

VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD Y LA FRECUENCIA CARDIACA DURANTE UN MARATÓN EN UN AMBIENTE CALUROSO¹

SPEED AND HEART RATE VARIATION DURING MARATHON RUNNING IN A HOT ENVIRONMENT

Daniel Rojas-Valverde ¹, Braulio Sánchez-Ureña ¹, Alexis Ugalde-Ramírez ¹, Carlos D Gómez-Carmona ², José Pino-Ortega ², Randall Gutiérrez-Vargas ¹

drojasv@hotmail.com; brau09@hotmail.com; a.ugalde07@hotmail.com;
cdgomezcarmona@gmail.com; pepepinoortega@gmail.com; rangutie@live.com

¹ Escuela Ciencias del Movimiento Humano y Calidad de Vida, Universidad Nacional de Costa Rica

² Universidad de Extremadura, Universidad de Murcia, España

Envío Original: 2019-06-07 Reenviado: 2020-01-05, 2020-03-03 Aceptado: 2020-03-05

Publicado en versión en español: 2020-06-04

Doi: <https://doi.org/10.15517/pensarmov.v18i1.42155>

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue analizar la variación de la velocidad de carrera y la frecuencia cardíaca en corredores aficionados durante un maratón en un entorno de alto índice térmico. Dieciocho corredores aficionados (peso: 65.2 ± 12.21 kg, altura: 168.4 ± 10.6 cm, VO_{2max} : 52.9 ± 7.1 ml/kg/min) corrieron un maratón (42195 m) en cercanía al mar bajo un índice térmico de 27.8 ± 3.52 °C y con recorrido de 0-80 m.s.n.m. La prueba de Pearson mostró una correlación significativa entre el aumento del índice de estrés termal (TGBH) y la variación de la velocidad ($r = 0.168$, $p = 0.049$). En este sentido, la duración total de la carrera presentó una relación directa con la velocidad ($r = 0.675$, $p = 0.003$) y la variación de la frecuencia cardíaca ($r = 0.631$, $p = 0.007$). El tiempo final de carrera se explicó en un 61.6% y 37% por la variación de la velocidad de 26 a 30 km ($r^2 = 0.61$; $F = 26.17$; $p < 0.001$) y por la variabilidad de la frecuencia cardíaca en el lapso de 31 a 35 km ($r^2 = 0.37$; $F = 10.38$; $p < 0.001$) respectivamente. En conclusión, el índice

¹ Versión traducida al español. Original en inglés disponible en: Rojas-Valverde, D., Sánchez-Ureña, B., Ugalde-Ramírez, A., Gómez-Carmona, C., Pino-Ortega, J., & Gutiérrez-Vargas, R. (2020). Speed and heart rate variation during marathon running in a hot environment. *Pensar En Movimiento: Revista de Ciencias del Ejercicio y la Salud*, 18(1), e37602. doi: <https://doi.org/10.15517/pensarmov.v18i1.37602>

térmico provoca una disminución en el ritmo de la velocidad, siendo este efecto mayor en la segunda mitad de la carrera. Por lo anterior, entrenadores deben de planificar entrenamientos y estrategias para mitigar el impacto de estas condiciones en el desempeño físico y fisiológico de los corredores amateur.

Palabras clave: maratón, índice de estrés termal, ritmo, resistencia, carga interna

ABSTRACT

The purpose of the study was to analyze the variation of running speed and heart rate in amateur runners during a marathon in a hot environment. Eighteen runners (weight: 65.2 ± 12.21 kg, height: 168.4 ± 10.6 cm, VO_{2max} : 52.9 ± 7.1 ml/kg/min) took part of a beach-side marathon (42195 m) under a temperature of 27.8 ± 3.52 °C and at 0-80 m.a.s.l. Pearson's correlation showed a significant linear relationship between the increase in thermal stress index (WGBT) and the speed variation ($r= 0.168$, $p= 0.049$). In this respect, the total duration of the race revealed a direct relationship with speed ($r= 0.675$, $p= 0.003$) and heart rate ($r= 0.631$, $p= 0.007$) variation. Multiple regressions analysis showed that 61.6% of the final race time was explained by the speed variation in the 26 to 30 km course section ($r^2= 0.61$; $F= 26.17$; $p< 0.001$) and 37% by the heart rate variation in the 31 to 35 km section ($r^2= 0.37$; $F= 10.38$; $p< 0.001$). In conclusion, an increase in the environmental temperature provoked a decrease in running pacing, with a stronger effect in the second half of the race. Therefore, coaches should take these aspects into account in training and strategies to mitigate the impact of these conditions on the physical and physiological performance of amateur runners.

