx), definido como la mayor cantidad de oxígeno que un individuo es capaz de captar, transportar y utilizar durante un ejercicio incremental realizado hasta el agotamiento (Bassett y Howley, 2000). El VO_2 máx constituye uno de los principales predictores del rendimiento en deportes de resistencia debido a que refleja la capacidad máxima del sistema cardiorrespiratorio para suministrar oxígeno a la musculatura activa. Sin embargo, investigaciones desarrolladas durante las últimas décadas han demostrado que el rendimiento no depende exclusivamente del valor máximo alcanzado, sino también de la capacidad para sostener elevados porcentajes del VO_2 máx durante esfuerzos prolongados y de la rapidez con la que el consumo de oxígeno responde ante cambios en la intensidad del ejercicio (Poole et al., 2016; Jones et al., 2019).

En este sentido, el interés científico ha evolucionado desde la evaluación exclusiva del VO_2 máx hacia el estudio del comportamiento dinámico del consumo de oxígeno durante el ejercicio. La cinética del VO_2 describe la velocidad con la que el consumo de oxígeno aumenta hasta satisfacer las demandas metabólicas impuestas por una determinada intensidad de ejercicio y constituye uno de los principales mecanismos fisiológicos responsables de la transición entre los diferentes dominios de intensidad (Poole y Jones, 2012). Cuando el ejercicio se realiza por debajo de la Potencia Crítica, el organismo alcanza un estado estable del consumo de oxígeno, permitiendo mantener el equilibrio

metabólico durante periodos prolongados. En contraste, cuando la intensidad supera este límite, aparece el componente lento del VO_2 , caracterizado por un incremento progresivo del consumo de oxígeno a pesar de que la carga externa permanezca constante, fenómeno asociado con un mayor reclutamiento de fibras musculares tipo II, un incremento del costo energético del ejercicio y una aceleración del proceso de fatiga (Burnley & Jones, 2018; Poole et al., 2016).

Esta respuesta convierte al consumo de oxígeno en una variable de especial interés para la fisiología del entrenamiento, ya que permite comprender cómo el organismo responde a diferentes intensidades de ejercicio y cómo se relacionan dichas respuestas con otros indicadores fisiológicos como la Potencia Crítica, los umbrales ventilatorios, la producción de lactato y la regulación autonómica. En consecuencia, el análisis integrado del comportamiento del VO_2 proporciona una base fisiológica para interpretar la carga interna inducida por el ejercicio y fundamenta la utilización de diferentes modelos de prescripción del entrenamiento basados en intensidad relativa.

Umbral Ventilatorio

El umbral ventilatorio constituye uno de los principales indicadores fisiológicos utilizados para evaluar la respuesta cardiorrespiratoria durante el ejercicio incremental. Se define como el punto en el que la ventilación pulmonar comienza a incrementarse de manera desproporcionado con respecto al consumo de oxígeno (VO_2), como consecuencia de los cambios metabólicos asociados al aumento progresivo de la intensidad del ejercicio (Wasserman et al., 2012). Los puntos que aquí se marcan al detectarse diferentes

actividades pulmonares permiten establecer dominios de intensidad en el ejercicio y comprender a su vez la interacción entre los sistemas cardiovascular, respiratorio y metabólico durante el esfuerzo.

Desde el punto de vista fisiológico, los umbrales ventilatorios representan la respuesta integrada del organismo frente al incremento de las demandas energéticas. Conforme aumenta la intensidad del ejercicio, la producción de dióxido de carbono y la acumulación de fatiga se generan cambios en los patrones ventilatorios, produciendo incrementos en la ventilación minuto a minuto que pueden identificarse mediante el análisis de variables respiratorias obtenida en una prueba de esfuerzo (Beaver, Wasserman, y Whipp, 1986; Wasserman et al., 2012).

La determinación de los umbrales ventilatorios es fundamental en el estudio fisiológico del ejercicio y claramente en el entrenamiento deportivo, permitiendo evaluar eventualmente la funcionalidad del deportista, a su vez poder establecer las diferentes zonas de entrenamiento e individualizar las cargas y la planificación del ejercicio. Los diferentes estudios dejan ver que los umbrales se relacionan con variables de rendimiento y con otros indicadores fisiológicos utilizados en deportes de resistencia, en donde el consumo de oxígeno es la principal variable de estudio seguido de la FTP y la PC. Por lo tanto estos indicadores representan fenómenos diferentes y deben interpretarse de forma complementaria al rendimiento deportivo (Meyer et al., 2005; Poole et al., 2016; Jones et al., 2019).

De acuerdo a los anteriores fundamentos , la fisiología del ejercicio reconoce dos puntos principales de transición ventilatorio durante el ejercicio incremental, denominados primer umbral ventilatorio (VT1) y segundo umbral ventilatorio (VT2), los cuales representan diferentes dominios de intensidad y establecen un referente fundamental para la evaluación y control de la parte funcional para la prescripción y planificación del entrenamiento.

El umbral ventilatorio 1 (VT1)

El umbral ventilatorio 1, también denominado primer umbral aeróbico, corresponde al punto durante el ejercicio fisiológica durante una prueba de ejercicio incremental en el cual la ventilación comienza a aumentar de manera desproporcionada respecto al consumo de oxígeno (VO_2). Este incremento ventilatorio ocurre principalmente debido al aumento en la producción de dióxido de carbono (CO_2) derivado del tamponamiento inicial de los iones hidrógeno producidos durante el metabolismo anaeróbico glucolítico. En esta intensidad, el organismo aún puede sostener el ejercicio durante largos periodos de tiempo, debido a que la producción y eliminación de lactato permanecen relativamente equilibradas. (Beaver et al., 1986; Wasserman et al., 2012). A pesar de estos cambios, en este nivel de intensidad el metabolismo aeróbico continúa siendo predominante y el organismo mantiene un equilibrio relativo frente a la fatiga presentada debido a una carga externa x.

Desde el punto de vista fisiológico, el VT1 marca la transición entre el dominio moderado y el dominio pesado del ejercicio. Por debajo de este umbral, el esfuerzo es predominantemente aeróbico, existe estabilidad del lactato sanguíneo y el organismo puede

mantener el ejercicio con relativa comodidad fisiológica. En cambio, al superar el VT1 comienza un incremento progresivo de la participación glucolítica y de la respuesta ventilatoria. Según Wasserman et al. (2012), el primer umbral ventilatorio representa uno de los mejores indicadores de la capacidad aeróbica funcional y posee gran utilidad para la prescripción de entrenamiento en deportes de resistencia.

En ciclismo, el VT1 suele asociarse con intensidades utilizadas en entrenamientos extensivos de resistencia aeróbica, recuperación activa y sesiones de larga duración. El trabajo cercano a este umbral favorece adaptaciones relacionadas con aumento de la densidad mitocondrial, mejora de la oxidación de grasas y mayor eficiencia cardiovascular. Además, numerosos estudios han mostrado que deportistas entrenados presentan un VT1 a porcentajes más elevados del VO_2max en comparación con sujetos sedentarios, reflejando una mejor capacidad de sostener esfuerzos prolongados con menor estrés metabólico.

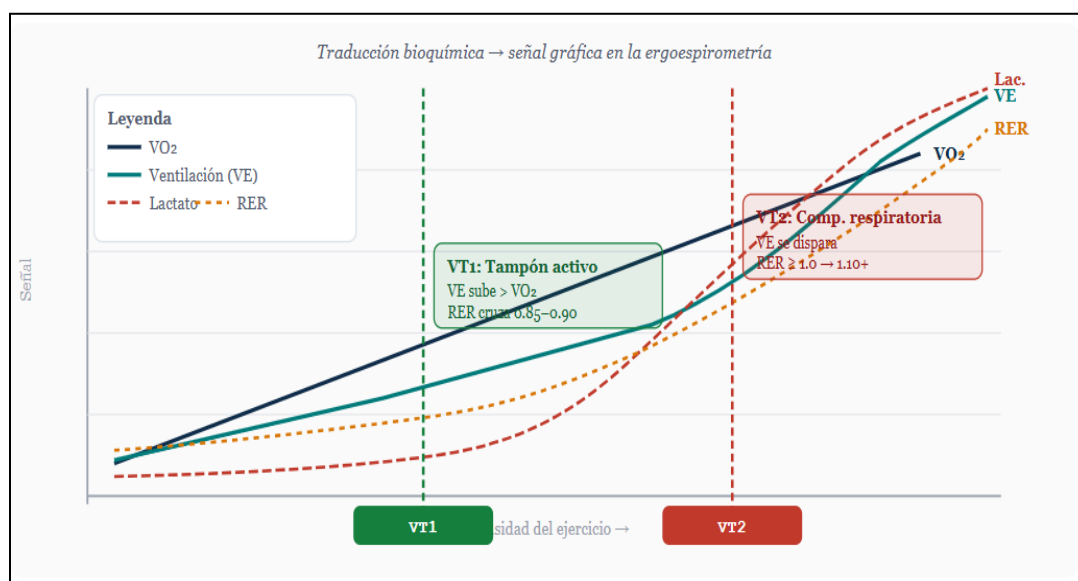
Es el punto durante el ejercicio en el cual la relación entre la ventilación (VE) y el consumo de oxígeno (VO_2) comienza a cambiar de manera más notable. Este punto está asociado con el inicio de la acumulación de lactato en la sangre, aunque en cantidades aún bajas, debido a que el cuerpo comienza a hacer una transición hacia un mayor uso de mecanismos anaeróbicos para producir energía, de forma aún no son predominante. Astrand, y Rodahl, (1992).

Las características del Umbral Ventilatorio 1, son: el cambio gradual en la relación VE/VO_2 , en donde a medida que la intensidad del ejercicio aumenta, la relación entre la ventilación (VE) y el consumo de oxígeno (VO_2) se mantiene en una proporción más o

menos constante. Sin embargo, en este umbral, se empieza a observar un cambio gradual en esta relación. La ventilación comienza a aumentar más rápidamente en comparación con el aumento del consumo de oxígeno. Astrand, y Rodahl, (1992).

Figura 1

Umbrales ventilatorios y transición de VT1 a VT2.



Nota: VT1 = primer umbral ventilatorio; VT2 = segundo umbral ventilatorio; VO_2 = consumo de oxígeno; VE = ventilación minuto; RER = cociente de intercambio respiratorio. **Elaboración propia.**

En el contexto del ciclismo y del paracycling, el VT1 constituye un referente fisiológico para la planificación y el establecer las cargas externas del entrenamiento de forma adecuada, permitiendo individualizar el ejercicio y favorecer las adaptaciones relacionadas con la resistencia y la eficiencia metabólica (Wasserman et al., 2012; Meyer et al., 2005).

Umbral Ventilatorio 2 (VT2)

Se entiende como el punto en el que se produce un aumento abrupto en la ventilación (VE) en relación con el consumo de oxígeno (VO_2), lo que indica una transición significativa hacia el metabolismo anaeróbico. Este punto está asociado con la acumulación de lactato en la sangre debido a que el cuerpo ha alcanzado una intensidad de ejercicio tal que la producción de lactato supera la capacidad del organismo para eliminarlo eficientemente. (Astrand, y Rodahl,1992).

Dentro de las características del umbral ventilatorio 2, están los cambios fuertes en la relación VE/ VO_2 , En el VT2, se produce un aumento significativo en la ventilación (VE) en comparación con el consumo de oxígeno (VO_2). Este cambio repentino refleja la transición hacia un mayor uso del metabolismo anaeróbico y la eliminación de CO_2 generada por el aumento en la producción de lactato. (Astrand, y Rodahl,1992).

Este Umbral también conocido como segundo umbral ventilatorio, umbral anaeróbico ventilatorio o punto de compensación respiratoria, corresponde al momento en el que la ventilación aumenta de forma abrupta y desproporcionada tanto respecto al VO_2 como al CO_2 . Este fenómeno ocurre debido a una acumulación acelerada de lactato e hidrogeniones en sangre, generando una acidosis metabólica que el organismo intenta compensar mediante un incremento excesivo de la ventilación pulmonar para eliminar CO_2 .

El VT2 representa la transición entre el dominio pesado y el dominio severo del ejercicio. A partir de este punto, la estabilidad fisiológica se pierde progresivamente y el

ejercicio solo puede mantenerse durante tiempos relativamente cortos debido a la fatiga metabólica. En términos fisiológicos, el VT2 se relaciona estrechamente con el máximo estado estable de lactato (MLSS), la Potencia Crítica y otras variables utilizadas para determinar la máxima intensidad sostenible en deportes de resistencia (Faude et al., 2009).

Durante intensidades superiores al VT2, se incrementa considerablemente la dependencia del metabolismo anaeróbico glucolítico, aumenta la acumulación de lactato sanguíneo y se acelera el agotamiento de las reservas energéticas. Por esta razón, el VT2 es considerado uno de los mejores indicadores del rendimiento en pruebas de resistencia y contrarreloj en ciclismo. Los ciclistas altamente entrenados suelen presentar VT2 a porcentajes elevados del VO2max, permitiéndoles sostener intensidades cercanas al máximo durante mayores periodos de tiempo.

La determinación de los umbrales ventilatorios se realiza comúnmente mediante pruebas de esfuerzo incremental con ergoespirometría, analizando variables como ventilación pulmonar (VE), consumo de oxígeno (VO₂), producción de dióxido de carbono (VCO₂) y equivalentes ventilatorios. Wasserman y colaboradores desarrollaron uno de los métodos más reconocidos para identificar estos puntos fisiológicos a partir del análisis de gases respiratorios. En la práctica deportiva contemporánea, la identificación de VT1 y VT2 permite establecer zonas de entrenamiento individualizadas con alta precisión fisiológica.

En el contexto del ciclismo y particularmente en investigaciones relacionadas con FTP y Potencia Crítica, los umbrales ventilatorios poseen gran relevancia debido a que

permiten comprender cómo diferentes intensidades de entrenamiento afectan la respuesta fisiológica del deportista. El análisis de VT1 y VT2 facilita interpretar la carga interna generada por las sesiones de entrenamiento y su relación con variables como lactato, variabilidad de la frecuencia cardíaca y tolerancia al ejercicio prolongado.

La relación entre los umbrales ventilatorios, la producción de lactato y la potencia crítica constituye un enfoque claro en la fisiología del rendimiento deportivo y particularmente en el entrenamiento de la resistencia, como se ha mencionado en apartados anteriores la relación de estos indicadores se entendía que representaban los fenómenos fisiológicos en el organismo de forma equivalente, a lo que en investigaciones más recientes los diferentes teóricos y autores acotan que cada indicador responde a mecanismos distintos. Dado que la potencia crítica representa el límite superior del control del esfuerzo en un ejercicio, mientras que el VT2 se da en un punto donde la ventilación aumenta conforme a la aceleración de la acumulación de metabolitos y el incremento a su vez de la demanda respiratoria según lo menciona (Jones et al., 2019).

Desde la perspectiva metabólica, el lactato es primordial en la relación anteriormente señalada. ya que durante intensidades inferiores al VT1 y a la potencia crítica, la producción y la eliminación del lactato se mantienen relativamente equilibradas. Por el contrario, cuando la intensidad supera estos umbrales fisiológicos, la acumulación de lactato aumenta a la par, como también se ve acompañado el proceso con el incremento del VO₂ y una pérdida del equilibrio homeostático o control del sistema parasimpático para una recuperación adecuada en un tiempo menor o adecuado según la exigencia. De este

modo muestra el porqué las variables como el MLSS, la PC y los umbrales ventilatorios son utilizadas para eliminar zonas de entrenamiento y analizar el esfuerzo.

En los deportes de resistencia especialmente en el ciclismo los umbrales ventilatorios son utilizados en mayor medida para la planificación, adecuación y control del rendimiento por su relación muy próxima con el rendimiento competitivo. La identificación del VT1 establece la relación con las intensidades asociadas al entrenamiento aeróbico extensivo y la eficiencia en el metabolismo, por el contrario el VT2 se relaciona con las intensidades próximas al máximo estado estable de un esfuerzo alto y la tolerancia al lactato. Todo esto marca un punto fundamental para poder optimizar las progresivas adaptaciones fisiológicas y evitar de esta forma la fatiga y/o el sobreentrenamiento. (Bassett y Howley, 2000).

Los diferentes estudios recientes demuestran que en los atletas entrenados se presentan mayores capacidades para desplazar los umbrales ventilatorios hacia intensidades más altas, permitiendo no solo la adaptación fisiológica sino el sostenimiento de mayores cargas de trabajo con una menor fatiga. Esto demuestra la mejora de la capacidad oxidativa muscular, el transporte de oxígeno y la eficiencia ventilatoria. (Bassett y Howley, 2000).

Ya en el deporte paralímpico, y específicamente en el paracycling, el estudio de los umbrales ventilatorios presenta una relevancia creciente debido a las diferencias funcionales y fisiológicas de esta población particularmente. Las diferentes diversidades y alteraciones musculares pueden modificar significativamente la respuesta ventilatoria y

metabólica existente en el ejercicio, lo que afecta la relación entre la potencia mecánica producida y el cambio fisiológico asociado (Goosey et al., 2016).

En diferentes investigaciones asociadas al paracycling se señala que los deportistas con discapacidad presentan patrones ventilatorios distintos a los observados en atletas convencionales, especialmente en ejercicios incrementales. Estas diferencias influyen en el comportamiento de los umbrales ventilatorios y en la precisión de modelos de entrenamiento basados en la FTP o la Potencia Crítica tal como lo menciona (Faupin et al., 2010; Stone et al., 2019).

Consecuencia de ello, al analizar los umbrales en deportistas de paracycling no sólo se observa el comportamiento de estos indicadores sino la mejora de las respuestas fisiológicas en aras de desarrollar estrategias de entrenamiento más individualizadas y adaptadas a las necesidades de cada atleta en la población con discapacidad y en el deporte paralímpico. (Goosey-Tolfrey et al., 2016, p. 842).

Bases fisiológicas del control autonómico cardíaco

El control de la frecuencia cardíaca (FC) está mediado por el sistema nervioso autónomo (SNA), el cual se divide en dos ramas: simpática y parasimpática. Ambas actúan de manera antagonista y complementaria para regular el ritmo cardíaco según las demandas del organismo (Billman, 2011). La rama simpática incrementa la frecuencia cardíaca mediante la liberación de catecolaminas (adrenalina y noradrenalina), mientras que la rama

parasimpática, a través del nervio vago, promueve la disminución de la frecuencia mediante la liberación de acetilcolina en el nodo sinusal (Ortigosa et al., 2018; Kiss et al., 2016).

Estas interacciones se traducen en variaciones de los intervalos entre latidos, generando el fenómeno conocido como variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC). Una VFC elevada en reposo suele asociarse a un predominio parasimpático y a un buen estado de salud cardiovascular, mientras que una VFC reducida puede reflejar fatiga, estrés, enfermedad o un desequilibrio autonómico con predominio simpático (Billman, 2013; Flatt et al., 2019).

Durante la inspiración y espiración se producen cambios rítmicos naturales en la frecuencia cardíaca, denominados arritmia sinusal respiratoria (ASR), que son mediadas principalmente por la rama parasimpática. Esta sincronía respiratoria con el latido cardíaco es uno de los mecanismos más evidentes del control autonómico dinámico (Billman, 2011; George et al., 2015).

La VFC no sólo refleja el estado momentáneo del equilibrio autonómico, sino que se considera un marcador global del estado funcional del sistema nervioso central y periférico. Por esta razón, su monitoreo es útil tanto en contextos clínicos como deportivos, permitiendo inferir el grado de adaptación del organismo ante distintos estímulos fisiológicos (Ortigosa et al., 2018; Billman, 2015).

