



universidad  
de león



TRABAJO DE FIN DE GRADO EN CIENCIAS DE LA ACTIVIDAD FÍSICA Y DEL DEPORTE

Curso Académico 2016/2017

## INFLUENCIA DEL MODO DE LOCOMOCIÓN EN LA ECONOMÍA DE CARRERA EN DIFERENTES PENDIENTES

Influence of the locomotion mode on movement economy during different  
slopes

Autor/a: David López Calderón

Tutor/a: José A. Rodríguez Marroyo

Fecha: 05/07/2017

VºBº TUTOR/A

VºBº AUTOR/A



## **ÍNDICE**

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Objetivos .....	5
Metodología .....	6
Sujetos .....	6
Diseño experimental .....	6
Pruebas de economía.....	7
Test incremental máximo .....	7
Análisis estadístico .....	8
Resultados .....	9
Discusión.....	19
Conclusiones.....	20
Valoración personal.....	21
Bibliografía .....	22

## **RESUMEN**

El objetivo principal de éste trabajo fue determinar el efecto del modo de locomoción (andar y correr) en la economía del movimiento en diferentes pendientes positivas. En el estudio participaron 12 estudiantes deportistas, 6 de ellos corredores. Todos ellos realizaron test para calcular la economía en diferentes pendientes (8, 10, 12, 14, 16 y 18%), modos de locomoción (andar y correr), velocidades (velocidad de transición y otra inferior elegida subjetivamente) y una prueba de esfuerzo en el laboratorio. Para el análisis se registró la frecuencia cardíaca (FC), la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE), el consumo de oxígeno ( $VO_2$ ) y el cociente respiratorio (CR). Respecto a la pendiente, los resultados mostraron que el  $VO_2$ , la FC y la RPE aumentan paulatinamente hasta el 12%, y la economía empeora significativamente hasta el 14%. En cuanto al modo de locomoción, el  $VO_2$  corriendo es significativamente mayor a partir del 12%; la economía es significativamente menor corriendo a partir del 12%, y la RPE muestra valores más bajos corriendo que andando. En cuanto a la velocidad, se observan mejores economías a velocidad de transición que elegir una velocidad ligeramente inferior. En conclusión, andar es más eficiente por encima del 10%. A partir del 12% el coste energético de la carrera fue significativamente más alto. Debajo del 12% los valores más bajos de RPE cuando los sujetos corrieron indican que la carrera produzca menor discomfort muscular.

*Palabras clave:* Economía de carrera, pendiente, frecuencia cardíaca, RPE, consumo de oxígeno.

## **ABSTRACT**

The main aim of this study was to determine the effect from the way of locomotion (walk and run) on the economy of the movement in positive slopes. In the study, 12 student-athletes took part, 6 of them were runners. All of them realized test to calculate the economy of locomotion in different slopes (8, 10, 12, 14, 16 and 18 %), the ways of locomotion (walking and running), the speeds (the speed of transition and a lower speed chosen subjectively) and an exercise stress test in the laboratory. For the analysis the heart rate (HR), the rated perceived exertion (RPE), the oxygen uptake ( $VO_2$ ) and the respiratory quotient (CR) were recorded. With regard to the slope, the results showed that  $VO_2$ , HR and RPE increase gradually up to 12 %, and the economy decrease significantly up to 14%. As for the way of locomotion, the  $VO_2$  when running is significantly higher from 12%; the economy is significantly lower running from 12% and the RPE shows lower values when running than when walking. Regarding the speed, better economies were observed in speed of transition than when choosing a speed a bit lower. In conclusion, to walk is more efficient over 10%. From 12% the energetic cost of running was significantly higher. Under 12% the lowest values from RPE when the subjects ran showed that to run produce less muscular discomfort.

*Key words:* Running economy, slope, heart rate, RPE, oxygen uptake.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el número de aficionados a las carreras populares ha aumentado considerablemente. Del mismo modo, la organización y competición en carreras por montaña ha experimentado un gran auge. El rendimiento en los deportes de resistencia se ha asociado, desde el punto de vista fisiológico, al consumo máximo de oxígeno, a la utilización fraccional del mismo (e.g., umbrales ventilatorios) y a la economía/eficiencia del movimiento. Debido al escaso margen de mejora que presenta el consumo máximo de oxígeno, cuando los sujetos alcanzan altos valores o tienen un bagaje de entrenamiento previo, la valoración de las otras variables como la economía del movimiento ha tomado mayor relevancia.

La economía del movimiento en corredores ha sido ampliamente investigada, gracias a lo cual, sabemos que tanto corriendo como andando, el coste energético es superior en terrenos blandos que en terrenos duros (Zamparo et al., 1992; Lejeune et al., 1998), por lo que partimos de que la economía de carrera será mayor en carreras de asfalto que en carreras de montaña, tanto por la dureza variable del terreno, como por la amplia gama de pendientes con las que cuentan éstas últimas.

Los primeros estudios sobre coste energético y pendientes (Margaria et al., 1963) reflejaron que en pendientes positivas, tanto el coste energético de la marcha como el de la carrera aumentan en función de la inclinación. Sobre pendientes negativas, tanto el coste energético de la marcha como el de la carrera alcanzan su valor más bajo en -10%. Por debajo de esa pendiente, tanto el coste energético de la marcha como el de la carrera están negativamente relacionados con la inclinación, siendo mayor el coste energético cuanto menor es la pendiente.

Margaria et al. (1963) también introdujo el concepto de *eficiencia mecánica* definida como la proporción de trabajo mecánico externo para un desplazamiento vertical a la energía interna gastada. Sólo tuvo en cuenta el trabajo mecánico potencial (sin tener en cuenta el cinético) porque consideró que más allá de una pendiente dada, la subida (o descenso) del centro de masa es el contribuidor predominante al trabajo mecánico externo. Esta suposición fue apoyada por Minetti et al. (1993, 1994a), que estableció el +15% y -15% como pendientes umbral para el trabajo puro positivo cuesta arriba y trabajo puro negativo para descensos, respectivamente. Minetti et al. (2002) amplió el abanico de pendientes desde -45% hasta +45%, y observó que el coste energético mínimo fue similar en la marcha y en la carrera en torno al -10 – -20%.

Ardigò et al. (2003) comparó el coste energético de la marcha, la carrera y el ciclismo en diferentes velocidades y pendientes, y partiendo de que en llano es más económico correr que andar a una velocidad elevada para la marcha, observaron que es preferible andar que correr en pendientes donde la velocidad es más típica para andar (donde el coste metabólico de la carrera es mucho mayor que el de la marcha). En cambio, en pendientes bajas la velocidad aumenta y es más económica la carrera que la marcha. Por lo tanto concluyeron que la “pendiente crítica” (pendiente a partir de la cual es más económico andar que correr) estaba en torno al 13-15%.

En otro estudio reciente centrado en las carreras por montaña, donde se estudió la especialidad del “kilómetro vertical”, (Giovanelli et al., 2015) compararon el coste metabólico entre la marcha y la carrera en pendientes extremas (entre el 16 y el 81%), y observaron que hay un rango de pendientes (entre el 37 y el 70%) en el que se minimiza el gasto energético tanto corriendo como andando, y recomiendan andar a partir del 28% (la segunda pendiente más baja medida por encima de 16%) para reducir el gasto energético.

En cuanto a velocidades de transición, (Minetti et al., 1994b) se observó que la velocidad de transición espontánea era 0.5-0.9 km/h menor que la velocidad de mismo coste energético entre correr y andar, y que las velocidades de transición espontánea varían en torno a 2 km/h entre la “última” velocidad andando y la “primera” velocidad de carrera.

También se investigó sobre los factores determinantes de la velocidad de transición (Hreljac, 1995), concluyendo con la hipótesis de que la razón principal podría ser el evitar esfuerzos excesivos y riesgo de lesiones, durante la marcha, para el grupo de músculos dorsiflexores cuando trabajan a intensidades cercanas a su capacidad máxima a partir de velocidades cercanas a la velocidad de transición.

