

## Dinámica de la frecuencia cardíaca y PTT durante entrenamiento físico de distinta intensidad en sujetos sedentarios.

L. E. Méndez Magdaleno<sup>1</sup>, G. Dorantes Méndez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

**Resumen**— El entrenamiento físico a largo plazo tiene una influencia significativa en el control del sistema nervioso autónomo sobre la modulación cardíaca. En este trabajo se analizó un protocolo de prueba que consistió en subir y bajar un escalón durante 5 minutos a una velocidad constante una vez por semana durante 5 semanas. 8 sujetos divididos en 2 grupos fueron sometidos a 2 entrenamientos de intensidad alta y moderada con una duración de 5 y 20 minutos respectivamente, realizados 5 veces a la semana. Se analizaron índices de variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) y el tiempo transitorio del pulso (PTT). Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas entre los 2 tipos de entrenamiento. Sin embargo, se observó una tendencia de aumento en la activación parasimpática después de las 5 semanas de entrenamiento, lo que sugiere que los 2 tipos de entrenamiento benefician la condición cardiovascular.

**Palabras clave**— Actividad física, entrenamiento de alta intensidad, tiempo transitorio del pulso, variabilidad de la frecuencia cardíaca.

### I. INTRODUCCIÓN

El análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) es un método no invasivo ampliamente utilizado para evaluar el sistema nervioso autónomo (SNA) controlado por las ramas simpática y parasimpática. El SNA es el encargado de integrar las interacciones del sistema cardiovascular, respiratorio y muscular que ocurren durante el ejercicio y a su vez la frecuencia cardíaca (FC) es modulada por la combinación de 3 mecanismos: la ley de Frank-Starling, factores humorales y el SNA.

La respuesta cardiovascular al realizar ejercicio físico depende de varios factores como la intensidad del ejercicio, tipo, repeticiones, entre otros. Varios estudios se han realizado con la finalidad de evaluar los efectos del ejercicio sobre la VFC en personas sedentarias y en deportistas y comparando diferentes grados de intensidad de ejercicio [1,2].

La FC durante alguna actividad física es regulada por un aumento en la modulación simpática de la FC y una supresión de la actividad vagal [3,4], mientras que el entrenamiento físico a largo plazo tiene efecto sobre la VFC aumentando la modulación vagal y disminuyendo el tono simpático [5,6], resultando en bradicardia en reposo y un aumento más lento de la FC a consumos de oxígeno submáximos. Por otra parte, la recuperación de la FC después del ejercicio se ha utilizado como un indicador de la

reactivación vagal relacionado con un mejoramiento cardiovascular [3,7].

Otra variable fisiológica que cambia durante el ejercicio es la presión arterial, la cual es detectada por los baroreceptores y cambia el control autónomo de la FC. Una forma de estimar la señal de presión arterial latido a latido es la utilización del tiempo de tránsito del pulso (Pulse transit time, PTT), basado en la relación que existe entre presión arterial y velocidad de onda de pulso [8,9]. En este trabajo se propone analizar el PTT y relacionarlo con los cambios en presión arterial.

El objetivo de este trabajo es evaluar los cambios de la VFC y PTT que existen después de dos tipos de entrenamiento de diferentes intensidades evaluando los cambios durante un ejercicio de prueba llevado a cabo antes de iniciar el entrenamiento y después de un periodo de 5 semanas.

### II. METODOLOGÍA

#### A. Protocolo clínico.

Se seleccionaron 8 sujetos sedentarios con una media de edad de  $21.4 \pm 0.7$  años, 5 mujeres y 3 hombres con peso de  $68.3 \pm 8.4$  kg, estatura de  $1.64 \pm 0.07$  m y un índice de masa corporal (IMC) de  $25.5 \pm 3.1$  kg/m<sup>2</sup>. Todos los sujetos fueron no fumadores y sin presencia de alguna enfermedad cardíaca o respiratoria. Los participantes del protocolo se dividieron en dos grupos de cuatro integrantes, donde cada grupo realizó 5 días a la semana, un entrenamiento físico distinto, por un intervalo de tiempo de 5 semanas. El protocolo se realizó con el consentimiento informado y escrito de todos los participantes.

El grupo 1 realizó entrenamiento físico moderado, que consistió en correr durante 20 minutos a una velocidad en un rango de 5-8 km/hr; mientras que el grupo 2 realizó entrenamiento físico intenso, durante 5 minutos continuos, sin descansos, divididos en segmentos de 30 segundos, en los cuales se efectuaron 3 tipos de ejercicio, escaladores, burpees y sentadillas con salto, de forma aleatoria.