Keywords: marathon, thermal stress index, passing, endurance, internal load.

INTRODUCCIÓN

Los eventos de resistencia como la media-maratón, maratón y ultra-maratón requiere que los participantes tengan altas capacidades cardiorrespiratorias, metabólicas, neuromuscular y psicológicas para poder completarlos (Del Coso et al., [2017](#); Lazzer et al., [2012](#); Millet y Millet, [2012](#); Rapoport, [2010](#)). Del mismo modo, debido a la duración de la carrera y la larga distancia que los atletas tienen que cubrir, es común para los corredores utilizar diferentes estrategias con el fin de mantener el rendimiento deseado durante la competición (Díaz, Fernández-Ozcorta y Santo-Concejero, [2018](#); Renfree y Gibson, [2013](#)). Por lo tanto, la economía de carrera y la energía metabólica del corredor parecen ser fundamentales (Sawyer et al., [2010](#); Tartaruga et al., [2012](#)). Para lograr una

economía de energía correcta, por lo general los atletas utilizan diferentes estrategias en cuanto al ritmo, que modifican la velocidad de carrera y el ancho de zancada (Skorski y Abbiss, [2017](#)).

En estudios previos, se ha demostrado que la mayoría de los atletas aficionados por lo general experimentan variaciones de velocidad durante el curso de la maratón (Ely, Martin, Chevront y Montain, [2008](#); Renfree y Gibson, [2013](#); Díaz et al., [2018](#)). Por ejemplo, durante los maratones de San Diego y Las Vegas, se encontró que la variación en el ritmo de carrera registrada usando dispositivos electrónicos de seguimiento (1-5 Hz) fue de $16.9 \pm 6.4\%$ y $16.8 \pm 6.6\%$, respectivamente (Haney y Mercer, [2011](#)). En otra investigación realizada con corredores aficionados, Ely et al. ([2008](#)) muestran que en los primeros 5 km se reportó la velocidad promedio más alta. Después de ello, la velocidad disminuyó y se mantuvo entre los kilómetros del 10 al 25. Entonces, desde este punto de la carrera, fue evidente otro decrecimiento en la velocidad de carrera entre los kilómetros del 25 al 40 (Skorski y Abbiss, [2017](#)). En contraste, los corredores de élite por lo general obtienen mejores resultados al final de la carrera entre los kilómetros del 35 al 40 (Ely et al., [2008](#)). Por otra parte, durante el *Women's Marathon Championship* del 2009, Renfree y Gibson ([2013](#)) se encontró que los atletas que llegaron a la línea de meta en el grupo que lideraba la carrera fueron capaces de mantener un ritmo regular en comparación con el resto de las mujeres que corrió con una estrategia de ritmo irregular.

En cuanto a las respuestas fisiológicas de los atletas, las variaciones en la frecuencia cardíaca generalmente se reportan durante las pruebas de resistencia (Rodríguez- Marroyo, González- Lázaro, Arribas -Cubero, y Villa, [2018](#)). Formenti, Trecroci, Cavaggioni, Caumo y Alberti ([2014](#)) han reportado de una menor frecuencia cardíaca media durante los últimos 19 km en comparación con los primeros kilómetros en un maratón de 42 km. Durante una competencia de carrera en sendero de 35 km, la frecuencia cardíaca puede estar influenciado por el ritmo de carrera, la pendiente del terreno, y la fatiga (Vallverdú et al., [2017](#)). Los cambios en el rendimiento mecánico como el ritmo y la técnica de carrera podrían determinar las respuestas de frecuencia cardíaca, específicamente una mayor carga cardiorrespiratoria; y también la capacidad cardiorrespiratoria también puede determinar el ritmo de carrera (Reis, Van den Tillaar y Marques, [2011](#)).