Desde un punto de vista más biomecánico, se investigó las transiciones de la marcha a la carrera y viceversa, y sobre el paso de transición (Segers et al., 2007). La transición de la marcha a la carrera comienza durante el balanceo del último paso de la marcha y termina tras el paso de transición. En la transición de la carrera a la marcha no se observa preparación, pero la transición se completa con la reorientación del tronco durante el primer paso de la marcha. Y por último, el paso de transición es asimétrico, al contrario que el paso de la marcha y el de la carrera.

Volviendo al gasto energético comparando ambos tipos de locomoción, (Biewener et al., 2004) se sugirió que el mayor gasto energético en la carrera que en la marcha podría ser debido, en parte, por la menor ventaja mecánica resultante de una flexión mayor en la pierna que la que se realiza andando, donde toma protagonismo la rigidez muscular de la pierna (leg stiffness).

Sobre economía de carrera en ultra maratones, Millet et al. (2011) nos muestra que la economía de carrera no está directamente relacionada con el rendimiento pero, sin embargo, podría ser importante para mantener un alto porcentaje del  $VO_{2max}$  en un ultra maratón. Craib et al. (1996) registró un coste energético mayor en corredores flexibles, probablemente porque unas estructuras musculo-tendinosas más rígidas facilitan el almacenaje de energía elástica y la recuperación, y sugiere que la rigidez en ciertas áreas del sistema musculo-esquelético podría mejorar la economía de carrera por el almacenaje de energía elástica y la reducción de la actividad estabilizadora del músculo. Más adelante, Millet et al. (2012) observa que el equilibrio entre un bajo coste energético, y una mayor flexibilidad, para optimizar el rendimiento en ultra maratones, puede favorecer a una flexibilidad mayor perjudicando al coste energético, teniendo en cuenta parámetros como la rigidez y la masa de la pierna, la frecuencia de zancada, y el uso de calzado mullido y bastones. Sugiere que los corredores de ultra maratón deberían limitar el estiramiento regular, aunque Chen et al. (2011) muestra que el entrenamiento de la flexibilidad antes de un ejercicio excéntrico intenso atenúa el daño muscular inducido por el ejercicio.

## **OBJETIVOS**

El principal objetivo de éste trabajo fue determinar el efecto que tiene el modo de locomoción (*i.e.*, andar y correr) en la economía del movimiento en diferentes pendientes positivas.

Además, se plantearon los siguientes objetivos del trabajo:

- Determinar si la velocidad de desplazamiento afecta a la relación modo de locomoción y coste energético del movimiento.
- Analizar la influencia de la pendiente en el comportamiento de distintas variables fisiológicas y en la percepción subjetiva del esfuerzo.



## METODOLOGÍA

### Sujetos

En el presente trabajo participaron voluntariamente 12 estudiantes físicamente activos de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte de la Universidad de León (media  $\pm$  SD; edad,  $23.3 \pm 2.7$  años; estatura,  $180.6 \pm 4.9$  cm; peso,  $74.0 \pm 5.3$  kg; longitud de pierna,  $91.3 \pm 4.2$  cm). Seis de los cuales entrenaron habitualmente en distintos deporte (triatlón, carreras por montaña, atletismo de fondo y medio fondo). El resto de sujetos practicaron actividad física de manera regular, al menos 3 veces por semana. Todos los sujetos aceptaron participar de manera voluntaria en el estudio y firmaron el consentimiento informado antes del inicio del mismo.

### Diseño experimental

Todos los sujetos acudieron en cuatro ocasiones al laboratorio de Valoración de la Condición Física de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte durante los meses de abril y mayo de 2017. Durante la primera visita los sujetos fueron sometidos a una familiarización con los protocolos del estudio. Además, en esta sesión se determinó la velocidad de desplazamiento para las pendientes estudiadas (*i.e.*, 8, 10, 12, 14, 16 y 18%). Esta velocidad fue hallada de manera subjetiva e individual para cada sujeto. Los sujetos identificaron su velocidad de transición andar-correr y se disminuyó la misma para que fueran capaces de andar al menos 4 min. En la segunda sesión, utilizando la velocidad previamente establecida, se valoró la economía de carrera en diferentes pendientes: 10, 16 y 12%. En la tercera sesión se valoró el coste energético a 8, 18 y 14%. Por último, en la cuarta sesión de valoración se procedió a valorar de nuevo la economía de carrera al 12 % pero incrementando la velocidad de desplazamiento. En esta sesión se seleccionó la velocidad de transición andar-correr. Posteriormente, tras una pausa de 10-15 min los sujetos realizaron un test incremental hasta el agotamiento en el tapiz rodante. Todas las sesiones de valoración fueron separadas al menos por 48h. El calentamiento (10 min de carrera continua a 8-10 km/h y 5 min de estiramientos) fue estandarizado para todos los sujetos y sesiones de valoración. Así mismo las condiciones del laboratorio (20 °C y 20% humedad relativa) y la hora del día a la que se realizaron las valoraciones fueron similares para cada sujeto. El diseño experimental utilizado en el estudio fue balanceado.

## **Pruebas de economía**

Las pruebas de economía, como se indicó previamente, fueron realizadas a una velocidad seleccionada subjetivamente por los sujetos (h/p/cosmos Pulsar, h/p/cosmos sports & medical gmbh, Nussdorf, Germany). Esta velocidad fue ligeramente inferior a la velocidad de transición andar-correr. Lo cual permitió a los sujetos completar los 4 min que duró la prueba andando. En todas las pendientes estudiadas los sujetos anduvieron y corrieron, dejando 4 min de recuperación entre los modos de locomoción. El mismo tiempo de recuperación fue dado entre pendientes. Los sujetos fueron refrigerados continuamente en todas las pruebas por medio de dos ventiladores colocados a los lados del tapiz. El intercambio de gases respirados y la FC fueron registrados continuamente utilizando un analizador de gases (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium), y cada 5 s (Polar Vantage NV, Polar Electro Oy, Finland), respectivamente. Por último, en los últimos 10 s de cada minuto se recogió la RPE de los sujetos. Para el análisis de datos ( $VO_2$ , FC y RPE) solo se tuvo en cuenta el promedio de los 2 últimos minutos de cada intensidad (Lucia et al., 2006). La economía de movimiento fue determinada como el costo de  $VO_2$  (ml/kg/km) (Daniels et al., 1992) o costo energético (J/kg/m) (Minetti et al., 2002) a una determinada velocidad. El trabajo mecánico (W/kg) en cada una de las pendientes analizadas fue calculado como (Minetti et al., 2002):

$$W/kg = g \times v \times \text{seno}(\arctan i)$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $v$  es la velocidad en m/s, e  $i$  es la pendiente. Por último, la eficiencia mecánica de la locomoción fue calculada como el ratio entre el trabajo mecánico realizado y el gasto metabólico (Ardigò et al., 2003).

## **Test incremental máximo**

El test incremental se realizó sobre un tapiz rodante h/p/cosmos Pulsar (h/p/cosmos sports & medical gmbh, Nussdorf, Germany). La velocidad inicial fue de 6 km/h y se incrementó en 1 km/h cada 1 min hasta que los sujetos no pudieron mantener la velocidad fijada. La pendiente del tapiz fue fijada a un 1% durante toda la prueba para intentar imitar el coste metabólico que produce el viento cuando se corre al aire libre. Durante toda la prueba se monitorizó la frecuencia cardíaca (FC) (Polar Vantage NV, Polar Electro Oy, Finland) cada 5 s y los gases respirados respiración a respiración (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium). Además, en los últimos 10 s de cada escalón los sujetos indicaron su percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) utilizando la escala de Borg de 0-10 (Borg et al.,

1987). Se consideró como  $VO_{2max}$  al valor máximo obtenido al promediar los datos cada 30 s. Además, se determinaron los umbrales ventilatorios a tendiendo a la metodología descrita por (Davis, 1985). El criterio utilizado para determinar el umbral ventilatorio (VT) fue el incremento de la ventilación (VE), el equivalente ventilatorio del oxígeno ( $VE/VO_2$ ) y de la presión end-tidal de oxígeno ( $PET_{O_2}$ ) sin el aumento concomitante del equivalente ventilatorio del dióxido de carbono ( $VE/VCO_2$ ), y la segunda ruptura de la linealidad de la VE, el aumento del  $VE/VO_2$  con un incremento paralelo del  $VE/VCO_2$  y la disminución de la presión end-tidal del dióxido de carbono ( $PET_{CO_2}$ ) para hallar el umbral de compensación respiratoria (RCT).