Con la finalidad de comparar entre los 2 tipos de entrenamiento, se realizó un protocolo de prueba, el cual consistió en 3 etapas; la primera etapa, *control*, consistió en 5 minutos en reposo durante los cuales el sujeto permaneció sentado; en la segunda etapa, *maniobra*, los sujetos subieron y bajaron un escalón de 50 cm de altura durante 5 minutos a una velocidad de 90 pulsos por minuto; y la

tercera etapa, *recuperación*, conformada por 5 minutos en reposo. Dicho protocolo se realizó antes del inicio del entrenamiento y al inicio de cada semana.

Las señales adquiridas durante el protocolo de prueba fueron ECG con la configuración de electrodos CM5 y pletismografía (PPG) utilizando el sistema BIOPAC MP36<sup>®</sup> con una frecuencia de muestreo de 1kHz.

### B. Procesamiento de las señales.

Se calculó la serie de tiempo de intervalos RR a partir de la señal de ECG utilizando el algoritmo de Pan-Tompkins [10], posteriormente, se eliminó la tendencia y artefactos de la señal de intervalos RR. Las series de tiempo de intervalos RR y de PTT fueron remuestreadas a 1 Hz.

Se calculó la raíz cuadrada de la media de diferencias sucesivas del periodo cardíaco (RMSSD), el cual se considera un índice de la actividad vagal [11]. Adicionalmente se calcularon las gráficas de Poincaré, que son una representación gráfica de la correlación entre los intervalos RR consecutivos [12].

Se calculó el espectro de potencia de la señal de intervalos RR utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) y se determinó la potencia en bajas frecuencias (LF, 0.04-0.15 Hz), altas frecuencias (HF, 0.15-0.4 Hz) y la relación entre bajas y altas frecuencias (LF/HF) el cual es un índice que refleja el balance simpátovagal [11].

Todos los índices implementados se calcularon periódicamente desde la semana previa al entrenamiento (semana 0) hasta la semana 5.

El cálculo de la serie de tiempo del PTT, fue calculada a partir de la señal de PPG, encontrando los picos máximos de la señal y restando la posición de dichos picos a la posición de los picos R de la señal de ECG. Esta serie de tiempo se utilizó como un subrogado de la señal de presión sanguínea y se evaluó la relación entre RR y PTT ( $R_{RR-PTT}$ ) a través de una relación equivalente a la sensibilidad del baroreflejo [13]. La cual está determinada por el índice  $\alpha$ , calculado en base a los espectros en frecuencia del PTT y RR en las bandas LF y HF ( $LF_{RR}$ ,  $HF_{RR}$ ,  $LF_{PTT}$ ,  $HF_{PTT}$ ), considerando una coherencia  $> 0.5$  entre ambas señales (1).

$$\alpha_{LF} = \sqrt{\frac{LF_{RR}}{LF_{PTT}}} \quad \alpha_{HF} = \sqrt{\frac{HF_{RR}}{HF_{PTT}}} \quad (1)$$

### C. Análisis estadístico.

Las diferencias entre las etapas del protocolo de prueba se evaluaron utilizando la prueba de Kruskal-Wallis con una prueba post-hoc a través de comparaciones múltiples por medio de la prueba Tukey-Kramer. Las diferencias entre semanas de entrenamiento se evaluaron utilizando una prueba de Wilcoxon. Además, se realizó el análisis de varianza (Anova) de 2 vías para verificar diferencias en los

índices  $\alpha_{LF}$  y  $\alpha_{HF}$ . Se consideraron diferencias estadísticamente significativas con  $p < 0.05$  y se evaluó el criterio de normalidad de los datos a través de la prueba Lilliefors.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 1 se muestra el valor medio de la FC durante la semana 0 y la semana 5 en ambos grupos de entrenamiento, donde se observa un aumento significativo durante la maniobra en el caso de los dos entrenamientos. Durante el protocolo de prueba se observó una recuperación de la FC del 62% y 70% en semana 0 y 5 respectivamente en entrenamiento intenso y 52% y 63% en entrenamiento moderado.

A pesar de que las diferencias de FC entre semanas de entrenamiento no fueron significativas se observa una ligera disminución en la FC después de las 5 semanas, 7.6% y 5% para el entrenamiento intenso y moderado respectivamente. Adicionalmente, ambos grupos de entrenamiento mostraron una disminución de FC muy similar durante la etapa de recuperación (12.8%, intenso; 12%, moderado) después del entrenamiento con respecto de la semana 0.