Variabilidad de la frecuencia Cardíaca

La variabilidad de la frecuencia cardíaca conocida internacionalmente como Heart Rate Variability (HRV), corresponde a la fluctuación natural de los intervalos de tiempo entre latidos cardíacos consecutivos, denominados intervalos R-R. Esta variabilidad constituye una manifestación fisiológica de la interacción entre el corazón y el sistema nervioso autónomo (SNA), reflejando la capacidad del organismo para adaptar continuamente la función cardiovascular a las demandas internas y externas. Desde esta perspectiva, la HRV es considerada uno de los indicadores no invasivos más importantes para evaluar la regulación neuro cardíaca y el equilibrio autonómico (Billman, 2011).

La actividad del sistema nervioso autónomo se encuentra regulada principalmente por dos componentes funcionales: el sistema nervioso simpático y el sistema nervioso parasimpático. El primero incrementa o activa la frecuencia cardíaca durante situaciones de estrés o ejercicio ya sea leve o intenso, mientras que el segundo sistema, mediado principalmente por el nervio vago, disminuye o normaliza la actividad cardíaca y a su vez regula la recuperación y conservación de energía antes liberada. La interacción dinámica entre ambos sistemas produce variaciones fisiológicas observadas entre intervalos R-R razón por la cual la HRV representa un marcador indirecto del equilibrio simpático vagal (Billman, 2011).

Desde un enfoque fisiológico, un corazón sano no representa intervalos R-R constantes, sino pequeñas oscilaciones continuas que reflejan la capacidad del organismo para responder y adaptarse a estímulos metabólicos, respiratorios, hemodinámicos y

emocionales. Este tipo de actividad cardiovascular muestra el control autonómico. Del modo que los niveles de la HRV se asocian con una mayor capacidad de adaptación al estrés y un funcionamiento mas eficiente de los mecanismos homeostáticos del organismo, mientras que una reducción de la actividad parasimpática ha sido relacionada con la fatiga, estrés fisiológico, enfermedades cardiovasculares y mayor riesgo de mortalidad (Shaffer y Ginsberg, 2017).

La HVR puede analizarse mediante diferentes métodos numéricos desde los aspectos de dominio de tiempo, la frecuencia y los datos no lineales. En el ámbito del deporte, uno de los indicadores más utilizados es el RMSSD (*Root Mean Square of Successive Differences*), perteneciente al dominio del tiempo. Este aspecto refleja principalmente la actividad parasimpática y la modulación vagal del corazón, siendo independiente de la frecuencia cardíaca marcando una sensibilidad a los cambios del entrenamiento y la recuperación. Debido a estas características, el RMSSD es considerado uno de los aspectos más fiables para monitorizar el estado de recuperación y las adaptaciones al entrenamiento en deportistas. (Plews et al., 2013; Flatt et al., 2019).

Dentro del dominio de la frecuencia, el análisis de todos los parámetros permiten descomponer la señal del HRV en diferentes bandas que representan componentes fisiológicos específicos. Las bandas de alta frecuencia (HF) reflejan principalmente la actividad parasimpática relacionada con la respiración, mientras que las bandas de baja frecuencia /LF reciben influencia tanto simpática como parasimpática. Diversos autores han señalado que la interpretación debe observarse detenidamente debido a la complejidad

fisiológica de ambas bandas y la influencia de múltiples factores sobre su comportamiento. Cuando la relación LF/HF se interpreta conjuntamente con el indicador RMSSD, proporciona información concreta y acertada sobre las modificaciones autonómicas inducidas por el ejercicio y la recuperación. (Task Force, 1996; Billman, 2013; Shaffer y Ginsberg, 2017).

En las últimas dos décadas, la HRV se ha consolidado como una herramienta ampliamente utilizada para monitorizar la respuesta fisiológica al entrenamiento deportivo. Plews et al. (2013) demostraron que el seguimiento sistemático del RMSSD permite ajustar las cargas del entrenamiento de acuerdo con el estado del deportista a nivel fisiológico, ayudando a mayores adaptaciones aeróbicas y reduciendo así la fatiga acumulada. En la misma línea, Flatt et al. (2019) destacan que el control diario de la HRV constituye una estrategia para evaluar el equilibrio y la regulación de la carga y su recuperación post ejercicio, permitiendo optimizar la planificación del entrenamiento y disminuir el riesgo del sobreentrenamiento.

En deportes de resistencia, la respuesta de la HRV al ejercicio ha tenido gran cantidad de estudios e investigaciones. Stanley et al. (2013) observaron que las diferentes sesiones de entrenamiento de alta intensidad producen una disminución considerable del RMSSD inmediatamente después del esfuerzo, consecuencia de la retirada del tono vagal y del incremento de la actividad simpática. Posteriormente, en la recuperación, se presenta una activación inmediata y progresiva del sistema parasimpático, cuya velocidad depende de la intensidad del ejercicio, el nivel de entrenamiento y el estado fisiológico del

deportista. De manera similar, Michael et al. (2017), en una revisión sistemática sobre el HRV y el ejercicio físico, concluyeron que la variabilidad constituye un marcador de carga interna y una herramienta útil para evaluar la adaptación al entrenamiento en atletas de resistencia.

En ciclismo, la utilización de medidores de potencia ha permitido tener control precisión la carga externa del entrenamiento; sin embargo, diversos autores coinciden en que esta información debe complementarse con indicadores fisiológicos que permitan colocar la carga interna experimentada por el deportista (Bourdon et al., 2017). en este contexto, la HRV ha adquirido especial importancia porque proporciona información sobre la respuesta del sistema nervioso autónomo frente a diferentes estímulos en el entrenamiento, en aras individualizar las cargas y la optimización de los procesos de recuperación (Plews et al., 2013; Flatt et al., 2019).

Aunque la evidencia sobre el HRV en el ciclismo convencional es amplia, las investigaciones realizadas en deporte paralímpico continúan siendo limitadas. Goosey Tolfrey y Leicht (2013) señalan que los aspectos fisiológicos y funcionales propios de las diferentes discapacidades pueden modificar la regulación cardiovascular y autonómica durante el ejercicio, generando respuestas diferentes a las observadas en deportistas sin discapacidad. De manera similar, Paulson y Goosey Tolfrey (2017) destacan que las adaptaciones cardiovasculares y la respuesta del sistema nervioso autónomo pueden variar según la clasificación funcional, el tipo de discapacidad y la modalidad deportiva, recomendando el desarrollo de investigaciones específicas en la población paralímpica.

Paracycling

El Paracycling es deporte que permite la participación de ciclistas con alguna discapacidad (Física, motriz, intelectual, auditiva o visual) que le impida realizar el uso de bicicletas convencionales adaptadas a su discapacidad, su reglamentación está consignada en la desde el 2007 cuando la Unión Ciclista Internacional (UCi) asumió oficialmente la regulación de la disciplina estableciendo criterios de clasificación funcional, reglamentación técnica y organización de las competencias internacionales, así consolidando su desarrollo dentro del movimiento paralímpico (Union Cycliste Internationale UCI, 2023).

Desde esta perspectiva las principales características del paracycling es la utilización de una clasificación funcional, donde el objetivo del sistema es agrupar los paratletas según el impacto que presenta su discapacidad sobre el rendimiento deportivo y no únicamente por el diagnóstico clínico. Con esto la UCI reconoce diferentes categorías competitivas que incluyen paratletas con amputaciones, lesiones medulares, parálisis cerebral, alteraciones neurológicas, discapacidad visual y otras deficiencias físicas elegibles, quienes compiten utilizando bicicletas convencionales, triciclos, tandems o handcycles, dependiendo de sus características funcionales (UCI, 2023; Tweedy Y Vanlandewijck, 2011).

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la ruta metodológica que se empleó para llevar a cabo la investigación, detallando el diseño y el enfoque de la investigación, los diferentes momentos de la implementación, la recolección de datos y las técnicas de análisis utilizadas para poder dar cumplimiento con los objetivos del estudio.

El presente estudio se desarrolló bajo un diseño cuasi experimental de medidas repetidas intrasujeto, con enfoque cuantitativo, alcance exploratorio y serie de casos. Cada deportista participó en las dos condiciones experimentales: una sesión de entrenamiento prescrita con base en el FTP y otra determinada a partir de la PC. El orden de aplicación de las sesiones fue [aleatorizado/contrabalanceado], con un período de recuperación entre ellas para minimizar posibles efectos residuales. Este diseño permitió comparar, dentro de cada participante, las respuestas fisiológicas agudas generadas por ambas condiciones de entrenamiento.

Población

La población de estudio estuvo conformada por cuatro (4) para-atletas de la modalidad de paracycling, pertenecientes a las selecciones de Bogotá y Cundinamarca, con edades comprendidas entre 23 y 40 años. Todos los participantes fueron de sexo masculino, contaban con clasificación funcional oficial vigente y se encontraban vinculados a procesos sistemáticos de entrenamiento orientados al alto rendimiento deportivo.

La selección de los participantes se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando la disponibilidad de deportistas que cumplieran con las características requeridas para el desarrollo del protocolo experimental. Con el fin de garantizar la homogeneidad de la muestra y reducir la influencia de variables que pudieran modificar la respuesta fisiológica al ejercicio, se establecieron criterios específicos de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión

Con el propósito de asegurar que los participantes presentarán condiciones deportivas, fisiológicas y funcionales acordes con los objetivos de la investigación, se establecieron los siguientes criterios de inclusión:

- Ser deportista activo de la modalidad de paracycling.
- Tener una clasificación funcional oficial vigente emitida por la federación deportiva correspondiente.
- Encontrarse en un proceso sistemático de entrenamiento con una carga mínima de 10 horas semanales.
- No presentar lesiones osteomusculares que limitaran la ejecución de las pruebas experimentales.

- No haber presentado lesiones incapacitantes durante los seis (6) meses previos al inicio de la investigación.
- Haber obtenido medallas en eventos nacionales o internacionales, garantizando un nivel competitivo homogéneo.

Criterios de exclusión

Con el fin de controlar posibles factores de confusión que pudieran afectar la respuesta fisiológica al ejercicio o comprometer la seguridad de los participantes, se establecieron los siguientes criterios de exclusión:

- No contar con afiliación vigente al Sistema General de Seguridad Social en Salud.
- Presentar sanciones vigentes por incumplimiento de la normativa antidopaje establecida por la World Anti-Doping Agency (WADA).
- No encontrarse bajo la dirección de un entrenador o no contar con un plan de entrenamiento estructurado y vigente.
- Estar bajo tratamiento farmacológico con medicamentos que pudieran modificar la respuesta cardiovascular, autonómica o metabólica durante el desarrollo de la investigación.

Aspectos éticos de la investigación.

El presente estudio se sustenta en el marco normativo y ético vigente dadas las resoluciones, declaraciones, pautas y tratados generales pertinentes donde se establecen las características de la investigación, las cuales van en concordancia con las recomendaciones dadas por el comité de ética de la Universidad Pedagógica Nacional.

Para el desarrollo de la investigación se tomaron los principios éticos para la investigación en seres humanos establecidos en la **Declaración del Helsinki** de la **Asociación Médica Mundial: (AMM)**, para la protección de los derechos y de la dignidad en los participantes de la investigación. Así mismo para el territorio colombiano, se establecen las directrices establecidas por la **Resolución 8430 de 1993** del Ministerio de Salud y Protección Social, la cual regula la ética de las investigaciones científicas en salud, así como la **Ley 1751 de 2015**, que garantiza el derecho a la salud y la ética en los estudios relacionados con la salud pública.

La investigación prioriza el respeto a la dignidad y bienestar de cada para-atleta participante, cuya protección se garantiza mediante la supervisión continua de su estado físico y emocional. En cada intervención, el investigador a cargo aplicará un protocolo que respete la integridad de los participantes y la ética de trato, garantizando la seguridad en cada sesión. De igual forma cada participante será ampliamente informado sobre el contenido, los objetivos y las aclaraciones a las que allá lugar de cada intervención que se vaya a realizar, asegurando de esta forma que no sean vulnerados sus derechos fundamentales.

En cuanto a la protección de la salud, el bienestar y los derechos de los participantes según la **AMM (2013)**: de modo que en esta investigación los profesionales dedicaremos todo el conocimiento basado en antecedentes científicos, siguiendo un proceso riguroso, planificado y continuo para establecer seguridad y eficacia en la investigación sin colocar en riesgo la integridad del ser humano. Así mismo, el respeto y sus derechos de cada uno de los participantes.

La participación de cada para-atleta, requiere un consentimiento informado escrito de los participantes, padres o tutores legales, (Anexo 1). Este consentimiento incluirá los objetivos y métodos del estudio, los riesgos, beneficios y el derecho de los ciclistas a retirarse cuando deseen sin consecuencias. Además, se realizará una reunión informativa con los participantes y sus tutores legales para responder a todas las inquietudes de manera clara.

En concordancia con la Resolución 8430 de 1993 del ministerio de salud de Colombia, el estudio requiere que los riesgos sean explícitos para el participante, dadas las circunstancias y exigencias que se requieren con las pruebas para valorar los esfuerzos máximos en las pruebas para la medición y valoración de las diferentes variables fisiológicas y bioquímicas propuestas y mencionadas más adelante. De acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión aseguran que solo paratletas en buena condición de salud y experiencia mínima en el deporte participen en el estudio, y se implementarán criterios de monitoreo constantes que permitan finalizar la participación de cualquier para-atleta si surge un riesgo imprevisto para su salud.

Este riesgo está clasificado en riesgo tipo uno lo cual es bajo ya que, al buscar recolectar información de variables fisiológicas, bioquímicas y su relación con variables biomecánicas no representa ni pone en riesgo la salud ni el bienestar de los deportistas, los cuales no son factores de riesgo durante la intervención del estudio.

La confidencialidad y protección de la identidad de los paratletas son aspectos fundamentales tenidos en cuenta desde la formulación de la propuesta investigativa. Todos los datos recolectados serán tratados de forma anónima, utilizando identificadores y garantizando que solo el equipo de investigadores tenga acceso a la información. La privacidad de los datos personales y de rendimiento se mantendrá durante todo el proceso de la investigación y se documentará de forma segura y para ello se tendrá un protocolo.

Los paratletas serán seleccionados y tratados de manera justa, respetando su igualdad en derechos y dignidad, sin discriminación. La inclusión de menores está justificada y asentada con los formatos requeridos y debidamente diligenciados por los padres y/o tutores legales como a su vez teniendo en cuenta los diferentes criterios de inclusión y exclusión dando cuenta que son paratletas entrenados dado que se realizará una prueba de alta intensidad. Para ello se contactará a los deportistas mediante entrenadores de ligas de ciclismo, y estos serán libres de participar siempre y cuando cumplan con los criterios de inclusión.

Además del beneficio directo para cada paratleta del autoconocimiento de su desempeño fisiológico, metabólico y biomecánico el estudio aporta conocimientos significativos al ámbito deportivo para la eficacia del rendimiento deportivo. Esto

contribuye tanto al bienestar deportivo de los paratletas, como al avance científico en el campo de la fisiología y biomecánica del entrenamiento, generando una base de conocimiento aplicable en otros estudios.

Análisis de riesgos

El esfuerzo al que serán sometidos los ciclistas es similar al que realizan durante el entrenamiento. De forma excepcional se pueden presentar síntomas (cansancio muscular, mareo, dolor de pecho –angina-, dolor en las piernas) o signos (hipertensión arterial) que se aliviarán o desaparecerán al terminar cada una de las pruebas. En ciertos casos debido a situaciones clínicas y circunstancias particulares de los participantes como enfermedad coronaria importante (excepcionales en deportistas sanos), pudieran presentarse trastornos del ritmo cardíaco graves, síncope y muy ocasionalmente infarto de miocardio o insuficiencia cardíaca; el riesgo de muerte es excepcional (1 por 10.000). Durante la exploración se controlan la presión arterial, la frecuencia cardíaca y el electrocardiograma (la actividad del corazón), para analizar sus variaciones. La prueba se detendrá si aparecieran síntomas o signos alarmantes. O el deportista puede suspender la prueba voluntariamente en el momento que lo desee, por sentir fatiga u otras molestias que no fuesen obvias para los evaluadores.

Confidencialidad y almacenamiento de la información

La confidencialidad de la información de los participantes será privada y respetada, el estudio explicará de forma detallada los beneficios y los riesgos que conlleva la

participación, así mismo, se socializarán los resultados obtenidos de manera personal al deportista si así lo desea, sin comprometer su identidad.

Toda la información obtenida y los resultados de la investigación serán tratados confidencialmente; en virtud de ello, esta información será archivada en papel y/o medio electrónico. Los archivos del estudio estarán bajo la custodia del grupo de investigación conformado por Julie Acevedo Ramirez, Alejandro Valbuena y Jairo Alejandro Fernández Ortega, adscritos al programa académico Maestría en ciencias del deporte y la actividad física, de la Facultad de Educación Física de la Universidad Pedagógica Nacional.

Puesto que toda la información en este proyecto de investigación es llevada bajo condición de anonimato, los resultados personales no estarán disponibles para terceras personas como empleadores, organizaciones gubernamentales, compañías de seguros, medios de comunicación etc.

Protección de la identidad

Toda información o datos que pueda identificar al participante serán manejados confidencialmente, se tomarán las siguientes medidas de seguridad:

- Eliminar toda información identificativa de los participantes (anonimato).
- Utilización de códigos numéricos o alfanuméricos para la identificación del participante (códigos de identificación).

- El almacenamiento de los datos se realizará en lugares seguros y con acceso solo para los investigadores del estudio.

Consentimiento y asentimiento informado

Para participar en el presente estudio todos los participantes firmaron el consentimiento informado sugerido por la Universidad Pedagógica Nacional. Todos los participantes tendrán este documento en físico y deberán diligenciar de manera previa al inicio del estudio, el formato de consentimiento informado.

Conflicto de intereses

El grupo de investigación manifiesta no tener ningún interés particular más allá de generar un aporte académico e investigativo que contribuya a la mejora del paracycling y sus participantes.

Instrumentos

Para la evaluación de las variables fisiológicas, metabólicas y de rendimiento se emplearon equipos e instrumentos previamente validados y ampliamente utilizados en investigaciones de fisiología del ejercicio y ciencias del deporte. Todos los dispositivos fueron calibrados siguiendo las recomendaciones de los respectivos fabricantes antes del inicio de cada sesión experimental, con el propósito de garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones obtenidas.

Cicloergómetro

La potencia mecánica fue registrada mediante un cicloergómetro Wattbike AtomX (Wattbike Ltd., Nottingham, Reino Unido), el cual permitió controlar de manera precisa la carga externa durante las evaluaciones fisiológicas y las sesiones experimentales. Este equipo registra continuamente variables como potencia (W), cadencia (rpm) y velocidad, facilitando la estandarización de los protocolos de evaluación.

Ergoespirómetro

El consumo de oxígeno, la producción de dióxido de carbono, el cociente respiratorio (RER) y los umbrales ventilatorios fueron determinados mediante un sistema de análisis de gases de circuito abierto MetaLyzer 3B-R3 (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Alemania). Antes de cada prueba se realizó la calibración de los analizadores de oxígeno y dióxido de carbono, así como del neumotacógrafo, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Monitor de la frecuencia cardíaca

La frecuencia cardíaca y la variabilidad de la frecuencia cardíaca fueron registradas mediante una banda torácica Polar H10 (Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia), reconocida por su elevada precisión en la captura de intervalos RR. Los registros fueron adquiridos mediante el software Acentas (Hörgertshausen, Alemania) y posteriormente procesados

utilizando el software Kubios HRV Premium (Kubios Oy, Kuopio, Finlandia), ampliamente validado para el análisis de la modulación autonómica.

Desarrollo metodológico

El desarrollo de la presente investigación se estructuró en dos fases secuenciales y complementarias, diseñadas para caracterizar fisiológicamente a los participantes y posteriormente evaluar las respuestas fisiológicas agudas derivadas de dos modelos de prescripción de la intensidad del ejercicio. La primera fase correspondió a la evaluación fisiológica inicial, en la cual se determinaron las variables necesarias para individualizar la carga de entrenamiento de cada deportista. La segunda fase correspondió a la fase experimental, en la que se compararon las respuestas fisiológicas inducidas por sesiones de entrenamiento prescritas a partir del Umbral de Potencia Funcional (Functional Threshold Power, FTP) y de la Potencia Crítica (PC), mediante un diseño intra-sujeto.