### **Análisis estadístico**

Los resultados se expresan como media  $\pm$  desviación estándar (SD). Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de la muestra. La influencia de la pendiente (8, 10, 12, 14 y 16 y 18%) y el modo de locomoción (andar vs. correr) se estudió por medio de una ANOVA de medias repetidas (pendiente  $\times$  locomoción). El mismo análisis fue empleado para estudiar la influencia de la velocidad en el modo de desplazamiento (velocidad [por debajo de la velocidad de transición andar-correr vs. velocidad de transición andar-correr]  $\times$  locomoción [andar vs. correr]). Cuando se analizó una F estadísticamente significativa se aplicó la prueba de Bonferoni para establecer las diferencias entre medias. Valores de  $p < 0.05$  fueron considerados como estadísticamente significativos. El tamaño del efecto se calculó por medio de la eta parcial al cuadrado ( $\eta_p^2$ ). Valores de 0.01, 0.06 y 0.14 fueron considerados pequeños, moderados o grandes, respectivamente. El software estadístico SPSS+ v.24.0 fue usado para este análisis.

## RESULTADOS

Las características fisiológicas de los sujetos que participaron en el estudio se muestran en la Tabla 1. Las velocidades verticales analizadas en este estudio y el trabajo mecánico realizado por los sujetos en cada una de las pendientes y velocidades estudiadas se muestran en la Tabla 2. Ambas variables aumentaron significativamente ( $p < 0.05$ ) con el aumento de la pendiente. Los valores analizados en la velocidad de transición andar-correr fueron menores ( $p < 0.05$ ) a los obtenidos cuando los sujetos redujeron en 0.5 km/h la velocidad de desplazamiento.

Tabla 1. Datos obtenidos en las pruebas de esfuerzo máximas realizadas.

	media $\pm$ SD
VO <sub>2max</sub> (ml/kg/min)	54.8 $\pm$ 9.7
Velocidad <sub>max</sub> (km/h)	17.6 $\pm$ 2.0
FC <sub>max</sub> (ppm)	193 $\pm$ 6
VO <sub>2RCT</sub> (ml/kg/min)	44.4 $\pm$ 6.1
%VO <sub>2max</sub>	81.8 $\pm$ 6.5
Velocidad <sub>RCT</sub> (km/h)	13.8 $\pm$ 1.5
FC <sub>RCT</sub> (ppm)	175 $\pm$ 8
VO <sub>2VT</sub> (ml/kg/min)	33.3 $\pm$ 5.2
%VO <sub>2max</sub>	61.2 $\pm$ 5.8
Velocidad <sub>VT</sub> (km/h)	10.1 $\pm$ 1.4
FC <sub>VT</sub> (ppm)	150 $\pm$ 10

VO<sub>2max</sub>, consumo de oxígeno máximo; FC, frecuencia cardiaca; RCT, umbral de compensación respiratoria; VT, umbral ventilatorio.

Tabla 2. Velocidad vertical y trabajo mecánico realizado por los sujetos en las diferentes pendientes estudiadas (media  $\pm$  SD).

%	°	Velocidad (km/h)	Velocidad Vertical (m/s)	Trabajo mecánico (W/kg)
8	4.6	7.3 $\pm$ 0.5§‡†	0.16 $\pm$ 0.01&§§‡†*	1.6 $\pm$ 0.1&§§‡†*
10	5.7	7.1 $\pm$ 0.3§‡†	0.20 $\pm$ 0.01§§‡†*	2.0 $\pm$ 0.1§§‡†*
12	6.8	6.9 $\pm$ 0.4§‡†*	0.24 $\pm$ 0.01§‡†*	2.3 $\pm$ 0.1§‡†*
14	8.0	6.7 $\pm$ 0.5†*	0.27 $\pm$ 0.01‡†*	2.7 $\pm$ 0.1‡†*
16	9.1	6.4 $\pm$ 0.4*	0.30 $\pm$ 0.02†*	3.0 $\pm$ 0.2†*
18	10.2	6.3 $\pm$ 0.5*	0.34 $\pm$ 0.02*	3.3 $\pm$ 0.2*
12 <sup>a</sup>	6.8	7.4 $\pm$ 0.5	0.22 $\pm$ 0.01	2.1 $\pm$ 0.1

<sup>a</sup>, velocidad de transición andar-correr. &, diferencias significativas con 10% (p<0.05). §, diferencias significativas con 12% (p<0.05). §, diferencias significativas con 14% (p<0.05). ‡, diferencias significativas con 16% (p<0.05). †, diferencias significativas con 18% (p<0.05). \*, diferencias significativas con 12<sup>ao</sup>% (p<0.05).

Se analizó un efecto significativo de la variable pendiente y locomoción para el VO<sub>2</sub> (F=28.91, p<0.001,  $\eta_p^2=0.72$  y F=20.83, p<0.01,  $\eta_p^2=0.65$ , respectivamente), la economía expresada en costo de VO<sub>2</sub> (F=115.09, p<0.001,  $\eta_p^2=0.91$  y F=17.56, p<0.01,  $\eta_p^2=0.62$ , respectivamente) o costo calórico (F=163.3, p<0.001,  $\eta_p^2=0.94$  y F=16.3, p<0.01,  $\eta_p^2=0.59$ , respectivamente), el costo calórico del desplazamiento vertical (F=72.3, p<0.001,  $\eta_p^2=0.87$  y F=12.6, p<0.01,  $\eta_p^2=0.53$ , respectivamente) y la eficiencia mecánica (F=171.5, p<0.001,  $\eta_p^2=0.87$  y F=15.6, p<0.01,  $\eta_p^2=0.59$ , respectivamente). Globalmente, el VO<sub>2</sub> se incrementó paulatinamente con el aumento de la pendiente hasta el 12%. No se analizó un incremento significativo de esta variable a partir de esta pendiente (Tabla 3). El comportamiento de la economía fue similar al del VO<sub>2</sub>. La economía empeoró paulatinamente hasta el 14% de pendiente, independientemente del modo de locomoción (Tabla 4 y 5). El modo de locomoción sólo afectó a estas variables a partir del 12% de pendiente (Tabla 3 y 4). El costo calórico vertical (Tabla 6) y la eficiencia mecánica (Tabla 7) se comportaron de manera similar a la economía.

Tabla 3. Consumo de oxígeno (l/min) obtenido en cada una de las pendientes según el modo de locomoción (media  $\pm$  SD).

Pendiente	Andar	Correr	$\eta_p^2$
8%	2.53 $\pm$ 0.24&\$\$‡‡	2.66 $\pm$ 0.18&\$\$‡‡	0.20
10%	2.92 $\pm$ 0.27‡‡	3.00 $\pm$ 0.27\$\$‡‡	0.17
12%	3.14 $\pm$ 0.51	3.34 $\pm$ 0.44†*	0.65
14%	3.23 $\pm$ 0.38	3.36 $\pm$ 0.25*	0.36
16%	3.36 $\pm$ 0.39	3.51 $\pm$ 0.36*	0.64
18%	3.45 $\pm$ 0.56	3.61 $\pm$ 0.46*	0.46
$\eta_p^2$	0.94	0.95	

$\eta_p^2$ , eta parcial al cuadrado. &, diferencias significativas con 10% ( $p < 0.05$ ). \$, diferencias significativas con 12% ( $p < 0.05$ ). §, diferencias significativas con 14% ( $p < 0.05$ ). ‡, diferencias significativas con 16% ( $p < 0.05$ ). †, diferencias significativas con 18% ( $p < 0.05$ ). \*, diferencias significativas con Andar ( $p < 0.05$ ).

Tabla 4. Economía (ml/kg/km) analizada en las diferentes pendientes según el modo de locomoción (media  $\pm$  SD).

