Selected Papers from Impact

El Uso de una Batería de Pruebas Funcionales como Método No Invasivo de Evaluación de la Fatiga

The Use of a Functional Test Battery as a Non-Invasive Method of Fatigue Assessment

Steven Hughes, Dale W. Chapman, G. Gregory Haff y Sophia Nimphius

RESUMEN

Para evaluar si una batería de marcadores de rendimiento, tanto individual como en grupo, era sensible a la fatiga, un diseño cruzado aleatorio dentro de grupo comparó múltiples variables durante las condiciones de control en sedestación y de fatiga (ciclismo de sprints repetidos). Treinta y dos participantes físicamente activos completaron: cuestionario de fatiga neuromuscular, prueba de Stroop, balanceo postural, squat jump, countermovement jump, isometric mid-thigh pull y ciclismo de sprint máximo de 10 seg (Sprintmax) antes y después de cada condición (15 min, 1 h, 24 h y 48 h). En comparación con el control, se observaron mayores disminuciones en la puntuación total del cuestionario de fatiga neuromuscular 15 min (5,20 ± 4,6), 1 h (3,33 ± 3,9) y 24 h (1,83 ± 4,8) después del ciclismo. De manera similar, la condición de fatiga provocó mayores descensos que el control a los 15 min y 1 h en la altura del countermovement jump (1,67 ± 1,90 cm y 1,04 ± 2,10 cm), la relación entre el tiempo de vuelo y el tiempo de contracción (0,03 ± 0,06 y 0,05 ± 0,11), y la velocidad (0,06 ± 0,07 m•s-1 y 0,04 ± 0,08 m•s-1). Después de la fatiga, se observaron disminuciones hasta 48 h para la cadencia media de Sprintmax (4-6 RPM), hasta 24 h en la cadencia máxima de Sprintmax (2-5 RPM) y hasta 1 h en la potencia media y máxima de Sprintmax (45 ± 60 W y 58 ± 71 W). La modelización de variables en una regresión por pasos demostró que la altura del CMJ explicaba el 53,2% y el 51,7% de la potencia media de salida de 24 h y 48 h del Sprintmax. Sobre la base de estos datos, la fatiga inducida por el ciclismo de sprints repetidos coincidió con cambios en la percepción de la fatiga y marcadores de rendimiento durante los countermovement jumps y los squat jumps. Además, la modelización de regresiones múltiples reveló que una sola variable (altura de countermovement jump) explicaba la potencia media de salida.

Palabras Clave: control, fatiga, batería, pruebas funcionales

ABSTRACT

To assess whether a battery of performance markers, both individually and as group, would be sensitive to fatigue, a within group random cross-over design compared multiple variables during seated control and fatigue (repeated sprint cycling) conditions. Thirty-two physically active participants completed a neuromuscular fatigue questionnaire, Stroop task, postural sway, squat jump, countermovement jump, isometric mid-thigh pull and 10 s maximal sprint cycle (Sprintmax) before and after each condition (15 min, 1 h, 24 h and 48 h). In comparison to control, larger neuromuscular fatigue questionnaire total score decrements were observed 15 min (5.20 ± 4.6), 1 h (3.33 ± 3.9) and 24 h (1.83 ± 4.8) after cycling. Similarly, the fatigue condition elicited greater declines than control at 15 min and 1 h post in countermovement

jump height (1.67 ± 1.90 cm and 1.04 ± 2.10 cm), flight time-contraction time ratio (0.03 ± 0.06 and 0.05 ± 0.11), and velocity (0.06 ± 0.07 m•s-1 and 0.04 ± 0.08 m•s-1). After fatigue, decrements were observed up to 48 h for average Sprintmax cadence (4–6 RPM), up to 24 h in peak Sprintmax cadence (2–5 RPM) and up to 1 h in average and peak Sprintmax power (45 ± 60 W and 58 ± 71 W). Modelling variables in a stepwise regression demonstrated that CMJ height explained 53.2% and 51.7% of 24 h and 48 h Sprintmax average power output. Based upon these data, the fatigue induced by repeated sprint cycling coincided with changes in the perception of fatigue and markers of performance during countermovement and squat jumps. Furthermore, multiple regression modelling revealed that a single variable (countermovement jump height) explained average power output.

Keywords: control, fatigue, battery, functional tests

INTRODUCCIÓN

La capacidad de controlar eficazmente la fatiga es muy requerida por los entrenadores y los científicos del ejercicio de los deportistas de élite. Clásicamente, la fatiga neuromuscular se ha definido como una reducción aguda en el rendimiento de la tarea que incluye tanto un mayor esfuerzo percibido para ejercer fuerza como una eventual incapacidad para producir fuerza [1]. En el deporte, la fatiga se manifestaría como una reducción en la capacidad de realizar el movimiento, ejercicio o habilidad deseada y puede abarcar fatiga metabólica y/o neuromuscular y/o cognitiva. En el deporte de alto rendimiento se utilizan a menudo varios marcadores de rendimiento para evaluar la fatiga, como cuestionarios perceptivos [2, 3], pruebas de salto [2, 4], carreras máximas y submáximas [2], variables de frecuencia cardíaca [2, 3], niveles hormonales [5] y mediciones del balanceo postural [4].

La capacidad de controlar eficazmente la fatiga de los deportistas proporciona a entrenadores y científicos la capacidad de comprender mejor el entrenamiento de fuerza y la periodización del acondicionamiento, así como la adaptación y la respuesta de tapering. Una comprensión más profunda de la periodización, la adaptación y el tapering permite una mejor aplicación a los procesos típicamente empleados para optimizar el entrenamiento o mejorar el rendimiento de la competición. Sin embargo, a pesar de una gran cantidad de investigaciones en el área de la fatiga deportiva, los marcadores de rendimiento individuales rara vez han sido definitivos en todas las situaciones [6-8], lo que sugiere que ningún marcador es capaz de reflejar verdaderamente el estado de fatiga. Esto se debe probablemente a la naturaleza de la fatiga, en la que los mecanismos fundamentales dependen del tipo de tarea realizada y se confunden con la motivación de los participantes, el estado psicológico, el patrón de activación muscular, la intensidad, la duración y la naturaleza continua o intermitente de la tarea [9]. Por esta razón, tal vez sea necesario un nuevo enfoque de la utilización de marcadores de rendimiento. Aunque la investigación se ha centrado en marcadores individuales [10, 11] o múltiples como una medida de la fatiga [4, 8, 12], rara vez la investigación sobre marcadores de rendimiento múltiples ha utilizado un enfoque de modelización para explicar la fatiga. La naturaleza multifactorial de la fatiga puede sugerir que puede no existir una prueba única y completa para medir la fatiga. Por lo tanto, la presente investigación pretendía evaluar si una gama de marcadores de rendimiento disminuiría en respuesta a un protocolo de fatiga de ciclismo de velocidad de alta intensidad en una serie de puntos temporales hasta 48 horas después de la inducción de la fatiga. El segundo objetivo de esta investigación fue evaluar si un análisis de regresión por pasos de los marcadores de rendimiento explicaría las disminuciones en el rendimiento del ciclismo de sprint máximo de 10 seg (Sprintmax).

Los cambios en el rendimiento de los participantes sanos y activos se midieron antes y después de un protocolo de fatiga utilizando una variedad de marcadores de rendimiento independientes que reflejaban la naturaleza multifactorial y el origen de la fatiga. Los marcadores de rendimiento tenían como objetivo evaluar las percepciones internas de la fatiga mediante un cuestionario estándar, la función cognitiva a través del test de Stroop y aspectos de las funciones de control autónomo del sistema nervioso central a través de los tests de balanceo postural. Además, se evaluó la capacidad de movimiento, la fuerza y la potencia de las extremidades inferiores mediante pruebas de salto e isométricas de fuerza. Se eligieron múltiples tareas en base a una serie de funciones corporales que, según los informes, son sensibles a la fatiga [3, 4, 13] en respuesta a muchas formas de ejercicio, con la hipótesis de que, por lo tanto, es más probable que una amplia gama de pruebas aumente la sensibilidad a una amplia gama de estímulos de fatiga. Después de identificar las variables más sensibles a una tarea fatigosa, se modeló su capacidad para dilucidar la relación entre aptitud física y fatiga. Los resultados de este trabajo pueden ayudar a informar a los entrenadores y científicos deportivos sobre la predicción y comprensión de la preparación de un deportista para los próximos estímulos de entrenamiento.

MÉTODOS

Se utilizó un diseño cruzado aleatorio dentro de grupo para comparar la batería de pruebas de fatiga a través de múltiples puntos de tiempo y evaluar la sensibilidad de los marcadores de rendimiento a un control en sedestación asignado al azar y a una condición de ejercicio de ciclismo de sprint repetido.

Participantes

Treinta y dos participantes físicamente activos (24 hombres: 27,8 ± 7,6 años; 81,4 ± 11,1 kg y 8 mujeres: 24,5 ± 3,5 años; 69,0 ± 14,1 kg) fueron reclutados en cursos de ciencias del deporte y la salud en instituciones locales. Cada participante completó todas las sesiones de pruebas del estudio. Los participantes estaban familiarizados con el ejercicio de fuerza con un historial de al menos 6 meses de entrenamiento general de fuerza. Se pidió a los participantes que evitaran cualquier ejercicio extenuante 24 horas antes de la prueba y durante el período de evaluación de seguimiento de 24 horas y 48 horas. Un período de al menos 24 horas separó los bloques de familiarización, control y fatiga. A cada participante se le proporcionó una comida estandarizada (CHO = 1-1,5 g•kg-1; Proteína = 0,3 g•kg-1, Grasa = 0,28-0,47 g•kg-1) que se consumió 2 horas antes de todas las sesiones de prueba y un frasco de 600 ml (618 kJ) de bebida deportiva Gatorade (PepsiCo, Nueva York, EEUU) durante las sesiones de prueba. Se instruyó a los participantes para que evitaran el consumo de café antes de las sesiones de prueba y se les pidió que mantuvieran su ingesta nutricional actual durante todo el estudio.