Los cambios la estrategia del ritmo y respuestas fisiológicas pueden también verse influenciados por diferentes factores, tales como la experiencia del corredor, edad, sexo, tiempo para cubrir la distancia y las condiciones ambientales (March, Vanderburgh, Titlebaum y Hoops, [2011](#); Santos-Lozano, Collado, Foster, Lucia y Garatachea, [2014](#); Trubee, Vanderburgh, Diestelkamp y Jackson, [2014](#)). Específicamente, los factores

ambientales durante los eventos de larga distancia se han estudiado ampliamente en los últimos años (Knechtle et al., [2019](#); Rojas-Valverde, Ugalde - Ramírez, Sánchez-Ureña y Gutiérrez-Vargas, [2019](#)). uno de los primeros trabajos que analizaron las condiciones ambientales en las carreras de resistencia fue realizado por Verdaguer, Codina, Pujol, Rodríguez y Ortiz ([1995](#)) durante los Juegos Olímpicos de Barcelona de 1992, en el que se indicó que las carreras que se realizaron bajo altas temperaturas pueden conducir a efectos fisiológicos y físicos adversos en los atletas. Esto está respaldado por evidencia reciente que mostró serias complicaciones al realizar bajo condiciones de calor y humedad (Rojas-Valverde, Orcina, Gutiérrez-Vargas y Crowe, [2019](#)).

Actualmente, se sabe que la temperatura, la dirección del viento y la humedad pueden afectar el rendimiento fisiológico (frecuencia cardíaca, termorregulación) y mecánico (biomecánica de la marcha, velocidad) de los corredores de carreras de resistencia durante la competencia y el entrenamiento (El Helou et al., [2012](#); Flouris, y Schlader, [2015](#); Junge, Jørgensen, Flouris, y Nybo, [2016](#); Maughan, Otani y Watson, [2012](#)). El mejor indicador para evaluar el índice de estrés térmico durante los eventos deportivos es *Wet-Bulb Globe Temperature* (WBGT) porque considera la temperatura del bulbo húmedo (Twb), la temperatura del globo negro (Tg) y la temperatura del bulbo seco (Tbd) para crear un índice de temperatura global (Armstrong et al., [2007](#); Brocherie, y Millet, [2015](#)). Bajo circunstancias de calor y humedad, la manifestación de la fatiga puede ser prematura en comparación con los ambientes más fríos y secos, debido a un mayor requerimiento metabólico, neuromuscular y cardiorrespiratorios para mantener el ritmo de carrera (Rapoport, [2010](#)). Estas condiciones climáticas podrían afectar el rendimiento neuromuscular que afectan a la velocidad (Del Coso et al, [2013](#); Wu, Peiffer, Brisswalter, Nosaka y Abbiss, [2014](#)), del mismo modo, los aumentos en el índice de estrés térmico podrían causar un aumento de la temperatura interna y pérdida de líquidos (deshidratación) (Cheuvront, Kenefick, Montain, y Sawka, [2010](#)). Los aspectos detallados anteriormente podrían generar alteraciones en la carga interna (por ejemplo, la frecuencia cardíaca) que conducen a una disminución de la función muscular y también afectan negativamente el rendimiento de la carrera durante el maratón (Maughan, [2010](#); Maughan, Otani y Watson, [2012](#)). Otras complicaciones graves como la rabdomiólisis por esfuerzo o la lesión renal aguda podrían ser evidencia de cuando la deshidratación, la tensión por calor y la carga externa se presentan combinadas (Rojas-Valverde et al., [2019](#)).

Entendiendo las pruebas presentadas y reconociendo la influencia de un ambiente caloroso en el rendimiento de carrera (carga interna y externa), el propósito de la presente investigación fue analizar la variación de la velocidad y el ritmo cardíaco

en corredores aficionados durante una maratón en horas o condiciones de calor en Costa Rica.