Pendiente	Andar	Correr	$\eta_p^2$
8%	284.0 $\pm$ 31.2\$\$‡‡	297.7 $\pm$ 16.5\$\$‡‡	0.19
10%	333.2 $\pm$ 24.4\$\$‡‡	341.8 $\pm$ 14.7§‡‡	0.16
12%	366.2 $\pm$ 30.5‡‡	390.8 $\pm$ 26.7‡‡*	0.65
14%	391.4 $\pm$ 27.3‡‡	407.9 $\pm$ 22.8‡‡*	0.41
16%	426.6 $\pm$ 27.1	445.9 $\pm$ 20.1*	0.63
18%	442.3 $\pm$ 43.3	465.1 $\pm$ 34.6*	0.46
$\eta_p^2$	1.00	0.98	

$\eta_p^2$ , eta parcial al cuadrado. \$, diferencias significativas con 12% ( $p < 0.05$ ). §, diferencias significativas con 14% ( $p < 0.05$ ). ‡, diferencias significativas con 16% ( $p < 0.05$ ). †, diferencias significativas con 18% ( $p < 0.05$ ). \*, diferencias significativas con Andar ( $p < 0.05$ ).

Tabla 5. Economía (J/kg/m) analizada en las diferentes pendientes según el modo de locomoción (media  $\pm$  SD).

Pendiente	Andar	Correr	$\eta_p^2$
8%	6.0 $\pm$ 0.7&\$\$‡††	6.2 $\pm$ 0.3&\$\$‡††	0.14
10%	7.0 $\pm$ 0.5\$\$‡††	7.1 $\pm$ 0.3\$\$‡††	0.10
12%	7.7 $\pm$ 0.6‡††	8.1 $\pm$ 0.5‡††*	0.56
14%	8.2 $\pm$ 0.6‡††	8.6 $\pm$ 0.5‡††*	0.36
16%	9.0 $\pm$ 0.6	9.4 $\pm$ 0.4*	0.60
18%	9.4 $\pm$ 0.9	9.8 $\pm$ 0.7*	0.39
$\eta_p^2$	1.00	1.00	

$\eta_p^2$ , eta parcial al cuadrado. &, diferencias significativas con 10% ( $p < 0.05$ ). \$, diferencias significativas con 12% ( $p < 0.05$ ). §, diferencias significativas con 14% ( $p < 0.05$ ). ‡, diferencias significativas con 16% ( $p < 0.05$ ). †, diferencias significativas con 18% ( $p < 0.05$ ). \*, diferencias significativas con Andar ( $p < 0.05$ ).

Tabla 6. Costo calórico vertical (J/kg/m) analizado (media  $\pm$  SD).

Pendiente	Andar	Correr	$\eta_p^2$
8%	74.7 $\pm$ 8.6\$\$‡††	77.4 $\pm$ 4.6&\$\$‡††	0.12
10%	68.9 $\pm$ 6.1\$‡††	70.1 $\pm$ 4.8\$‡††	0.09
12%	62.7 $\pm$ 7.6\$‡††	66.3 $\pm$ 6.0\$‡††*	0.56
14%	55.9 $\pm$ 5.9†	57.8 $\pm$ 3.8†*	0.30
16%	52.3 $\pm$ 3.8	54.6 $\pm$ 3.3*	0.61
18%	48.1 $\pm$ 5.0	50.3 $\pm$ 3.7*	0.40
$\eta_p^2$	0.96	0.98	

$\eta_p^2$ , eta parcial al cuadrado. &, diferencias significativas con 10% ( $p < 0.05$ ). \$, diferencias significativas con 12% ( $p < 0.05$ ). §, diferencias significativas con 14% ( $p < 0.05$ ). ‡, diferencias significativas con 16% ( $p < 0.05$ ). †, diferencias significativas con 18% ( $p < 0.05$ ). \*, diferencias significativas con Andar ( $p < 0.05$ ).

Tabla 7. Eficiencia mecánica (%) obtenida en las pendientes estudiadas (media  $\pm$  SD).

Pendiente	Andar	Correr	$\eta_p^2$
8%	13.3 $\pm$ 1.6 $\&\$§\ddagger\ddagger$	12.7 $\pm$ 0.7 $\&\$§\ddagger\ddagger$	0.17
10%	14.3 $\pm$ 1.2 $\$§\ddagger\ddagger$	14.1 $\pm$ 1.0 $\$§\ddagger\ddagger$	0.13
12%	15.8 $\pm$ 1.7 $\$§\ddagger\ddagger$	14.9 $\pm$ 1.2 $\$§\ddagger\ddagger^*$	0.53
14%	17.7 $\pm$ 1.8 $\ddagger$	17.0 $\pm$ 1.1 $\ddagger^*$	0.37
16%	18.9 $\pm$ 1.3	18.1 $\pm$ 1.1 $^*$	0.62
18%	20.6 $\pm$ 2.1	19.6 $\pm$ 1.5 $^*$	0.42
$\eta_p^2$	0.98	0.99	

$\eta_p^2$ , eta parcial al cuadrado.  $\&$ , diferencias significativas con 10% ( $p < 0.05$ ).  $\$$ , diferencias significativas con 12% ( $p < 0.05$ ).  $\$$ , diferencias significativas con 14% ( $p < 0.05$ ).  $\ddagger$ , diferencias significativas con 16% ( $p < 0.05$ ).  $\ddagger$ , diferencias significativas con 18% ( $p < 0.05$ ).  $^*$ , diferencias significativas con Andar ( $p < 0.05$ ).

La frecuencia cardiaca sólo se vio afectada por la pendiente ( $F=27.09$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2=0.71$ ) hasta el 12%. No se encontraron diferencias significativas según el modo de locomoción en ninguna de las pendientes analizadas (Tabla 8).

Tabla 8. Frecuencia cardiaca (ppm) en cada una de las pendientes estudiadas según el modo de locomoción (media  $\pm$  SD).

Pendiente	Andar	Correr	$\eta_p^2$
8%	150 $\pm$ 17 $\$§\ddagger\ddagger$	152 $\pm$ 16 $\$§\ddagger\ddagger$	0.07
10%	161 $\pm$ 13 $\$§\ddagger\ddagger$	162 $\pm$ 15 $\$§\ddagger\ddagger$	0.03
12%	170 $\pm$ 16	170 $\pm$ 16	0.08
14%	170 $\pm$ 16	171 $\pm$ 16	0.05
16%	173 $\pm$ 14	174 $\pm$ 13	0.11
18%	174 $\pm$ 14	175 $\pm$ 14	0.04
$\eta_p^2$	0.97	0.97	

$\eta_p^2$ , eta parcial al cuadrado.  $\$$ , diferencias significativas con 12% ( $p < 0.05$ ).  $\$$ , diferencias significativas con 14% ( $p < 0.05$ ).  $\ddagger$ , diferencias significativas con 16% ( $p < 0.05$ ).  $\ddagger$ , diferencias significativas con 18% ( $p < 0.05$ ).  $^*$ , diferencias significativas con Andar ( $p < 0.05$ ).



La RPE se vio afectada significativamente por la pendiente ( $F=20.89$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta_p^2=0.66$ ) y el modo de locomoción ( $F=13.44$ ,  $p<0.01$ ,  $\eta_p^2=0.55$ ). Al igual que el  $VO_2$  y la economía, a partir del 12% de pendiente no se obtuvieron diferencias significativas entre sus valores con el incremento de pendiente (Tabla 9). Los menores valores ( $p<0.05$ ) fueron obtenidos corriendo entre el 8-14% de pendiente (Tabla 9). La interacción de las variables pendiente y modo de locomoción no tuvo efectos significativos en la RPE, ni en el resto variables fisiológicas estudiadas en este trabajo (i.e.,  $VO_2$ , economía y frecuencia cardiaca).

Tabla 9. Percepción subjetiva del esfuerzo en función de la pendiente y el modo de locomoción (media  $\pm$  SD).