Los participantes asistieron a siete sesiones de prueba de laboratorio, una de familiarización y tres sesiones para las condiciones de control y fatiga. La configuración de la bicicleta, la evaluación de la altura del isometric mid-thigh pull (IMTP) y la familiarización con la muñequera se completaron durante la sesión de familiarización para garantizar que los procedimientos de prueba fueran correctos durante cada una de las seis sesiones.

Para ambas condiciones, los participantes completaron evaluaciones de marcadores de rendimiento iniciales seguidas por la intervención o el control. Después de esto, los participantes completaron evaluaciones de marcadores de rendimiento en múltiples puntos de tiempo (15 minutos, 1 hora, 24 horas y 48 horas) después de la intervención (control o fatiga) (Fig. 1). Las seis pruebas de rendimiento se completaron por cada participante en un orden consistente establecido como mínimo para la mayoría de los esfuerzos metabólicos [14]; el cuestionario de fatiga neuromuscular (NFQ), el test de Stroop, el balanceo postural, el squat jump (SJ), el countermovement (CMJ), el IMTP y el ciclismo de sprint máximo de 10 seg.

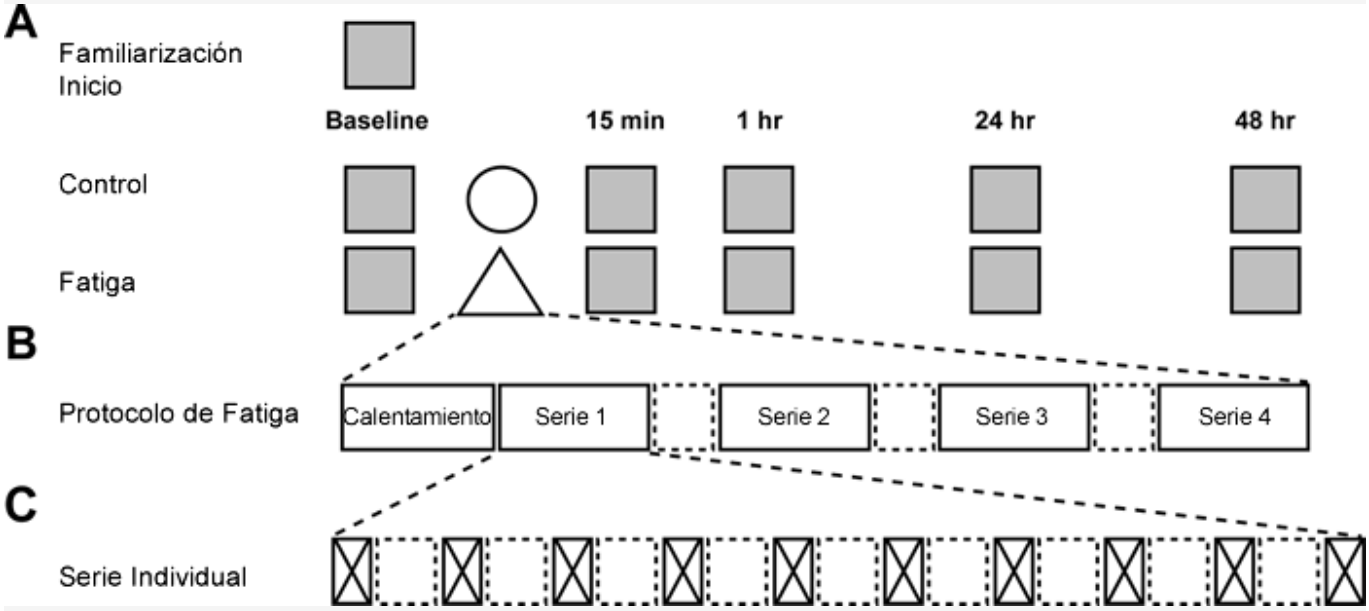

Figura 1. *Resumen del protocolo del estudio.*

(A) Prueba de la Batería de pruebas de fatiga (cuadrados grises) con protocolo de control (círculo) e intervención de fatiga (triángulo). (B) Intervención de fatiga que consiste en 4 series de sprint intercalados con recuperación activa de 90 seg

(cuadrado discontinuo). (C) Distribución de la serie de sprint que consiste en 10 x 6 seg de sprints (rectángulo con cruz) con 30 seg de recuperación activa (cuadrado discontinuo).

El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de Investigación en Humanos de la Universidad Edith Cowan (Aprobación #16284). A cada participante se le proporcionó un resumen escrito de los requisitos del estudio y se le dieron instrucciones verbales sobre cómo realizar todas las tareas de prueba y ejercicios. Después de la oportunidad de responder a cualquier pregunta específica, se obtuvo el consentimiento informado por escrito de todos los participantes.

Procedimientos

Protocolo de Fatiga.

Se modificó un protocolo de sprint repetido [15, 16] previamente utilizado (ver Fig. 1B) y se realizó en un cicloergómetro Wattbike (Nottingham, UK-Version 2.50.49). El protocolo modificado consistió en 4 series de sprints máximos de 10 x 6 seg con una recuperación activa de 30 seg entre sprints y una recuperación activa adicional de 90 seg entre series. Con la adición de un calentamiento de 5 minutos, la duración del protocolo fue de 33,5 minutos con un tiempo de sprint combinado de 4 minutos y 24,5 minutos de recuperación activa.

Batería de Pruebas de Fatiga.

En cada día de prueba se completó un calentamiento estandarizado que consistía en 7 minutos de ciclismo de intensidad auto-seleccionada, 10 x 3 kg de sentadilla/press de hombros con pelota medicinal, 10 x 3 kg de pase de pecho con pelota medicinal, 6 x sentadillas de peso corporal y 6 x CMJ de peso corporal.

Cuestionario de Fatiga Neuromuscular.

Se utilizó una adaptación del cuestionario "calidad de vida neuromuscular individualizada" [17] para evaluar la fatiga perceptiva y el funcionamiento de los participantes. El cuestionario adaptado incluía cuatro preguntas contestadas utilizando una escala de 7 puntos de Likert para evaluar los niveles de cansancio/fatiga general, fatiga muscular específica, dolor como resultado de la fatiga muscular, así como la dificultad para realizar las tareas cotidianas. La escala de Likert utilizó una calificación de 0 a 6, siendo 0 "nada" y 6 "una cantidad extrema".

Test de Stroop.

El test de Stroop utilizado para evaluar el estado cognitivo consistió en dos series de 30 diapositivas de PowerPoint (Microsoft, EEUU) (6 colores x 5 diapositivas) mostradas en colores de tinta incongruentes. Se pidió a los participantes que articularan el color de la tinta y no la palabra escrita, con una excepción a esta regla si la tinta se mostraba en rojo [18]. Cada diapositiva progresó sólo después de una respuesta correcta, con el tiempo total necesario para completar las 30 diapositivas grabadas. Las series seleccionadas se asignaron aleatoriamente de cinco series para evitar posibles efectos de aprendizaje.

Balanceo Postural.

Los participantes realizaron una prueba de equilibrio postural estático de 30 segundos descalzos sobre una plataforma de fuerza (9286BA, Kistler, Winterthur, Suiza) posicionada a 0,35 m delante de una pared en blanco para eliminar puntos de referencia visuales. Las recolecciones de datos de 30 seg se completaron utilizando el software MARS (2875A, Kistler, Winterthur, Suiza) y se tomaron muestras a 1000 Hz. Los participantes se colocaron con una base de apoyo del hallux y la cabeza del quinto metatarso a 0,10 m de distancia y realizaron 3 x 30 seg estando de pie tranquilos, uno en cada una de las siguientes condiciones; cabeza hacia adelante con posición neutra del cuello y ojos abiertos, cabeza hacia adelante con posición neutra del cuello y ojos cerrados, y cabeza hacia atrás y ojos cerrados (30° en el plano sagital). Se dio un período de reposo en sedestación de 45 seg entre las pruebas con éstas completadas en orden de dificultad de tarea (control postural). Para cada una de las tres condiciones se calculó la longitud total del trayecto de balanceo, la velocidad total de balanceo y el 100% del área de una elipse. El software MARS definió la longitud total del trayecto de balanceo (mm) como la trayectoria combinada del centro de presión y calculó la velocidad de balanceo (mm•s-1) dividiendo la longitud total del trayecto de balanceo por la duración de la recolección. Finalmente, el 100% del área de una elipse (mm2) se definió como el área de una elipse ajustada sobre la trayectoria del centro de presión de manera que contuviera el 100% de los puntos de los datos.

Squat Jump, Countermovement Jump e Isometric Mid-Thigh Pull.

Se completaron tres pruebas separadas de función muscular; SJ sólo concéntrico, CMJ e IMTP utilizando plataformas de fuerza (9286BA, Kistler, Winterthur, Suiza) muestreadas a 1000 Hz.