Esta organización metodológica permitió que cada participante actuará como su propio control experimental, reduciendo la variabilidad interindividual y favoreciendo una comparación más precisa de las respuestas fisiológicas generadas por ambos modelos de prescripción del entrenamiento. Asimismo, todas las evaluaciones se realizaron bajo condiciones estandarizadas de laboratorio, utilizando los mismos equipos, protocolos e investigadores durante todo el proceso experimental.

Fase I. Evaluación fisiológica inicial

La fase de evaluación fisiológica inicial tuvo como propósito caracterizar el perfil fisiológico de cada para-atleta y obtener las variables necesarias para la individualización de la intensidad del entrenamiento. Durante esta fase se determinaron el consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_{2\text{máx}}$), los umbrales ventilatorios (VT1 y VT2), el coeficiente respiratorio (RER), el Umbral de Potencia Funcional (FTP) y la Potencia Crítica (PC), empleando protocolos previamente validados en la literatura científica para la evaluación del rendimiento en ciclismo.

Las evaluaciones se realizaron en días diferentes con el fin de evitar la influencia de la fatiga acumulada sobre el desempeño de los participantes y garantizar la obtención de valores representativos de cada variable fisiológica. Todos los deportistas recibieron las mismas indicaciones previas respecto al descanso, alimentación, hidratación y abstención de ejercicio intenso antes de cada prueba, con el propósito de controlar factores que pudieran modificar la respuesta fisiológica durante las evaluaciones.

La información obtenida en esta fase permitió establecer los valores individuales de FTP y Potencia Crítica que posteriormente fueron utilizados para prescribir la intensidad del ejercicio durante la fase experimental, garantizando que ambas sesiones de entrenamiento fueran ajustadas a las características fisiológicas propias de cada participante.

Fase II. Fase experimental

La fase experimental consistió en la aplicación de dos sesiones de entrenamiento realizadas en días diferentes bajo un diseño experimental intra-sujeto de tipo cruzado (*cross-over*), en el cual cada participante realizó ambos protocolos de ejercicio. La única variable modificada entre las sesiones fue el criterio utilizado para prescribir la intensidad del entrenamiento.

En una de las sesiones, la intensidad del ejercicio fue determinada a partir del valor individual del Umbral de Potencia Funcional (FTP), mientras que en la otra se utilizó el valor correspondiente a la Potencia Crítica (PC), previamente establecido durante la fase de evaluación fisiológica. La secuencia de aplicación de las sesiones se realizó manteniendo un período de recuperación suficiente entre ellas para minimizar posibles efectos residuales derivados del ejercicio previo.

Durante ambas sesiones se mantuvieron constantes las condiciones experimentales relacionadas con el equipo utilizado, la duración del calentamiento, el protocolo de ejercicio, las condiciones ambientales y el procedimiento de recolección de datos, con el propósito de garantizar que las diferencias observadas en las variables fisiológicas fueran atribuibles exclusivamente al modelo de prescripción de la intensidad empleado.

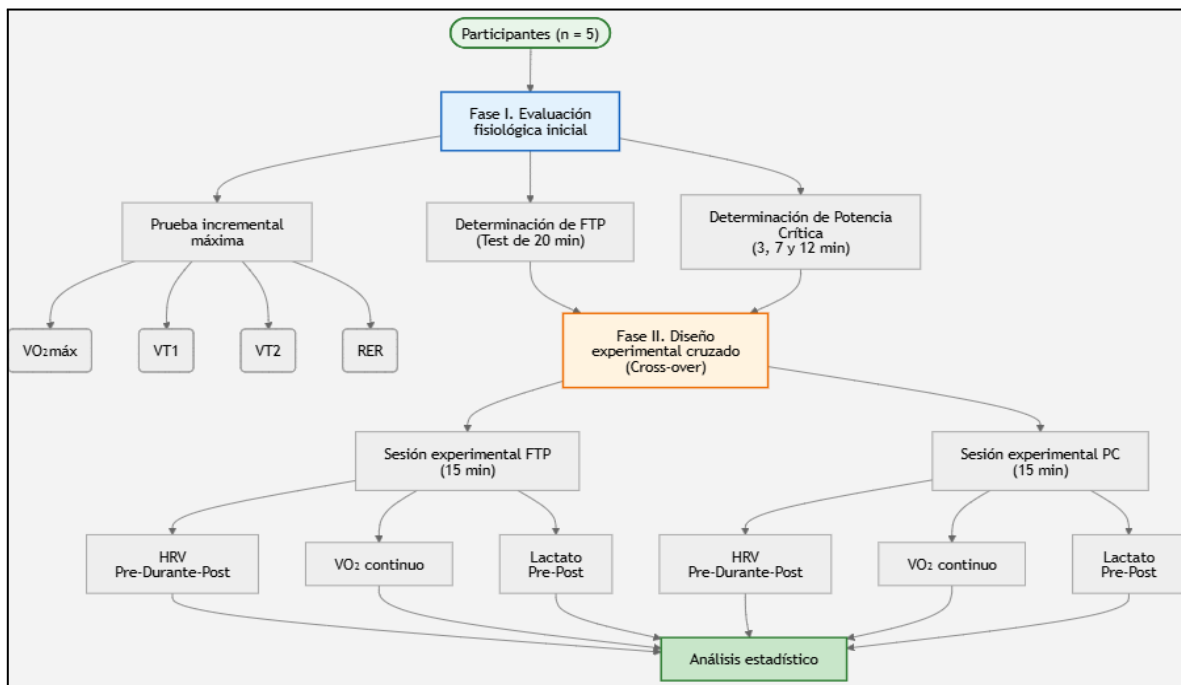
En cada sesión se registraron de manera sistemática las variables fisiológicas objeto de estudio. La concentración de lactato sanguíneo fue determinada antes y después del ejercicio para evaluar la respuesta metabólica aguda; la frecuencia cardíaca fue

monitorizada continuamente durante toda la sesión; la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) fue analizada en reposo, durante el ejercicio y en el período de recuperación; y el consumo de oxígeno fue registrado durante el esfuerzo mediante ergoespirometría de circuito abierto, permitiendo caracterizar la demanda metabólica asociada a cada modelo de entrenamiento.

La comparación de las respuestas fisiológicas obtenidas durante ambas sesiones permitió analizar el comportamiento agudo de variables autonómicas, ventilatorias y metabólicas frente a dos estrategias ampliamente utilizadas para la prescripción del entrenamiento en ciclismo, aportando evidencia sobre su aplicabilidad en para-atletas de paracycling.

Figura 2

Fases y procedimientos de la investigación.



Nota: FTP = *Functional Threshold Power*; PC = potencia crítica; VFC = variabilidad de la frecuencia cardíaca; VO_2 = consumo de oxígeno; VT1 = primer umbral ventilatorio; VT2 = segundo umbral ventilatorio; RER = cociente de intercambio respiratorio.

Protocolos de evaluación fisiológica y experimental

Los protocolos empleados en la presente investigación fueron seleccionados con base en la evidencia científica disponible para la evaluación del rendimiento en ciclismo y fisiología del ejercicio. Todos los procedimientos fueron ejecutados bajo condiciones estandarizadas, utilizando los mismos equipos, condiciones ambientales y personal

investigador durante las diferentes sesiones de evaluación, con el propósito de garantizar la reproducibilidad de las mediciones y reducir la variabilidad experimental. Cada protocolo permitió obtener las variables fisiológicas necesarias para caracterizar el estado funcional de los participantes y analizar las respuestas agudas inducidas por las sesiones de entrenamiento prescritas mediante Functional Threshold Power (FTP) y Potencia Crítica (PC).

Evaluación del consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_{2\text{máx}}$), umbrales ventilatorios (VT1 y VT2) y cociente respiratorio (RER)

Se realiza una prueba incremental de consumo a través de cicloergómetro, el monitoreo de la frecuencia cardíaca se va a tomar con las bandas de monitoreo de frecuencia cardíaca polar H10, para la monitorización electrocardiográfica continua durante la prueba incremental, se utilizó una configuración de 12 derivaciones basada en la modificación de Mason-Likar. Previo a la colocación, se preparó la piel del deportista (rasurada y una limpieza con alcohol). Los electrodos se ubicaron anatómicamente de la siguiente manera:

Electrodos periféricos (reubicados en el torso):

- Brazo Derecho (RA - *Right Arm*): Fosa infraclavicular derecha (justo debajo de la clavícula derecha, en la línea medioclavicular).
- Brazo Izquierdo (LA - *Left Arm*): Fosa infraclavicular izquierda (justo debajo de la clavícula izquierda, en la línea medioclavicular).

- Pierna Izquierda (LL - *Left Leg*): Cuadrante inferior izquierdo del abdomen, por encima de la cresta ilíaca anterior o en la línea axilar anterior a nivel del reborde costal inferior.
- Pierna Derecha (RL - *Right Leg*): Cuadrante inferior derecho del abdomen (sirve como polo a tierra o referencia).

Electrodos precordiales (pecho):

- V1: Cuarto espacio intercostal, en el borde paraesternal derecho.
- V2: Cuarto espacio intercostal, en el borde paraesternal izquierdo.
- V3: A medio camino en la línea recta que une V2 y V4.
- V4: Quinto espacio intercostal, en la línea medioclavicular izquierda.
- V5: Línea axilar anterior izquierda, al mismo nivel horizontal que V4.
- V6: Línea axilar media izquierda, al mismo nivel horizontal que V4 y V5.

Esto no presenta ninguna molestia ni riesgo para con los participantes, a su vez se verificara la calibración del ergo espirómetro y potenciómetro.

El protocolo aplicado corresponde a una prueba incremental tipo rampa en cicloergómetro, ampliamente validada en la literatura científica para la evaluación de la capacidad aeróbica máxima. Este tipo de test se caracteriza por incrementos continuos de la carga de trabajo hasta el agotamiento voluntario, permitiendo una relación lineal entre la intensidad del ejercicio y las respuestas fisiológicas, especialmente el consumo de oxígeno (Midgley et al., 2007). En este caso, el incremento de 25 W/min se encuentra dentro de los

rangos recomendados (15–30 W/min) para alcanzar el VO_2max en un tiempo óptimo sin generar fatiga prematura (Buchfuhrer et al., 1983).

Asimismo, el control de la cadencia y los criterios de finalización del test se ajustan a las recomendaciones del American College of Sports Medicine (ACSM), garantizando la validez y seguridad de la evaluación, en este caso finaliza la prueba cuando la cadencia caída de 60 rpm o el deportista no podía continuar con la prueba. La inclusión de un calentamiento previo y una fase de recuperación activa con monitoreo fisiológico refuerza la estandarización del protocolo y su aplicabilidad en contextos de evaluación del rendimiento deportivo y clínico.

Determinación del Umbral de Potencia Funcional (FTP)

La evaluación del FTP se realizó con el protocolo propuesto por Allen y Coggan, (2010) el cual se realizó en tres fases divididas en el calentamiento, la realización de la prueba y la vuelta a la calma; a continuación, se detalla cada una de estas fases.

Calentamiento General (10 minutos) Se debe ejecutar un pedaleo continuo en una zona aeróbica suave, correspondiente al 50-60% de la frecuencia cardíaca máxima de la potencia máxima aeróbica estimada. Lo que se busca promover es la vasodilatación periférica, incrementar la temperatura muscular y optimizar la lubricación sinovial. En el contexto del paracycling, esto es vital para preparar la musculatura del tren superior, la cual posee una menor masa muscular y un flujo sanguíneo diferente al del tren inferior, siendo más susceptible a la fatiga prematura si no se oxigena adecuadamente.

Activación Neuromuscular (3×1 minuto con 1 minuto de recuperación suave)
Ejecución de tres intervalos de 1 minuto, intercalados con 1 minuto de pedaleo suave.
Recuperación Intermedia (5 minutos) Pedaleo suave y continuo. 10 minutos pedaleo suave.

El atleta debe realizar el máximo esfuerzo constante posible durante un período ininterrumpido de 20 minutos.

Se exige mantener una potencia estable. El inicio no debe ser explosivo; un pico de potencia en los primeros minutos inducirá una acidosis metabólica prematura (caída abrupta del pH intramuscular) que obligaría al atleta a disminuir la intensidad, invalidando la naturaleza de estado estable de la prueba. No se permiten pausas ni cambios bruscos de la cadencia o la resistencia. La métrica principal para registrar será la Potencia Media expresada en vatios (W) durante el bloque exacto de 20 minutos.

Adaptaciones Biomecánicas para Paracycling: El pedaleo debe ser estrictamente en posición sentada. La compensación con el tronco debe minimizarse para aislar la potencia generada por las extremidades propulsoras.

Recuperación Activa (10 minutos) Pedaleo muy suave a una intensidad del 40-50% del FTP estimado resultante. En este último momento de la prueba se estimula el retorno venoso, previniendo el síncope post-ejercicio debido a la acumulación de sangre en las extremidades.

Tabla 1

Protocolo para la determinación del Functional Threshold Power (FTP).

Fase	Duración	Intensidad / Cadencia	Objetivo Fisiológico y Biomecánico
Calentamiento General	10 min	50–60% o Potencia aeróbica	Vasodilatación, incremento de temperatura muscular, lubricación articular específica al tipo de bicicleta.
Activación Neuromuscular	6 min (3x1' + 1' rec)	Ritmo de carrera / Rec. suave	Aceleración de la cinética del, reclutamiento de fibras Tipo IIa, estabilización de asimetrías.
Recuperación Intermedia	5 min	Suave	Resíntesis de, retorno a homeostasis basal.
Depleción Anaeróbica	5 min	Esfuerzo fuerte (Ritmo TT)	Vaciado de la capacidad de trabajo anaeróbico para evitar sobreestimación del estado estable aeróbico.
Pre-Test	10 min	Suave	Preparación metabólica final.
Test FTP (Esfuerzo Principal)	20 min	Máxima intensidad sostenible (Constante)	Medición de Potencia Media. Evaluación del umbral metabólico sin picos explosivos. Cadencia estable ajustada a la clase deportiva.
Vuelta a la Calma	10-15 min	40–50% del FTP estimado	Retorno venoso, aclaramiento de metabolitos, restitución del tono vagal para evaluación de HRV.

Nota: FTP = *Functional Threshold Power*; TT = contrarreloj (*time trial*); VFC = variabilidad de la frecuencia cardíaca; VO₂ = consumo de oxígeno.

Determinación de la Potencia Crítica (PC)

La potencia crítica se evaluó con el modelo propuesto por Mondo y Scherrer (1965) adaptado a diferentes duraciones en relación de potencia- tiempo (Jones y Vanhalato, 2017) en el cual se determinó mediante esfuerzos máximos con duraciones de 12, 7 y 3 minutos, con un descanso de 24 horas entre esfuerzos. El protocolo comenzaba con una fase de calentamiento de 5 minutos a 100 W, seguida inmediatamente donde la resistencia en el

simulador aumenta al 90% de potencia media alcanzada por los participantes en la prueba incremental, los participantes podían auto-dosificarse mediante un cambio de marchas cambiando de relación. Se proporcionó retroalimentación sobre el tiempo transcurrido y un fuerte ánimo durante todo el tiempo. La frecuencia cardíaca (FC) se midió de forma continua con la banda cardíaca garmin, la potencia fue medida por los pedales de potencia faveo y se midió la cadencia del pedaleo con el cadenciometro ASC , se registró inmediatamente al final de los ensayos con la plataforma Wahoo y garmin.

La PC fue determinada mediante el modelo lineal trabajo–tiempo de dos parámetros, a partir de los valores de potencia media obtenidos en pruebas máximas de 3, 7 y 12 minutos. Para ello, se calculó el trabajo total como el producto entre la potencia media y el tiempo de cada esfuerzo, expresado en Joules. Posteriormente, se aplicó una regresión lineal entre el trabajo total (variable dependiente) y el tiempo (variable independiente), utilizando la función de pendiente en hoja de cálculo, donde la pendiente de la recta representa la Potencia Crítica y el intercepto corresponde a la capacidad de trabajo anaeróbico (W'). Este modelo ha sido ampliamente descrito y validado en la literatura científica como una herramienta robusta para estimar la capacidad aeróbica máxima sostenible, siendo propuesto inicialmente por Monod y Scherrer (1965) y posteriormente desarrollado y aplicado en el ámbito del rendimiento deportivo por autores como Morton (1996) y Jones y Vanhatalo (2017) , quienes destacan su validez para describir la relación entre el tiempo hasta el agotamiento y la producción de potencia en ejercicios de alta intensidad.

Desarrollo de las sesiones experimentales

El protocolo de entrenamiento consistió en una sesión, Cada sesión incluyó un calentamiento estandarizado de 20 minutos distribuidos de la siguiente manera 8 minutos al 50% de la potencia media lograda en la prueba del CPTE , luego 8 minutos al 60% de la W del vo2 max luego 3x 10 segundo a máxima potencia con recuperación de 1 minuto entre serie, seguido de una recuperación final de 3 minutos.

La prueba se ejecutó de forma continua utilizando los valores de FTP o Potencia Crítica (PC), según corresponda a la sesión. En una jornada se empleó el FTP y en la otra la PC de cada deportista; dicho valor le fue notificado al inicio del test. La prueba finalizo cuando el atleta no logró sostener la potencia indicada y su rendimiento se situó 10 vatios por debajo del objetivo de manera continua durante más de 10 segundos.

El protocolo de calentamiento y la duración del ejercicio principal fueron diseñados con base en evidencia científica que respalda tanto la preparación fisiológica previa como la validez de intensidades cercanas al máximo estado estable.

Desde el enfoque del modelo de Potencia Crítica, el ejercicio realizado a intensidades cercanas o iguales a la PC delimita el umbral entre el estado estable y el agotamiento, constituyéndose como un marco teórico sólido para el análisis del rendimiento en ejercicios de alta intensidad (Jones y Vanhatalo, 2017). En este sentido, la estandarización del protocolo y el control de la intensidad permiten una comparación válida

de variables fisiológicas como el consumo de oxígeno y la respuesta cardiovascular entre los modelos basados en FTP y Potencia Crítica.

Evaluación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV)

El comportamiento de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) fue evaluado mediante una banda de frecuencia cardíaca Polar H10 (Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia), registrando los datos a través del software Acentas (Hörgertshausen, Alemania) y analizados posteriormente con el programa Kubios HRV (Kubios, V.2.2, Biosignal Analysis and Medical Imaging Group, Kuopio, Finlandia). Este procedimiento permite una evaluación precisa de la modulación autonómica del sistema cardiovascular en respuesta al ejercicio.

El seguimiento de la HRV se realizó en ambas sesiones de entrenamiento (basadas en FTP y Potencia Crítica), bajo condiciones controladas. En cada sesión, se hizo medición en diferentes tres momentos diferentes: en reposo en posición decúbito supino durante 10 minutos, seguida de una medición en bipedestación durante 7 minutos, con el fin de evaluar la respuesta autonómica basal. Durante el desarrollo del ejercicio se realizó un registro continuo de la señal cardíaca, permitiendo el análisis de la variabilidad durante el esfuerzo. Al finalizar la sesión, nuevamente la posición decúbito supino, donde se realizó un seguimiento durante 60 minutos para evaluar la recuperación autonómica, seguido de una última medición en posición de pie durante 7 minutos. Para registrar los datos de la HRV se realizó por medio de una planilla de registro (Anexo 3).

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, organizados de acuerdo a los objetivos específicos planteados. En un primer momento, se describe la caracterización de la muestra y los resultados de las evaluaciones fisiológicas iniciales. Posteriormente, se presentan las respuestas individuales obtenidas durante las sesiones experimentales prescritas mediante (FTP) y PC, permitiendo identificar el comportamiento fisiológico de cada deportista. Para finalizar, se exponen los análisis comparativos grupales de las respuestas cardiorrespiratorias, metabólicas y de la variabilidad de la frecuencia cardíaca, utilizando indicadores descriptivos y pruebas no paramétricas que facilitan la interpretación de las diferencias observadas entre los dos métodos evaluados.