Pendiente	Andar	Correr	$\eta_p^2$
8%	2.9 $\pm$ 0.6 $\$ \ddagger \dagger$	2.3 $\pm$ 0.8 $\& \$ \ddagger \dagger^*$	0.41
10%	3.7 $\pm$ 1.5 $\ddagger \dagger$	3.0 $\pm$ 1.1 $\$ \ddagger \dagger^*$	0.40
12%	5.0 $\pm$ 1.9	4.1 $\pm$ 2.0*	0.37
14%	4.8 $\pm$ 1.3	4.1 $\pm$ 1.4 $\dagger^*$	0.54
16%	5.2 $\pm$ 1.7	4.6 $\pm$ 1.6	0.29
18%	5.1 $\pm$ 1.1	4.9 $\pm$ 1.3	0.02
$\eta_p^2$	0.95	0.93	

$\eta_p^2$ , eta parcial al cuadrado. &, diferencias significativas con 10% ( $p<0.05$ ). \$, diferencias significativas con 12% ( $p<0.05$ ). §, diferencias significativas con 14% ( $p<0.05$ ). ‡, diferencias significativas con 16% ( $p<0.05$ ). †, diferencias significativas con 18% ( $p<0.05$ ). \*, diferencias significativas con Andar ( $p<0.05$ ).

La velocidad no tuvo ningún efecto significativo sobre el  $VO_2$  (Figura 1), el coste calórico vertical (Figura 2), la eficiencia mecánica (Figura 3), la frecuencia cardiaca (Figura 4) y la RPE (Figura 5) a 12% de pendiente. Sin embargo, sí que se halló una interacción general de la velocidad sobre la economía ( $F=28.6$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta_p^2=0.74$ ). Las mejores economías ( $p<0.01$ ) se analizaron cuando los sujetos adoptaron la velocidad de transición (Figura 6). Al igual que sucedió cuando se analizaron todas las pendientes en conjunto, a 12% se halló un efecto significativo del modo de locomoción para el  $VO_2$  ( $F=18.83$ ,  $p<0.01$ ,  $\eta_p^2=0.67$ ), economía ( $F=21.2$ ,  $p<0.01$ ,  $\eta_p^2=0.68$  y  $F=14.0$ ,  $p<0.01$ ,  $\eta_p^2=0.58$  cuando se expresó como ml/kg/km y J/kg/m, respectivamente), coste calórico vertical ( $F=12.4$ ,  $p<0.01$ ,  $\eta_p^2=0.55$ ), eficiencia mecánica ( $F=12.0$ ,  $p<0.01$ ,  $\eta_p^2=0.55$ ), RPE ( $F=15.85$ ,  $p<0.01$ ,  $\eta_p^2=0.61$ ) e incluso para la frecuencia cardiaca ( $F=5.90$ ,  $p<0.05$ ,  $\eta_p^2=0.37$ ). Los peores resultados ( $p<0.05$ ) se

obtuvieron corriendo (Figura 1, 2, 3 y 6). Sin embargo, las menores ( $p < 0.05$ ) RPE (Figura 5) se analizaron corriendo. Únicamente, se halló un efecto significativo de la interacción velocidad y modo de locomoción en la frecuencia cardiaca ( $F = 8.27$ ,  $p < 0.05$ ,  $\eta_p^2 = 0.45$ ). Así, sólo se obtuvieron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la frecuencia cardiaca entre andar y correr en la velocidad de transición (Figura 4).

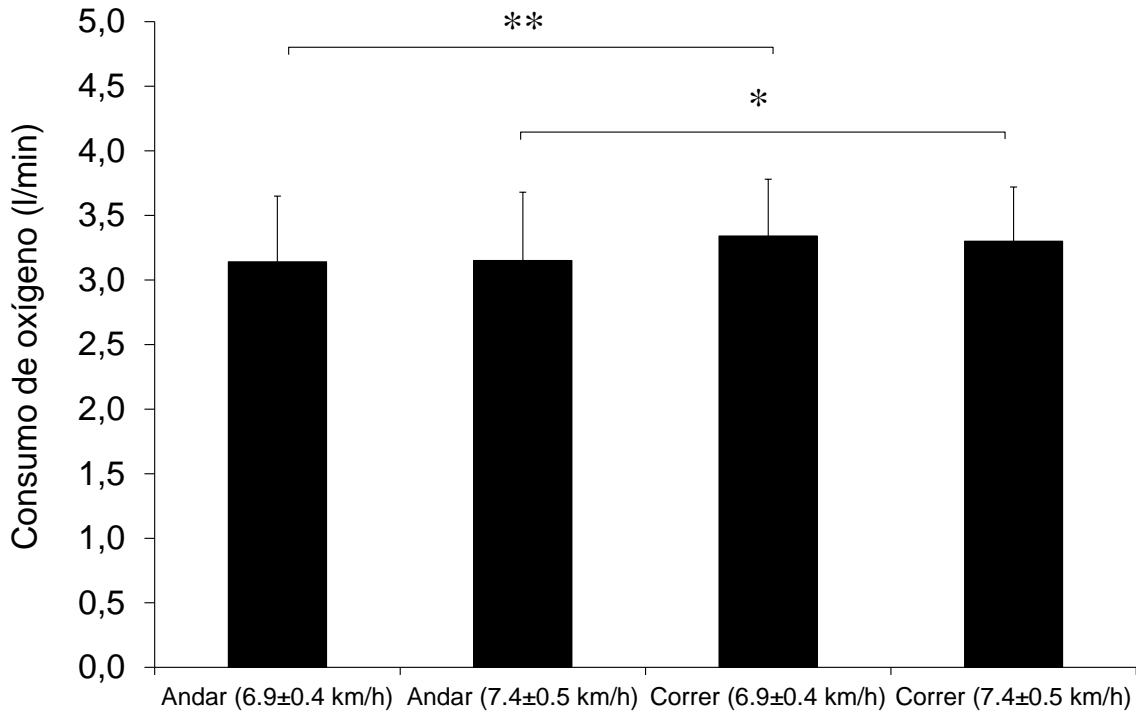


Figura 1. Consumo de oxígeno a 12% de pendiente según el modo de locomoción y velocidad de desplazamiento. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*\*,  $p < 0.01$ . \*,  $p < 0.05$ .

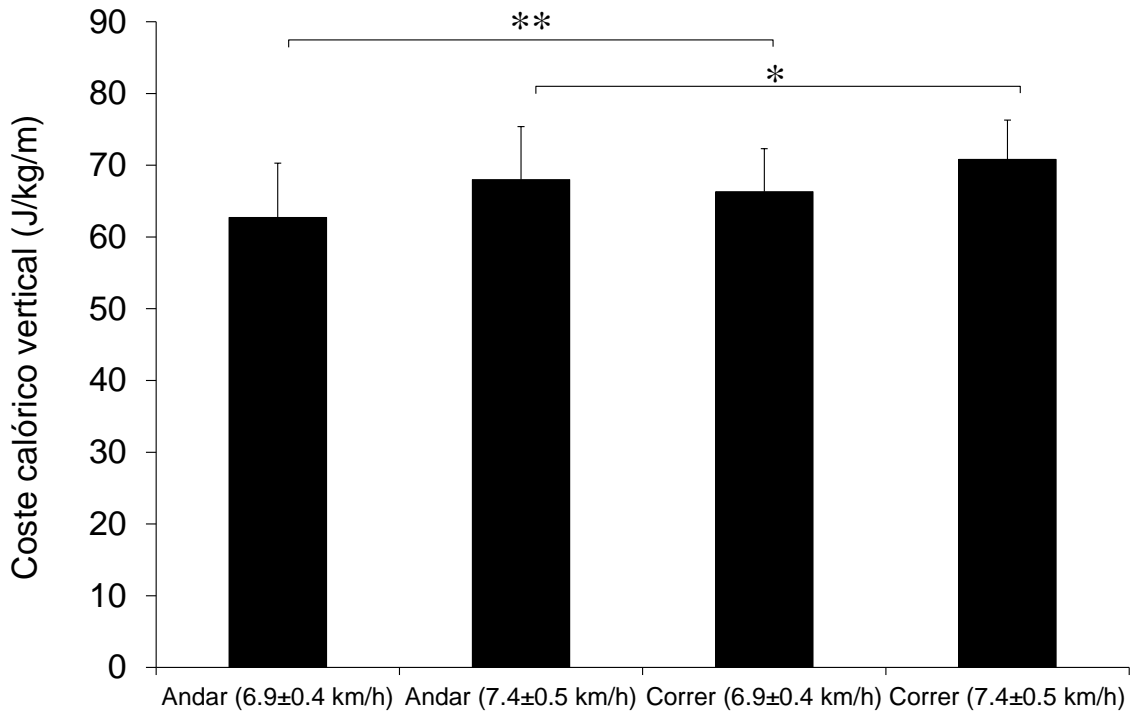


Figura 2. Coste calórico del desplazamiento vertical a 12% de pendiente. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*\*,  $p < 0.01$ . \*,  $p < 0.05$ .