METODOLOGÍA

Participantes

Dieciocho corredores aficionados que entrenaron regularmente al menos 3 veces por semana (edad: 35.6 ± 6.9 ; peso: 67.4 ± 11.9 kg.; Altura: 168 ± 10 cm; porcentaje de grasa: 20.9 ± 7.5 %, VO 2_{máx}: 52.6 ± 7 ml/kg/ min; masa magra en pierna: 17 ± 4.2 kg, experiencia corriendo maratón: 9 ± 6.6 años) formaron parte en el estudio. Ellos corrieron un maratón al lado de la playa (42 195 m) en Guanacaste, Costa Rica con un índice térmico de $27,8 \pm 3,52$ ° C y en 0-80 msnm. No se reportaron lesiones u otras condiciones adversas al menos 3 meses antes del evento que pudieran afectar las pruebas neuromusculares, cardiovasculares o de rendimiento. El protocolo experimental fue aprobado por el Comité de Maestría de la Universidad Nacional de Costa Rica. Antes de comenzar el estudio, todos los participantes fueron informados de los detalles de los procedimientos experimentales y los riesgos y molestias asociados. Cada sujeto firmó el consentimiento informado de acuerdo con los criterios de la Declaración de Helsinki para la investigación biomédica en seres humanos tal como fue aprobado en el 64 ° *World Medical Asociación General Assembly*, Fortaleza, Brasil ([2013](#)).

Instrumentos y procedimiento

Las pruebas antropométricas y fisiológicas se realizaron 15 días antes del evento. Todos los participantes fueron citados en el Laboratorio de Fisiología (PROCESA) en diferentes horarios. Cada sujeto realizó las pruebas individualmente. Para el peso corporal se utilizó una Elite *Tanita-Ironman*® Series BC554, con una sensibilidad de 0.1 kg; la altura se midió usando un estadiómetro (Seca, Hamburgo, Alemania); y composición corporal mediante absorciómetro dual de rayos X (DEXA) con una precisión de $\pm 3\%$ (General *Electric enCORE* 2011®, versión de *software* 13.6). El VO 2_{max} se evaluó utilizando un analizador de gases (VO 2000, MedGraphics ®) y BREEZESUITE *software* ®, con una cinta de correr y el protocolo incremental de intensidad como se ha descrito por Martin y Coe ([2007](#)) (es decir, 3 min de calentamiento-1 km/h aumentando cada 3 min hasta la fatiga volitiva). El analizador de gases tiene una precisión de $\pm 3\%$ sobre el volumen absoluto (Crouter et al., [2006](#)).

Las condiciones ambientales se midieron usando un monitor de estrés calórico (QuestTemp 36, 3M). El índice térmico se expresó mediante la temperatura del global

del bulbo húmedo (WBGT), que se estimó considerando la temperatura del bulbo húmedo (Twb), la temperatura del globo negro (Tg) y la temperatura del bulbo seco (Tbd) mediante la ecuación: $0.7Twb+0.2Tg+0.1 Tdb$ (Armstrong et al., [2007](#); Brocherie, y Millet, [2015](#)). El equipo se encuentra a 50 metros de la línea de meta y se coloca en un trípode 30 minutos antes del comienzo del evento. Las medidas fueron tomadas durante todo el evento.

La velocidad y la frecuencia cardíaca (FC) se midieron durante toda la carrera. Para estandarizar los datos, la carrera se dividió en un total de ocho vueltas en intervalo de 5 km de la siguiente manera: 0-5 km, 6 -10 km, 1 1-15 km, 1 6 -20 km, 2 1-25 km, 26-30 km, 3 1-35 km, 36-40 km. La velocidad y la FC medias se calcularon utilizando datos brutos para cada rango de 5 km de la distancia total del maratón. Los últimos 2.195 m se excluyeron para estandarizar todas las vueltas a 5 km y teniendo en cuenta sus particularidades (Ely et al., [2008](#)).

Un dispositivo inercial (*SPI-PRO X II*, *GPSports*, Canberra, Australia) se utilizó para medir tanto la carga externa como la interna. Estos equipos utilizan una frecuencia de muestreo de 15 Hz. Los dispositivos eran portados por los corredores en un chaleco de neopreno especial en el nivel de las vértebras T2-T4 y en la línea media de la escápula. Un *software* especial (V2.5.4 *firmware* *AMS Team*, *GPSports*, Canberra, Australia) se utilizó para analizar los datos. Un monitor de frecuencia cardíaca (T31, Polar®, Finlandia) se adjunta a los corredores utilizando una correa para el pecho. Toda la información durante el evento fue recopilada y vinculada al *software* del dispositivo de inercia.