Los participantes completaron dos series de tres SJ con peso corporal y CMJ con una barra de aluminio ligera (0,4 kg) sostenida sobre los hombros. Se dieron instrucciones para saltar lo más alto posible mientras "se empuja desde el suelo lo más fuerte y rápido posible". Entre repeticiones, se dieron 10 seg de descanso y 45 seg de descanso entre cada serie. Para el SJ, los participantes mantuvieron una sentadilla isométrica con una flexión de rodilla de 90° auto-seleccionada durante 3 seg antes de saltar verticalmente. Se descartaron y se repitieron todas las pruebas con un descenso de la fuerza excéntrica >5%. El CMJ consistía en un contramovimiento antes de un salto vertical máximo.

El protocolo de IMTP requería que los participantes en una plataforma de fuerza traccionaran lo más fuerte posible durante 3 seg sobre una barra inmóvil (25 mm de diámetro; 460 MPa [min] Tensile Strength; 370 MPa [min] Yield Stress). La barra se fijó en un rack de potencia personalizado (Crossrig, Aussie Strength Equipment, Australia). El posicionamiento del cuerpo se estableció según lo descrito por Haff et al. [19] con la altura de la barra registrada y replicada para cada sesión de prueba. Las correas de la muñeca se utilizaron para asegurar el máximo agarre con instrucciones de enfoque externo para "empujar el suelo tan fuerte y tan rápido como sea posible" [20] proporcionadas a los participantes. Se realizaron dos repeticiones separadas por 2 minutos de descanso y una tercera repetición si se veía una diferencia de 200 N entre la fuerza máxima de los dos esfuerzos.

El registro y cálculo de las variables se realizó utilizando el software Templo Jump Analysis (Versión 2016.1.404 Contemplas GmbH, Kempten, Alemania) con las variables SJ y CMJ de la velocidad máxima (m•s-1) y la altura máxima de salto (cm) calculadas a partir de trazas de fuerza de reacción en el suelo, y fuerzas relativas (N•kg-1) de SJ, CMJ e IMTP calculadas utilizando la fuerza máxima de reacción en el suelo y el peso corporal. La relación tiempo de vuelo/tiempo de contracción (FT:CT) se calculó para el SJ y el CMJ con el tiempo de contracción representado como la diferencia de tiempo entre que el sujeto abandona la plataforma de fuerza y la contracción concéntrica del SJ o el inicio del contramovimiento en el CMJ [21].

Ciclismo de Sprint de 10 segundos.

El Sprintmax se completó en un alto momento de inercia del volante del ciclo-ergómetro de frenado por aire (AIS, Australia). La potencia de salida fue registrada en los cigüeñales del ciclo-ergómetro utilizando un medidor de potencia SRM versión científica (8 galgas extensométricas) (Schoberer Rad Meßtechnik, Alemania) con una frecuencia de muestreo de 2 Hz. El medidor de potencia SRM fue calibrado dinámicamente antes de la prueba. La posición del asiento y del manubrio del ergómetro se colocaron individualmente para cada participante y de forma coherente en todas las sesiones.

Análisis de Datos

Se utilizó la inspección visual de los diagramas Q-Q para evaluar la normalidad de los datos. Los datos se analizaron en SPSS (v 19.0 IBM, Nueva York, NY) utilizando un ANOVA bidireccional de medidas repetidas (condición × tiempo) y un ANOVA unidireccional de medidas repetidas para analizar los efectos principales simples de la condición y el tiempo cuando se observó un efecto de interacción. Una corrección de Greenhouse-Geisser se utilizó cuando se violó la esfericidad. Las variables utilizadas en el análisis fueron: puntuación total del NFQ, duración del test de Stroop, trayectoria del balanceo postural, velocidad del balanceo postural y área de balanceo postural de 100% de una elipse, fuerza máxima relativa de SJ y CMJ, FT:CT, velocidad máxima y altura de salto, fuerza máxima relativa de IMTP, cadencia media de Sprintmax, cadencia máxima, potencia media y potencia máxima. Se promediaron múltiples pruebas en cada punto de tiempo para el test de Stroop, SJ, CMJ, IMTP y Sprintmax. La significación se estableció en $\alpha = 0,05$ y se empleó el procedimiento Benjamini-Hochberg para corregir comparaciones múltiples y disminuir las tasas de falsos descubrimientos. Los resultados de la interacción bidireccional se presentan con el valor p y el tamaño del efecto Cohen (d).

Cuando se observaron interacciones bidireccionales, se completó el análisis del coeficiente de correlación. Las variables con una correlación de <0,8 se introdujeron en un modelo de regresión por pasos para evaluar si los cambios de las variables de la batería de pruebas individuales o por grupo podían explicar el cambio en la potencia media de Sprintmax. La significancia para la regresión por pasos se estableció en $\alpha = 0,05$. La independencia de los residuos se evaluó mediante la prueba de Durbin-Watson y la homocedasticidad se evaluó mediante la inspección visual de un gráfico de residuos estudiados versus valores pronosticados no estandarizados.

Los tamaños del efecto de Cohen para el ANOVA bidireccional de medidas repetidas y la regresión por pasos se calcularon a partir de los valores de eta cuadrada parcial y f2 de Cohen para presentar tamaños de efecto uniformes [22]. La magnitud de los tamaños del efecto se clasificó como trivial (<0,19), pequeño (0,2-0,49), mediano (0,5-0,79), grande (>0,8).

Resultados

Un participante fue retirado del estudio debido a la participación en deportes de competición <24 h antes del inicio del estudio, lo que dio como resultado 31 participantes. Debido al mal funcionamiento del equipo, no se recolectaron datos de

un solo sujeto para el NFQ (1 punto de tiempo) y el Sprintmax (2 puntos de tiempo). Los participantes consumieron todas las comidas y el consumo de Gatorade fue consistente para cada participante en todas las sesiones. El decremento de potencia media entre el primer sprint en el ciclismo de inducción de fatiga y los promedios de la serie subsiguiente fue del 25%, 29% y 29% para las series 2, 3 y 4.

No se observaron interacciones bidireccionales significativas en la altura del SJ ($p = 0,065$, $d = 0,62$), el test de Stroop ($p = 0,187$, $d = 0,47$), o las fuerzas relativas para el CMJ ($p = 0,150$, $d = 0,50$), el SJ ($p = 0,054$, $d = 0,66$), y el IMTP ($p = 0,622$, $d = 0,29$). El balanceo postural medido en las pruebas con los ojos abiertos, los ojos cerrados o la cabeza hacia atrás y los ojos cerrados, no difirió significativamente sin que se observara interacción alguna en las métricas de la trayectoria de balanceo ($p = 0,381$; $d = 0,37$; $p = 0,171$; $d = 0,47$; $p = 0,208$, $d = 0,44$ respectivamente) velocidad ($p = 0,379$, $d = 0,37$; $p = 0,186$, $d = 0,47$; $p = 0,205$, $d = 0,45$ respectivamente), y 100% del área de una elipse ($p = 0,607$, $d = 0,28$; $p = 0,568$, $d = 0,27$; $p = 0,114$, $d = 0,51$ respectivamente). El análisis simple de los efectos principales no reveló diferencias significativas entre las mediciones de fatiga y las mediciones del inicio del control para ninguna variable.

Al inicio, la puntuación total del NFQ fue de 1,6 ± 2,2 y 1,2 ± 1,3 para el control y la fatiga respectivamente (Fig. 2). Se observó una interacción bidireccional entre la condición y el tiempo para el NFQ ($p < 0,0005$, $d = 1,74$). Se observó un aumento máximo no significativo del 50% 1 hora post-condición de control y permaneció un 28% mayor a las 48 horas post-control. En comparación, la condición de fatiga aumentó significativamente 489%, 386% y 233% a los 15 minutos ($p < 0,0005$, $d = 1,88$), 1 h ($p < 0,0005$, $d = 1,43$) y 24 h ($p = 0,011$, $d = 0,87$) post-intervención respectivamente. Un aumento del 100% entre el valor inicial y las 48 horas post-intervención en la condición de fatiga no fue significativo a pesar de un tamaño del efecto medio ($d = 0,57$). Se observaron diferencias significativas entre el control y la intervención de fatiga a los puntos de tiempo de 15 minutos ($p < 0,0005$; $d = 1,58$), 1 h ($p < 0,0005$; $d = 0,92$) y 24 h ($p = 0,034$; $d = 0,53$).

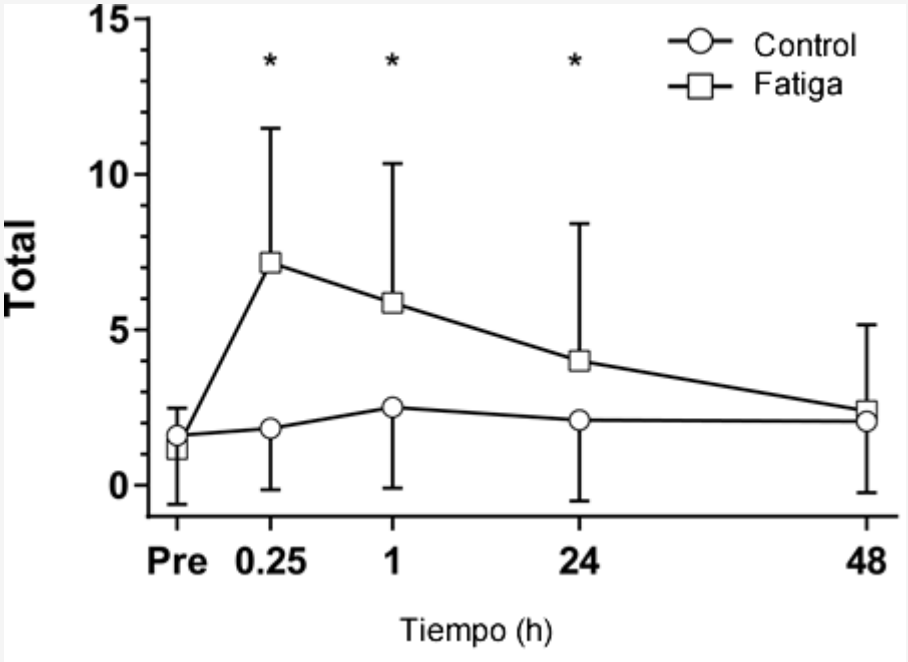

Figura 2. *Resultados del cuestionario de fatiga neuromuscular.*

La media (SD) de las respuestas al cuestionario de fatiga neuromuscular (n = 30) para el control (círculos) y las intervenciones de fatiga (cuadrados) desde inmediatamente antes (Pre) hasta 48 horas post-condición. *Diferencia significativa ($p < 0,05$) entre las condiciones en el punto de tiempo identificado usando un procedimiento post hoc de Benjamini-Hochberg.