Se presentan las características generales de los cuatro paratletas incluidos en el estudio, así como los resultados obtenidos durante las evaluaciones fisiológicas realizadas antes del desarrollo de las sesiones experimentales. Esta información constituye el punto de partida para la interpretación de los resultados posteriores.

Caracterización de la muestra y resultados de las evaluaciones iniciales

En la Tabla 2 se presentan las características antropométricas, experiencia deportiva, volumen de entrenamiento y tipo de discapacidad, de los cuatro paratletas participantes del estudio.

Tabla 2

Características generales de los paratletas.

Variable	Media
Masa corporal (Kg)	65,88 ± 12,60
Talla (Cm)	170,00 ± 9,76
Entrenamiento semanal (h·sem ⁻¹)	11,50 ± 1,00
Experiencia deportiva (Años)	5,75 ± 1,50
Edad cronológica (Años)	28,25 ± 9,54
Discapacidad física (n)	2
Discapacidad Auditiva (n)	1
Discapacidad Intelectual (n)	1

Nota: Los valores se expresan como media ± desviación estándar, excepto las categorías de discapacidad, expresadas como número de paratletas (n). h·sem⁻¹ = horas por semana.

La Tabla 2 presenta los resultados de la prueba de esfuerzo máximo, siendo la línea base para el segundo momento en el experimento, se incluyen las variables fisiológicas registradas en el (VT1), el (VT2) y el consumo máximo de oxígeno, los cuales sirvieron como referencia para la caracterización fisiológica inicial de cada paratleta.

Tabla 3

Resultados de las variables fisiológicas y de rendimiento obtenidas durante la prueba de esfuerzo máximo por los cuatro deportistas.

Momentos	Variable fisiológica	Deportista			
		1	2	3	4
VT1	VO ₂ absoluto (L·min ⁻¹)	2,87	2,15	2,33	2,58
	VO ₂ relativo (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	37	39	42	34
	Frecuencia cardíaca (bpm)	154	158	154	150
	Potencia (W)	202	144	175	202
	Ventilación minuto (L·min ⁻¹)	100,4	60,9	68,8	77,5
	VE/VO ₂	33,6	26,4	27,4	27,6
	VE/VCO ₂	35	27,6	28,9	29,2
	RER	0,96	0,96	0,95	0,95
	PetO ₂ (mmHg)	76	69	70	68
	PetCO ₂ (mmHg)	33	38	37	38
	Pulso de O ₂ (mL·latido ⁻¹)	19	14	15	17
VT2	VO ₂ absoluto (L·min ⁻¹)	3,77	2,93	3,16	3,4
	VO ₂ relativo (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	48	54	57	45
	Frecuencia cardíaca (bpm)	184	175	177	178
	Potencia (W)	212	213	268	287
	Ventilación minuto (L·min ⁻¹)	155,4	110,5	117,3	125,2
	VE/VO ₂	38,9	35,6	35	34,8
	VE/VCO ₂	34,9	32,2	33	31,8
	RER	1,11	1,11	1,06	1,09
	PetO ₂ (mmHg)	83	77	76	77
	PetCO ₂ (mmHg)	30	33	35	34
	Pulso de O ₂ (mL·latido ⁻¹)	20	17	18	19
Consumo Max	VO ₂ absoluto (L·min ⁻¹)	3,78	3,15	3,81	3,82
	VO ₂ relativo (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	48	58	69	51
	Frecuencia cardíaca máxima (lpm)	183	180	184	188
	Potencia máxima (W)	301	254	353	361
	Ventilación minuto máxima (L·min ⁻¹)	157,5	150,3	178,2	159,3
	VE/VO ₂	39,3	45,3	44,1	38,9
	VE/VCO ₂	35,1	37	39,7	35,9
	RER máximo	1,12	1,22	1,11	1,08
	PetO ₂ (mmHg)	88	85	83	83
	PetCO ₂ (mmHg)	32	30	29	33
	Pulso de O ₂ (mL·latido ⁻¹)	21	18	21	20

Nota: Los datos corresponden a cada deportista. VT1 = primer umbral ventilatorio; VT2 = segundo umbral ventilatorio; VO₂máx = consumo máximo de oxígeno; RERmáx = cociente de intercambio respiratorio máximo; W = vatios; lpm = latidos por minuto.

Una vez finalizada la evaluación fisiológica inicial, se determinó el Umbral Funcional de Potencia (FTP) mediante el protocolo de contrarreloj de 20 minutos, en un primer momento se determinaron los valores individuales correspondientes a la (FTP), los cuales

fueron utilizados posteriormente para la prescripción de una de las sesiones experimentales.

En la Tabla 4 se resumen los resultados obtenidos por cada paratleta durante la prueba.

Tabla 4

Resultados individuales de la prueba de potencia funcional umbral.(FTP).

Deportista	Potencia media (W)	Potencia máxima (W)	FC máxima (lpm)	Cadencia media (rpm)	FTP final (W)
1	240	342	188	85	228
2	162	261	191	83	154
3	277	360	186	96	263
4	306	410	187	95	291

Nota: FC = frecuencia cardíaca; FTP = *Functional Threshold Power*; W = vatios; lpm = latidos por minuto; rpm = revoluciones por minuto.

De manera complementaria, en este segundo momento se determinó la (PC) mediante el protocolo de esfuerzos máximos de duración fija de tres, siete y doce minutos, empleado para estimar la relación potencia-tiempo y calcular el valor individual de PC de cada paratleta. En la Tabla 5 presenta los resultados registrados en cada uno de los esfuerzos y el valor final estimado de la Potencia Crítica.

Tabla 5

Resultados individuales de las pruebas de 3, 7 y 12 minutos utilizadas para determinar la potencia crítica.

Duración	Variable	1	2	3	4
3 minutos	Potencia media (W)	303	254	353	361
	Potencia máxima (W)	335	279	390	398
	Frecuencia cardíaca máxima (lpm)	182	183	179	178
	Cadencia media (rpm)	94	100	84	96
	Cadencia máxima (rpm)	121	122	110	121
7 minutos	Potencia media (W)	279	211	328	325
	Potencia máxima (W)	307	232	362	357
	Frecuencia cardíaca máxima (lpm)	184	180	182	181
	Cadencia media (rpm)	94	89	47	94
	Cadencia máxima (rpm)	127	120	127	118
12 minutos	Potencia media (W)	272	198	321	313
	Potencia máxima (W)	294	214	347	338
	Frecuencia cardíaca máxima (lpm)	184	183	188	182
	Cadencia media (rpm)	89	89	78	98
	Cadencia máxima (rpm)	119	115	120	115
Resultado final	Potencia crítica, PC (W)	261	179	310	297

Nota: Los datos presentan valores estándar de los valores de cada deportista. Las mediciones corresponden a los esfuerzos de **3, 7 y 12 minutos** realizados para la estimación de la potencia crítica (PC). W = vatios; bpm = Beats Per Minute rpm = revoluciones por minuto.

A continuación se presentan las respuestas individuales durante las sesiones experimentales, en el cual se analiza las respuestas fisiológicas y el comportamiento de la

variabilidad de la frecuencia cardiaca ante la carga externa que cada paratleta experimentó al someterse a las dos sesiones de entrenamiento.

Este enfoque por paratleta resulta fundamental para comprender cómo interactúan realmente las intensidades desde el FTP frente a las de la PC, presentar el comportamiento de cada uno evidenciar de manera precisa en qué medida cada métrica de potencia subestima o sobreestima las cargas de trabajo y la tolerancia al esfuerzo.

A continuación, se presenta la tabla 6, la cual muestra una comparación de las respuestas fisiológicas del paratleta en tres momentos de esfuerzo distintos: En el VT1, VT2 y el estado de consumo máximo obtenidos durante las dos sesiones de entrenamiento de los paratletas.

Tabla 6*Comparación individual de la potencia y la frecuencia cardíaca entre PC y FTP*

Paratleta	PC final (W)	FTP final (W)	Potencia media PC (W)	Potencia media FTP (W)	FC máx. PC (lpm)	FC máx. FTP (lpm)	Cadencia media PC (rpm)	Cadencia media FTP (rpm)
1	261	228	272	240	184	188	89	85
2	179	154	198	162	183	191	89	83
3	310	263	321	277	188	186	78	96
4	297	291	313	306	182	187	98	95

Nota: PC = Potencia Crítica; FTP = Functional Threshold Power; FC = frecuencia cardíaca; W = vatios; rpm = revoluciones por minuto. En PC, la potencia media, FC máxima y cadencia media corresponden al esfuerzo de 12 minutos.

La Tabla 7 presenta las respuestas fisiológicas del paratleta 1, durante las condiciones FTP y PC, comparadas en el primer y segundo umbral ventilatorio y en el consumo máximo de oxígeno.

Tabla 7

Comparación de las respuestas fisiológicas en VT1, VT2 y respuesta pico/máxima entre las sesiones prescritas por FTP y potencia crítica (PC) paratleta 1.

Variable	VT1					VT2					Consumo Max				
	CPET	FTP	PC	Dif.	VT1 Δ (%)	CPET	FTP	PC	Dif.	VT1 Δ (%)	CPET VO _{2peak}	FTP	PC	Dif.	Δ máx (%)
VO ₂ absoluto (L/min)	2,87	2,55	2,7	0,15	5,88	3,77	3,73	3,85	0,12	3,22	4,18	3,26	3,98	0,72	22,09
VO ₂ relativo (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	37	32	34	2	6,25	48	36	49	13	36,11	54	41	51	10	24,39
Frecuencia cardíaca (bpm)	154	136	140	4	2,94	184	149	158	9	6,04	188	161	164	2	2,5
Potencia (W)	202	174	191	17	9,77	212	228	265	37	16,23	320	252	261	9	3,57
Potencia media (W)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	168	161	-7	-4,17
Potencia máxima (W)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	232	375	143	61,64
Ventilación minuto (L/min)	100,4	99,6	100,1	0,5	0,5	155,4	143,8	154,5	10,7	7,44	181,6	129,1	155,9	26,8	20,76
VE/VO ₂	33,6	33,4	33,5	0,1	0,3	38,9	38,6	38,8	0,2	0,52	43,4	36,8	37,1	0,3	0,82
VE/VCO ₂	35	34,8	34,9	0,1	0,29	34,9	34,8	34,8	0	0	36,9	34,9	34,7	-0,20	-0,57
RER	0,96	0,96	0,96	0	0	1,11	1,1	1,1	0	0	1,16	1,06	1,07	0,01	0,94
PetO ₂ (mmHg)	74	74	74	0	0	83	82	83	1	1,22	86	80	82	2	2,5
PetCO ₂ (mmHg)	34	34	34	0	0	24	24	24	0	0	23	29	28	-1	-3,45
Pulso de O ₂ (ml·lat ⁻¹)	19	19	19	0	0	20	20	24	4	20	23	20	25	5	25

Nota: Dif. = diferencia; Δ = cambio porcentual. Los valores positivos indican que la respuesta fue mayor en PC que en FTP; los negativos indican que fue menor en PC. El CPET se presenta como referencia descriptiva y no interviene en el cálculo de la diferencia ni del delta porcentual.

Los resultados que se muestran en la Tabla 8, se observa la comparación de las respuestas fisiológicas del paratleta 2, en tres momentos del esfuerzo: VT1, VT2 y consumo máximo, durante las sesiones de entrenamiento basadas en FTP y PC.

Tabla 8

Comparación de las respuestas fisiológicas en VT1, VT2 y respuesta pico/máxima entre las sesiones prescritas por FTP y potencia crítica (PC) paratleta 2.

Variable	VT1					VT2					Consumo Max				
	CPET	FTP	PC	Dif.	VT1 Δ%	CPET	FTP	PC	Dif.	VT2 Δ%	CPET VO _{2peak}	FTP	PC	Dif.	Δ Máx.
VO ₂ absoluto (L/min)	2,15	2,19	2,45	0,26	11,87	2,93	2,75	2,95	0,2	7,27	3,08	2,98	3,14	0,16	5,37
VO ₂ relativo (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	39	41	45	4	9,76	54	51	55	4	7,84	57	55	58	3	5,45
Frecuencia cardíaca (bpm)	158	141	151	10	7,09	171	173	172	-1	-0,58	180	179	180	1	1,22
Potencia (W)	144	144	150	6	4,17	213	164	184	20	12,2	225	138	159	21	15,22
Potencia media (W)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	142	144	2	1,41
Potencia máxima (W)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	303	323	20	6,6
Ventilación minuto (L/min)	60,9	51,5	60	8,5	16,5	111	108	109	1	0,93	118,2	115,3	117,5	2,2	1,91
VE/VO ₂	26,4	23,9	25,5	1,6	6,69	35,6	35,5	36	0,5	1,41	37,2	36,7	37,1	0,4	1,09
VE/VCO ₂	27,6	25,9	27,5	1,6	6,18	32,2	32	31,5	-0,5	-1,56	33,4	37,8	33,1	-4,7	-12,43
RER	0,96	0,89	0,95	0,06	6,74	1,11	1,1	1,1	0	0	1,14	0,97	1,04	0,07	7,22
PetO ₂ (mmHg)	70	68	69	1	1,47	84	84	84	0	0	86	84	84	0	0
PetCO ₂ (mmHg)	39	39	39	0	0	27	27	28	1	3,7	26	27	28	1	3,7
Pulso de O ₂ (ml·lat ⁻¹)	14	16	17	1	6,25	17	17	18	1	5,88	18	17	18	1	5,88

Nota: Diferencia = PC – FTP; $\Delta\% = (PC - FTP)/FTP \times 100$. Los valores positivos indican respuestas mayores en PC respecto a FTP, mientras que los valores negativos indican respuestas menores en PC respecto a FTP.

En la Tabla 9, se presentan los resultados de la comparación de las respuestas fisiológicas del paratleta 3, durante las sesiones de entrenamiento con base en el FTP y la PC.

Tabla 9

Comparación de las respuestas fisiológicas en VT1, VT2 y respuesta pico/máxima entre las sesiones prescritas por FTP y potencia crítica (PC) paratleta 3.

Variable	VT1					VT2					Consumo Max				
	CPE T	FTP	PC	Dif.)	VT1 Δ (%)	CPET	FTP	PC	Dif.	VT2 Δ (%)	CPET VO ₂ peak	FTP	PC	Dif. máx.	Δ máx. (%)
VO ₂ absoluto (L/min)	2,33	1,72	1,83	0,11	6,4	3,16	3,1	3,26	0,16	5,16	3,81	3,39	3,47	0,08	2,36
VO ₂ relativo (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	42	31	33,03	2,03	6,55	57	55	58,3	3,3	6	69	62	61	-1,00	-1,61
Frecuencia cardiaca (bpm)	154	166	160	-6	-3,61	177	169	178	9	5,33	184	172	181	9	5,23
Potencia (W)	175	210	212	2	0,95	268	271	317	46	16,97	353	236	381	145	61,44
Potencia media (W)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	215	176	-39	-18,14
Potencia máxima (W)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	584	475	-109	-18,66
Ventilación minuto (L/min)	68,8	67,2	68	0,8	1,19	117,3	112,4	115	2,6	2,31	178,2	125,1	142,4	17,3	13,83
VE/VO ₂	27,4	27,5	27,6	0,1	0,36	35	34,4	34,6	0,2	0,58	44,1	33,3	38,7	5,4	16,22
VE/VCO ₂	28,9	29,1	29	-0,10	-0,34	33	32,7	32,8	0,1	0,31	39,7	32,9	38	5,1	15,5
RER	0,95	0,94	0,94	0	0	1,06	1,04	1,05	0,01	0,96	1,11	1,01	1,02	0,01	0,99
PetO ₂ (mmHg)	69	69	69	0	0	80	79	79	0	0	83	83	82	-1	-1,20
PetCO ₂ (mmHg)	38	38	38	0	0	31	31	31	0	0	28	28	28	0	0
Pulso de O ₂ (ml·lat ⁻¹)	15	10	11	1	10	18	18	18	0	0	21	19	20	1	5,26

Nota: Dif. = diferencia; Δ = cambio porcentual. Los valores positivos indican que la respuesta fue mayor en PC que en FTP; los valores negativos indican que fue menor en PC. El CPET se incluye como referencia descriptiva y no interviene en el cálculo de la diferencia ni del delta porcentual.

Finalmente, en la Tabla 10, se describen los resultados de la comparación de las respuestas fisiológicas del paratleta 4 en tres momentos del esfuerzo: VT1, VT2 y consumo máximo, durante las sesiones de entrenamiento prescritas con base en el FTP y la PC.

Tabla 10

Comparación de las respuestas fisiológicas en VT1, VT2 y respuesta pico/máxima entre las sesiones prescritas por FTP y potencia crítica (PC) paratleta 4.

Variable	VT1					VT2					Consumo Max				
	CPET	FTP	PC	Dif.	VT1 Δ (%)	CPET	FTP	PC	Dif.	VT2 Δ (%)	CPET VO _{2peak}	FTP	PC	Dif.	Δ máx. (%)
VO₂ absoluto (L/min)	2,58	2,55	2,56	0,01	0,39	3,4	3,35	3,37	0,02	0,6	4,02	3,77	3,89	0,12	3,18
VO₂ relativo (ml·kg⁻¹·min⁻¹)	34	34	34	0	0	45	44	45	1	2,27	63	59	61	2	3,39
Frecuencia cardíaca (bpm)	150	160	151	-9	-5,63	178	171	169	-2	-1,1 7	183	174	176	2	1,15
Potencia (W)	202	213	241	28	13,15	287	273	280	7	2,56	325	281	289	8	2,85
Potencia media (W)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	195	201	6	3,08
Potencia máxima (W)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	509	545	36	7,07
Ventilación minuto (L/min)	77,5	76,8	77	0,2	0,26	125,2	124	124	0,6	0,49	160,8	142,2	149,1	6,9	4,85
VE/VO₂	27,6	27,4	27,5	0,1	0,36	34,8	34,5	34,6	0,1	0,29	39,9	34,5	35	0,5	1,45
VE/VCO₂	29,2	29,1	29,1	0	0	31,8	31,7	31,7	0	0	35,8	32,7	31,8	-0,9 0	-2,7 5
RER	0,95	0,95	0,95	0	0	1,09	1,08	1,09	0,01	0,93	1,14	1,05	1,1	0,05	4,76
PetO₂ (mmHg)	69	69	69	0	0	77	77	77	0	0	84	82	83	1	1,22
PetCO₂ (mmHg)	39	39	39	0	0	37	37	37	0	0	27	28	27	-1	-3,5 7
Pulso de O₂ (ml·lat⁻¹)	17	17	17	0	0	19	19	19	0	0	22	22	22	0	0

Nota: CPET = prueba de esfuerzo cardiopulmonar; VO₂ = consumo de oxígeno; FC = frecuencia cardíaca; VE = ventilación minuto; RER = cociente de intercambio respiratorio; FTP = *Functional Threshold Power*; PC = potencia crítica; Δ% = diferencia porcentual respecto al CPET.

En las siguientes tablas se muestra el análisis comparativo grupal entre las sesiones de FTP y PC. Las tablas integran los valores estadísticos descriptivos, el cambio porcentual y el tamaño del efecto de Hedges.

La Tabla 11 presenta la comparación grupal de las variables fisiológicas registradas en el (VT1) durante las sesiones prescritas mediante FTP y PC y se establecieron las diferencias observadas entre ambas condiciones experimentales.

Tabla 11

Resultado de la relación grupal de las respuestas fisiológicas entre las sesiones mediante FTP y potencia crítica en el primer umbral ventilatorio.

