

# EFECTO DE LA FATIGA SOBRE EL PERFIL FUERZA-VELOCIDAD EN CARRERA VERTICAL

Pablo Jesús Bascuas, César Berzosa, Eduardo Piedrafita, Héctor Gutiérrez, Cristina Comeras, Ana Vanessa Bataller-Cervero.

• Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad San Jorge. Autovía A-23 Zaragoza-Huesca, km 299. 50830 - Villanueva de Gállego (Zaragoza, Spain).



## INTRODUCCIÓN

La carrera vertical es una modalidad de carrera por montaña caracterizada por poseer únicamente un ascenso de 1.000 metros con desnivel positivo ( $\pm 5\%$ ) y una longitud máxima de 5 km. El promedio de la inclinación en el ascenso debe ser, al menos, del 20%, y el 5% de la distancia total debe tener una inclinación superior al 33% (1). En este tipo de prueba, los corredores deben aplicar una fuerza neta considerable para vencer la pendiente en el mínimo tiempo posible, lo que se traduce en una alta demanda neuromuscular y metabólica. La velocidad de desplazamiento del corredor está íntimamente relacionada con la pendiente del terreno y la fuerza generada. A medida que avanza la prueba, la fatiga se convierte en un factor clave que compromete el rendimiento tanto biomecánico como fisiológico.

En el contexto de la carrera vertical, el perfil fuerza-velocidad (V(F)) puede ser clave para identificar cómo varía la capacidad neuromuscular del corredor al enfrentarse a pendientes pronunciadas conforme avanza la prueba, así como para identificar cómo la fatiga acumulada durante el esfuerzo puede alterar dicho perfil. A pesar de las investigaciones y aplicaciones ya existentes en otros deportes sobre este perfil, todavía se desconoce su grado de influencia sobre el rendimiento y la fatiga en la carrera vertical. Por este motivo, el objetivo principal del estudio fue analizar la evolución del perfil V(F) estimado y de los principales parámetros fisiológicos en corredores por montaña, comparando la primera y la segunda mitad de una prueba de carrera vertical.

## MÉTODOS:

Diez corredores por montaña completaron una carrera vertical (4,86 km; +835 m). Cada corredor portó un dispositivo GPS Apex Stats Sport, ubicado a nivel de la vértebra C7, que registró distancia, altitud y tiempo a una frecuencia de 1 Hz. Los datos se analizaron en tramos de 20 segundos, calculando velocidad y gradientes promedios por tramo.

Se estimó la fuerza (F) necesaria para elevar el centro de masas contra la gravedad (g), asumiendo la velocidad como constante en cada tramo mediante la fórmula (2):

$$F = g \cdot \sin(\text{atan}[\text{gradiente}])$$

A partir de una nube de puntos de fuerza-velocidad, se construyó un perfil V(F) utilizando la siguiente expresión:

$$V(F) = \frac{(V_0 - 1) \cdot (F_1 - F)}{(F_1 + [F \cdot C])} + 1$$

F<sub>1</sub>: fuerza debida al gradiente que permite desplazarse a 1 m/s; V<sub>0</sub>: máxima velocidad en ausencia de pendiente; C: curvatura del perfil.

El ajuste se realizó con mínimos cuadrados no lineales (Matlab 2024), eliminando outliers tras el análisis de residuos.

Simultáneamente, se registraron las siguientes variables fisiológicas mediante los dispositivos Moxy Monitor y Cosmed K5:

- Frecuencia cardiaca pico (FC<sub>pico</sub>) y media (FC<sub>media</sub>)
- Consumo de oxígeno pico (VO<sub>2pico</sub>) y medio (VO<sub>2medio</sub>)
- Saturación de oxígeno muscular en cuádriceps media (SmO<sub>2media</sub>) y mínima (SmO<sub>2mínima</sub>)

Los datos se compararon entre la primera y segunda mitad de la carrera con pruebas T. Para observar el efecto del nivel de rendimiento (5 mejores tiempos [grupo A] vs. 5 peores [grupo B]) sobre la fatiga, se aplicó la prueba ANOVA. Finalmente, mediante SPSS se realizó un análisis de correlación ("r" de Pearson) entre todas las variables analizadas y el tiempo final obtenido de cada corredor.

## RESULTADOS:

La fatiga redujo significativamente tanto los parámetros mecánicos (F<sub>1</sub>, V<sub>0</sub> y C), como los fisiológicos (VO<sub>2medio</sub>, VO<sub>2pico</sub>, SmO<sub>2media</sub> y SmO<sub>2mínima</sub>) con el avance de la prueba (Tabla 1).

Tabla 1: Variables fisiológicas y de perfil V(F) en la primera y segunda mitad de la prueba de carrera vertical. Resultados expresados como media  $\pm$  desviación estándar. \* $p < 0,05$ ; \*\* $p < 0,01$ . Tamaño del efecto medido como "d" de Cohen.