Respecto al PTT, observamos un comportamiento contrario a la FC durante la maniobra, lo cual es un resultado esperado ya que al incrementar la FC aumenta el volumen de eyección y el gasto cardíaco lo que permite que disminuya el tiempo que tarda en llegar el latido del corazón al lugar de sensor de la PPG (dedo). Este resultado soporta la relación que existe entre PTT y presión arterial.

La Fig. 2 muestra las gráficas de Poincaré de dos sujetos sometidos a entrenamiento intenso y moderado respectivamente, en la semana 0 y en la semana 5; donde se observa que la distribución de los intervalos RR del sujeto del entrenamiento intenso durante el periodo de recuperación, se desplazó más hacia la etapa de control durante la semana 5 con respecto a la gráfica de Poincaré del sujeto con entrenamiento moderado, dicho comportamiento se observó en todos los sujetos, lo que sugiere que el entrenamiento intenso puede generar un mayor beneficio a nivel cardiovascular, ya que ha sido reportado que la disminución del tiempo de recuperación después del ejercicio están relacionados con una mejor condición cardiovascular [3].

Los resultados del análisis de la VFC se presentan en la Tabla I. El índice RMSSD, el cual es un indicador de la actividad vagal [11], mostró una disminución significativa durante la maniobra en la semana 0 y 5 para el entrenamiento intenso y moderado, al igual que el índice HF que refleja la activación de la rama parasimpática de la modulación cardíaca.

La disminución de HF durante la maniobra concuerda con estudios durante ejercicio [4], sin embargo se observó

una disminución de LF durante la maniobra; esto puede ser debido a que el índice LF tiene influencia simpática y vagal y probablemente la influencia vagal es más fuerte. Por otro lado, el índice del balance simpátovagal (LF/HF) no mostró diferencias significativas, debido a que los sujetos de ambos entrenamientos no mostraron una tendencia generalizada en la relación simpátovagal (LF/HF) en la semana 0; mientras que en la semana 5, LF/HF disminuyó en todos los sujetos de ambos entrenamientos durante la etapa de maniobra con respecto al control, lo que sugiere que después del periodo de entrenamiento la activación vagal tiende a aumentar.

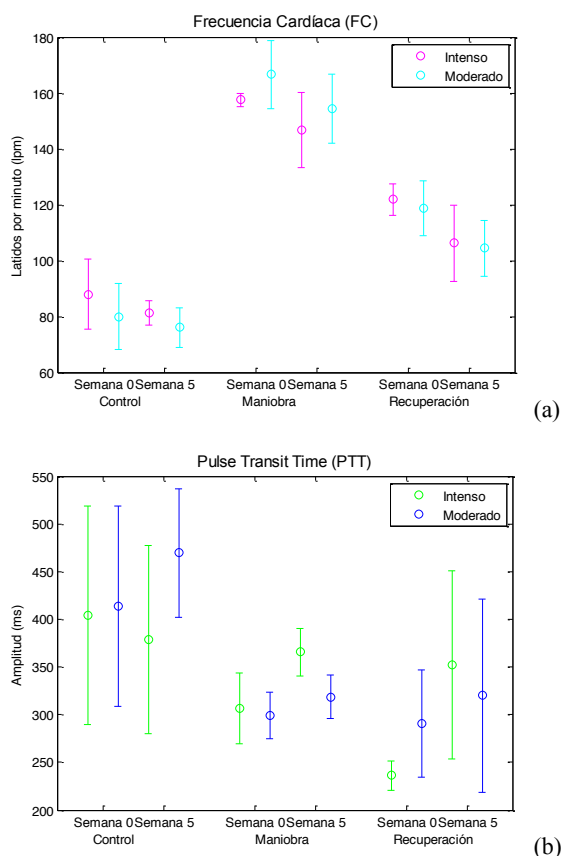


Fig. 1. Medias y desviaciones estándar de los valores de FC (a) y PTT (b) de ambos grupos de entrenamiento en la semana 0 y 5.

Los índices  $R_{RR-PTT}$  mostraron una disminución en la semana 5 con respecto a la semana 0 en ambos índices  $\alpha_{LF}$  y  $\alpha_{HF}$  durante la etapa de control en el entrenamiento moderado, mientras que los valores de  $\alpha_{LF}$  y  $\alpha_{HF}$  del entrenamiento intenso mostraron un comportamiento contrario (Tabla II). La diferencia entre los valores de  $R_{RR-PTT}$  encontrados durante los 2 tipos de entrenamiento y la falta de diferencias significativas puede ser debida al bajo número de semanas de entrenamiento. Un resultado esperado sería que  $R_{RR-PTT}$  mejorará con el entrenamiento

como sucede en el entrenamiento intenso aunque no se encontraron diferencias significativas.