El porcentaje del coeficiente de variación (%CoV) tanto de tasa de velocidad y el ritmo cardíaco de cada vuelta, se calculó siguiendo la siguiente fórmula (Haney [2010](#); Haney, y Mercer, [2011](#)):

$$\%CoV = \frac{\text{desviación standar}}{\text{media}} * 100$$

Análisis estadístico

Los datos descriptivos se informaron como media y desviación estándar. Se exploró la normalidad utilizando la prueba de Shapiro Wilk ($p > 0,50$). Se aplicó estadística inferencial paramétrica usando análisis de varianza de una sola vía para explorar diferencias entre las vueltas durante el maratón. Se realizó un análisis post hoc de Bonferroni para determinar diferencias por pares específicas entre vueltas. Se utilizó una correlación de Pearson para explorar relación entre las variables. Además, se utilizó regresión escalonada múltiple para explorar las variables que influyen en el tiempo de finalización de un maratón. El *Alpha* se estableció en $p < .05$. Para el análisis estadístico

se utilizó el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (SPSS; v. 24.0; SPSS Inc., Chicago, IL, EUA).

RESULTADOS

El evento se realizó bajo una temperatura promedio de 27.8 ± 3.52 °C y un máximo de 33.26 °C. El tiempo promedio para completar la carrera fue 225 ± 37.61 min. La [tabla 1](#) muestra los datos descriptivos de velocidad y frecuencia cardíaca medias por las correspondientes vueltas de 5Km del maratón. La velocidad promedio fue de 10.5 ± 1.4 km / h, mientras que la frecuencia cardíaca promedio fue de 161 ± 10.8 ppm.

La [figura 1](#) representa las diferencias estadísticas en la velocidad %CoV entre las vueltas de la carrera (= 7,179, $p < 0.001$). La velocidad %CoV fue mayor en la vuelta de 31-35 km que en los 5-10 km ($p = 0.025$), 6-10 km ($p < 0.001$) y 11-15 km ($p < 0.001$), 16-20 km ($p < 0.001$), 21-25 km ($p < 0.001$). Adicionalmente, la velocidad %CoV fue mayor en el 26-30 km que el 11-15 km ($p = 0.014$) y 16-20 km ($p < 0.029$) vueltas, y la velocidad %CoV fue mayor en la vuelta de 36-40 km que las vueltas de 11-15 km ($p = 0.021$) y 16-20 km ($p = 0.041$).

Tabla 1.

Datos descriptivos (media \pm desviación estándar) de la velocidad del maratón y la frecuencia cardíaca por vuelta.

Vueltas	0-5 km	6-10 km	11-15 km	16-20 km	21-25 km	26-30 km	31-35 km	36-40 km	0-40 km	%CoV (0-40 km)
Velocidad (km/h)	11.14 ± 1.32	11.51 ± 1.27	11.57 ± 1.34	11.32 ± 1.39	10.94 ± 1.56	9.75 ± 2.21	9.04 ± 2.16	9.12 ± 1.58	10.5 ± 1.4	4.5 ± 2.7
Frecuencia Cardíaca (ppm)	157.04 ± 9.43	163.6 ± 10	163.29 ± 10.21	163.7 ± 10.6	164.64 ± 12.08	161.09 ± 16.77	156.2 ± 17.96	159.26 ± 12.71	161.1 ± 10.8	2.1 ± 0.98

Nota: %CoV: Porcentaje de coeficiente de variación. Fuente: elaboración propia.