La velocidad del SJ al inicio fue de 2,42 ± 0,27 m•s-1 y 2,42 ± 0,28 m•s-1 en control y fatiga respectivamente (Fig. 3) con una interacción bidireccional presente ($p = 0,033$, $d = 0,67$). La velocidad de control del SJ tuvo una disminución significativa de 1% a los 15 minutos ($p = 0,004$, $d = 0,11$) post-control con una disminución máxima de 2% ocurriendo a 1 h ($p = 0,003$, $d = 0,18$) antes de regresar al inicio. En respuesta a la intervención, la condición de fatiga mostró una disminución máxima del 4% a los 15 minutos ($p < 0,0005$; $d = 0,36$) post-intervención con una disminución del 3%

observada a 1 h (p = 0,023; d = 0,25) y una recuperación a las 24 h. La velocidad en la condición de fatiga fue significativamente menor que la del control a los puntos de tiempo de 15 minutos (p < 0,0005; d = 0,26) y a las 24 h (p = 0,031; d = 0,08).

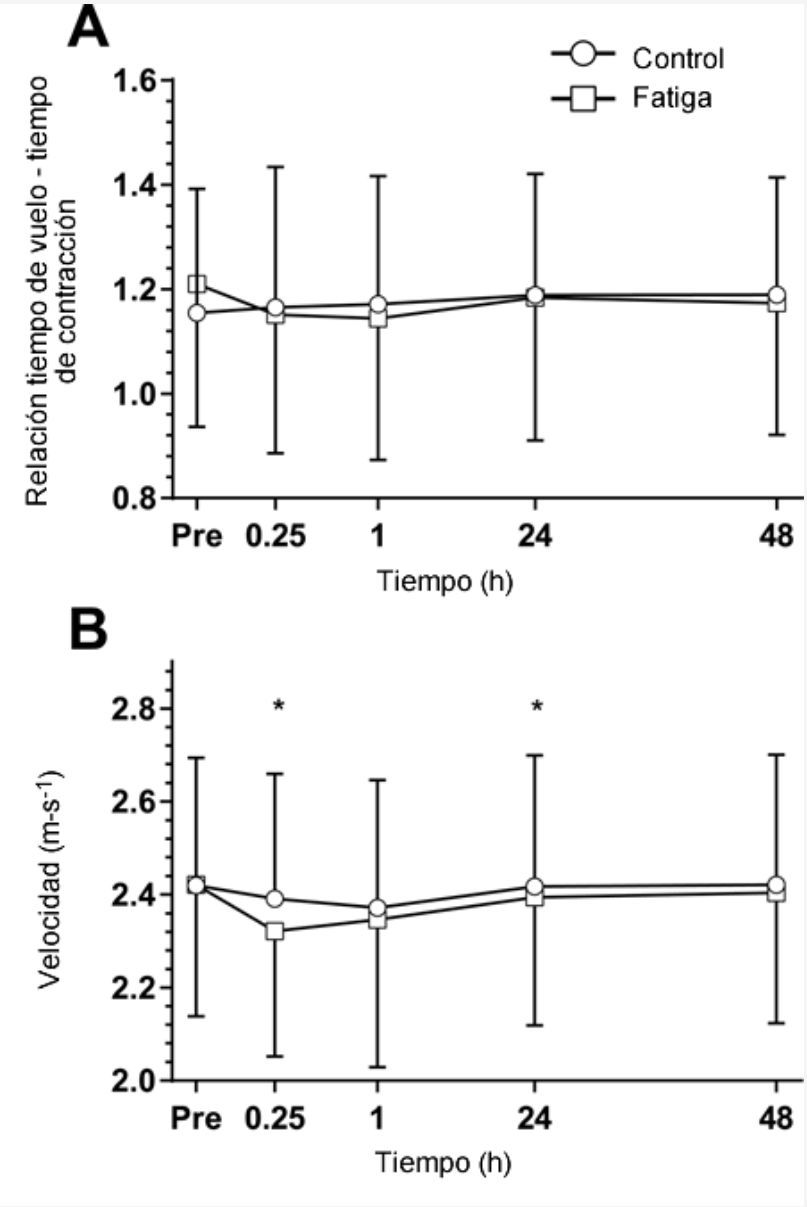

Figura 3. *Resultados del Squat Jump.*

El resultado medio (SD) del squat jump (n = 31) para las intervenciones de control (círculos) y fatiga (cuadrados) de (A) la relación tiempo de vuelo/tiempo de contracción (FT:CT) y (B) la velocidad máxima propulsiva (concéntrica). Puntos de tiempo desde inmediatamente antes (Pre) hasta 48 horas post-condición. *Diferencia significativa (p < 0,05) entre las condiciones en el punto de tiempo identificado usando un procedimiento post hoc de Benjamini-Hochberg.

La velocidad registrada del CMJ al inicio fue de 2,56 ± 0,27 m•s-1 y 2,57 ± 0,26 m•s-1 en control y fatiga respectivamente (Fig. 4). Se observó una interacción bidireccional entre las condiciones (p = 0,005; d = 0,77). El control mostró una disminución máxima del 2% a los 15 minutos (p < 0,0005; d = 0,14) y 1 h (p = 0,001; d = 0,15) post-condición, mientras que la fatiga tuvo una disminución máxima del 4% a los 15 minutos (p < 0,0005; d = 0,35) y 1 h (p < 0,0005, d = 0,29) post-intervención con un retorno al inicio en 24 h. La velocidad del CMJ fue significativamente menor en la condición de fatiga en los puntos de tiempo de 15 min (p < 0,0005, d = 0,21) y 1 h (p = 0,005, d = 0,15).

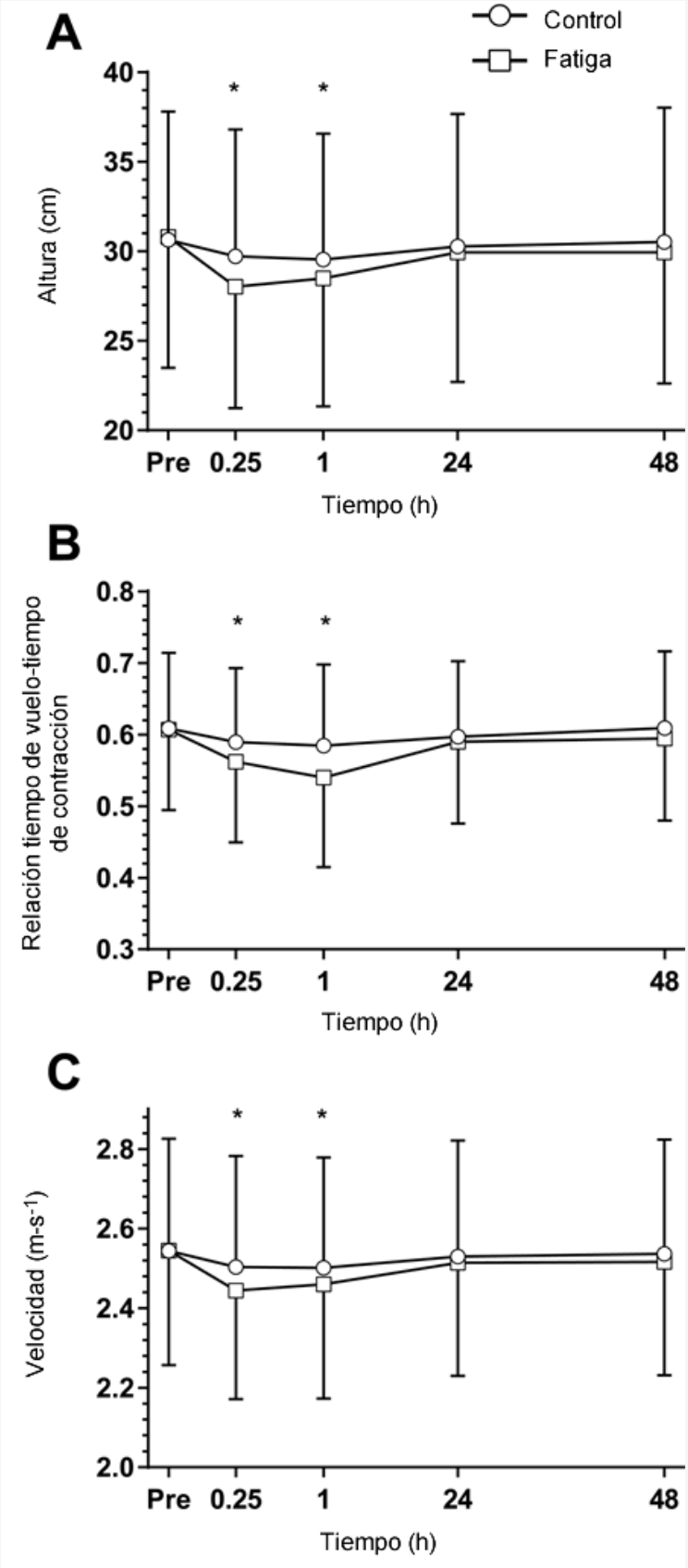

Figura 4. *Resultados del Countermovement Jump.*

El resultado medio (SD) del countermovement jump (n = 31) para las intervenciones de control (círculos) y fatiga (cuadrados) de (A) la altura del salto; (B) la relación tiempo de vuelo/tiempo de contracción (FT:CT) y (C) la velocidad

máxima propulsiva (concéntrica). Puntos de tiempo desde inmediatamente antes (Pre) hasta 48 horas post-condición. *Diferencia significativa ($p < 0,05$) entre las condiciones en el punto de tiempo identificado usando un procedimiento post hoc de Benjamini-Hochberg.

