

Monograph

La Estimación del Volumen Sistólico de Atletas Mexicanos durante Ejercicios Submáximos Respalda el Ajuste Periférico del VO₂max

Javier Padilla-Pérez¹, María del Carmen Castillo-Hernández¹ y Carlos Castillo-Henkel¹¹Escuela Superior de Medicina, Instituto Politécnico Nacional, Distrito Federal, México.

RESUMEN

El propósito de este estudio fue determinar si la presunta diferencia en el volumen sistólico en ejercicios de intensidad submáxima (Subm) (SV, mL·latido⁻¹) de atletas (ATH) se debía a una adaptación de resistencia de diferente proporción en relación con la frecuencia cardíaca (HR), consumo de oxígeno absoluto (VO_{2max}, L·min⁻¹) y relativo (VO_{2max}, mL·min⁻¹·kg⁻¹) submáximos. Los sujetos (N=57) tenían 26 ± 9 años, 171±6 centímetros de estatura y TBM de 66±9 kg. La muestra fue dividida en no atletas (n=11) y atletas (ATH) de diferentes disciplinas deportivas (n=41) quienes estaban clasificados a nivel nacional o internacional. Luego los ATH fueron reagrupados en 5 grupos: 30, (n=8 ≤39 mL·min⁻¹·kg⁻¹), 40, (n=11, ≤49 mL·min⁻¹·kg⁻¹) 50, (n=8, ≤59 mL·min⁻¹·kg⁻¹), 60, (n=7, ≤69 mL·min⁻¹·kg⁻¹), y 70, (n=4, ≤79 mL·min⁻¹·kg⁻¹) (VO_{2max}RelATH). Utilizamos una prueba de esfuerzo máxima en bicicleta ergométrica con medición directa de VO₂ a 2240 m de altitud. El volumen sistólico (SV) medio se obtuvo de la relación entre VO₂ y HR con una pendiente $\Delta VO_2 / \Delta HR$ y un valor constante de $1 / [O_2]_{\text{arterial}} = \frac{1}{2} \cdot 10$. La potencia máxima ergométrica, el índice de potencia máxima ergométrica, VO_{2max} y SV fueron significativamente mayores en los sujetos atletas (ATH) (138 mL) que en los sujetos no atletas (86 mL). Pero, el SV no fue significativamente diferente entre los grupos clasificados en función del VO_{2max}Rel (VO_{2max}RelATH). La similitud en el SV entre los grupos de VO_{2max}RelATH se explica por una probable disociación entre los componentes centrales y periféricos durante la adaptación de resistencia (es decir, la práctica que cada disciplina deportiva impone sobre el VO_{2max}RelATH del atleta). Los resultados apoyan el planteo que el SV distingue las diferencias en esta variable, entre atletas y no atletas pero no entre los diferentes grupos de VO_{2max}RelATH.

Palabras Clave: resistencia, disciplinas deportivas, consumo de oxígeno, frecuencia cardíaca

INTRODUCCION

Existe una variabilidad individual significativa en las adaptaciones cardíacas que ocurren en respuesta al entrenamiento físico. Se están investigando continuamente los factores asociados con esta variabilidad (3, 27). En particular, se plantea el interrogante, acerca de si existe una diferencia en el volumen sistólico en función de los diferentes grados de entrenamiento entre atletas (30). El determinante de la respuesta cardiovascular al ejercicio, probablemente está relacionado al tipo de entrenamiento que los atletas realizan. En general, el entrenamiento físico es dinámico (isotónico) o estático (isométrico), aunque la mayoría de los tipos de ejercicios son una combinación de los dos (13). En el ejercicio

estático, hay un aumento en la tensión del músculo que cambia poco su longitud. El ejercicio dinámico (ej., carrera y natación) cambia la longitud de los músculos y hay un mínimo de tensión. Las consecuencias fisiológicas del entrenamiento son numerosas, particularmente se observa un aumento en la salud y el bienestar. Notablemente, hay un aumento en el consumo de oxígeno (VO_2) que permite un aumento en la energía para la contracción muscular.