Variable	FTP Media $\pm$ DE	PC Media $\pm$ DE	Δ (%)	p exacta	Hedges g_{av}
VO₂ absoluto (L/min)	2,25 $\pm$ 0,39	2,38 $\pm$ 0,38	5,88	0,125	0,296
VO₂ relativo (mL·kg⁻¹·min⁻¹)	34,50 $\pm$ 4,51	36,51 $\pm$ 5,68	5,82	0,250	0,342
Frecuencia cardiaca (bpm)	150,75 $\pm$ 14,50	150,50 $\pm$ 8,19	-0,17	1,000	-0,019
Potencia (W)	185,25 $\pm$ 32,71	198,50 $\pm$ 38,28	7,15	0,125	0,324
Ventilación minuto (L/min)	73,78 $\pm$ 20,13	76,28 $\pm$ 17,34	3,39	0,125	0,116
VE/VO₂	28,05 $\pm$ 3,94	28,52 $\pm$ 3,45	1,69	0,125	0,112
VE/VCO₂	29,73 $\pm$ 3,70	30,12 $\pm$ 3,27	1,35	0,750	0,100
RER	0,93 $\pm$ 0,0	0,95 $\pm$ 0,01	1,60	1,000	0,664
PetO₂ (mmHg)	70,00 $\pm$ 2,71	70,25 $\pm$ 2,50	0,36	1,000	0,083
PetCO₂ (mmHg)	37,50 $\pm$ 2,38	37,50 $\pm$ 2,38	0,00	—	0,000
Pulso de O₂ (mL·lat⁻¹)	15,50 $\pm$ 3,87	16,00 $\pm$ 3,46	3,23	0,500	0,118

Nota: FTP = potencia funcional umbral; PC = potencia crítica; DE = desviación estándar; Md = mediana; $\Delta\%$ = cambio porcentual PC-FTP; W = Wilcoxon; g_{av} = tamaño del efecto de Hedges. Valores positivos/negativos indican respuestas mayores/menores con PC. En PetCO₂ no se calcularon W ni p debido a valores idénticos entre condiciones.

Posteriormente, la Tabla 12 muestra los resultados de la comparación grupal de las respuestas fisiológicas en el VT2, con el propósito de evaluar las diferencias entre las sesiones mediante FTP y PC a una mayor intensidad en el ejercicio.

Tabla 12

Resultado de la relación grupal de las respuestas fisiológicas entre las sesiones mediante FTP y potencia crítica en el segundo umbral ventilatorio.

Variable	FTP Media ± DE	PC Media ± DE	Δ (%)	P exacta	Hedges g _{av}
VO ₂ absoluto (L/min)	3,23 ± 0,41	3,36 ± 0,37	3,87	0,125	0,276
VO ₂ relativo (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	46,50 ± 8,35	51,83 ± 5,96	11,45	0,125	0,647
Frecuencia cardiaca (bpm)	165,50 ± 11,12	169,25 ± 8,38	2,27	0,500	0,334
Potencia (W)	234,00 ± 51,08	261,50 ± 56,10	11,75	0,125	0,446
Ventilación minuto (L/min)	121,95 ± 15,98	125,68 ± 20,21	3,05	0,125	0,179
VE/VO ₂	35,75 ± 1,96	36,00 ± 1,98	0,70	0,125	0,110
VE/VCO ₂	32,80 ± 1,40	32,70 ± 1,51	-0,30	1,000	-0,060
RER	1,08 ± 0,03	1,09 ± 0,02	0,46	0,500	0,167
PetO ₂ (mmHg)	80,50 ± 3,11	80,75 ± 3,30	0,31	1,000	0,068
PetCO ₂ (mmHg)	29,75 ± 5,62	30,00 ± 5,48	0,84	1,000	0,039
Pulso de O ₂ (mL·lat ⁻¹)	18,50 ± 1,29	19,75 ± 2,87	6,76	0,500	0,522

Nota: FTP = potencia funcional umbral; PC = potencia crítica; DE = desviación estándar; Md = mediana; Δ% = cambio porcentual PC-FTP; *W* = Wilcoxon; g_{av} = tamaño del efecto de Hedges. Valores positivos/negativos indican respuestas mayores/menores con PC.

La Tabla 13 presenta la comparación grupal de las respuestas fisiológicas máximas alcanzadas durante las sesiones de entrenamiento prescritas mediante FTP y PC.

Tabla 13

Comparación grupal de las respuestas fisiológicas pico o máximas entre las sesiones prescritas mediante FTP y potencia crítica.

Variable	FTP Media $\pm$ DE	PC Media $\pm$ DE	Δ (%)	p exacta	Hedges g_{av}
VO₂ absoluto (L/min)	3,35 $\pm$ 0,33	3,62 $\pm$ 0,39	8,06	0,125	0,654
VO₂ relativo (mL·kg⁻¹·min⁻¹)	54,25 $\pm$ 9,29	57,75 $\pm$ 4,72	6,45	0,250	0,434
Frecuencia cardiaca (bpm)	171,50 $\pm$ 7,59	174,25 $\pm$ 9,07	1,60	0,500	0,287
Potencia (W)	226,75 $\pm$ 62,03	272,50 $\pm$ 91,39	20,18	0,125	0,518
Potencia media (W)	180,00 $\pm$ 31,82	170,50 $\pm$ 24,17	-5,28	0,625	-0,295
Potencia máxima (W)	407,00 $\pm$ 166,51	429,50 $\pm$ 99,54	5,53	0,625	0,147
Ventilación minuto (L/min)	127,93 $\pm$ 11,14	141,23 $\pm$ 16,75	10,40	0,125	0,828
VE/VO₂	35,33 $\pm$ 1,72	36,98 $\pm$ 1,52	4,67	0,125	0,886
VE/VCO₂	34,58 $\pm$ 2,37	34,40 $\pm$ 2,68	-0,51	0,875	-0,060
RER	1,02 $\pm$ 0,04	1,06 $\pm$ 0,04	3,42	0,125	0,799
PetO₂ (mmHg)	82,25 $\pm$ 1,71	82,75 $\pm$ 0,96	0,61	0,750	0,326
PetCO₂ (mmHg)	28,00 $\pm$ 0,82	27,75 $\pm$ 0,50	-0,89	1,000	-0,330
Pulso de O₂ (mL·lat⁻¹)	19,50 $\pm$ 2,08	21,25 $\pm$ 2,99	8,97	0,250	0,600

Nota: FTP = potencia funcional umbral; PC = potencia crítica; DE = desviación estándar; $\Delta\%$ = cambio porcentual PC-FTP; g_{av} = Hedges. Valores positivos/negativos indican respuestas mayores/menores con PC.

Para la última fase experimental del estudio se describen las respuestas del sistema autónomo durante las sesiones establecidas con los valores obtenidos de las pruebas de FTP y PC que se presentaron en el apartado anterior, se analizó la HRV a partir de los indicadores RMSSD y la relación LF/HF. Las mediciones se realizaron en cinco momentos específicos: supino antes de la prueba, de pie antes de la prueba, durante la prueba, supino posterior a la prueba y de pie posterior a la prueba. Inicialmente se presentaron los resultados individuales de cada paratleta y, posteriormente, el análisis comparativo grupal con ambas condiciones del experimento.

En la Tabla 14 se presentan las diferencias porcentuales de las respuestas fisiológicas y de potencia entre el CPET y las sesiones basadas en FTP y PC en VT1, junto con los tamaños del efecto.

Tabla 14

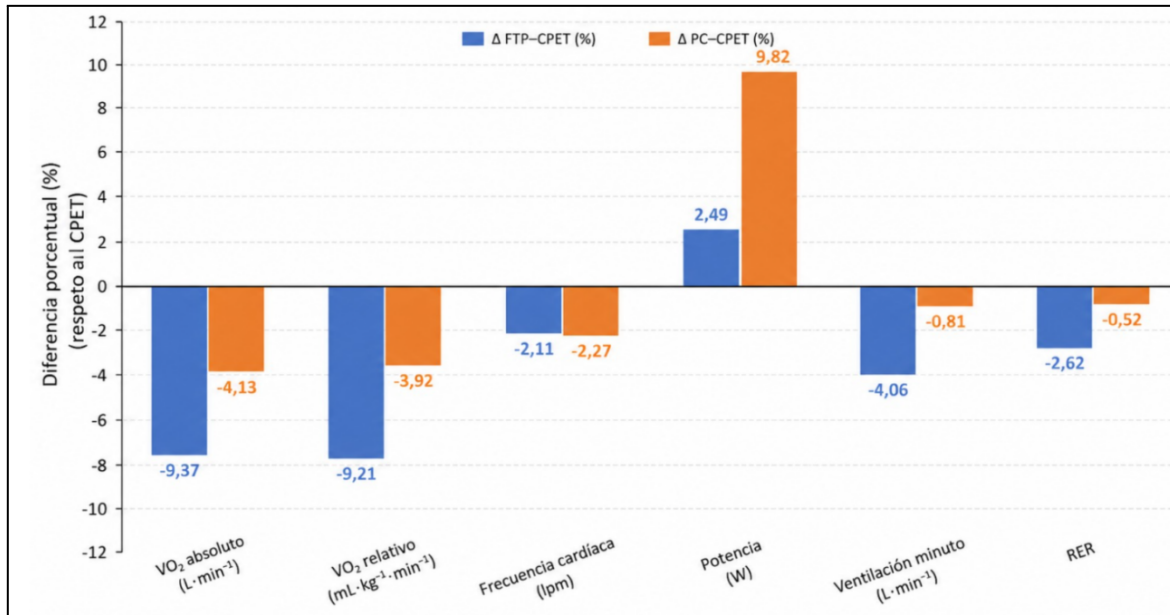
Comparación de las respuestas fisiológicas y de potencia entre CPET, FTP y PC en VT1.

Variable	Δ FTP-CPET (%)	Δ PC-CPET (%)	Δ PC-FTP (%)	Hedges (g_{av}) PC-FTP
VO₂ absoluto (L·min⁻¹)	-9,37	-4,13	5,88	0,296
VO₂ relativo (mL·kg⁻¹·min⁻¹)	-9,21	-3,92	5,82	0,342
Frecuencia cardíaca (lpm)	-2,11	-2,27	-0,17	-0,019
Potencia (W)	2,49	9,82	7,15	0,324
Ventilación minuto (L·min⁻¹)	-4,06	-0,81	3,39	0,116
RER	-2,62	-0,52	1,6	0,664

Nota: CPET=Prueba de esfuerzo cardiopulmonar, Los valores FTP Y PC se presentan como media, los valores negativos indican que la primera condición fue inferior a la condición de referencia mientras que los positivos indican que fue superior.

Figura 3.

Diferencias porcentuales de las respuestas fisiológicas y de potencia de FTP y PC respecto al CPET en VT1.



Nota. Δ = diferencia respecto al CPET; valores próximos a 0 indican mayor similitud con el CPET. FTP = umbral de potencia funcional; PC = potencia crítica; VO₂ = consumo de oxígeno; VE = ventilación minuto; RER = cociente de intercambio respiratorio.

En VT1, la sesión basada en PC presentó mayor proximidad al CPET en la mayoría de las variables fisiológicas (Tabla 13; Figura 1). Las diferencias del VO₂ absoluto fueron de -4,13 % para PC y -9,37 % para FTP, mientras que en el VO₂ relativo fueron de -3,92 % y -9,21 %, respectivamente. La VE y el RER mostraron un comportamiento similar, con menores diferencias respecto al CPET durante PC (-0,81 % y -0,52 %) que durante FTP (-4,06 % y -2,62 %). En contraste, la FC fue similar entre condiciones (-2,27 % PC; -2,11 % FTP), mientras que la potencia fue superior al CPET en ambas sesiones, especialmente

en PC (+9,82 % frente a +2,49 % en FTP). En conjunto, PC reprodujo con mayor proximidad la mayoría de las respuestas fisiológicas del CPET, aunque requirió una mayor potencia externa. Debido al reducido tamaño muestral y a la heterogeneidad individual, estos resultados se interpretaron principalmente de forma descriptiva.

La Tabla 14 presenta la comparación de las respuestas fisiológicas y de potencia observadas en VT2 durante el CPET y las sesiones de entrenamiento prescritas mediante FTP y PC.

Tabla 15

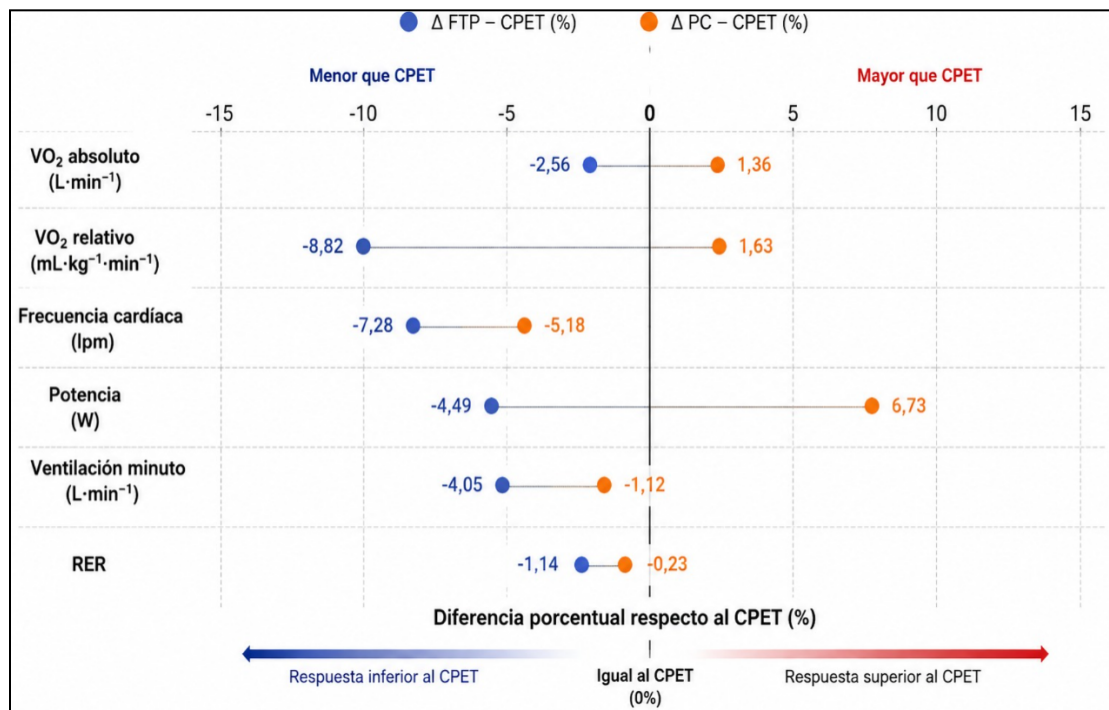
Comparación de las respuestas fisiológicas y de potencia entre CPET, FTP y PC en VT2.

Variable	Δ FTP-CPET (%)	Δ PC-CPET (%)	Δ PC-FTP (%)	Hedges (g_{av}) PC-FTP
VO₂ absoluto (L·min⁻¹)	-2,56	1,36	3,87	0,276
VO₂ relativo (mL·kg⁻¹·min⁻¹)	-8,82	1,63	11,45	0,647
Frecuencia cardíaca (lpm)	-7,28	-5,18	2,27	0,334
Potencia (W)	-4,49	6,73	11,75	0,446
Ventilación minuto (L·min⁻¹)	-4,05	-1,12	3,05	0,179
RER	-1,14	-0,23	0,46	0,167

Nota. El CPET se utilizó como condición de referencia. Un valor negativo indica que la respuesta registrada durante FTP o PC fue inferior al CPET; un valor positivo indica que fue superior. Los valores de Δ PC-FTP corresponden a los reportados en la tabla original. VO₂ = consumo de oxígeno; FTP = umbral de potencia funcional; PC = potencia crítica; VE = ventilación minuto; RER = cociente de intercambio respiratorio.

Figura 4

Diferencias porcentuales de las respuestas fisiológicas y de potencia de FTP y PC respecto al CPET en VT2.



Nota: Δ = diferencia porcentual respecto al CPET; valores próximos a 0 indican mayor proximidad al CPET. FTP = umbral de potencia funcional; PC = potencia crítica; VO₂ = consumo de oxígeno; VE = ventilación minuto; RER = cociente de intercambio respiratorio.

En VT2, la sesión basada en PC mostró mayor proximidad al CPET en las variables fisiológicas evaluadas (Tabla 14; Figura 2). El VO₂ absoluto presentó una diferencia de 1,36% con PC frente a -2,56% con FTP, mientras que el VO₂ relativo mostró diferencias de 1,63% y -8,82%, respectivamente. La frecuencia cardíaca, la ventilación minuto y el RER también presentaron menores diferencias respecto al CPET con PC. En contraste, la potencia fue más próxima al CPET durante FTP (-4,49%) que durante PC (+6,73%). En

conjunto, PC reprodujo con mayor proximidad las respuestas fisiológicas del CPET, aunque con una mayor potencia externa. El mayor tamaño del efecto se observó en VO_2 relativo ($gav = 0,647$), clasificado como moderado; los demás efectos fueron pequeños o triviales. Debido al reducido tamaño muestral, estos resultados se interpretaron principalmente de forma descriptiva.

En la Tabla 16 se presentan los valores individuales de RMSSD y la relación LF/HF correspondientes al paratleta 1 durante las sesiones con FTP y PC, que se registraron en los momentos de la prueba antes, durante y post ejercicio.

Tabla 16

Valores individuales de RMSSD y LF/HF durante las sesiones FTP y PC del paratleta 1.

Prueba	Momento de medición	RMSSD (ms)	LF/HF
PC	Supino antes de la prueba	18.7	4.2
	De pie antes de la prueba	20.1	16.5
	Prueba	2.9	3.6
	Supino pos ejercicio	15.0	13.1
	De pie pos ejercicio	18.7	4.2
FTP	Supino antes de la prueba	20.9	7.9
	De pie antes de la prueba	15.1	4.7
	Prueba	2.7	1.7
	Supino pos ejercicio	10.8	2.7
	De pie pos ejercicio	20.9	7.9

Nota: Los valores corresponden a los registros individuales obtenidos durante las sesiones prescritas mediante Umbral Funcional de Potencia (FTP) y Potencia Crítica (PC), evaluados en cinco momentos: supino previo, de pie previo, durante la prueba, supino post ejercicio y de pie pos ejercicio. El RMSSD (*Root Mean Square of Successive Differences*) representa la modulación parasimpática, mientras que la relación LF/HF representa el equilibrio simpático-vagal.

En la Tabla 17 se presentan los valores individuales de RMSSD y la relación LF/HF correspondientes al paratleta 2 durante las sesiones con FTP y PC, que se registraron en los momentos de la prueba antes, durante y post ejercicio.

Tabla 17

Valores individuales de RMSSD y LF/HF durante las sesiones FTP y PC del paratleta 2.

Prueba	Momento de medición	RMSSD (ms)	LF/HF
PC	Supino antes de la prueba	14.4	2.4
	De pie antes de la prueba	14.3	4.7
	Prueba	7.7	8.7
	Supino pos ejercicio	9.0	4.6
	De pie pos ejercicio	68.8	2.9
FTP	Supino antes de la prueba	20.8	7.8
	De pie antes de la prueba	17.0	8.7
	Prueba	2.5	0.8
	Supino pos ejercicio	12.1	2.7
	De pie pos ejercicio	12.9	9.8

Nota: Los valores corresponden a los registros individuales obtenidos durante las sesiones prescritas mediante Umbral Funcional de Potencia (FTP) y Potencia Crítica (PC), evaluados en cinco momentos: supino previo, de pie previo, durante la prueba, supino post ejercicio y de pie pos ejercicio. El RMSSD (*Root Mean Square of Successive Differences*) representa la modulación parasimpática, mientras que la relación LF/HF representa el equilibrio simpático-vagal.

En la Tabla 18 se presentan los valores individuales de RMSSD y la relación LF/HF correspondientes al paratleta 3 durante las sesiones con FTP y PC, que se registraron en los momentos de la prueba antes, durante y post ejercicio.