La altura inicial del CMJ fue de 30,63 ± 7,17 cm y 30,80 ± 7,32 cm en control y fatiga, respectivamente. Se mostró una interacción bidireccional ($p = 0,001$; $d = 0,87$) con la condición de control que disminuyó significativamente en un 3% a los puntos de tiempo de 15 minutos ($p < 0,0005$; $d = 0,13$) y en un 4% a 1 h ($p = 0,010$; $d = 0,15$) con un retorno a las 24 h. De manera similar, la fatiga registró una disminución máxima en la altura de salto del CMJ del 9% a los 15 minutos ($p < 0,0005$; $d = 0,39$) post-intervención permaneciendo 8% deprimido a 1 h ($p < 0,0005$, $d = 0,32$) antes de regresar al inicial a las 24 h. Una mayor disminución en el rendimiento después de la intervención de fatiga resultó en una altura de salto de CMJ significativamente menor en la condición de fatiga a los puntos de tiempo de 15 min ($p < 0,0005$, $d = 0,25$) y 1 h ($p = 0,008$, $d = 0,15$).

Al inicio, la relación FT:CT del CMJ fue de 0,61 ± 0,10 y 0,61 ± 0,11 para el control y la fatiga respectivamente, con una interacción bidireccional significativa observada ($p = 0,045$; $d = 0,63$) a lo largo del tiempo. Aunque no se observaron cambios significativos en el control a lo largo del tiempo, se registraron disminuciones significativas de 8% y 11% a los 15 minutos ($p < 0,0005$; $d = 0,41$) y 1 h ($p = 0,002$; $d = 0,57$) post-intervención de fatiga, con un retorno al punto de partida a las 24 h en la condición de fatiga. En comparación con el control, los resultados de la condición de fatiga fueron significativamente inferiores en los puntos de tiempo de 15 minutos ($p = 0,014$; $d = 0,25$) y 1 h ($p = 0,031$; $d = 0,38$).

Las relaciones FT:CT del SJ de las condiciones de control y fatiga iniciales fueron de 1,15 ± 0,24 y 1,21 ± 0,27 respectivamente. Se observó una interacción bidireccional entre la condición y el tiempo para FT:CT del SJ ($p = 0,002$; $d = 0,77$). No se observaron diferencias significativas a lo largo del tiempo en la condición de control, mientras que la fatiga mostró una disminución significativa del 6% a 1 h ($p = 0,040$; $d = 0,25$) post-intervención de fatiga, sin diferencias significativas en otros puntos de tiempo. Además, no se observaron diferencias significativas entre el control y la fatiga en ningún punto de tiempo.

La cadencia media inicial observada en el Sprintmax fue de 127 ± 12 RPM y 127±13 RPM en control y fatiga respectivamente (Fig. 5) y se observó una interacción bidireccional ($p = 0,003$; $d = 0,87$). No se observaron diferencias significativas entre el inicio y los puntos de tiempo posteriores en la condición de control. La condición de fatiga resultó en una disminución máxima del 5% a los 15 minutos ($p = 0,001$; $d = 0,45$) post- intervención con disminuciones del 4% observadas a 1 hora ($p = 0,001$; $d = 0,38$) post- intervención. La fatiga fue significativamente menor que en el control a los puntos de tiempo de 15 minutos ($p < 0,0005$, $d = 0,46$), 1 h ($p < 0,0005$, $d = 0,47$), 24 h ($p = 0,002$, $d = 0,34$) y 48 h ($p < 0,0005$, $d = 0,34$).

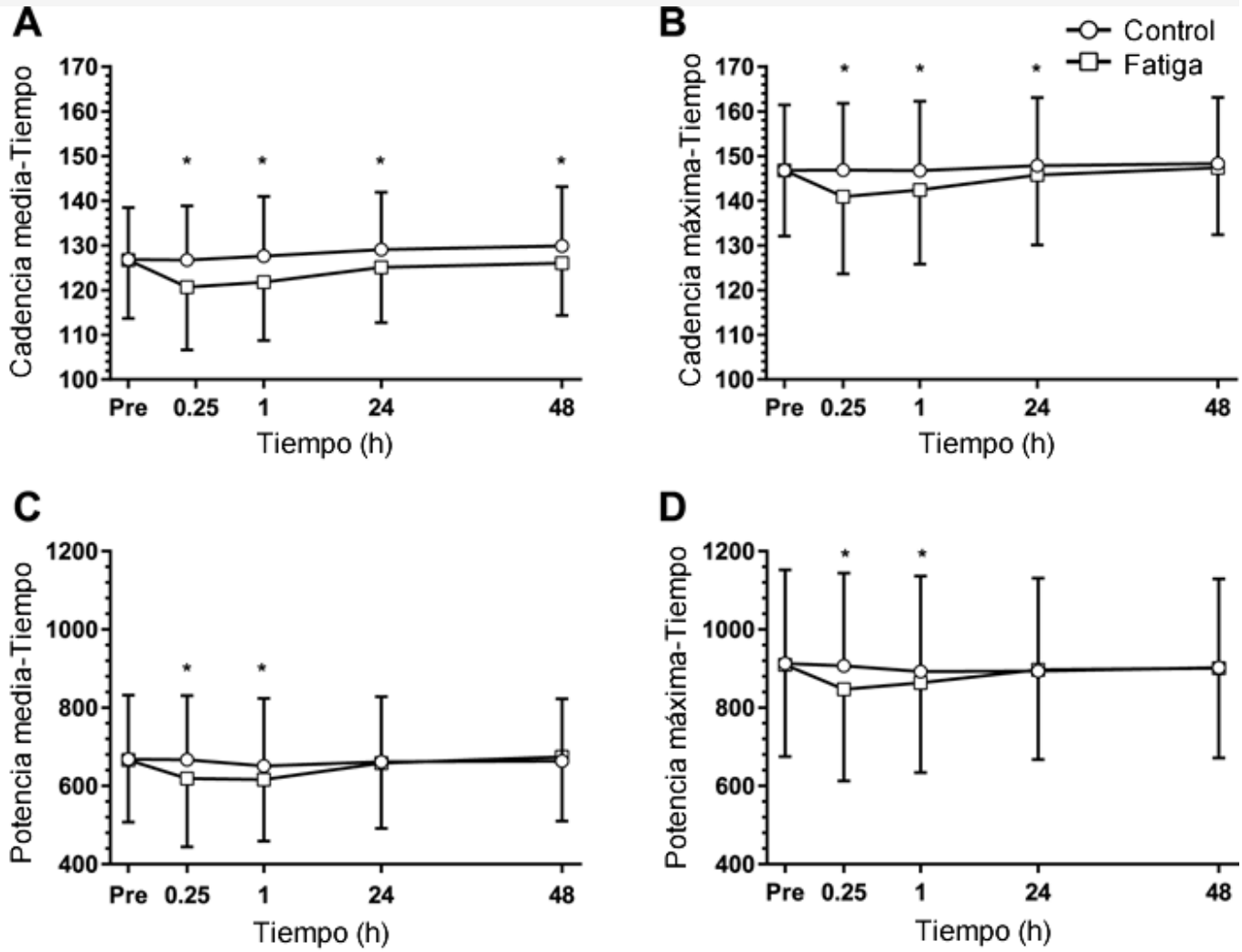

Figura 5. *Resultados del Sprintmax.*

El resultado medio (SD) del ciclismo de sprint máximo (Sprintmax) (n = 30) para las intervenciones de control (círculos) y fatiga (cuadrados) de las variables (A) cadencia media de sprint, (B) cadencia máxima de sprint, (C) potencia media de sprint y (D) potencia máxima de sprint. Puntos de tiempo desde inmediatamente antes (Pre) hasta 48 horas post-condición. *Diferencia significativa ($p < 0,05$) entre las intervenciones en el punto de tiempo identificado mediante un procedimiento post hoc de Benjamini-Hochberg.

La cadencia máxima registrada durante el Sprintmax al inicio fue de 147 ± 15 RPM y 147 ± 15 RPM en control y fatiga respectivamente. Se observó una interacción bidireccional ($p < 0,0005$, $d = 1,22$). No se observaron diferencias en los puntos de tiempo de control, mientras que los cambios post-intervención en la condición de fatiga mostraron una reducción máxima del 4% a los 15 minutos ($p < 0,0005$; $d = 0,37$) y una disminución del 3% a 1 h ($p < 0,0005$; $d = 0,28$). La fatiga fue significativamente menor que en el control a los puntos de tiempo de 15 minutos ($p < 0,0005$, $d = 0,36$), 1 h ($p < 0,0005$, $d = 0,27$) y 24 h ($p = 0,008$, $d = 0,14$).