Por la reestructuración de la ecuación de Fick ($VO_2 = Q \times a - \text{diferencia } O_2$), queda claro que el aumento en VO_2 con el ejercicio se debe al ajuste central (Q) y/o al ajuste periférico (dif $a-O_2$) por la necesidad que tienen los músculos de recibir más oxígeno. Los atletas entrenados en resistencia se ajustan a la necesidad de un aumento en la energía para la contracción muscular, a través de un aumento en Q (principalmente a través del volumen sistólico, SV) y a través de un aumento en la extracción de los tejidos (diferencia $a-O_2$). Los diferentes tipos de eventos deportivos, dan a los respectivos atletas más o menos probabilidad de aumentar el VO_2 a través del SV. Los atletas de deportes de corta duración y de intensidad máxima, tienen una mayor probabilidad de responder con una mayor HR para aumentar Q (9). Por otro lado, el $VO_{2\text{máx}}$ es sustancialmente mayor en atletas de resistencia. Pero, por supuesto, existen diferentes niveles de $VO_{2\text{máx}}$ tal como lo definen los datos específicos de los diferentes deportes de resistencia (6, 18).

El pulso de oxígeno (pulso de O_2) es la cantidad de O_2 que se absorbe durante un ciclo cardíaco. Representa el promedio de VO_2 en el transcurso de un período cardíaco (sístole más diástole). Para obtener el consumo medio de O_2 en el transcurso de un latido cardíaco de duración promedio, el VO_2 por minuto se divide por HR. El pulso de oxígeno depende del SV y la diferencia de oxígeno arterial-venoso ($a-\text{diferencia } O_2$) (23). En lo que se refiere a la ecuación de Fick, si, la diferencia $a-O_2$ se mantiene constante, entonces VO_2 cambia en función del gasto cardíaco (Q). Dado que Q es el producto de frecuencia cardíaca (HR) por SV entonces, para un Q dado, una disminución en HR refleja un aumento en SV. Por esa razón, la determinación del pulso de O_2 durante un esfuerzo ergométrico aporta una valiosa información sobre la potencia cardíaca (26). Por consiguiente, si el pulso de O_2 aumenta luego de la participación en un deporte específico, es apropiado concluir que el SV aumenta. En general, con el aumento en SV, uno puede esperar que también aumente tanto el $VO_{2\text{máx}}$ absoluto ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) como el $VO_{2\text{máx}}$ relativo ($VO_{2\text{máx}}$ relativo ; $\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) (2,14).

La evaluación de la función cardíaca en reposo ofrece poca información en lo que respecta a la reserva cardiovascular. Esta es la razón por la cual, un test de esfuerzo permite a los investigadores evaluar la integridad del ventrículo izquierdo para contribuir con un volumen de sangre adecuado para satisfacer las demandas de oxígeno a nivel celular. En síntesis, el aumento en el metabolismo de energía durante el ejercicio, permite la determinación de la capacidad metabólica aeróbica periférica (25). Los atletas tienen una mayor reserva cardíaca asociada con un mayor tamaño en el ventrículo izquierdo, en comparación con los sujetos que no son atletas (21). Los atletas de resistencia, altamente entrenados, tienen una frecuencia cardíaca en reposo menor con un ventrículo izquierdo de mayor tamaño que permite un aumento en el volumen final diastólico (EDV). El tamaño del EDV establece la base para un aumento en el estiramiento de los ventrículos que producirá un mayor SV y así el potencial para alcanzar Q y $VO_{2\text{máx}}$ superiores (21).