TABLA I  
ÍNDICES DE VFC, RMSSD, LF, HF, Y LF/HF DURANTE LAS 3 ETAPAS DEL PROTOCOLO DE PRUEBA

	Control	Maniobra	Recuperación
<b>RMSSD (ms)</b>			
Intenso			
Semana 0*	34.7±16.4	4.7±2.4°	8.4±4.5*
Semana 5*	30.8±8.1	6.2±2.6°	14.6±11.1*
Moderado			
Semana 0*	52.1±31.8	12.8±16.5°	12.2±7.1
Semana 5*	49.7±25.8	7.6±5.5°	20.1±14.3
<b>LF (ms<sup>2</sup>)</b>			
Intenso			
Semana 0*	28320±11215	5756±1306°	9155±1896*
Semana 5*	24828±7299	4836±755°	15700±7648
Moderado			
Semana 0*	29555±8667	4609±4095°	12632±4860
Semana 5*	31519±5452	3610±1075°	16154±5506*
<b>HF (ms<sup>2</sup>)</b>			
Intenso			
Semana 0*	24533±11194	5301±744°	7399±1618*
Semana 5*	20830±4571	4989±804°	12644±4136
Moderado			
Semana 0*	31699±16662	7406±9359°	9747±2147
Semana 5*	28884±12580	4758±1622°	13164±6683
<b>LF/HF</b>			
Intenso			
Semana 0	1.20±0.17	1.09±0.21	1.24±0.13
Semana 5	1.18±0.13	0.98±0.18	1.20±0.18
Moderado			
Semana 0	1.00±0.21	0.91±0.39	1.30±0.38
Semana 5	1.20±0.39	0.80±0.24	1.31±0.27

Los valores se presentan como Media ± DE.  
\*Prueba Kruskal Wallis para un valor de  $p < 0.05$ .  
° Diferencias significativas entre control vs maniobra ( $p < 0.05$ ).  
\* Diferencias significativas entre control vs recuperación ( $p < 0.05$ ).  
+ Diferencias significativas entre maniobra vs recuperación ( $p < 0.05$ ).

TABLA II  
ÍNDICES  $\alpha$  EN LAS BANDAS DE LF Y HF DURANTE LA ETAPA DE CONTROL Y DE RECUPERACIÓN

	Control	Recuperación
<b><math>\alpha_{LF}</math> (u.a.)</b>		
Intenso		
Semana 0	1.07±0.33	0.82±0.34
Semana 5	1.33±0.21	1.06±0.16
Moderado		
Semana 0	1.32±0.15	1.15±0.44
Semana 5	1.14±0.16	1.10±0.42
<b><math>\alpha_{HF}</math> (u.a.)</b>		
Intenso		
Semana 0	0.92±0.34	0.66±0.31
Semana 5	1.27±0.19	0.87±0.26
Moderado		
Semana 0	1.22±0.12	0.77±0.25
Semana 5	0.97±0.18	0.93±0.31

Valores presentados como Media ± DE.

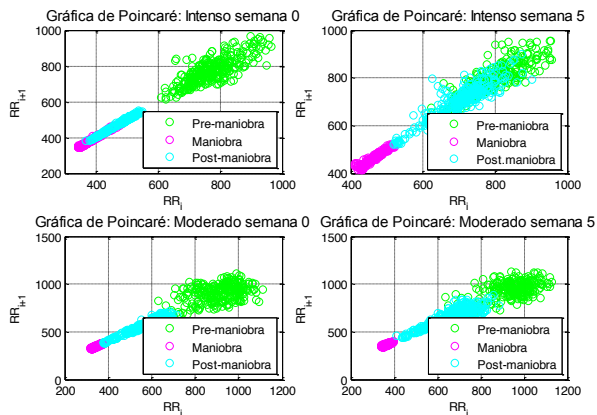


Fig.2. Gráficas de Poincaré de un sujeto del entrenamiento intenso y moderado durante la semana 0 y la semana 5 durante las 3 etapas del protocolo de prueba (control, maniobra y recuperación).

Además es importante mencionar que el número de sujetos considerados en el análisis es bajo por lo que se proponen como perspectivas del trabajo aumentar el número de sujetos, incrementar el periodo de entrenamiento y considerar un periodo de recuperación más largo para evaluar los cambios de VFC con respecto a los tipos de entrenamiento.

#### IV. CONCLUSIÓN

En este estudio se utilizaron medidas clásicas de la VFC y adicionalmente se evaluó el baroreflejo de forma indirecta utilizando la serie de PTT durante un protocolo de prueba en sujetos que realizaron un entrenamiento con diferente intensidad.