Tabla 18

Valores individuales de RMSSD y LF/HF durante las sesiones FTP y PC del paratleta 3.

Prueba	Momento de medición	RMSSD (ms)	LF/HF
PC	Supino antes de la prueba	5.7	4.9
	De pie antes de la prueba	5.1	6.7
	Prueba	5.8	6.2
	Supino pos ejercicio	57.0	7.3
	De pie pos ejercicio	241.4	4.5
FTP	Supino antes de la prueba	35.9	4.0
	De pie antes de la prueba	20.1	5.6
	Prueba	4.8	1.0
	Supino pos ejercicio	19.0	4.1
	De pie pos ejercicio	19.5	13.3

Nota: Los valores corresponden a los registros individuales obtenidos durante las sesiones prescritas mediante Umbral Funcional de Potencia (FTP) y Potencia Crítica (PC), evaluados en cinco momentos: supino previo, de pie previo, durante la prueba, supino post ejercicio y de pie pos ejercicio. El RMSSD (*Root Mean Square of Successive Differences*) representa la modulación parasimpática, mientras que la relación LF/HF representa el equilibrio simpático-vagal.

En la Tabla 19 se presentan los valores individuales de RMSSD y la relación LF/HF correspondientes al paratleta 4 durante las sesiones con FTP y PC, que se registraron en los momentos de la prueba antes, durante y pos ejercicio.

Tabla 19

Valores individuales de RMSSD y LF/HF durante las sesiones FTP y PC del paratleta 4.

Prueba	Momento de medición	RMSSD (ms)	LF/HF
PC	Supino antes de la prueba	26.1	1.7
	De pie antes de la prueba	25.4	0.8
	Prueba	22.1	14.4
	Supino pos ejercicio	12.5	2.9
	De pie pos ejercicio	14.8	5.7
FTP	Supino antes de la prueba	31.1	0.6
	De pie antes de la prueba	27.4	1.8
	Prueba	7.6	26.8
	Supino pos ejercicio	20.5	1.3
	De pie pos ejercicio	17.6	3.7

Nota: Los valores corresponden a los registros individuales obtenidos durante las sesiones prescritas mediante Umbral Funcional de Potencia (FTP) y Potencia Crítica (PC), evaluados en cinco momentos: supino previo, de pie previo, durante la prueba, supino post ejercicio y de pie pos ejercicio. El RMSSD (*Root Mean Square of Successive Differences*) representa la modulación parasimpática, mientras que la relación LF/HF representa el equilibrio simpático-vagal.

Una vez descritas las respuestas individuales, en este apartado se muestran los comparativos grupales de los valores de RMSSD y de la relación LF/HF registrados durante las sesiones FTP y PC en cinco momentos: supino previo, de pie previo, durante la sesión, supino posterior y de pie posterior.

La Tabla 20 presenta las comparaciones de forma grupal del indicador RMSSD entre las sesiones establecidas con FTP y PC en los diferentes momentos de evaluación, describiendo las modificaciones del sistema parasimpático antes, durante y después del ejercicio.

Tabla 20

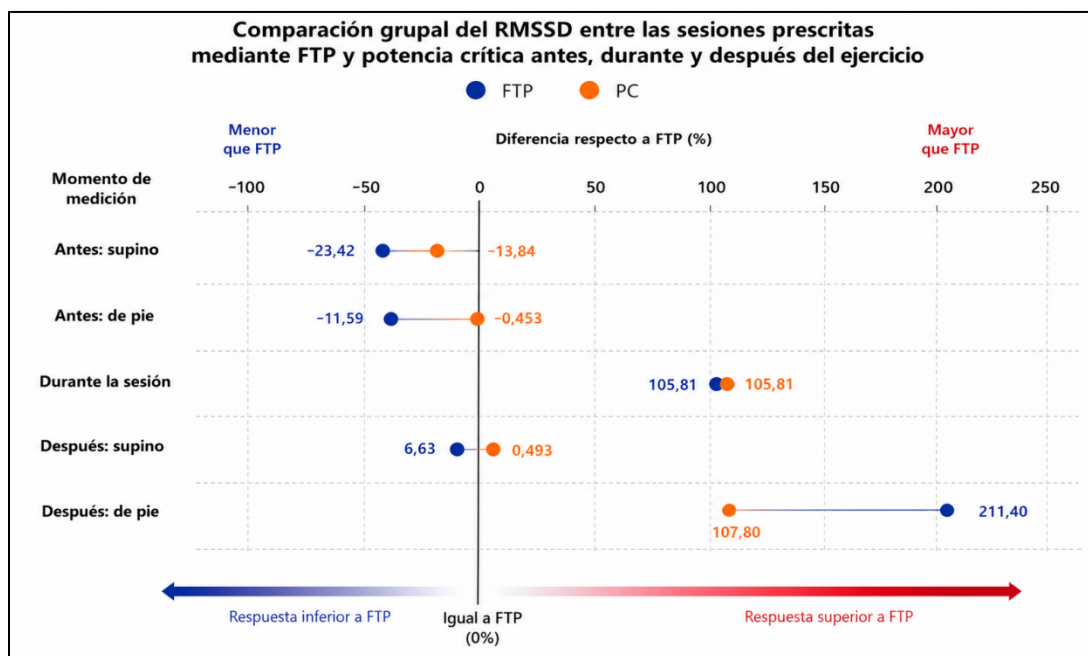
Comparación grupal del RMSSD entre las sesiones basadas en FTP y PC.

Momento de medición	FTP, mediana	PC, mediana	Δ mediano respecto a FTP (%)	p exacta	Hedges g_{av}
Antes: supino	26,00	16,55	-23,42	0,125	-1,184
Antes: de pie	18,55	17,20	-11,59	0,625	-0,453
Durante la sesión	3,75	6,75	105,81	0,125	0,832
Después: supino	15,55	13,75	6,63	0,875	0,493
Después: de pie	18,55	43,75	211,4	0,625	1,078

Nota: FTP y PC se expresan como mediana [RIC]. RMSSD = raíz cuadrática media de las diferencias sucesivas entre intervalos RR; RIC = rango intercuartílico; $\Delta\%$ = cambio porcentual individual PC-FTP; g_{av} = tamaño del efecto de Hedges. Valores positivos/negativos indican resultados mayores/menores con PC.

Figura 5

Cambios porcentuales del RMSSD entre las sesiones basadas en FTP y PC.



Nota: $\Delta\%$ = cambio porcentual individual PC-FTP; valores negativos/positivos indican menor/mayor RMSSD con PC. RMSSD = raíz cuadrática media de las diferencias sucesivas entre intervalos RR.

El RMSSD no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las sesiones FTP y PC en ninguno de los momentos evaluados (Tabla 19; Figura 3; $p > 0,05$). Antes del ejercicio, el RMSSD fue menor con PC tanto en supino ($\Delta = -23,42\%$; $g_{av} = -1,184$) como de pie ($\Delta = -11,59\%$; $g_{av} = -0,453$). Durante la sesión, se observó un aumento del RMSSD con PC ($\Delta = 105,81\%$; $g_{av} = 0,832$). Después del ejercicio, el cambio fue pequeño en supino ($\Delta = 6,63\%$; $g_{av} = 0,493$) y mayor en bipedestación ($\Delta = 211,40\%$; $g_{av} = 1,078$). En conjunto, los resultados muestran un comportamiento heterogéneo del RMSSD entre las condiciones y momentos de medición, sin evidencia estadística de diferencias entre FTP y PC. La amplitud de los cambios observados, especialmente después del ejercicio en bipedestación, deja ver que los diferentes resultados deben observarse detenidamente debido al reducido tamaño muestral y a la variabilidad individual.

En la Tabla 21 se presentan las comparaciones de forma grupal del indicador LF/HF entre las sesiones establecidas con FTP y PC en los diferentes momentos de evaluación, describiendo las modificaciones del sistema parasimpático antes, durante y después del ejercicio.

Tabla 21

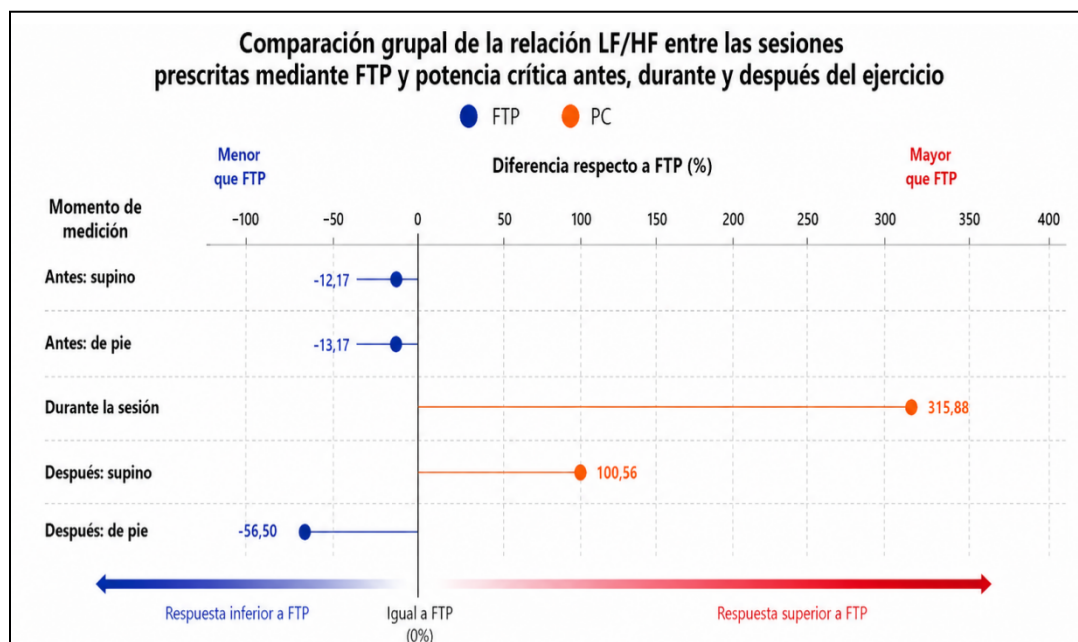
Comparación grupal de la relación LF/HF entre las sesiones basadas en FTP y PC.

Momento de medición	FTP, mediana	PC, mediana	Δ mediano respecto a FTP (%)	p exacta	Hedges g_{av}
Antes: supino	5,90	3,30	-12,17	0,625	-0,618
Antes: de pie	5,15	5,70	-13,17	0,875	0,361
Durante la sesión	1,35	7,45	315,88	0,875	0,065
Después: supino	2,70	5,95	100,56	0,125	1,325
Después: de pie	8,85	4,35	-56,50	0,250	-1,469

Nota: FTP y PC se expresan como mediana [RIC]. LF/HF = relación entre bandas de baja y alta frecuencia; RIC = rango intercuartílico; $\Delta\%$ = cambio porcentual PC-FTP; p = Wilcoxon exacta; g_{av} = tamaño del efecto de Hedges. Valores positivos/negativos indican respuestas mayores/menores con PC. Los resultados deben interpretarse de forma exploratoria debido a la asimetría de LF/HF y al reducido tamaño muestral.

Figura 6

Cambios porcentuales de la relación LF/HF entre las sesiones basadas en FTP y PC.



Nota: $\Delta\%$ = cambio porcentual individual PC–FTP; valores negativos/positivos indican menor/mayor LF/HF con PC. LF/HF = relación entre las bandas de baja y alta frecuencia.

La relación LF/HF no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las sesiones FTP y PC en ninguno de los momentos evaluados (Tabla 20; Figura 3B; $p > 0,05$). Antes del ejercicio, PC presentó valores ligeramente inferiores a FTP en supino ($\Delta = -12,17\%$; $g_{av} = -0,618$) y de pie ($\Delta = -13,17\%$; $g_{av} = 0,361$). Durante la sesión se observó el mayor cambio porcentual a favor de PC ($\Delta = 315,88\%$); sin embargo, este cambio no fue significativo ($p = 0,875$) y presentó un tamaño del efecto trivial ($g_{av} = 0,065$). Después del ejercicio, PC mostró un aumento de LF/HF en supino ($\Delta = 100,56\%$; $p = 0,125$; $g_{av} = 1,325$), mientras que en bipedestación presentó una disminución ($\Delta = -56,50\%$; $p = 0,250$;

$g_{av} = -1,469$). En conjunto, estos resultados evidencian respuestas autonómicas heterogéneas entre los momentos de medición, sin evidencia estadística de diferencias entre las condiciones. El incremento observado durante el ejercicio puede describirse como compatible con una modificación de la modulación autonómica, pero no permite inferir una mayor activación simpática de manera general debido al reducido tamaño muestral y la elevada variabilidad de LF/HF.

DISCUSIÓN

La presente investigación tuvo como propósito determinar los efectos agudos de dos sesión de entrenamiento en cuatro paratletas de paracycling, una planificada a partir de la PC y la otra sesión planificada a partir del valor de FTP, estas respuestas fisiológicas se analizaron desde la relación entre la carga externa y las respuestas fisiológicas, la carga externa estuvo representada principalmente por la potencia mecánica desarrollada sobre la bicicleta, mientras que las respuestas fisiológicas se evaluaron mediante el consumo de oxígeno, la frecuencia cardiaca y Los umbrales ventilatorios y la variabilidad de la frecuencia cardiaca.

El paratleta 1 es un hombre de 40 años de edad que presenta una desarticulación inferior izquierda, con masa corporal de 78,6 kg y talla de 171 cm, presentó un FTP de 228 W y una PC de 261 W, en relación con la masa corporal, estos valores corresponden aproximadamente a $2,90 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, y $3,32 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$,

En el VT1, los valores registrados durante la sesión mediante PC fueron más próximos a los obtenidos en la prueba de esfuerzo máximo que los observados durante la sesión basada en FTP, este comportamiento se presenta en todas las variables analizadas, como se vio en el VO_2 absoluto que alcanzó $2,70 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ y en PC $2,55 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, lo que representó un aumento del 5,88%, respecto a la prueba de esfuerzo este valor fue 5,92 % menor en la sesión de PC y 11,15 % menor en FTP. La potencia presentó una tendencia similar ya que fue 191W durante PC y de 174 W FTP, equivalente a un incremento del 9,77%, as mismo fue 5,45% inferior al valor obtenido la prueba de esfuerzo, durante PC y

14, 86% menos durante FTP durante la sesión de PC fue 5,45 % inferior a la alcanzada en la prueba de esfuerzo máximo, mientras que en la sesión de FTP fue 13,86 % menor.

En el VT2 se observa un comportamiento diferente, el VO_2 absoluto de FTP fue el más próximo a la prueba de esfuerzo, con una diferencia de sólo $-1,06$ %, frente a $+2,12$ % en PC teniendo un mayor consumo de oxígeno en la sesión de PC, no obstante para el VO_2 relativo, la frecuencia cardíaca y el VE/VO_2 , la condición PC estuvo más próxima al consumo de oxígeno máximo, en relación con la potencia, ambas sesiones superaron el valor registrado en la prueba de consumo máximo: en FTP la potencia fue $7,55$ % mayor y PC fue $25,00$ % mayor, esto muestra que, aunque PC reprodujo mejor varias respuestas fisiológicas en el VT2, también implicó una carga externa considerablemente superior.

En el comportamiento pico, este deportista durante la PC el VO_2 absoluto alcanzó $3,98 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ frente a $3,26 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ en FTP lo que significa un aumento de $22,09$ %, acompañado por una ventilación minuto $20,76$ % superior y un pulso de oxígeno 25 % mayor. La potencia asociada a ese punto fue sólo $3,57$ % mayor, pero la potencia máxima de la sesión aumentó $61,64$ %. este resultado demuestra que la carga interna no estuvo determinada solamente por la potencia media dado que un entrenamiento puede presentar una potencia media menor y paralelamente, generar mayor VO_2 , ventilación y mayor estrés fisiológico, si contiene picos más altos, transiciones más exigentes o mayor tiempo próximo a la PC.

En la HRV, el RMSSD disminuyó hasta $2,9$ ms durante PC y $2,7$ ms durante FTP, mostrando una retirada vagal marcada en ambas sesiones, después del ejercicio en posición

supina, el RMSSD fue mayor después de PC 15,0 frente a 10,8 ms lograda en FTP, pero la relación LF/HF también fue considerablemente superior de 13,1 frente a 2,7 en FTP, en la medición al finalizar estando de pie, el RMSSD fue ligeramente menor en PC siendo de 18,7 frente a 20,9 ms y el LF/HF también menor de 4,2 frente a 7,9 . Por tanto, la respuesta autonómica no siguió una dirección única. La PC produjo una respuesta cardiorrespiratoria más alta, pero no una supresión uniforme del RMSSD durante toda la recuperación. El aumento de LF/HF supino posterior sugiere una distribución espectral diferente tras PC, aunque no permite afirmar de manera directa que existió

El paratleta 2, es un hombre de 21 años con una amputación transfemoral, una masa corporal de 54,7 kg y talla de 178 cm, presentó un FTP de 154 W y una PC de 179 W, equivalentes aproximadamente a 2,82 y 3,27 W·kg⁻¹, a partir de esos datos se planifica las sesiones de entrenamiento y al analizar las respuesta fisiológicas en VT1, la sesión de PC incrementó la potencia solo 4,17 %, pero produjo aumentos de 11,87 % en el VO₂ absoluto, 7,09 % en la frecuencia cardíaca y 16,5 % en la ventilación minuto en el VT1 la sesión de FTP presento mayor proximidad a la prueba de consumo máximo en el VO₂ absoluto, el VO₂ relativo y la potencia, El VO₂ absoluto fue solamente 1,86% mayor que en la prueba de consumo máximo de Oxígeno, mientras que en PC fue 13,95% mayor, no obstante la sesión de PC se aproximó mas al consumo máximo de oxígeno en la frecuencia cardíaca, la ventilación por minuto y el RER, por ejemplo la ventilación minuto fue apenas 1,48% menor en PC respecto al consumo de oxígeno máximo, mientras que en FTP fue 15, 44% menor, es decir al comparar las sesiones.

En el VT2 la sesión mediante PC se tuvo la misma tendencia pues la mayoría de las respuestas fisiológicas registradas durante PC estuvo más cerca a la prueba de esfuerzo máxima, el VO_2 absoluto durante el PC fue 0,68% superior que el FTP que fue de 6,14% inferior, así mismo el VO_2 relativo, la frecuencia cardiaca y la ventilación minuto presenta menores diferencias e PC que en FTP. La potencia se mantuvo por abajo de los valores alcanzado en el VT22 de la prueba de esfuerzo, en ambas sesiones, sin embargo, la diferencia fue menos en PC con una reducción del 13,62% frente a 23% en FTP,, además la potencia desarrollada durante PC fue de 12,20 % mayor que durante FTP, en contraste el FTP mostró una mayor proximidad a la prueba de esfuerzo en las respuestas fisiológicas VE/VO_2 y VE/VCO_2 mientras que el RER fue igual en ambas sesiones, conjunto la PC estuvo más cerca la respuesta cardiorrespiratoria metabólica del VT2

En la respuesta pico, PC produjo incrementos de 5,37 % en VO_2 absoluto, 15,22 % en potencia asociada a ese punto, 1,91 % en ventilación minuto y 7,22 % en RER. La potencia media y máxima de la sesión fueron solo 1,41 % y 6,6 % superiores. Por consiguiente, PC provocó un aumento de la carga interna, pero de menor magnitud que en el Deportista 1. La mayor diferencia se observó en la potencia asociada al $\text{VO}_{2\text{pico}}$, lo que indica que el FTP situó a este deportista en una intensidad mecánica insuficiente para alcanzar la misma exigencia oxidativa que la PC.