Existen varios métodos de estudio del corazón para evaluar su función como bomba intermitente; entre ellos existen, el cateterismo cardíaco, centellograma cardíaco con ^{201}Ta durante el esfuerzo, ultrasonido cardíaco bidimensional, fonocardiograma, ecocardiografía Doppler, electrocardiografía, fluoroscopia cardíaca e imagen cardíaca de contraste (3, 8) en los que la determinación del SV puede servir como un indicador útil de la relación fisiológica entre el tamaño del corazón y las adaptaciones cardíacas específicas de los diferentes tipos de entrenamiento deportivo (21). En particular, se sabe bien que el entrenamiento aeróbico se asocia con mayor SV en reposo y mayor fracción de eyección del ventrículo izquierdo (7).

El SV durante el ejercicio puede ser estimado a partir del pulso de O_2 asintótico (26). Ésta es una importante técnica no invasiva, que evita la canulación vascular, lo que permite la determinación del SV durante el ejercicio. La mayoría de las veces, los atletas con valores altos de SV también tienen un $VO_{2\text{máx}}$ alto, así como también una propensión para un nivel alto de actividad física (26). Por lo tanto, si el volumen sistólico de atletas mexicanos de diferentes disciplinas deportivas, es provocado por un ajuste deportivo de diferente proporción, en términos de potencia aeróbica máxima ($VO_{2\text{máx}}$), entonces, parecería adecuado concluir que deberían observarse diferencias significativas en el SV entre estos grupos de atletas.

MÉTODOS

Voluntarios

Cincuenta y siete sujetos (46 atletas y 11 no atletas) participaron voluntariamente en este estudio. Todos eran clínicamente

saludables y no poseían contraindicaciones para realizar un test de esfuerzo máximo (1). Todos los sujetos firmaron un consentimiento informado antes de realizar el test.

Procedimientos

Grupos

Los no atletas (n=11) provenían de la Escuela Superior de Medicina, Instituto Politécnico Nacional. Ninguno participó en un programa de preparación deportiva. Los atletas (n=46) y sus disciplinas deportivas se agruparon en cinco áreas (definidas por su $VO_{2max}Rel$): Treinta ($\leq 39 mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) = remo (n=2) + fisiculturismo (n=4) + caminata (n=1) + atletismo (n=1); Cuarenta ($\leq 49 mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) = karate-do (n=6) + remo (n=3) + caminata (n=1) + maratón (n=1); Cincuenta ($\leq 59 mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) = karate-do (n=3) + remo (n=3) + caminata (n=1) + maratón (n=1); Sesenta ($\leq 69 mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) = maratón (n=2) + atletismo (n=2) + karate-do (n=1) + caminata (n=1) + fisiculturismo (n=1) y Setenta ($\leq 79 mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) = atletismo (n=2) + maratón (n=1) + caminata (n=1).

Antropometría General

La masa corporal total y estatura fueron medidos con una balanza clínica (*Bame, modelo 420*) previamente calibrada para cada medición (24). La masa corporal total de cada sujeto, expresada en kilogramos se obtuvo después de 12 hrs de ayuno. La estatura de cada sujeto, en centímetros, se midió mientras el sujeto se encontraba en la balanza clínica.

Test de Esfuerzo Máximo

Para medir el VO_{2max} se utilizó la técnica de espirometría de circuito abierto mientras el sujeto realizaba el test incremental en una bicicleta ergométrica electrónica (17). Los gases ventilatorios del ejercicio fueron recolectados y medidos, durante el último minuto de cada producción de potencia, con un medidor de gases *Tissot*, la concentración de oxígeno se midió con un analizador electroquímico de O_2 (*Medical Analyzer IL404*) y la concentración de CO_2 con un analizador infrarrojo de CO_2 (*Medical Analyzer IL200*). El VO_{2max} se definió como el mayor valor de VO_2 alcanzado hasta la fatiga volitiva (potencia máxima), a una tasa de intercambio respiratorio mayor que 1 y en la frecuencia cardíaca máxima (HR_{max} , que coincidía o era más alta, que el valor establecido para el sujeto en función de su edad).