Los resultados obtenidos al finalizar el entrenamiento, nos dejan ver como el ejercicio físico aumenta la actividad parasimpática de la respuesta autonómica cardíaca. Al no haber encontrado diferencias significativas durante las semanas de entrenamiento en los 2 tipos de entrenamiento, podemos sugerir que ambas intensidades producen respuestas similares, es decir, que parecen dar el mismo beneficio a pesar de que el tiempo de realización de cada uno sea distinto, además se considera que 5 semanas de entrenamiento no son suficientes para crear cambios significativos en los sujetos de estudio. Aun así, durante la realización del protocolo, se observó como la fatiga de los participantes era menor durante el protocolo de prueba con el paso de las semanas, y como sus valores de FC disminuían con respecto a la semana previa al entrenamiento y, que aunque en ambos entrenamientos se encontró una mejoría en cuanto a FC, en el entrenamiento intenso se observa una mejoría mayor que concuerda con el comportamiento de la relación  $R_{RR-PTT}$ , resaltando que dicho entrenamiento se realizó durante 5 minutos comparados con 20 minutos del entrenamiento moderado.

Los resultados encontrados sugieren que el entrenamiento intenso durante 5 minutos realizado de forma periódica es equiparable al entrenamiento de intensidad menor realizado durante 20 minutos realizado igualmente de forma periódica, lo cual puede representar una estrategia de acondicionamiento físico para personas que requieren realizar actividad física pero no disponen de suficiente tiempo para realizarlo. Sin embargo, es importante mencionar que el entrenamiento intenso tiene cierta dificultad y no sería adecuado para cualquier tipo de persona.

Por otra parte sería necesario aumentar el número de sujetos y las semanas de entrenamiento para soportar los resultados obtenidos en este estudio.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Sarmiento, J. M. García-Manzo, J. M. Martín-González, D. Vaamonde, J. Calderón, M. E. Da Silva-Grigoletto. "Heart rate variability during high-intensity exercise", *J Syst Sci Complex*, vol. 26, pp. 104-116, 2013.
- [2] A. P. Pichon, C. De Bisschop, M. Rouland, A. Denejan, and Y. Papelier, "Spectral analysis of heart rate variability during exercise in trained subjects", *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 36, no. 10, pp. 1702-1708, 2004.
- [3] M. Javorka, I. Zila, T. Balhárek, K. Javorka, "Heart rate recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity", *Department of Physiology, Jessenius Faculty of Medicine, Comenius University*, vol. 35, pp. 991-1000, 2002.
- [4] A. E. Aubert, B. Seps, F. Beckers, "Heart rate variability in athletes", *Sports Medicine*, vol. 33, no. 12, pp. 889-919, 2003.
- [5] V. Pichot, T. Busso, F. Roche, M. Garet, F. Costes, D. Duverney, J. R. Lacour, J. C. Barthélémy, "Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: A laboratory study", *Med Sci Sports Exerc*, vol. 34, no. 10, pp. 1660-1666, Oct 2002.
- [6] F. S. Routledge, T. S. Campbell, J. A. McFetridge-Durdle, S. L. Bacon, "Improvements in heart rate variability with exercise therapy", *Can J Cardiol*, vol. 26, no. 6, pp.303-312, 2010.
- [7] C. R. Cole, E.H. Blackstone, F. J. Pashkow, C. E. Snader and M. S. Lauer, "Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality", *New England Journal of Medicine*, vol. 341, pp. 1351-1357, 1999.
- [8] R. Shriram, A. Wakankar, N. Daimiwal, D. Ramdasi, "Continuous cuffless blood pressure monitoring based on PTT", *IEEE*, 2010.
- [9] A. Arza, J. Lázaro, E. Gil, P. Laguna, J. Aguiló, R. Bailon, "Pulse transit time and pulse width as potencial measure for estimating beat-to-beat systolic and diastolic blood pressure", *Computing in cardiology*, vol.40, pp. 887-890, 2013.
- [10] J. Pan, W. J. Tompkins, "A real-time QRS detection algorithm", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-32, no. 3, March 1985.
- [11] Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, *European Heart Journal*, 17, 354-381, 1996
- [12] U. R. Acharya, Paul Joseph K, N. Kannathal, C. M. Lim, J. S. Suri, "Heart rate variability: a review", *Med Biol Eng Comput*, vol. 44, no. 12, pp. 1031-1051, Dec 2006.
- [13] MT. La Rovere, GD. Pinna, G. Raczak, "Baroreflex sensitivity: measurement and clinical implications," *Ann Noninvasive Electrocardiol.*, vol.13, no. 2, pp: 191-207, Apr. 2008.