Por otro lado antes de iniciar la sesión con el RMSSD fue menor en PC que en FTP en posición supino (14,4 frente a 20,8 ms) siendo una diferencia de 30,8% y en posición de pie (14,3 frente a 17,0 ms) con una diferencia de 15,9%, lo que indica que las dos sesiones

no comenzaron desde el mismo estado autonómico, llegando el deportista a la sesión de PC con una menor modulación vagal cardíaca basal, es decir con un estado autonómico diferente y posiblemente con menos recuperación previa, durante el ejercicio el RMSSD fue mayor en PC (7,7 frente a 2,5 ms), pero después en posición supina fue menor en PC de 9,0 frente a 12,1 ms en FTP, no obstante ambos resultados reflejan una reducción de la variabilidad respecto al reposo, inicialmente más lenta después de PC en consecuencia a la mayor carga interna observada no obstante debido a que en sesión a PC llegó con una modulación menor vagal en basal los resultados no son suficientes para afirmar que produjo una recuperación económica más lenta en FTP que en PC.

El paratleta 3 hombre de 20 años con una masa corporal de 55,4 kg alcanzó un FTP de 263 W que equivale a $4,75 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. y una PC de 310 W que equivalen a $5,60 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$. Presentó la mayor diferencia de 47 W es decir una diferencia relativa 17,87 % entre PC Y FTP, además de la mayor potencia relativa muestran que la discapacidad intelectual no se acompañó de una limitación cardiorrespiratoria o mecánica general por el contrario el deportista presentó una elevada capacidad de producción de potencia y consumo de oxígeno.

Por otro lado Van Biesen et al. (2017) observaron que deportistas con discapacidad intelectual presentaban una mayor dificultad para mantener el ritmo previamente establecido cuando no se tenía una retroalimentación constante y Sakalidis et al. (2024) encontraron que las personas con discapacidad intelectual se desviaban más del ritmo que debían llevar durante un entrenamiento, sin embargo que con un estímulo visual, se podía

mejorar significativamente su ritmo, es decir que con estos resultados el deportista pudo durante el test de 20 minutos subestimarse su capacidad sostenible en comparación con el modelo de PC debido a que la prueba de PC son 3 esfuerzos a máxima intensidad sin regulación de ritmo a diferencia del FTP al ser un test de 20 minutos.

En VT1 la potencia fue prácticamente igual en las dos sesiones : 210W en FTP y 212 W en PC lo que representa una diferencia de solo 0,95% a pensar de esta similitud en la carga externa el VO_2 absoluto fue 6,40% mayor en PC, mientras que la frecuencia cardiaca fue 3,61 % menor, al comparar con la VT1 de la prueba de esfuerzo máximo, ambas sesiones presentaron un VO_2 absoluto inferior siendo 26,18% en FTP y 21,46% en PC, en oposición la potencia fue 20% mayor en FTP y 21,14% mayor en PC respecto a la prueba de consumo máximo de oxígeno, por lo tanto la diferencia de 47 W entre los valores finales FTP Y PC no se manifestó claramente en VT1.

En VT2 las diferencias entre las sesiones fueron mas evidentes, la potencia avanzada durante la PC fue de 317 w frente a 271 W en ftp, lo que presenta un aumento de 16,97% esta mayor carga externa estuvo acompañada por incrementos del 5,16% en el VO_2 absoluto , 6% en VO_2 relativo 5,33 % e la frecuencia cardiaca y 2,31% en la ventilación minuto, en este umbral la mayoría de la potencia si se reflejo en un mayor estrés fisiológico, En VT2, las diferencias entre las sesiones fueron más evidentes. La potencia alcanzada durante PC fue de 317 W, frente a 271 W en FTP, lo que representa un aumento de 16,97 %. Esta mayor carga externa estuvo acompañada por incrementos de 5,16 % en el VO_2 absoluto, 6,00 % en el VO_2 relativo, 5,33 % en la frecuencia cardiaca y 2,31 % en la ventilación

minuto. En este umbral, la mayor potencia de PC se reflejó en una mayor carga fisiológica interna.

Al comparar los resultados del VT2 con los obtenidos durante la prueba de esfuerzo máxima para determinar el consumo máximo de oxígeno, la potencia registrada en FTP fue de 1,12 % superior al valor de referencia, mientras que en PC fue 18,28 % mayor, esto indica que FTP reprodujo con mayor precisión la carga mecánica correspondiente al VT2. Sin embargo, la sesión de PC presentó respuestas fisiológicas más próximas a las observadas en la prueba de esfuerzo, especialmente en la frecuencia cardiaca, la ventilación minuto y el VO_2 relativo. La frecuencia cardiaca fue 0,56 % mayor en PC respecto al CPET, mientras que en FTP fue 4,52 % menor; de igual manera, la ventilación minuto fue 1,96 % inferior en PC y 4,18 % inferior en FTP. En conjunto, FTP mostró una mayor correspondencia con la potencia del VT2, mientras que PC reprodujo de forma más cercana la respuesta cardiorrespiratoria asociada a este umbral.

Desde la variabilidad de la frecuencia cardiaca la sesión de FTP se acompañó de una reducción del RMSSD supino y de un incremento marcado del LF/HF de pie, mientras que PC mostró aumentos muy elevados del RMSSD durante la recuperación. Sin embargo, las grandes diferencias basales entre las sesiones y el valor atípicamente alto del RMSSD de pie después de PC impiden afirmar que una condición produjo una recuperación autonómica superior. Por esta razón, los resultados deben presentarse como respuestas interindividuales descriptivas, acompañando los deltas porcentuales con los valores absolutos y evitando atribuir los cambios únicamente a FTP o PC.

En el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardiaca Después de la sesión el RMSSD fue de 5,8ms con PC y 4,8 ms durante FTP, estos resultados indican una reducción importante de modulación vagal durante el ejercicio dado ir el aumento de intensidad, la frecuencia cardiaca y la demanda metabólico , en FTP y aunque la PC en RMSSD fue de 1,0ms mayor durante la sesión en comparación al FTP esta pequeña diferencia no es significativa para concluir que la PC produjo una mayor activación parasimpática.

En conclusión se presentó la mayor diferencia basal entre las sesiones, cuando se iniciación con PC el RMSSD fue de 5,7 ms en posición supina y de 5,1 ms en posición de pie, mientras que antes de FTP alcanzó 35,9 en posición supina y 20,1 ms en posición de pie, esto significa que se durante la sesión de PC el RMSS supino estaba 84% menos que el de FTP iniciando las sesiones con un estado autonómico diferente muy marcado, en consecuencia no se puede concluir que por FTP o PC se le pueden atribuir a las respuestas durante la prueba debido al estado autonómico previo ya que era muy diferente uno del otro.

El paratleta 4, es un hombre de 32 años, con discapacidad auditiva con masa corporal de 74,8 kg y talla de 175 cm, presentó un FTP de 291 W y una PC de 297 W, correspondientes a 3,89 y 3,97 W·kg⁻¹. La diferencia de 6 W, equivalente a 2,06 % cabe resaltar que esta discapacidad auditiva no está asociada a alteraciones respiratorias, musculares, ventilatorias y cardiacas, sino su principal afectación es mas en la comunicación, la explicación inicial de la prueba, el cambio de intensidad (Akinoglu y Kocahan, 2019).

En VT1, las respuestas de consumo de oxígeno y ventilación fueron muy próximas a las obtenidas durante la prueba de consumo máximo, El VO_2 absoluto fue solamente 1,16 % menor en FTP y 0,78 % menor en PC, mientras que el VO_2 relativo fue idéntico tanto en FTP, PC Y prueba de consumo máximo, de igual manera, la ventilación minuto, VE/VO_2 , VE/VCO_2 y RER presentaron diferencias inferiores al 1 %, lo que indica una elevada similitud de la respuesta ventilatoria entre las sesiones experimentales y la prueba de esfuerzo.

La frecuencia cardíaca fue 6,67 % superior en FTP respecto al consumo de oxígeno máximo mientras que en PC fue solo 0,67 % mayor, por lo que la respuesta cardíaca de PC resultó más próxima al valor de referencia. En contraste, la potencia fue 5,45 % superior en FTP y 19,31 % superior en PC. Por tanto, en VT1, PC produjo respuestas metabólicas y ventilatorias similares al consumo de oxígeno máximo, pero con una potencia considerablemente mayor. Si estos valores corresponden a la potencia realmente ejecutada, el resultado podría reflejar una relación diferente entre carga externa y respuesta fisiológica.

En VT2 también se observó una elevada proximidad entre las condiciones. El VO_2 absoluto fue 1,47 % menor en FTP y 0,88 % menor en PC respecto al CPET. El VO_2 relativo fue 2,22 % menor en FTP, mientras que en PC coincidió con el valor del consumo máximo de oxígeno.

La frecuencia cardíaca fue menor que en el consumo de oxígeno máximo siendo de 3,93 % en FTP y 5,06 % en PC, la potencia también fue inferior, aunque PC volvió a situarse más cerca la prueba de consumo de oxígeno, con una diferencia de -2,44 %, frente a -4,88 % en FTP, en conclusión la PC reprodujo con mayor proximidad el VO_2 absoluto,

el VO_2 relativo y la potencia del VT2 del CPET, aunque la frecuencia cardíaca fue ligeramente más distante.

La diferencia mínima entre FTP y PC produjo modificaciones pequeñas de VO_2 , frecuencia cardíaca y ventilación, esto sugiere que, para este deportista, el 95 % de la potencia media de 20 minutos se aproximó adecuadamente a la asíntota de su relación potencia-tiempo.

Sin embargo, el comportamiento de la variabilidad de la frecuencia cardíaca durante la sesión, el RMSSD fue mayor en PC que en FTP (22,1 frente a 7,6 ms)., sin embargo, este resultado no debe interpretarse directamente como una mayor actividad parasimpática o una menor exigencia fisiológica durante PC. Durante la recuperación en posición supina, el RMSSD fue menor después de PC (12,5 frente a 20,5 ms) y la relación LF/HF fue mayor (2,9 frente a 1,3). Considerados conjuntamente, estos resultados podrían ser compatibles con una reactivación parasimpática inicialmente más lenta y una mayor alteración autonómica residual después de PC. En otras palabras, el sistema cardiovascular habría requerido más tiempo para retornar hacia un estado de recuperación tras esta condición. Sin embargo, esta interpretación debe mantenerse con cautela, porque el deportista ya había iniciado la sesión de PC con un RMSSD más bajo. Por tanto, no es posible establecer si el menor valor posterior fue causado por la sesión o si reflejó, al menos parcialmente, el estado autonómico previo.

En la medición final en posición de pie, el RMSSD continuó siendo ligeramente menor después de PC, mientras que la relación LF/HF permaneció más elevada. Este

comportamiento sugiere que las diferencias entre las condiciones se mantuvieron frente al cambio postural y que la recuperación autónoma posterior a PC podría haber sido menos completa. No obstante, la relación LF/HF no debe interpretarse como una medida directa del predominio simpático, ya que está influenciada por la respiración, la postura y la distribución de la potencia espectral. En conjunto, los resultados muestran que, aunque las cargas externas fueran similares, la sesión prescrita mediante PC se acompañó de una recuperación autonómica diferente y posiblemente más lenta. Esta respuesta fue distinta a la observada en los deportistas 2 y 3, lo que refuerza la existencia de una alta variabilidad individual en la respuesta autonómica a las prescripciones basadas en FTP y PC.

CONCLUSIONES

1. La presente investigación permitió determinar que una sesión de entrenamiento mediante PC y una sesión mediante FTP produce respuestas agudas diferentes en la carga mecánica y en algunos parámetros ventilatorios, respiratorio metabólicos y autonómicos de paratleta de los paratleta evaluados, en términos descriptivos la sesión basada en PC generó una mayor demanda fisiológica principalmente en VT2 en las respuestas pico, mientras que la sesión basada en FTP produjo una respuesta comparativamente más moderada, sin embargo ninguna de las dos comparaciones grupales alcanzó diferencias significativas por consiguiente los resultados deben interpretarse como tendencias fisiológicas observadas en una serie de casos y no como efectos generalizables a toda la población con estas características funcionales.

2. El determinar la PC y el FTP de cada paratleta permitió establecer dos referencias de potencia, aunque ambas métricas se relacionan con la capacidad de sostener esfuerzos de alta intensidad, los resultados mostraron que no fueron intercambiables, la PC mostró potencias superiores en los VT1 y VT2 lo cual corrobora que cada método representa una forma diferente de estimar y organizar la carga externa es decir la elección de PC o FTP puede modificar la intensidad efectivamente ejecutada aún cuando ambos métodos sean utilizados para planificar sesiones orientadas al desarrollo de la resistencia.

3. La prueba de esfuerzo cardiopulmonar permitió establecer la línea de base de los parámetros ventilatorio, respiratorios y metabólicos de cada paratleta, así como

identificar la individual el VT1 y VT2 y las respuestas pico , estos valores constituyen la referencia para determinar la proximidad fisiológica de las sesiones de PC Y FTP, la línea de base también evidenció una importante heterogeneidad entre los paratletas relacionada con sus características funcionales, capacidad cardiorrespiratoria, producción de potencia y modalidad de pedaleo. Esta variabilidad confirma la necesidad de interpretar los resultados de manera individual y de evitar que los valores grupales oculten respuestas particulares relevantes.

4. En el VT1, la sesión basada en PC produjo una potencia 7,15 % superior y un VO_2 absoluto 5,88 % mayor que la sesión FTP, además, los valores de VO_2 , ventilación minuto, equivalentes ventilatorios y RER obtenidos durante PC presentaron, en general, una mayor proximidad a los registrados en la prueba de esfuerzo máximo. No obstante, la frecuencia cardiaca fue prácticamente equivalente entre las dos sesiones y la mayoría de los indicadores ventilatorios mostraron tamaños del efecto bajos. Por tanto, en VT1 la principal diferencia entre PC y FTP se manifestó en una mayor carga mecánica y oxidativa durante PC, sin una modificación proporcional de la respuesta cardiaca o de la eficiencia ventilatoria.

5. En VT2, la sesión basada en PC produjo una diferenciación fisiológica más clara, la potencia fue 11,75 % mayor que durante FTP, mientras que el VO_2 absoluto aumentó 3,87 %, la frecuencia cardiaca 2,27 %, la ventilación minuta 3,05 % y el pulso de oxígeno 6,76 %. Estos resultados indican que al incrementarse la intensidad del ejercicio, la mayor carga externa generada por PC comenzó a producir una mayor respuesta fisiológica. Sin embargo, el incremento de la potencia fue superior al aumento proporcional de las variables

fisiológicas, lo que demuestra que la relación entre carga externa y respuesta fisiológica no fue lineal.

6. Las mayores diferencias entre las métricas se observaron en las respuestas pico, en comparación con FTP, la sesión PC produjo incrementos de 8,06 % en el VO_2 absoluto, 10,40 % en la ventilación minuto, 4,67 % en VE/VO_2 3,42 % en el RER y 8,97 % en el pulso de oxígeno, estas variables presentaron los tamaños del efecto más elevados del análisis cardiorrespiratorio. Es decir la principal manifestación aguda de la sesión basada en PC no se produjo en VT1, sino en VT2 y especialmente, cuando los paratletas se aproximaron a sus respuestas máximas, esto sugiere que la PC puede ser una referencia más exigente para diseñar sesiones dirigidas a generar un elevado estrés fisiológico.

7. En cuanto a la variabilidad de la frecuencia cardiaca, las mediciones previas mostraron que los deportistas no iniciaron las dos condiciones experimentales desde un estado autonómico equivalentes, en la sesión PC, el RMSSD fue menor que antes de FTP tanto en posición supina como cuando el paratleta se ponía de pie, lo que indica una menor modulación vagal basal. Esta diferencia pudo estar influida por fatiga de días anteriores acumulada, entrenamiento previo, sueño, estrés, hidratación u otros factores no controlados, por esta razón, las modificaciones posteriores de la VFC no pueden atribuirse exclusivamente al método de prescripción utilizado.

8. Después de las sesiones, el RMSSD no presentó una dirección uniforme entre los paratletas. en posición supina, algunos participantes mostraron valores mayores después de PC y otros después de FTP. En la medición final de pie, los resultados grupales estuvieron condicionados por valores individuales extremos. Por tanto, no se encontró evidencia

consistente de que una de las dos sesiones retrasara sistemáticamente la recuperación vagal en comparación con la otra.

9. Las características funcionales de los paratletas desempeñaron un papel relevante en la relación entre potencia y respuesta fisiológica. En particular, los deportistas que realizaron pedaleo unilateral pudieron experimentar una elevada carga muscular periférica en la única extremidad activa, sin que esto se refleja proporcionalmente en la frecuencia cardíaca o en el VO_2 de cuerpo completo, por ello, las variables pueden subestimar parcialmente en algunos paratletas, este resultado respalda la necesidad de combinar la potencia, las respuestas cardiorrespiratorias y las características funcionales individuales al prescribir el entrenamiento en paracycling.

10. Finalmente, los resultados resaltan que la prescripción del entrenamiento en paratletas no debería basarse únicamente en el valor de la potencia; la integración de PC o FTP con los umbrales ventilatorios, el VO_2 , la ventilación, la frecuencia cardíaca, la VFC y la respuesta individual permite caracterizar con mayor precisión la relación entre carga externa y respuestas fisiológicas, debido a la cantidad pequeña de participantes y la heterogeneidad funcional y las diferencias autonómicas basales, se recomienda que futuras investigaciones amplíen la muestra, controlen las condiciones previas a las mediciones, incorporen varias líneas basales de VFC y analicen separadamente a los deportistas según su clasificación funcional y modalidad de pedaleo, la cadencia del pedaleo y la velocidad.

REFERENCIAS

Achten, J., ukendrup, A. (2003). Heart rate monitoring: Applications and limitations. *Sports Medicine*, 33(7), 517–538. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333070-00004>

Allen, H., Coggan, A. (2010). *Training and Racing with a Power Meter* (2nd ed.). VeloPress.

Bassett, D., Howley, E. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(1), 70–84.

Beaver, W., Wasserman, K., Whipp, B.. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology*, 60(6), 2020–2027.

Beneke, R. (2003). Methodological aspects of maximal lactate steady state—Implications for performance testing. *European Journal of Applied Physiology*, 89(1), 95–99.

Bhambhani, Y. (2002). Physiology of wheelchair racing in athletes with spinal cord injury. *Sports Medicine*, 32(1), 23–51.

Billman, G. (2011). Heart rate variability: A historical perspective. *Frontiers in Physiology*, 2, 86. <https://doi.org/10.3389/fphys.2011.00086>

Billman, G. (2013). The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Frontiers in Physiology*, 4, 26. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00026>

Billman, G. (2015). Heart rate variability and exercise physiology: Past, present and future. *Frontiers in Physiology*.

Borszcz, F., Tramontin, A., Bossi, A., Carminatti, L., Costa, V. P (2018). Functional threshold power in cyclists: Validity of the concept and physiological responses. *International Journal of Sports Medicine*, 39(10), 737–742. <https://doi.org/10.1055/s-0044-101546>

Borszcz, F., Tramontin, A., Costa, V. . (2019). Is the functional threshold power interchangeable with the maximal lactate steady state in trained cyclists? *International*

Journal of Sports Physiology and Performance, 14(8), 1029–1035.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0572>

Bourdon, P., Cardinale, M., Murray, A., Gastin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., Cable, N. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl. 2), S2-161–S2-170.

Bourdon, P., Cardinale, M., Murray, A., Gastin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., Gabbett, T., Coutts, A., Burgess, D., Gregson, W., Cable, N. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl. 2), S2-161–S2-170.

Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: Do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*, 5, 73.

Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: Do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*, 5, 73. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00073>

Burnley, M., Jones, A. (2018). Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science*, 18(1), 1–12.

Burnley, M., Jones, A. (2018). Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science*.

Caritá, R., Greco, C., Denadai, B. (2013). Oxygen uptake kinetics during exercise performed at critical power in trained and untrained cyclists. *European Journal of Applied Physiology*.

Chicharro, J., Vaquero, A. (2006). *Fisiología del ejercicio*. Editorial Médica Panamericana.