Para el test en bicicleta ergométrica se utilizó una bicicleta ergométrica con freno electrónico (*Collins, Pedal Mate*) siguiendo un procedimiento de ejercicio continuo, con muchas etapas (17). La producción de potencia inicial se fijó en 50 W, y se mantuvo durante los primeros 2 min (17). Después de esto, la producción de potencia se incrementó 25 W todos los minutos, hasta que el sujeto no pudiera mantener una velocidad de pedaleo de 60 rpm. La frecuencia cardíaca fue supervisada electrónicamente en reposo y en cada minuto durante el test. Toda la evaluación se realizó en el laboratorio entre las 7 de la mañana y 10:30 de la mañana y todos los atletas realizaron el test al final su temporada deportiva.

El índice de potencia máxima se obtuvo dividiendo la potencia máxima (es decir, el mayor VO_2) por el peso corporal total (en kg). La frecuencia cardíaca (HR) máxima se estimó restando a 220 la edad del sujeto. El valor absoluto del VO_{2max} fue dividido por el peso corporal total para obtener el VO_2 máximo relativo ($mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$), que es un indicador excelente del grado de adaptación de resistencia deportiva (12) de acuerdo con la ecuación de pulso de O_2 (obtenida a partir de la ecuación de Fick):

$$VO_2 / HR = [(Q \cdot \text{contenido arterial de } O_2) / HR] - [(Q \cdot \text{contenido venoso mixto de } O_2) / HR]$$

Por consiguiente, reestructurando las variables en la fórmula, el volumen sistólico (SV) puede ser estimado como el SV del ejercicio submáximo según Whipp (26):

$VO_2 / HR = (SV \cdot \text{contenido arterial de } O_2) - [(Q \cdot \text{contenido venoso mixto de } O_2) / HR]$ Además, para todos los objetivos prácticos, tanto $Q \cdot \text{contenido venoso mixto de } O_2$ como el contenido arterial de O_2 , son constantes a lo largo de una gama amplia de tasas de trabajo de estado estable (11,26), así:

$$SV (mL \cdot lat^{-1}) = 5 (IO_2 \text{ arterial} \cdot I \text{ sangre}^{-1}) \cdot \Delta VO_2 (mL \cdot min^{-1}) / \Delta HR (mL \cdot min^{-1})$$

Dónde "e" corresponde al ejercicio submáximo de la relación entre VO_2 y HR con una pendiente $\Delta VO_2 / \Delta HR$ y 5 es el valor constante de $1 / [O_2] \text{ arterial} = \frac{1}{2} \cdot 10$ (11).

Análisis Estadísticos

Los datos de las características antropométricas en reposo y los datos del test de ejercicio máximo se analizaron mediante

un análisis de la varianza de una vía. Cuando los resultados presentaban diferencias significativas al 0,05, se utilizaron los test post hoc de Tukey y Mann-Whitney, para identificar las diferencias entre los grupos. Se utilizó el análisis del coeficiente de correlación de Pearson en la muestra total y en los grupos deportivos para evaluar el grado de relación entre los datos. Se empleó el test-t de Student para determinar si los valores medios de dos grupos eran significativamente diferentes (29).

RESULTADOS

Las características antropométricas, signos vitales y las características ergoespirométricas máximas de los no atletas y atletas se presentan en la Tabla 1 y las de los atletas, reagrupados sobre la base de su $VO_{2max}Rel$, se muestran en la Tabla 2. Los valores del volumen sistólico (SV) de no atletas y de atletas se presentan en la Figura 1 y los de los atletas reagrupados sobre la base de su $VO_{2max}Rel$ se presentan en la Figura 2. En la muestra total, la relación existente entre el SV y $VO_{2max}Rel$ fue $VO_{2max}Rel = 32,163 + (0,148 \cdot SV)$, $r = 0,50$, $P < 0,001$; y la relación existente entre SV y la HR en reposo fue $HR \text{ en reposo} = 74,811 - (0,118 \cdot SV)$, $r = 0,50$, $P < 0,001$.