La potencia máxima inicial del Sprintmax fue de 913 ± 240 W y 909 ± 235 W en control y fatiga, respectivamente. Se observó una interacción bidireccional en la potencia máxima ($p = 0,002$; $d = 0,81$). La potencia máxima no fue significativamente diferente en ningún punto de tiempo en control. Se observaron cambios post-intervención en la condición de fatiga con una disminución significativa del 7% a los 15 minutos ($p < 0,0005$; $d = 0,27$) y del 5% a 1 h ($p < 0,0005$; $d = 0,20$). La fatiga fue significativamente menor que en el control en el punto de tiempo de 15 minutos ($p < 0,0005$, $d = 0,26$) y 1 h ($p = 0,041$, $d = 0,12$).

La potencia media registrada para el Sprintmax al inicio fue de 669 ± 164 W y 666 ± 158 W para control y fatiga respectivamente. Se observó una interacción bidireccional en la potencia media ($p < 0,0005$, $d = 0,97$). No se observaron diferencias en los puntos de tiempo de control, mientras que la intervención de fatiga tuvo una disminución significativa

del 7% tanto en los puntos de tiempo de 15 minutos (p = 0,001; d = 0,28) como en los puntos de tiempo de 1 hora (p < 0,0005; d = 0,32) antes de regresar al valor inicial. La potencia media en la condición de fatiga fue significativamente menor que la del control en los puntos de tiempo de 15 minutos (p < 0,0005, d = 0,28) y 1 h (p = 0,004, d = 0,20).

Aunque no hubo diferencia de la potencia media de salida del Sprintmax entre el control y la fatiga, en los puntos de tiempo de 24 y 48 horas, se realizaron regresiones por pasos para evaluar la capacidad de las variables para explicar la potencia de salida en estos puntos de tiempo. Después de eliminar las variables correlacionadas, las variables independientes de la regresión de 24 h fueron NFQ 1 h, FT:CT de CMJ 1 h, altura devCMJ 1 h y FT:CT de SJ 1 h. Las variables independientes de la regresión de 48 h fueron NFQ 1 h y 48 h, FT:CT de CMJ 1 h y 48 h, altura de CMJ 1 h y FT:CT de SJ 1 h. Como variable dependiente se utilizó la potencia media de salida del Sprintmax. Debido a la impracticabilidad de la medición diaria en el mundo real, las variables tomadas en el punto de tiempo de 24 horas fueron excluidas de la regresión por pasos de 48 horas. Además, cuando las correlaciones entre las variables de 15 minutos y 1 hora eran evidentes, la variable de 1 hora se mantuvo en la regresión. Esto resultó en variables del punto de tiempo de 1 h analizado en la regresión por pasos de 24 h y variables de los puntos de tiempo de 1 h y 48 h analizados en la regresión por pasos de 48 h.

El R2 ajustado para el modelo de 48 h explicó el 51,7% de la varianza (d = 2,22), un gran tamaño del efecto. La altura del CMJ a las 48 h explicó la potencia media de salida del Sprintmax (p < 0,0005) a las 48 h con una ecuación de regresión de y = 187,618 + (1651,121 x altura de CMJ a 1 h). En la regresión por pasos de 24 horas, el R2 ajustado para el modelo general fue de 53,2% (d = 2,34), un tamaño del efecto grande. La altura del CMJ a 1 h explicó significativamente la potencia media de salida de 24 h (p < 0,0005) con una ecuación de regresión de y = 165,905 + (1696,978 x altura de CMJ a 1 h).

Discusión

Nuestro propósito era evaluar si una serie de pruebas de rendimiento individual serían adecuadamente sensibles para detectar cambios en el rendimiento del Sprintmax hasta 48 horas después de un protocolo de ciclismo de sprint de alta intensidad que induce la fatiga y para evaluar si individualmente o como batería, estos marcadores de rendimiento explicarían el rendimiento reducido del Sprintmax en estos puntos de tiempo. Este análisis se llevó a cabo con la intención de crear posiblemente una herramienta simple y prácticamente relevante que pudiera utilizarse para determinar cuándo un deportista o un paciente estaba listo para hacer frente a su próximo estímulo de entrenamiento (ejercicio).

Identificamos Sprintmax, NFQ, CMJ y SJ como pruebas de rendimiento que cambiaron en respuesta a un protocolo de fatiga de ciclismo de sprint de alta intensidad. Como se predijo, las variables de Sprintmax mostraron disminuciones de hasta 48 h después de la inducción de la fatiga, sin embargo, los tamaños del efecto fueron pequeños. Curiosamente, la puntuación subjetiva del NFQ fue la más sensible a la fatiga, con tamaños del efecto medios a grandes para cambios que ocurrieron hasta 24 horas después de la fatiga. Aunque las diferencias de sexo pueden jugar un papel en las respuestas del NFQ, se han informado percepciones similares de dolor y recuperación entre hombres y mujeres [23]. Mientras que la altura de salto, la velocidad y la FT:CT del CMJ respondían a la fatiga, esto era sólo a corto plazo (hasta 1 hora después) con tamaños del efecto pequeños y triviales. En contraste con esto en la variable de SJ, sólo la velocidad era indicativa de fatiga 15 min y 24 h después del protocolo de ciclismo de sprint de alta intensidad e incluso entonces, sólo con tamaños del efecto pequeños y triviales. Aunque no se observó ningún cambio entre las potencias de salida de fatiga y de control a las 24 y 48 h, el análisis de regresión por pasos sugiere que el marcador único, la altura del CMJ, explicaba el 53,2% y el 51,7% de la potencia de salida del Sprintmax en estos puntos de tiempo.

Aunque la potencia media de Sprintmax sólo se redujo a los 15 minutos y 1 hora siguiendo el protocolo de intervención, la cadencia media permaneció más baja en la condición de fatiga 24 horas y 48 horas después, con reducciones también presentes en la cadencia máxima 24 horas después. La reducción de la cadencia en ausencia de disminuciones de potencia, debería teóricamente requerir una mayor producción de fuerza por recorrido del pedal para alcanzar la potencia de salida dada. Típicamente, el requisito de la competición es producir la mayor potencia media de salida, haciendo que esta reducción de cadencia sea prácticamente insignificante, sin embargo, completar el Sprintmax con una cadencia no preferida sugiere que los participantes todavía estaban sintiendo los efectos de la fatiga, lo que puede haberse manifestado en la sensación perceptiva de fatiga observada en los puntos de tiempo posteriores en el NFQ. La incapacidad de reproducir cadencias más altas puede ser el resultado de la reducción en las velocidades de contracción o de la ralentización de la relajación muscular [24]. Una velocidad lenta de relajación podría afectar al ciclismo debido a las contracciones concéntricas de las piernas que se producen antes de la relajación de la pierna opuesta, afectando así a la velocidad máxima de pedaleo y a las cadencias óptimas de pedaleo [25]. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales que registren las fuerzas directas sobre el pedaleo para confirmar esta hipótesis.

Anteriormente se han utilizado cuestionarios de percepción para controlar los períodos de entrenamiento agudos y crónicos [13, 26-28]. De acuerdo con investigaciones anteriores [13, 26, 27, 29], este cuestionario de fatiga neuromuscular

era sensible a la fatiga aguda, con diferencias significativas entre las condiciones observadas hasta 24 horas después. Como se informó anteriormente [30], el cambio en la percepción de la fatiga no se correspondía directamente con los cambios en el rendimiento con un aumento de la fatiga percibida a las 24 horas a pesar de la ausencia de decrementos de potencia. Sin embargo, se observaron reducciones en la cadencia del Sprintmax a las 24 y 48 horas, y pueden haberse reflejado en cambios perceptivos de fatiga en los puntos de tiempo posteriores. Se ha demostrado que la motivación psicológica desempeña un papel en el rendimiento en condiciones de fatiga, con una producción de potencia tres veces mayor registrada en sprints cortos de ciclismo inmediatamente después del agotamiento voluntario [31]. La posibilidad de que la motivación de los participantes influya en estas observaciones no debe descartarse debido a la breve duración de la prueba de múltiples marcadores de rendimiento en esta investigación.