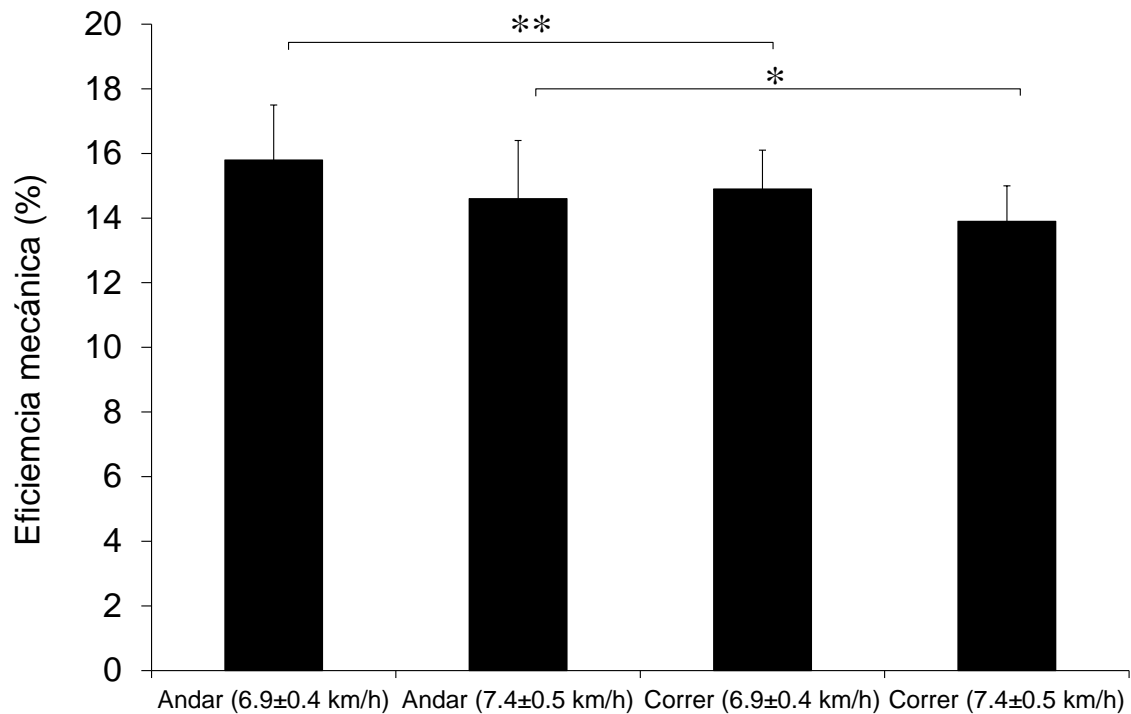


Figura 3. Eficiencia mecánica a 12% de pendiente según el modo de locomoción y velocidad de desplazamiento. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*\*,  $p < 0.01$ . \*,  $p < 0.05$ .

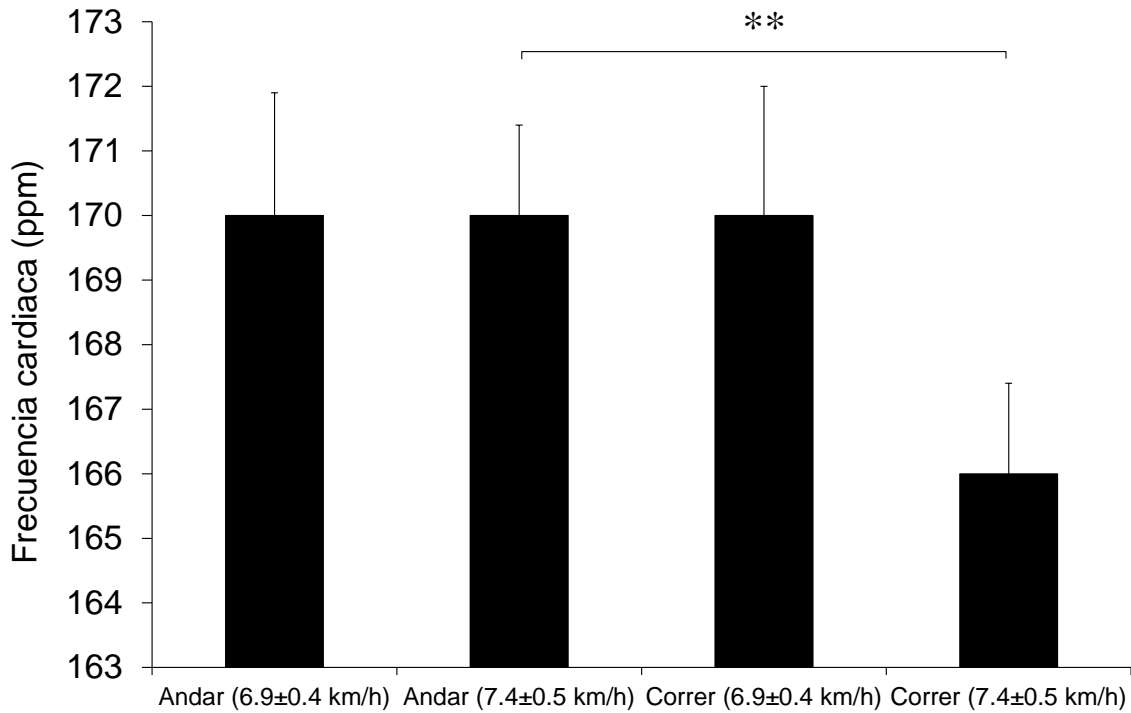


Figura 4. Frecuencia cardiaca a 12% de pendiente según el modo de locomoción y velocidad de desplazamiento. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*\*,  $p < 0.01$ .