Variable	No Atletas	Atletas
Antropometría General		
Tamaño de la muestra	11	46
Edad (años)	27±10	26±9
Talla (cm)	169±5	171±6
Masa Corporal Total (kg)	68±7	66±10
Datos en reposo		
Frecuencia cardíaca ($lat \cdot min^{-1}$)	66±8	59±12
DBP (mmHg)	68±19	67±9
SBP (mmHg)	109±20	111±14
Datos Máximos		
Potencia (Watts)	186±23 ^a	229±40 ^b
Índice de Potencia ($W \cdot kg^{-1}$)	7,9±1,3 ^c	10,4±1,9 ^d
Frecuencia Cardíaca ($lat \cdot min^{-1}$)	189±15	183±14
VO_2 ($L \cdot min^{-1}$)	2,7±0,6 ^e	3,5±0,8 ^f
VO_2 ($mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$)	40±10 ^g	54±13 ^h

Tabla 1. Datos descriptivos de los sujetos. Los datos se presentan en forma de Media ± SD; Pares con diferentes letras en los superíndices presentan diferencias significativas determinadas mediante el test-t de Student. $a \neq b$ Test de suma de rangos de Mann-Whitney, $T = 160$ ($P < 0,002$); $c \neq d$, $t = 4,12$ ($P < 0,05$), $e \neq f$, $t = 2,9$ ($P < 0,007$), $g \neq h$, $t = 3,254$ ($P < 0,05$). VO_2 = Potencia aeróbica máxima.

VO ₂ (mL•min ⁻¹ •kg ⁻¹)	Treinta (≤39)	Cuarenta (≤49)	Cincuenta (≤59)	Sesenta (≤69)	Setenta (≤79)
Antropometría General					
Tamaño de la muestra	8	11	8	7	4
Edad (años)	31±5	23±2	28±3	28±4	26±1
Talla (cm)	172±3	172±2	174±2	167±2	170±1
Masa Corporal Total (kg)	69±4	64±3	68±2	60±2	59±2
Datos en reposo					
Frecuencia Cardíaca (lat•min ⁻¹)	57±3	62±5	58±3	56±5	52±3
DBP (mmHg)	69±4	68±4	67±4	69±3	66±4
SBP (mmHg)	111±8	114±3	114±5	108±4	104±6
Datos Máximos					
Potencia (Watts)	210±12	218±13	241±16	225±10	231±22
Indice de Potencia (W•kg ⁻¹)	9±1	10±1	11±1	11±1	11±1
Frecuencia Cardíaca (lat•min ⁻¹)	180±4	186±6	185±4	180±6	178±1
VO ₂ (L•min ⁻¹)	2,5±0,15 ^{a,c}	2,9±0,13 ^a	3,6±0,11 ^a	3,9±0,14 ^d	4,3±0,2 ^b

Tabla 2. Datos descriptivos de los atletas reagrupados sobre la base de su potencia aeróbica relativa a la masa corporal total. DBP= Presión sanguínea diastólica; SBP= Presión sanguínea sistólica