Variable	Parte de la carrera vertical		p	"d" Cohen
	Primera mitad	Segunda mitad		
V <sub>0</sub>	3,9 $\pm$ 0,5	2,6 $\pm$ 0,4	0,001**	1,77
F <sub>1</sub>	3,1 $\pm$ 0,8	2,7 $\pm$ 0,7	0,022*	0,73
C	3,3 $\pm$ 1,8	0,9 $\pm$ 0,3	0,002**	1,23
FC <sub>media</sub>	162,5 $\pm$ 10,1	165,0 $\pm$ 9,9	0,063	-0,61
FC <sub>pico</sub>	171,0 $\pm$ 7,3	171,5 $\pm$ 9,1	0,358	-0,13
VO <sub>2medio</sub>	58,0 $\pm$ 8,9	55,4 $\pm$ 7,6	0,017*	0,69
VO <sub>2pico</sub>	65,6 $\pm$ 10,0	62,9 $\pm$ 8,8	0,028*	0,79
SmO <sub>2media</sub>	33,7 $\pm$ 18,1	41,1 $\pm$ 18,9	0,004**	-1,33
SmO <sub>2mínima</sub>	17,9 $\pm$ 13,2	31,2 $\pm$ 20,3	0,016*	-0,94

Se identificaron correlaciones negativas significativas entre el tiempo de ascenso y las variables F<sub>1</sub>, VO<sub>2pico</sub> y VO<sub>2medio</sub> durante toda la prueba (Tabla 2).

Tabla 2: Análisis de correlación con el tiempo final de la prueba de carrera vertical. \* $p < 0,05$ ; \*\* $p < 0,01$ . "r": índice de correlación de Pearson.

Variable	Parte de la carrera vertical		p	r
	1ª mitad	2ª mitad		
V <sub>0</sub>	0,538	-0,222		
	0,136	-0,506		
F <sub>1</sub>	0,021*	-0,711		
	0,018*	-0,725		
C	0,872	0,059		
	0,684	0,148		
FC <sub>media</sub>	0,338	-0,391		
	0,580	-0,232		
FC <sub>pico</sub>	0,343	-0,388		
	0,742	-0,140		
VO <sub>2medio</sub>	0,014*	-0,740		
	0,002**	-0,850		
VO <sub>2pico</sub>	0,014*	-0,741		
	0,002**	-0,853		
SmO <sub>2media</sub>	0,093	0,631		
	0,170	0,537		
SmO <sub>2mínima</sub>	0,099	0,623		
	0,205	0,502		

El análisis del nivel de rendimiento de los corredores (grupo A vs. grupo B) sobre las variables estudiadas no mostró resultados estadísticamente significativos, ya que éstos experimentaron cambios similares independientemente de su nivel. No se observó una interacción significativa en el análisis ANOVA de medidas repetidas (pre-post fatiga en función del grupo de rendimiento).

## CONCLUSIONES

Durante la realización de la carrera vertical, la fatiga provocó una disminución significativa en los parámetros del perfil V(F) (F<sub>1</sub>, V<sub>0</sub> y C), así como en las respuestas fisiológicas. Esta reducción refleja una menor capacidad para generar fuerza y velocidad a medida que avanza la prueba, lo que compromete el rendimiento, especialmente en tramos con mayor inclinación.

Asimismo, se vio reflejada una progresiva disminución del potencial cardiorrespiratorio y metabólico del corredor conforme avanzó la carrera. No obstante, es importante destacar que la magnitud de estas alteraciones no mostró diferencias significativas entre corredores de distintos niveles de rendimiento. Es decir, tanto los deportistas de nivel alto como medio de rendimiento experimentaron una respuesta similar a la fatiga en términos de deterioro mecánico y fisiológico. Sin embargo, el análisis de correlación halló una clara relación entre mejores tiempos y valores más altos de fuerza y capacidad aeróbica. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de diseñar programas de entrenamiento específicos que desarrollen tanto la fuerza aplicada en condiciones de inclinación como la capacidad aeróbica general. La preparación física debe centrarse en optimizar el perfil V(F) y aumentar la potencia y capacidad aeróbica para tolerar mejor la fatiga acumulada durante las carreras verticales.



## REFERENCIAS:

1. The International Skyrunning Federation (<https://www.skyrunning.com/>)
2. Delhaye, C.; Rozier-Delgado, P.; Vonderscher, M.; Di Domenico, H.; Bowen, M.; Millet, G.; Morin, J.B.; Samozino, P.; Morel, B. Submaximal force-velocity relationships during mountain ultramarathon: Data from the field. *J Sports Sci.* 2024; 42(20): 1881-1890. DOI: 10.1080/02640414.2024.2413715

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Gobierno de Aragón (ValorA, S08\_23R) y por el Ministerio de Educación y Formación Profesional (FPU2020-06437).

[pbascuas@usj.es](mailto:pbascuas@usj.es)