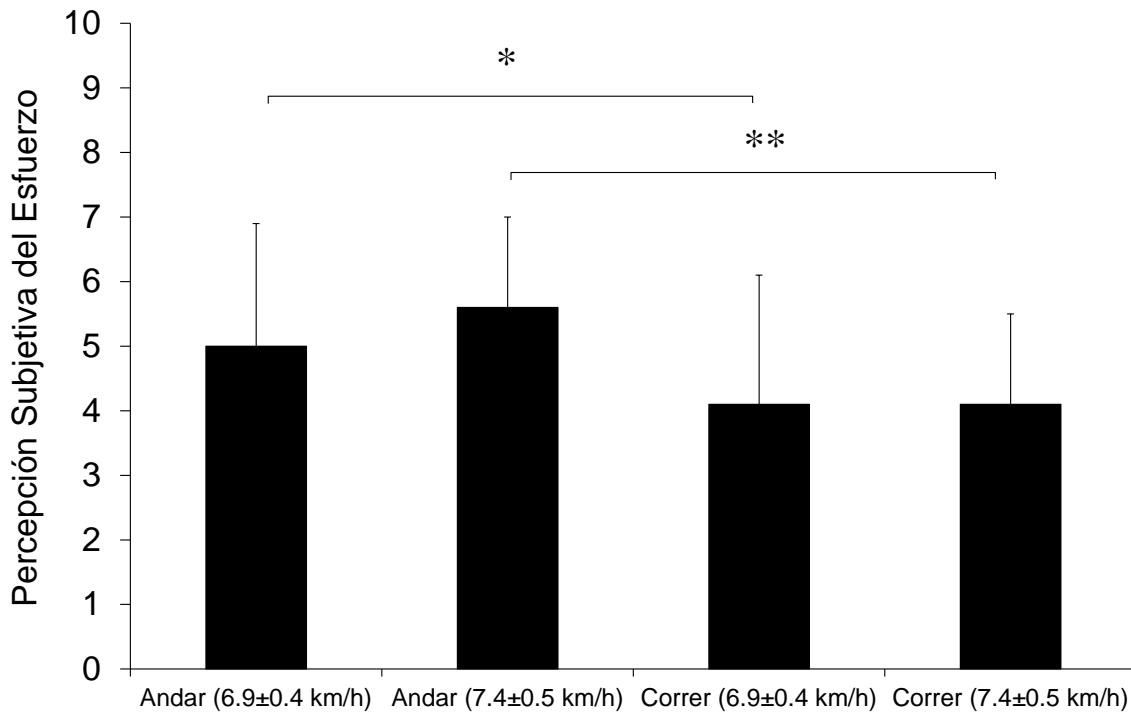


Figura 5. Percepción subjetiva del esfuerzo a 12% de pendiente según el modo de locomoción y velocidad de desplazamiento. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*\*,  $p < 0.01$ . \*,  $p < 0.05$ .

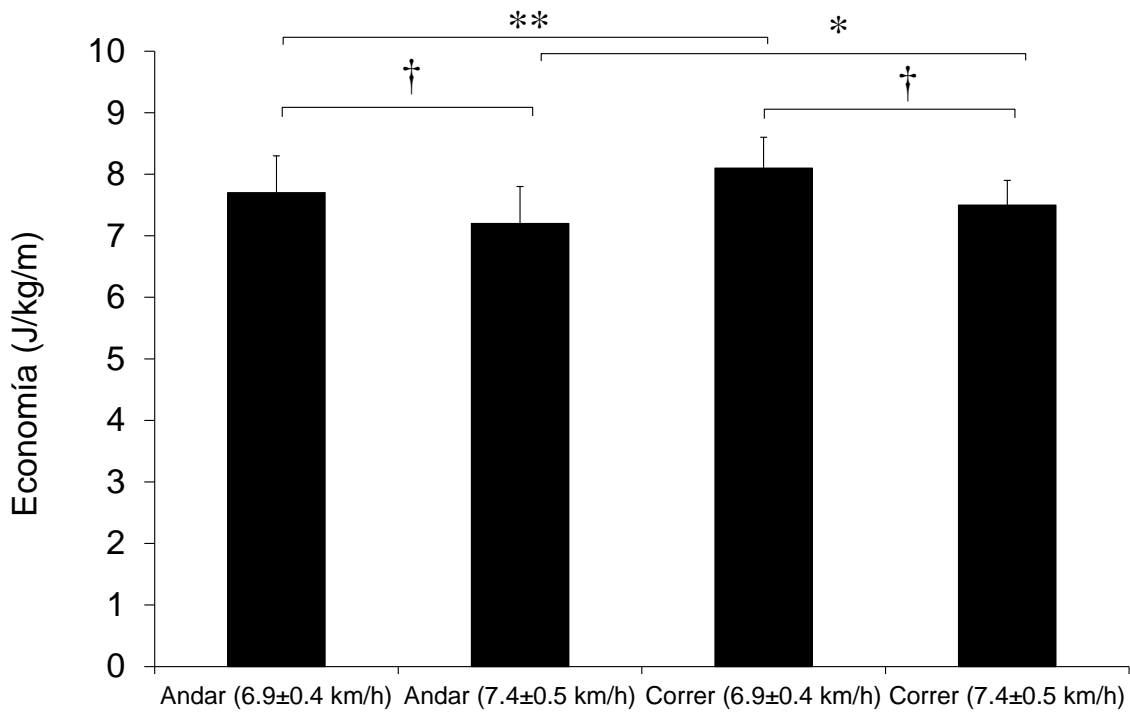
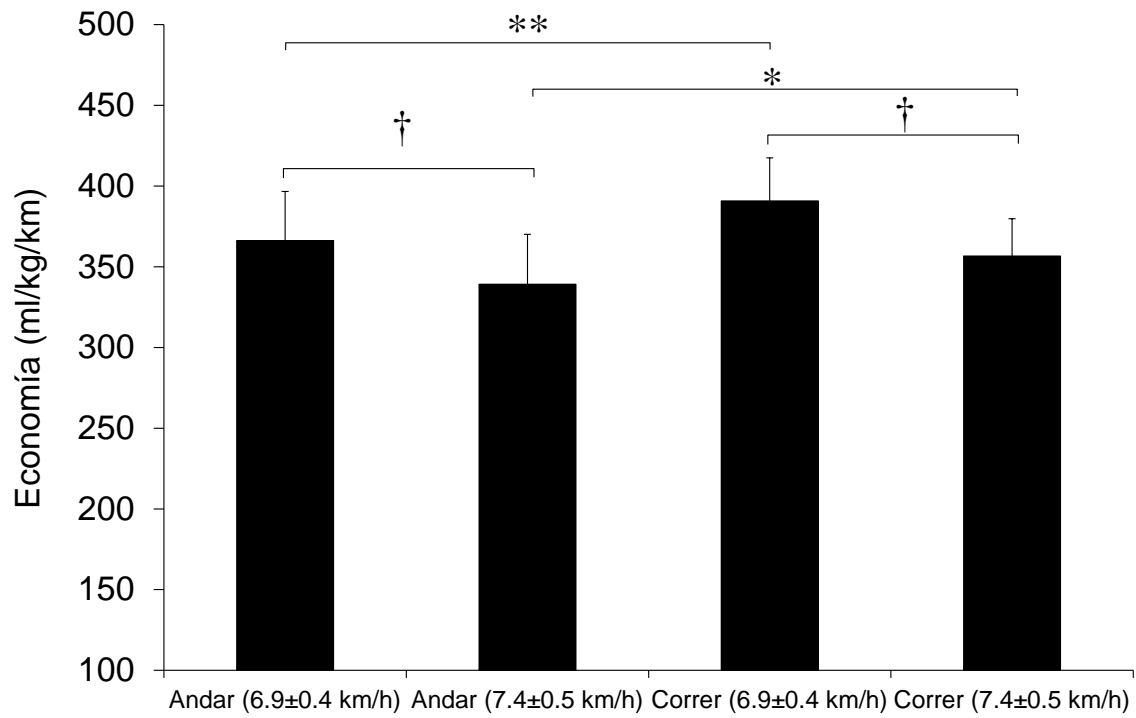


Figura 6. Economía expresada como coste de  $VO_2$  y coste calórico del desplazamiento a 12% de pendiente. Valores expresados como media  $\pm$  SD. \*\*,  $p < 0.01$ . \*,  $p < 0.05$ . †,  $p < 0.01$ .

## **DISCUSIÓN**

En lo referente a la metodología utilizada en otros trabajos, comprobamos varias diferencias entre diferentes estudios y diferencias con el nuestro. En cuanto a las velocidades, (Minetti et al., 2002) utilizaron incrementos de velocidades progresivos en todas las pendientes que analizaron, además de la velocidad de transición, aunque sin comparar las dos locomociones (correr-andar) a la misma velocidad; (Minetti et al., 1994b) utilizaron velocidades del mismo coste energético entre andar y correr a cada pendiente analizada; (Ardigò et al., 2003) eligieron velocidades que hicieran todas el mismo trabajo vertical; y (Giovanelli et al., 2015) calcularon diferentes velocidades para que la velocidad vertical fuera de 0.35 m/s en todas las pendientes. En nuestro caso utilizamos para cada pendiente una velocidad subjetiva de marcha rápida un poco inferior a la de transición que los sujetos pudieran mantener durante un tiempo prolongado, ya que son velocidades que se utilizan en carreras de montaña de larga duración cuando se opta por andar en lugar de correr. Además, para el 12% de pendiente también medimos el comportamiento de las diferentes variables a velocidad de transición para comprobar diferencias entre ambas velocidades.