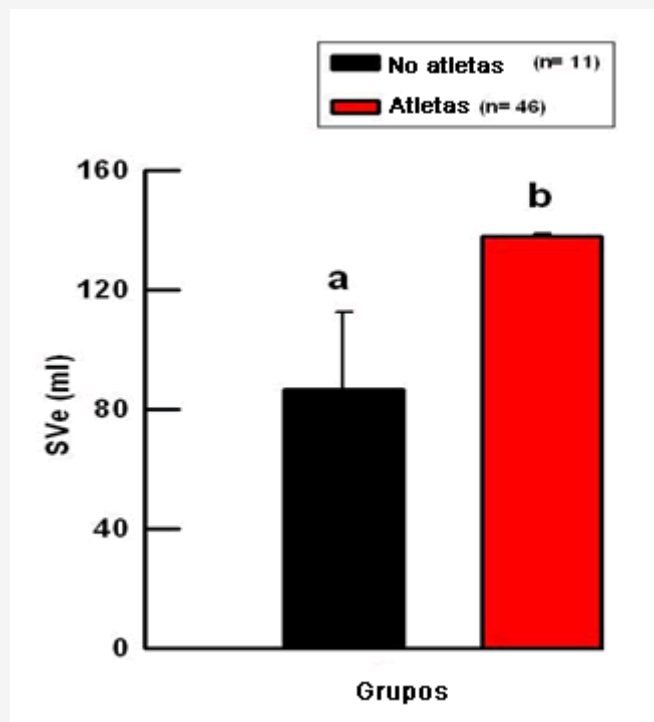


Figura 1. Valores medios de las respuestas submáximas del volumen sistólico (SV) en atletas (rojo) y no atletas (negro). $P < 0,05$; Test *t* de Student.

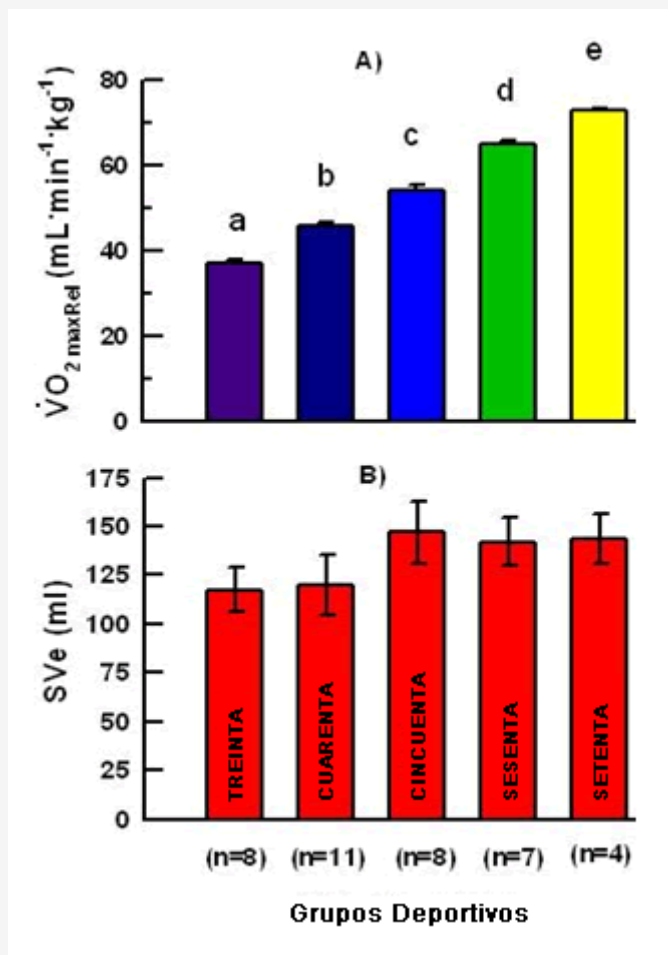


Figura 2. VO_{2max} relativo al peso corporal y SV submáximo de los deportes basados en su VO_{2max} . El tamaño de la barra y su línea vertical indican la Media \pm SEM. El número entre paréntesis, es el tamaño de la muestra de cada grupo. Cada par de letras diferentes hace referencia a que se observaron diferencias significativas entre los grupos ($P < 0,05$) a través del test post hoc de Tukey que se realizó luego del ANOVA.

ANÁLISIS ENTRE LOS GRUPOS

No atletas versus Atletas

Potencia Ergométrica Máxima

El análisis del test-t de Student del test no paramétrico de suma de rangos de Mann-Whitney, demostró que la potencia ergométrica máxima era mayor en atletas que en no atletas (Tabla 1).