Los resultados del presente estudio son consistentes con las investigaciones publicadas que sugieren que las variables de salto vertical son sensibles a la fatiga del ciclismo de velocidad [6] con variables de CMJ significativamente reducidas 1 hora después de la intervención y una reducción en la velocidad máxima del SJ observada a los 15 minutos y 24 horas después pero no 1 hora después. Sin embargo, el grado de sensibilidad de las pruebas de CMJ y SJ depende probablemente de la magnitud y el tipo de inducción a la fatiga, con pocos cambios en las variables de salto más allá de las 24 horas posteriores a la intervención. Las ligeras diferencias observadas entre las variables CMJ y SJ pueden reflejar las diferentes condiciones metabólicas contráctiles de los ejercicios de ciclismo de sprint de alta intensidad y/o evidencia adicional de cambios en las velocidades de contracción o de ralentización de los procesos de relajación muscular [24]. La complejidad del movimiento de CMJ resulta en una mecánica de movimiento que no se ve en el SJ. Se cree que una mayor absorción de la relajación muscular y una mayor acumulación de estimulación durante el contramovimiento son los principales factores [32] que contribuyen a la mayor cantidad de trabajo completado en el CMJ. Es posible que las diferencias en la mecánica del movimiento o la diferencia en el trabajo total de los dos tipos de salto puedan jugar un papel en la sensibilidad de las dos pruebas. La falta de disminución de las variables de potencia tanto en el salto como en el Sprintmax en períodos de tiempo superiores a 24 horas sugiere que los protocolos de ciclismo de sprint múltiple no producen cambios duraderos en la producción de potencia explosiva en la parte inferior del cuerpo. Por el contrario, una intervención de ejercicio que utiliza una mayor contracción muscular excéntrica puede haber mostrado una mayor respuesta a la fatiga debido al hecho de que las modalidades de ejercicio excéntrico resultan en cambios sustanciales en el sistema neuromuscular [33]. Los cambios como el aumento de las micro-lesiones musculares [33] y el consiguiente aumento del dolor, es probable que afecten a la fatiga perceptiva, así como a la capacidad de realizar pruebas de rendimiento físico como las utilizadas en este estudio. Esto se apoya en los decrementos informados de CMJ y SJ después de ciclismo excéntrico no habitual que no se observaron en el ciclismo concéntrico [34], así como en decrementos en las variables de CMJ y SJ para los deportes de equipo que requieren mayores contracciones excéntricas [35-38]. La modalidad utilizada para inducir la fatiga en este estudio puede haber resultado en menos daño muscular debido al bajo volumen, pero también a la alta intensidad y a la falta de contracción muscular excéntrica. Aunque se observaron diferencias en el rendimiento del CMJ y el SJ, los cambios a 1 hora después de la intervención no fueron prácticamente útiles para los entrenadores y los científicos del ejercicio cuando se consideró que el resultado de la investigación era proporcionar información sobre si el atleta estaba listo para su próximo estímulo.

La batería de pruebas de fatiga no mostró diferencias entre las variables de 24 y 48 horas para explicar la potencia de salida con un 53,2% frente a un 51,7% respectivamente. Una sola variable, la altura de CMJ, explicó la potencia media de salida del Sprintmax en ambos puntos de tiempo. Esto fue probablemente afectado por auto correlaciones entre variables potenciales, sin embargo, con sólo 4 y 6 variables ingresadas en regresiones de 24 y 48 h. Curiosamente, a pesar de tener tamaños del efecto medianos a grandes, el NFQ no explicó la potencia de salida en ningún punto de tiempo. Finalmente, la falta de cambios del Sprintmax observados a las 24 h y 48 h redujo la capacidad de la regresión por pasos para evaluar la fatiga en estos puntos de tiempo.

De las seis pruebas de rendimiento completadas, el test de Stroop, el balanceo postural y el IMTP no difirieron significativamente entre las condiciones de control y de fatiga. Las evaluaciones psicomotoras como el test de Stroop se han propuesto como una medida de fatiga [39], sin embargo, no observamos diferencias significativas. Las diferencias en las tasas de digestión de los participantes después de la alimentación pueden haber afectado el rendimiento cognitivo en el test de Stroop debido al efecto que los niveles de glucosa en sangre tienen sobre la capacidad cognitiva [40]. Además, la duración de la inducción a la fatiga puede haber sido demasiado breve con los decrementos cognitivos observados en protocolos de mayor alcance [13, 41, 42].

A pesar de las disminuciones informadas en el control postural después de los protocolos de ciclismo [43-45], no se observó ninguna en el presente estudio. A diferencia de estudios anteriores [4, 44, 46, 47], esta investigación evaluó el balanceo >15 minutos después de la inducción de la fatiga, ya que los períodos de tiempo de nuestra evaluación requerían relevancia para la toma de decisiones prácticamente informativas; sin embargo, estos períodos de evaluación afectaron potencialmente la sensibilidad de esta variable.

Aunque existe el uso del IMTP como medidor de rendimiento [2], este estudio es uno de los pocos que utiliza la prueba

como un medidor de rendimiento después de la inducción a la fatiga. De acuerdo con estos estudios, no se observaron disminuciones en el rendimiento del IMTP después de la fatiga [48, 49]. La falta de sensibilidad del IMTP como tarea de acción muscular fuerte a la fatiga implica la posibilidad de múltiples estrategias de control motor que son capaces de producir contracciones casi máximas cuando sólo se requieren tiempos de contracción cortos. Nosotros argumentaríamos que esta noción de estrategia de control múltiple casi máximo está apoyada por los informes de que el cambio de fuerza máxima del IMTP es un medidor de adaptación de entrenamiento que vale la pena en el deporte de equipo y en atletas individuales [50-52].

Aunque un gran número de participantes completaron este estudio, una cohorte heterogénea fue probada y puede haber afectado el poder estadístico. Además, el calentamiento posterior a la intervención de control puede no haber proporcionado suficiente preparación, lo que posiblemente explica los descensos observados en el punto de tiempo de 15 minutos después de la intervención de control. Se hizo un esfuerzo para reducir el efecto de aprendizaje mediante la realización de una amplia familiarización, sin embargo, en el test de Stroop se observó un efecto de aprendizaje consistente con investigaciones anteriores. Finalmente, la falta de disminución de potencia observada en el Sprintmax a las 24 y 48 horas redujo la aplicabilidad de los datos de la batería de pruebas de 24 y 48 horas para evaluar la fatiga a pesar de la reducción de la cadencia en estos puntos de tiempo, lo que sugiere que la fatiga seguía presente. Se necesita investigación adicional sobre la inducción de la fatiga empleando diferentes condiciones de contracción muscular (es decir, ciclo de estiramiento-acortamiento inclusive) que resultan en disminuciones del rendimiento a >24 h. Esto puede dilucidar si las variables de la batería responden en estos puntos de tiempo. Además, se necesita más investigación sobre la batería de pruebas de fatiga en una fase de mayor alcance para determinar si la sensibilidad de las variables aumenta con la acumulación de fatiga.

Esta investigación informa que el NFQ y las variables de salto de CMJ tales como altura, velocidad y FT:CT son adecuadas para monitorear la fatiga en múltiples puntos de tiempo después de la fatiga del ciclismo de sprint, mientras que el uso de la altura del CMJ explica >51% de la potencia de salida del sprint. Los resultados sugieren que un protocolo de ciclismo de sprint de intensidad máxima que consiste en cuatro series de sprint de 10 x 6 seg puede resultar un estímulo útil de entrenamiento de bajo volumen y alta intensidad debido a las pequeñas cantidades de fatiga observadas a >1 h.

Agradecimientos

Los autores desean reconocer y agradecer a los participantes por dar su tiempo para completar este estudio.

REFERENCIAS

1. Enoka RM, Stuart DG. (1992). Neurobiology of Muscle Fatigue. *J Appl Physiol. 1992;72(5):1631–48. pmid:1601767*
2. Taylor K, Chapman D, Cronin J, Newton M, Gill N. (2012). Fatigue monitoring in high performance sport: a survey of current trends. *JASC. 2012;20(1):12–23.*
3. Thorpe RT, Strudwick AJ, Buchheit M, Atkinson G, Drust B, Gregson W. (2016). Tracking Morning Fatigue Status Across In-Season Training Weeks in Elite Soccer Players. *Int J Sports Physiol Perform. 2016;11(7):947–52. pmid:26816390*
4. Clarke N, Farthing JP, Lanovaz JL, Krentz JR. (2015). Direct and indirect measurement of neuromuscular fatigue in Canadian football players. *Appl Physiol Nutr Metab. 2015;40(5):464–73. pmid:25894521*
5. Bouaziz T, Makni E, Passelergue P, Tabka Z, Lac G, Moalla W, et al. (2016). Multifactorial monitoring of training load in elite rugby sevens players: cortisol/cortisone ratio as a valid tool of training load monitoring. *Biol Sport. 2016;33(3):231–9. pmid:27601777*
6. Claudino JG, Cronin J, Mezencio B, McMaster DT, McGuigan M, Tricoli V, et al. (2017). The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *J Sci Med Sport. 2017;20(4):397–402. pmid:27663764*
7. Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sarabia JM, Moya M. (2015). Preseason Training: The Effects of a 17-Day High-Intensity Shock Microcycle in Elite Tennis Players. *J Sports Sci Med. 2015;14(4):783–91. pmid:26664275*
8. Coutts AJ, Reaburn P, Piva TJ, Rowsell GJ. (2007). Monitoring for overreaching in rugby league players. *Eur J Appl Physiol. 2007;99(3):313–24. pmid:17219174*
9. Barry BK, Enoka RM. (2007). The neurobiology of muscle fatigue: 15 years later. *Integr Comp Biol. 2007;47(4):465–73. pmid:21672855*
10. Gathercole R, Sporer B, Stellingwerff T. (2015). Countermovement Jump Performance with Increased Training Loads in Elite Female Rugby Athletes. *Int J Sports Med. 2015;36(9):722–8. pmid:25831403*
11. Marshall PW, Robbins DA, Wrightson AW, Siegler JC. (2012). Acute neuromuscular and fatigue responses to the rest-pause method. *J Sci Med Sport. 2012;15(2):153–8. pmid:21940213*
12. Thorpe RT, Strudwick AJ, Buchheit M, Atkinson G, Drust B, Gregson W. (2016). The Influence of Changes in Acute Training Load on Daily Sensitivity of Morning-Measured Fatigue Variables in Elite Soccer Players. *Int J Sports Physiol Perform. 2016;12(Suppl 2):S2107–s13. pmid:27918668*