En cuanto a las pendientes, la mayoría de estudios (Minetti et al., 1994a; Minetti et al., 1994b; Minetti et al., 2002; Ardigò et al., 2003; Giovanelli et al., 2015) utilizaron pendientes más extremas y con incrementos mayores (+2.5, +5, +10%). En éste trabajo analizamos pendientes que rondan la “pendiente crítica” de transición de la economía entre andar y correr (8-18%) y utilizamos incrementos de pendiente menores a cualquier otro estudio para mayor concreción (+2%).

Por otra parte, la muestra que participó en estudios anteriores (Minetti et al., 1994a; Minetti et al., 1994b; Minetti et al., 2002; Ardigò et al., 2003; Giovanelli et al., 2015) era más homogénea y especializada, y de mayor nivel respecto al presente estudio, en el cual la mitad de la muestra eran corredores habituales y la otra mitad practicantes de otras actividades deportivas.

Por lo general observamos que la evolución de la mayoría de las variables analizadas se comportan de manera similar: El  $VO_2$ , la frecuencia cardíaca y la RPE aumentan paulatinamente hasta el 12% (Tabla 3, 8 y 9), y la economía empeora significativamente hasta el 14%, independientemente del modo de locomoción (Tabla 4 y 5).

En cuanto al modo de locomoción, el  $VO_2$  es significativamente mayor corriendo a partir del 12% (Tabla 3); y la economía es significativamente menor corriendo a partir del 12% (Tabla 3 y 4). Por otra parte, la frecuencia cardíaca no se vio afectada por el modo de locomoción

(Tabla 8), y la RPE además muestra valores más bajos corriendo que andando (Tabla 9), lo cual puede deberse a la intensidad con la que trabajan los músculos dorsiflexores cuando se anda a velocidades altas (Hreljac, 1995).

La velocidad no influye sobre el  $VO_2$ , la frecuencia cardíaca y la RPE (Figura 1, 4 y 5). Sin embargo se observan mejores economías (andando y corriendo) a velocidad de transición que elegir una velocidad un poco inferior (Figura 6), lo cual puede deberse a que la velocidad vertical y el trabajo realizado disminuyeron (Tabla 2).

## **CONCLUSIONES**

Los hallazgos de este estudio indican que la marcha es el modo de locomoción más eficiente en pendientes superiores al 10%. A partir del 12% el coste energético de la carrera fue significativamente más alto. Aunque, en pendientes inferiores al 12% las variables fisiológicas analizadas fueron similares andando y corriendo, las menores RPE registradas cuando los sujetos corrieron indican que posiblemente la carrera sea el modo de locomoción que produzca menor disconfort muscular. Por último, adoptar la velocidad de transición andar-correr en pendientes del 12% resulta más económico en la locomoción de los sujetos que adoptar velocidades ligeramente inferiores, ya que disminuyen la velocidad vertical y el trabajo mecánico.

## **VALORACIÓN PERSONAL**

Éste estudio puede servir de utilidad para trabajos posteriores relacionados con las carreras por montaña y la locomoción en pendientes, además de contribuir al conocimiento de entrenadores y practicantes de éste tipo de carreras.

No obstante, para una mayor aplicabilidad a las carreras de montaña de larga distancia, deberían realizarse futuros estudios similares tras inducir fatiga en los sujetos, ya que es un factor determinante en carreras de larga distancia.

La realización de éste trabajo me ha permitido poner en práctica conocimientos adquiridos a lo largo del Grado como la búsqueda bibliográfica de trabajos relacionados con cierta temática del ámbito de las ciencias de la actividad física y el deporte, el desarrollo de test de valoración de la condición física, la familiarización con el laboratorio y el trabajo en el mismo.

Como aficionado a las carreras de montaña, la realización de este trabajo me ha aportado conocimiento sobre ésta modalidad, ya que una de las mayores dudas de todo corredor de montaña está en la decisión de cuándo andar y cuándo correr, independientemente de la fatiga del momento. Además, la disposición tanto de mi tutor como de los compañeros que han participado en el estudio, me ha facilitado la elaboración del trabajo y me ha permitido disfrutar del desarrollo mismo.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Ardigò, L. P., Saibene, F., & Minetti, A. E. (2003). The optimal locomotion on gradients: walking, running or cycling? *European journal of applied physiology*, 90(3-4), 365-371.
2. Biewener, A. A., Farley, C. T., Roberts, T. J., & Temaner, M. (2004). Muscle mechanical advantage of human walking and running: implications for energy cost. *Journal of Applied Physiology*, 97(6), 2266-2274.
3. Borg, G.P., Hassmen, P., & Lagerstrom, M. (1987). Perceived exertion related to heart rate and blood lactate during arm and leg exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 56, 679-685.
4. Chen C.H., Nosaka K, Chen H.L., Lin M.J., Tseng K.W., Chen T.C. (2011). Effects of flexibility training on eccentric exercise-induced muscle damage. *Med Sci Sports Exerc* 43, 491–500.
5. Craib, M., Mitchell, V., Fields, K., Cooper, T., Hopewell, R., & Morgan, D. (1996). The association between flexibility and running economy in sub-elite male distance runners. *Medicine & Amp Science In Sports & Amp Exercise*, 28(6), 737-743.
6. Daniels, J.T., Daniels, N,. (1992). Running economy of elite male and elite female runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24, 483-489.
7. Davis, J.A., (1985). Anaerobic threshold: Review of the concept and directions for future research. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 17, 6-18
8. Giovanelli, N., Ortiz, A. L. R., Henninger, K., & Kram, R. (2016). Energetics of vertical kilometer foot races; is steeper cheaper? *Journal of Applied Physiology*, 120(3), 370-375.
9. Hreljac, A. (1995). Determinants of the gait transition speed during human locomotion: kinematic factors. *Journal of biomechanics*, 28(6), 669-677.
10. Lejeune, T. M., Willems, P. A., & Heglund, N. C. (1998). Mechanics and energetics of human locomotion on sand. *Journal of Experimental Biology*, 201(13), 2071-2080.
11. Lucia A, Esteve-Lanao, J., Oliván J, Gómez-Gallego, F., San Juan, A.F., Santiago, C., Pérez, M., Chamorro-Viña, C., Foster, C. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Applied Physiology Nutrition & Metabolism*, 31, 530-540.
12. Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P, Sassi G. (1963). Energy cost of running. *J Appl Physiol*, 18, 367-370.
13. Millet, G. Y., Banfi, J. C., Kerherve, H., Morin, J. B., Vincent, L., Estrade, C., ... & Feasson, L. (2011). Physiological and biological factors associated with a 24 h treadmill

- ultra-marathon performance. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 21(1), 54-61.
14. Millet, G. Y., Hoffman, M. D., & Morin, J. B. (2012). Sacrificing economy to improve running performance—a reality in the ultramarathon? *Journal of applied physiology*, 113(3), 507-509.
  15. Minetti, A., Ardigò, L., & Saibene, F. (1993). Mechanical determinants of gradient walking energetics in man. *The Journal Of Physiology*, 472(1), 725-735.
  16. Minetti, A. E., Ardigo, L. P., & Saibene, F. (1994). Mechanical determinants of the minimum energy cost of gradient running in humans. *Journal of Experimental Biology*, 195(1), 211-225.
  17. Minetti, A. E., Ardigo, L. P., & Saibene, F. (1994). The transition between walking and running in humans: metabolic and mechanical aspects at different gradients. *Acta Physiologica*, 150(3), 315-323.
  18. Minetti, A. E., Moia, C., Roi, G. S., Susta, D., & Ferretti, G. (2002). Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *Journal of applied physiology*, 93(3), 1039-1046.
  19. Segers, V., Lenoir, M., Aerts, P., & De Clercq, D. (2007). Kinematics of the transition between walking and running when gradually changing speed. *Gait & posture*, 26(3), 349-361.
  20. Zamparo, P., Perini, R., Orizio, C., Sacher, M., & Ferretti, G. (1992). The energy cost of walking or running on sand. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 65(2), 183-187.