Potencia Aeróbica Máxima

El test t de Student demostró que tanto el VO_{2max} absoluto como el VO_{2max} Rel eran mayores en atletas que en no atletas (Tabla 1).

Respuesta de la HR al Ejercicio de Intensidad Submáxima

Los atletas comparados con los no atletas presentaron una respuesta de HR significativamente más pequeña durante el ejercicio submáximo (excepto durante los primeros 2 min del ejercicio) (Figura 3).

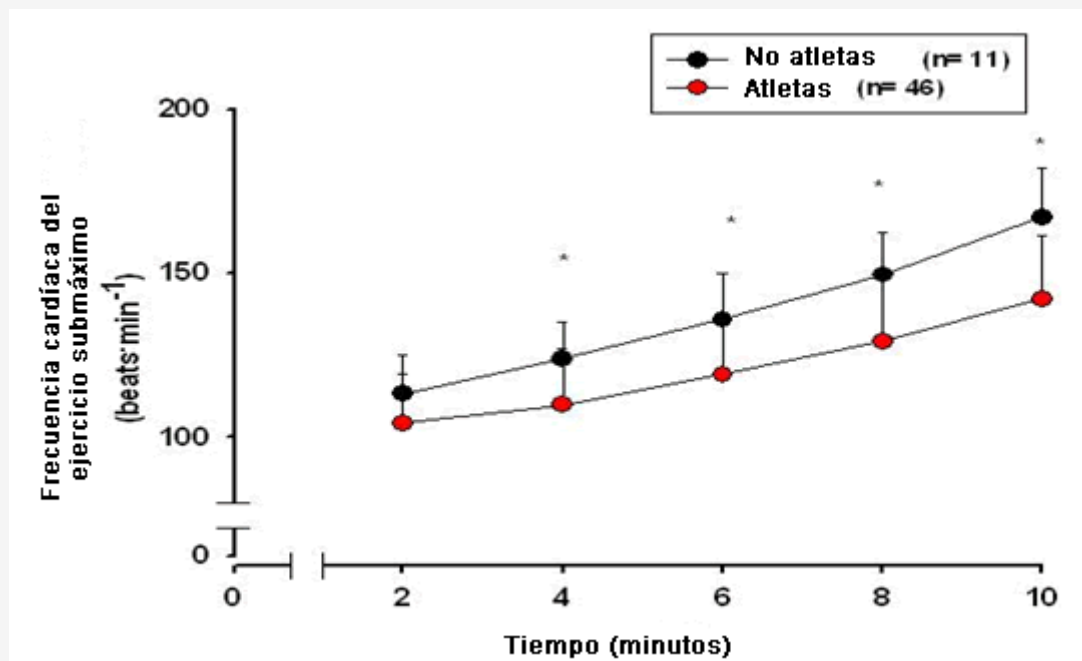


Figura 3. Frecuencia cardíaca (HR) ($\text{lat}\cdot\text{min}^{-1}$) del ejercicio submáximo. Los símbolos representan la media y las líneas verticales el error estándar de la media (SEM). * Presentan diferencias significativas establecidas mediante el ANOVA de una vía y el test post hoc de Tuckey ($F_{\text{index}} = 26,8$, $P < 0,05$).

SV

El test t de Student demostró que el SV era mayor ($t=3,751$, $P < 0,05$) en los atletas que en los no atletas (Figura 1).

Análisis post hoc del SV entre los Diferentes Grupos de $\text{VO}_{2\text{max}}\text{Rel}$

El test de Tukey realizado luego del ANOVA arrojó una diferencia significativa ($F=171,127$, $P < 0,05$) entre todos los grupos deportivos establecidos sobre la base de sus $\text{VO}_{2\text{max}}\text{Rel}$ (Treinta