Dekerle, J., Baron, B., Dupont, L., Vanvelcenaher, J., Pelayo, P. (2015). Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *European Journal of Applied Physiology*.

Elmer, S., Martin, J. (2021). Metabolic power and efficiency for an amputee cyclist: Implications for cycling technique. *Journal of Applied Physiology*, 130(2), 479–484. <https://doi.org/10.1152/jap.00661.2020>

Faria, E., Parker, D., Faria, I. (2005). The science of cycling: Factors affecting performance – Part 2. *Sports Medicine*, 35(4), 313–337.

Faude, O., Kindermann, W., Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: How valid are they? *Sports Medicine*, 39(6), 469–490.

Faupin, A., Gorce, P., Meyer, C., Thevenon, A. (2010). Critical power in elite wheelchair athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 31(9), 657–663.

Ferretti, G. (2014). Maximal oxygen consumption in healthy humans: Theories and facts. *European Journal of Applied Physiology*, 114(10), 2007–2036.

Flatt, A., Esco, M., Nakamura, F., Plews, D. (2019). Interpreting daily heart rate variability changes in athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

Foster, C., Florhaug, J., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L., Parker, S., Doleshall, P., Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 109–115.

Friel, J. (2015). *The Cyclist's Training Bible* (5th ed.). VeloPress.

Galán, M. (2020). Relative proximity of critical power and metabolic thresholds: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*.

Galán-Rioja, M., González, F., Poole, D., González M. (2020). Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: Systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(10), 1771–1783. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01314-8>

George, K., Birch, K.. (2015). Heart rate variability and exercise. *Sports Medicine*.

Goosey-Tolfrey, V., Leicht, C. (2013). Field-based physiological testing of elite para-athletes. *Sports Medicine*.

Goosey-Tolfrey, V., Leicht, C. (2016). Field-based physiological testing of elite para-athletes. *Journal of Sports Sciences*, 34(9), 839–847.

Goosey-Tolfrey, V., Jevsevar, D., Porcellato, L. (2018). The physiology of para-athletes: Implications for performance and training. (Eds.), *Training and Coaching the Paralympic Athlete*. Wiley-Blackwell.

Halson, S. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44(Suppl. 2), S139–S147.

Impellizzeri, F. M., Marcora, S. Coutts, A. J. (2019). Internal and external training load: 15 years on. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(2), 270–273.

Jobson, S. Passfield, L., Atkinson, G., Barton, G., Scarf, P. (2009). The analysis and utilization of cycling power output. *Sports Medicine*, 39(10), 833–844.

Jones, A. Burnley, M., Black, M., Poole, D. Vanhatalo, A. (2019). The maximal metabolic steady state: Redefining the gold standard. *Physiological Reports*, 7(10), e14098.

Karsten, B., Jobson, S., Hopker, J., Stevens, L., Beedie, C., Passfield, L. (2015). Comparison of inter-individual variation in the relationship between functional threshold power and maximal lactate steady state. *Journal of Sports Sciences*, 33(7), 1–8.

Karsten, B., Petrigna, L., Klose, A., Bianco, A., Townsend, N., & Triska, C. (2021). Relationship between the critical power test and a 20-min functional threshold power test in cycling. *Frontiers in Physiology*, 11, Article 613151. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.613151>

Kiss, O.(2016). Heart rate variability in athletes. *European Journal of Sport Science*.

Leo, P., Spragg, J., Simon, D., Lawley, J., Mujika, I. (2020). Training with power in cycling: Current evidence and future directions. *Sports Medicine*.

Leo, P., Spragg, J., Simon, D., Lawley, J.,Mujika, I. (2022). Training with power in cycling: Current evidence and future directions. *Sports Medicine*, 52, 1–20.

Meyer, T., Lucia, A., Earnest, C.,Kindermann, W. (2005). A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters: Theory and application. *International Journal of Sports Medicine*, 26(Suppl. 1), S38–S48.

Michael, S., Graham, K. Davis, G. (2017). Cardiac autonomic responses during exercise and implications for training adaptation: A systematic review. *Sports Medicine*.

Monod, H. Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*, 8(3), 329–338.

Morton, R. (2006). The critical power and related whole-body bioenergetic models. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 339–354.

Ortigosa, M. (2018). Heart rate variability as a monitoring tool in sport. *Journal of Sports Sciences*.

Passfield, L., Hopker, J., Jobson, S., Friel, D., Zabala, M. (2017). Knowledge is power: Issues of measuring training and performance in cycling. *Journal of Sports Sciences*.

Paulson, T. Goosey-Tolfrey, V. (2017). Current perspectives on cardiovascular responses in Paralympic sport. *Sports Medicine*.

Plews, D., Laursen, P., Stanley, J., Kilding, A. Buchheit, M. (2013). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes. *Sports Medicine*, 43(9), 773–781.

Poole, D., Jones, A. (2012). Oxygen uptake kinetics. *Comprehensive Physiology*, 2(2), 933–996.

Poole, D, Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H, Jones, A.(2016). Critical power: An important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(11), 2320–2334. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000939>

Sanders, D., Heijboer, M., Hesselink, M. Myers, T., Akubat, I. (2017). Analysing a cycling grand tour: Can we monitor fatigue with intensity or load? *Journal of Sports Sciences*, 35(14), 1385–1391.

Seiler, S. (2010). What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 276–291.

Shaffer, F., Ginsberg, J. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*, 5, 258.

Souza, K., Lucas, R., Grossl, T., Trindade, E. Costa, V. (2016). Critical power estimated by different methods in cyclists. *Journal of Sports Sciences*.

Stanley, J., Peake, J, Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: Implications for training prescription. *Sports Medicine*, 43(12), 1259–1277.

Stone, B., Goosey, f , Mason, B. (2019). Physiological profiles of elite paracyclists across functional classifications. *European Journal of Sport Science*, 19(6), 780–788

Stone, B., Goosey-Tolfrey, V. Mason, B. (2019). Physiological profiles of elite paracyclists across functional classifications. *European Journal of Sport Science*.

Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *European Heart Journal*, 17(3), 354–381.

Tweedy, S.M Vanlandewijck, C. (2011). International Paralympic Committee position stand—Background and scientific principles of classification in Paralympic sport. *British Journal of Sports Medicine*, 45(4), 259–269.

Union Cycliste Internationale. (2023). UCI Cycling Regulations – Para-cycling. <https://www.uci.org/regulations>

Valenzuela, P. Alejo, B., Talavera, E., Barranco, D. (2018). The functional threshold power is not equivalent to the maximal lactate steady state in trained cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

Vanhatalo, A., Black, M. DiMenna, F., Blackwell, J., Schmidt, J. Thompson, C., Wylie, L. Jones, A (2016). The mechanistic bases of the power–time relationship: Muscle metabolic responses and fatigue. *Journal of Physiology*.

Vanhatalo, A., Doust, J., Burnley, M. (2011). Determination of critical power using a 3-minute all-out cycling test. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(3), 548–555.

Wasserman, K., Hansen, J., Sue, D., Stringer, W., Sietsema, K., Sun, X., Whipp, B. (2012). *Principles of Exercise Testing and Interpretation* (5th ed.).

Åstrand, P., Rodahl, K. (1992). *Textbook of Work Physiology: Physiological Bases of Exercise* (3rd ed.). McGraw-Hill

Jones, A. Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. Poole, D.. (2010). Critical power: Implications for determination of VO_2max and exercise tolerance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(10), 1876–1890. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181d9cf7f>

Menaspà, P., Rampinini, E., Tonetti, L., Bosio, A. (2012). Physical fitness and performances of an amputee cycling world champion: A case study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 7(3), 290–294. <https://doi.org/10.1123/ijsp.7.3.290>

Anexo 1. Plantilla del Consentimiento informado



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL
Educadora de educadores

Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Educación Física
Maestría en Ciencias del Deporte y la Actividad Física
Consentimiento informado para participar en un estudio de investigación

Título del estudio: EFECTOS AGUDOS DE UNA SESIÓN DE ENTRENAMIENTO BASADA EN LA PC Y UNA SESIÓN BASADA EN EL FTP SOBRE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDÍACA Y LOS PARÁMETROS VENTILATORIOS, RESPIRATORIOS Y METABÓLICOS EVALUADOS EN LOS UMBRALES VENTILATORIOS VT1 Y VT2 EN PARATLETAS.

El propósito de este documento es ayudarle a tomar una decisión informada para decidir si participa o no en el estudio. Lea cuidadosamente este formulario y realice todas las preguntas que tenga, para asegurar que entiende los procedimientos del estudio, riesgos y beneficios; de tal forma que **usted** pueda decidir voluntariamente si desea participar o no. Si luego de leer este documento tiene alguna duda, pida al investigador que le explique. Sienta absoluta libertad para preguntar sobre cualquier aspecto que le ayude a aclarar sus dudas.

Una vez que haya comprendido el estudio y si **usted** desea participar, firme este consentimiento. Usted recibirá una copia firmada y fechada.

1. Propósito del estudio:

Observar los efectos agudos de una sesión de entrenamiento basada en la PC y una sesión basada en el FTP sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los parámetros ventilatorios, respiratorios y metabólicos evaluados en los umbrales ventilatorios vt1 y vt2 en paratletas.

Usted puede participar en el estudio si: Usted puede participar en el estudio si: a) Esta entrenando de manera continua, con un mínimo de 10 horas semanales; b) Tiene más de 2 años de antigüedad en su práctica deportiva; c) No presenta lesiones que limiten su participación en la evaluación; d) Contar con certificación de clasificación funcional emitida por la federación correspondiente; e) Haber obtenido medallas en eventos distritales, nacionales o internacionales. Los criterios de exclusión inducen: a) Estar en proceso de clasificación funcional no finalizado; b) No tener afiliación activa al sistema de salud; c) Estar sancionado por la WADA; d) No contar con un entrenador o un plan de entrenamiento estructurado.

2. Justificación.

El paracycling es una disciplina paralímpica en expansión que reúne atletas con diversas discapacidades, pero aún enfrenta una limitada evidencia científica sobre métodos de

entrenamiento específicos. Existen vacíos en la comprensión de cómo estrategias basadas en la Potencia Crítica (PC) y el Umbral de Potencia Funcional (FTP) influyen en variables determinantes del rendimiento, como la variabilidad de la frecuencia cardíaca y la producción de lactato. Las particularidades fisiológicas y biomecánicas de los paratletas —asimetrías, amputaciones o alteraciones del tono muscular— modifican la forma en que se regula la carga interna y se produce potencia, por lo que es necesario adaptar los modelos tradicionales de entrenamiento al contexto paralímpico.

Este estudio busca generar evidencia aplicada que permita diseñar programas más precisos e individualizados, fortaleciendo el rol del entrenador como analista funcional capaz de tomar decisiones fundamentadas. Además, ofrece información comprensible para deportistas con discapacidad intelectual y herramientas para optimizar el rendimiento de quienes presentan discapacidad física. Su impacto trasciende el ámbito deportivo, promoviendo la inclusión y la equidad, y contribuyendo al desarrollo académico en un campo con escasa producción científica como el paracycling.

3. Objetivos.

Determinar los efectos agudos de una sesión de entrenamiento basada en PC y una basada en el FTP sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los parámetros ventilatorios, respiratorios y metabólicos evaluados en los umbrales ventilatorios VT1 y VT2 en paratletas.

4. Procedimientos

Los procedimientos que se van a realizar no pretenden aclarar ninguna cuestión clínica.

Usted deberá asistir durante 9 días, en un primer momento un primer día para la evaluación del consumo de oxígeno, los umbrales ventilatorios y el Coeficiente Respiratorio. Este protocolo se realizará pedaleando en un cicloergómetro, iniciará con un calentamiento de 5 minutos de pedaleo a 50W sin incremento. Posterior a ello de forma Incremental comenzará con cadencia de pedaleo a 50 rpm con una constante de 80 W de aquí en adelante se tendrá un incremento continuo de carga de 5 vatios cada 12 segundos (25 vatios por minuto) hasta alcanzar el agotamiento voluntario, durante esta prueba se controlará los umbrales ventilatorios 1 VT1 Y umbrales ventilatorios 2 VT2, como también su Coeficiente Respiratorio. La frecuencia del pulso se monitorizará para analizar sus variaciones, la prueba se detendrá si aparecen síntomas o signos alarmantes de lo contrario seguirá la evaluación.

Luego los 8 días restantes serán para la realización del experimento para determinar la Potencia Crítica CP, la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca HVR. Para el desarrollo de todas las pruebas contempladas en este estudio, corresponderá que cada sesión tendrá una diferencia de 72 horas de realización entre ellas. La prueba simulada de esfuerzo según su Vo2max y las variaciones de las intensidades en relación con las cadencias de pedaleo durará hasta que el deportista se agote y superar los 60 rpm a la baja, esta se realizará pedaleando en la bicicleta de cada uno, mientras usted realiza dicho ejercicio. La prueba se detendrá si aparecieran síntomas o signos alarmantes. Adicionalmente dentro de cada prueba se realizará una toma de una mínima gota de sangre extraída de la yema de su dedo o su oreja antes y después de la competencia simulada.

5. Beneficios del estudio; en términos científicos, sociales, o individuales.

Los beneficios que usted obtendrá de este estudio son los siguientes: el grupo de investigadores le entregará un informe donde podrá ver el comportamiento y desempeño de su organismo con una relación de alto desempeño y una de máximo desempeño, junto con un análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca con intensidades al 90% 95% 100% y 110% el nivel pulmonar máximo (volumen de oxígeno) y la potencia crítica ideal para las diferentes pruebas que usted realiza. Además, se incluirán mediciones precisas de la cadencia de pedaleo, el coeficiente de respiración (relación entre el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono) y los umbrales ventilatorios (VT1 y VT2), que le permitirán entender su capacidad aeróbica y anaeróbica durante el ejercicio. Por otra parte, se espera que con los datos adquiridos de la potencia crítica usted junto con su entrenador va a realizar, se determine cuál de los métodos se ajusta a sus características y necesidades, y de esta forma usted pueda preparar de manera precisa y adecuada su temporada deportiva. A su vez se espera que, con los datos recolectados, se pueda incidir positivamente en los procesos de control, seguimiento y planificación deportiva en paracycling.

6. Riesgos asociados al estudio

De forma excepcional se pueden presentar síntomas (cansancio muscular, mareo, dolor de pecho –angina-, dolor en las piernas) o signos (hipertensión arterial) que se aliviarán o desaparecerán al cesar la actividad física. En ciertos casos debido a situaciones clínicas y circunstancias particulares de los participantes como enfermedad coronaria importante (excepcionales en deportistas sanos), pudieran presentarse trastornos del ritmo cardíaco graves, síncope y muy ocasionalmente infarto de miocardio o insuficiencia cardíaca; el riesgo de muerte es excepcional (1 por 10.000). Durante la exploración se controlan la presión arterial, la frecuencia cardíaca y el electrocardiograma (la actividad del corazón), para analizar sus variaciones. La prueba se detendrá si aparecieran síntomas o signos alarmantes. Es importante que sepa que puede suspender la prueba voluntariamente, si lo desea, por sentir fatiga u otras molestias que no fuesen obvias para los evaluadores en cualquier momento.

7. Confidencialidad y almacenamiento de la información:

La confidencialidad de su información será privada y respetada, el estudio tiene como propósito explicar de forma detallada los beneficios y los riesgos que conlleva para usted la participación en el estudio, así mismo, se socializarán los resultados obtenidos de manera personal al deportista si así lo desea, sin comprometer su identidad.

Toda la información obtenida y los resultados de la investigación serán tratados confidencialmente; en virtud de ello, esta información será archivada en papel y/o medio electrónico. Los archivos del estudio se guardarán en el repositorio de la Universidad Pedagógica Nacional, Sede Bogotá, bajo la custodia del grupo de investigación conformado por los estudiantes Julie Acevedo Ramírez, Cristian Alejandro Valbuena Rubiano, y el Dhr Jairo Alejandro Fernández Ortega, adscrito al programa académico Maestría en ciencias del deporte y la actividad física, perteneciente a la Facultad de educación física de la Universidad Pedagógica Nacional, y la responsabilidad de los investigadores participantes en el proyecto.

Puesto que toda la información en este proyecto de investigación es llevada bajo condición de anonimato, los resultados personales no pueden estar disponibles para terceras personas como empleadores, organizaciones gubernamentales, compañías de seguros, medios de comunicación etc.

8. Protección de la identidad

Toda información o datos que pueda identificar al participante serán manejados confidencialmente, se tomarán las siguientes medidas de seguridad, solamente, tendrán acceso a los datos que puedan identificar a un participante, los miembros del equipo de investigación.

Teniendo en cuenta la validación del proyecto por el comité de ética, donde los datos suministrados y recolectados serán protegidos sin poner en evidencia a los participantes, así mismo, la integridad será respetada y respaldada por la metodología del estudio, donde no hay conflicto de intereses en la investigación garantizando una imparcialidad en lo datos obtenidos. El acceso a los datos solamente podrá ser tratado por los investigadores del estudio.

Las medidas de seguridad serán las siguientes:

1. Eliminar toda información identificativa de los participantes (anonimato).
2. Utilización de códigos numéricos o alfanuméricos para la identificación del participante (códigos de identificación).
3. El almacenamiento de los datos se realizará en lugares seguros y con acceso solo para los investigadores del estudio.

NOTA; No divulgaremos ninguna información de Usted. Cuando los resultados de la investigación sean publicados o se discutan en conferencias científicas, no se incluirá información que pueda revelar su identidad. Toda divulgación de la información obtenida se realizará con fines científicos y/o pedagógicos.

Yo: _____
Identificado/a con cédula de ciudadanía N° _____ de _____
Declaro haber sido informado/a de los objetivos y procedimientos del estudio y del tipo de participación y certifico que he leído atentamente este formulario y aceptó participar libremente y doy mi consentimiento con pleno conocimiento de la naturaleza y finalidad de los procedimientos, los beneficios que se puede esperar, manifiesto que soy consciente de los posibles riesgos asociados a las exigencias durante el estudio y autorizo el uso y la divulgación de mi información a las entidades mencionadas en este Consentimiento Informado para los propósitos descritos anteriormente. El consentimiento lo otorgó de manera voluntaria y sé que soy libre de retirarme del estudio en cualquier momento, por cualquier razón y sin que tenga ningún efecto negativo y asumo voluntariamente los riesgos mencionados con anterioridad y sus consecuencias, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad Pedagógica Nacional y al grupo de investigadores encargados de este estudio.

Firma del participante

Fecha _____

Para cualquier pregunta que desee realizar durante el proceso de investigación puede contactarse con Julie Acevedo Ramirez, Cristian Alejandro Valbuena Teléfono: 3192784465 y 3165759420 Correo electrónico jjacevedor@pedagogica.edu.co cavalbuenar@pedagogica.edu.co

Anexo 2. Planilla de registro variabilidad de la frecuencia cardíaca (HVR)

Nombre del deportista _____ Fecha _____ FTP / PC _____

Hora de inicio _____

ACTIVIDAD		Minutos	Inicio de registro			Finalización del registro		
Actividad	Min.		Hora	Min.	Seg.	Hora	Min.	Seg.
Llegada, cambiada, conexión de banda	5							
Acostados en camilla	10							
Toma de lactato acostado	1							
Medición de variabilidad posición supina	7							
Cambio de posición acostado a pie	—							
Variabilidad en pie	5							
Calentamiento. Altura del sillón y equipo de F.R.G.O listo	5							
Calentamiento A	8							
Calentamiento B	8							
Calentamiento C	—							
INTERVALO	—							
Recuperación	1							
INTERVALO	—							
Recuperación	1							
INTERVALO	—							
Recuperación	3							
Prueba	40							
Recuperación dinámica	3							
Descanso sentado	2							
Toma de lactato sentado	1							
Variabilidad - Descanso	60							
Cambio de posición	—							
Posición de pie	5							

Observaciones

1. _____