13. Decroix L, Piacentini MF, Rietjens G, Meeusen R. (2016). Monitoring Physical and Cognitive Overload During a Training Camp in Professional Female Cyclists. *Int J Sports Physiol Perform. 2016;11(7):933–9. pmid:26816388*
14. Miller TA. (2018). NSCA's Guide to Tests and Assessments: Human Kinetics.
15. Girard O, Bishop DJ, Racinais S. (2013). Neuromuscular adjustments of the quadriceps muscle after repeated cycling sprints. *PLoS One. 2013;8(5):e61793. pmid:23650503*
16. Billaut F, Basset FA, Giacomoni M, Lemaitre F, Tricot V, Falgairette G. (2006). Effect of high-intensity intermittent cycling sprints on neuromuscular activity. *Int J Sports Med. 2006;27(1):25–30. pmid:16388438*
17. Sadjadi R, Vincent KA, Carr AJ, Walburn J, Brooks VL, Pandya S, et al. (2011). Validation of the individualised neuromuscular quality of life for the USA with comparison of the impact of muscle disease on those living in USA versus UK. *Health Qual Life Outcomes. 2011;9(1):114. pmid:22177525*
18. Schücker L, MacMahon C. (2016). Working on a cognitive task does not influence performance in a physical fitness test. *Psychol Sport Exerc. 2016;25:1–8.*
19. Haff GG, Ruben RP, Lider J, Twine C, Cormie P. (2015). A comparison of methods for determining the rate of force development during isometric midthigh clean pulls. *J Strength Cond Res. 2015;29(2):386–95. pmid:25259470*
20. Halperin I, Williams KJ, Martin DT, Chapman DW. (2016). The Effects of Attentional Focusing Instructions on Force Production During the Isometric Midthigh Pull. *J Strength Cond Res. 2016;30(4):919–23. pmid:27003451*
21. Cormack SJ, Newton RU, McGuigan MR. (2008). Neuromuscular and endocrine responses of elite players to an Australian rules football match. *Int J Sports Physiol Perform. 2008;3(3):359–74. pmid:19211947*
22. DeCoster J. (2018). Converting effect sizes Charlottesville, VA2012 [cited 2018 8 March]. *Available from: http://www.stat-help.com/spreadsheets/Converting%20effect%20sizes%202012-06-19.xls.*
23. Flores DF, Gentil P, Brown LE, Pinto RS, Carregaro RL, Bottaro M. (2011). Dissociated time course of recovery between genders after resistance exercise. *J Strength Cond Res. 2011;25(11):3039–44. pmid:21804429*
24. Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev. 2008;88(1):287–332. pmid:18195089*
25. Driss T, Vandewalle H. (2013). The Measurement of Maximal (Anaerobic) Power Output on a Cycle Ergometer: A Critical Review. *Biomed Res Int. 2013;2013:40. pmid:24073413*
26. Berglund B, Safstrom H. (1994). Psychological monitoring and modulation of training load of world-class canoeists. *Med Sci Sports Exerc. 1994;26(8):1036–40. pmid:7968421*
27. Ten Haaf T, van Staveren S, Oudenhoven E, Piacentini MF, Meeusen R, Roelands B, et al. (2017). Prediction of Functional Overreaching From Subjective Fatigue and Readiness to Train After Only 3 Days of Cycling. *Int J Sports Physiol Perform. 2017;12(Suppl 2):S287–s94. pmid:27834554*
28. Siegl A, E MK, Tam N, Koschnick S, Langerak NG, Skorski S, et al. (2017). Submaximal Markers of Fatigue and Overreaching; Implications for Monitoring Athletes. *Int J Sports Med. 2017;38(9):675–82. pmid:28704885*
29. Raglin JS, Morgan WP, O'Connor PJ. (1991). Changes in mood states during training in female and male college swimmers. *Int J Sports Med. 1991;12(6):585–9. pmid:1797703*
30. Twist C, Waldron M, Highton J, Burt D, Daniels M. (2012). Neuromuscular, biochemical and perceptual post-match fatigue in professional rugby league forwards and backs. *J Sports Sci. 2012;30(4):359–67. pmid:22176201*
31. Marcora SM, Staiano W. (2010). The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? Eur J Appl Physiol. *2010;109(4):763–70. pmid:20221773*
32. Van Hooren B, Zolotarjova J. (2017). The Difference Between Countermovement and Squat Jump Performances: A Review of Underlying Mechanisms With Practical Applications. *J Strength Cond Res. 2017;31(7):2011–20. pmid:28640774*
33. Hedayatpour N, Falla D. (2015). Physiological and Neural Adaptations to Eccentric Exercise: Mechanisms and Considerations for Training. *Biomed Res Int. 2015;2015:7 pages. pmid:26543850*
34. Penailillo L, Blazevich A, Numazawa H, Nosaka K. (2013). Metabolic and muscle damage profiles of concentric versus repeated eccentric cycling. *Med Sci Sports Exerc. 2013;45(9):1773–81. pmid:23475167*
35. Sparkes W, Turner A, Weston M, Russell M, Johnston M, Kilduff L. (2018). Neuromuscular, Biochemical, Endocrine, and Mood Responses to Small-Sided Games' Training in Professional Soccer. *J Strength Cond Res. 2018;32(9):2569–76. pmid:29351166*
36. McLean BD, Coutts AJ, Kelly V, McGuigan MR, Cormack SJ. (2010). Neuromuscular, endocrine, and perceptual fatigue responses during different length between-match microcycles in professional rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform. 2010;5(3):367–83. pmid:20861526*
37. Gescheit DT, Cormack SJ, Reid M, Duffield R. (2015). Consecutive Days of Prolonged Tennis Match Play: Performance, Physical, and Perceptual Responses in Trained Players. *Int J Sports Physiol Perform. 2015;10(7):913–20. pmid:25710259*
38. Robineau J, Jouaux T, Lacroix M, Babault N. (2012). Neuromuscular fatigue induced by a 90-minute soccer game modeling. *J Strength Cond Res. 2012;26(2):555–62. pmid:22240545*
39. Nederhof E, Lemmink KA, Visscher C, Meeusen R, Mulder T. (2006). Psychomotor speed: possibly a new marker for overtraining syndrome. *Sports Med. 2006;36(10):817–28. pmid:17004845*
40. Sünram-Lea SI, Foster JK, Durlach P, Perez C. (2001). Glucose facilitation of cognitive performance in healthy young adults: examination of the influence of fast-duration, time of day and pre-consumption plasma glucose levels. *Psychopharmacology. 2001;157(1):46–54. pmid:11512042*
41. Dupuy O, Lussier M, Fraser S, Bherer L, Audiffren M, Bosquet L. (2014). Effect of overreaching on cognitive performance and related cardiac autonomic control. *Scand J Med Sci Sports. 2014;24(1):234–42. pmid:22537000*
42. Rietjens GJ, Kuipers H, Adam JJ, Saris WH, van Breda E, van Hamont D, et al. (2005). Physiological, biochemical and psychological markers of strenuous training-induced fatigue. *Int J Sports Med. 2005;26(1):16–26. pmid:15643530*
43. Lepers R, Bigard AX, Diard JP, Gouteyron JF, Guezennec CY. (1997). Posture control after prolonged exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 1997;76(1):55–61. pmid:9243170*

44. Vuillerme N, Hintzy F. (2007). Effects of a 200 W-15 min cycling exercise on postural control during quiet standing in healthy young adults. *Eur J Appl Physiol. 2007;100(2):169–75. pmid:17318648*
45. Hill MW, Goss-Sampson M, Duncan MJ, Price MJ. (2014). The effects of maximal and submaximal arm crank ergometry and cycle ergometry on postural sway. *Eur J Sport Sci. 2014;14(8):782–90. pmid:24707964*
46. Nardone A, Tarantola J, Giordano A, Schieppati M. (1997). Fatigue effects on body balance. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Electromyography and Motor Control. 1997;105(4):309–20. pmid:9284239*
47. Hill MW, Higgins MF, Price MJ. (2016). The effect of high-intensity cycling training on postural sway during standing under rested and fatigued conditions in healthy young adults. *Eur J Appl Physiol. 2016;116(10):1965–74. pmid:27491619*
48. Stephens JM, Halson SL, Miller J, Slater GJ, Chapman DW, Askew CD. (2017). Effect of Body Composition on Physiological Responses to Cold Water Immersion and the Recovery of Exercise Performance. *Int J Sports Physiol Perform. 2017;13(3):382–9. pmid:28787237*
49. Bartolomei S, Sadres E, Church DD, Arroyo E, Iii JAG, Varanoske AN, et al. (2017). Comparison of the recovery response from high-intensity and high-volume resistance exercise in trained men. *Eur J Appl Physiol. 2017;117(7):1287–98. pmid:28447186*
50. Halperin I, Hughes S, Chapman DW. (2016). Physiological profile of a professional boxer preparing for Title Bout: A case study. *J Sports Sci. 2016;34(20):1949–56. pmid:26881871*
51. Marrier B, Robineau J, Piscione J, Lacome M, Peeters A, Hausswirth C, et al. (2017). Supercompensation Kinetics of Physical Qualities During a Taper in Team Sport Athletes. *Int J Sports Physiol Perform. 2017;12(9):1163–9. pmid:28121198*
52. Buchheit M, Morgan W, Wallace J, Bode M, Poulos N. (2015). Physiological, psychometric, and performance effects of the Christmas break in Australian football. *Int J Sports Physiol Perform. 2015;10(1):120–3. pmid:24806508*

Cita Original

Hughes S, Chapman DW, Haff GG, Nimphius S (2019) The use of a functional test battery as a non-invasive method of fatigue assessment. PLoS ONE 14(2): e0212870. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212870