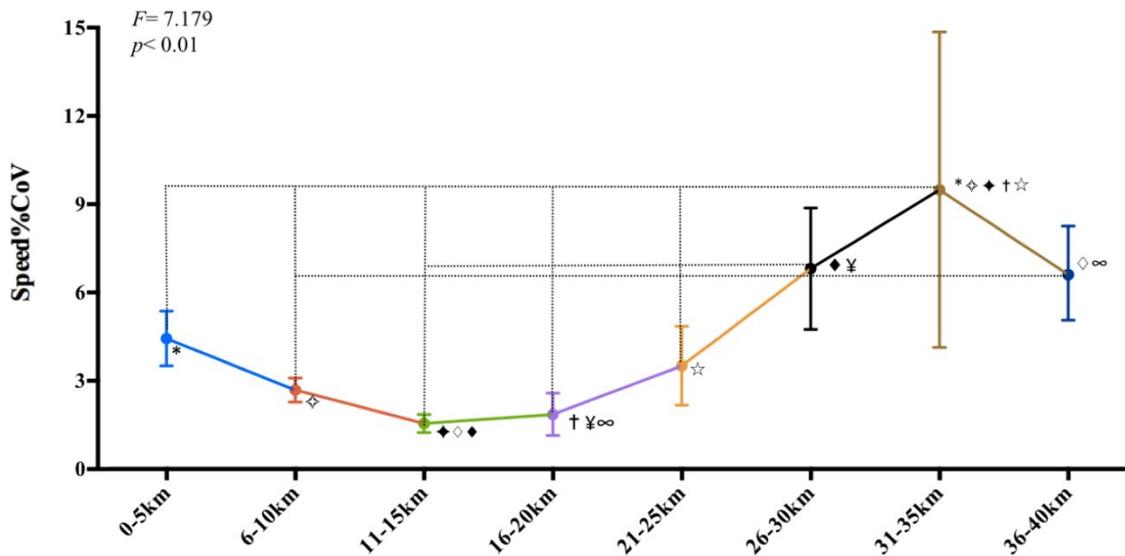


Figura 1. Variación de la velocidad durante el maratón. Diferencias significativas ($p < 0.001$) entre los rangos de kilómetros marcados. Fuente: elaboración propia.

La [figura 2](#), representa las diferencias estadísticas en el ritmo cardíaco %CoV durante las vueltas de carrera ($F=4.069$, $p < 0.001$). El ritmo cardíaco %CoV fue mayor en los 31-35 km que en los 11-15 km ($p = 0,007$) y los 16-20 km ($p = 0,006$); además, la frecuencia cardíaca %CoV fue mayor en la vuelta de 0-5 km que en las vueltas de 11-15 km ($p = 0.038$) y 16-20 km ($p = 0.033$). La variación de velocidad, frecuencia cardíaca e índice térmico a lo largo del maratón se muestra en la [figura 3](#).

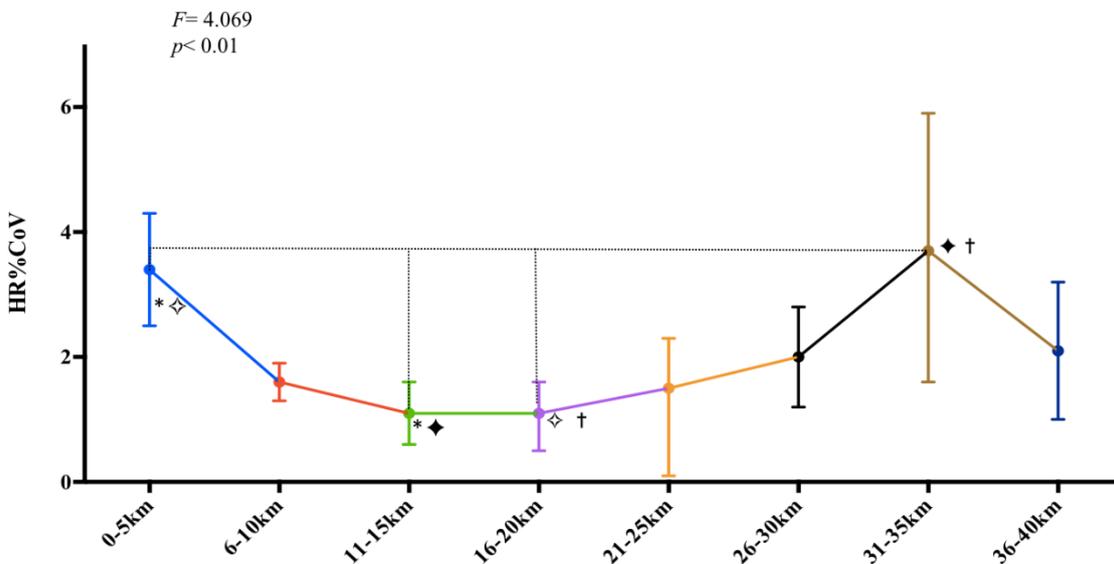


Figura 2. variación del ritmo cardíaco durante la maratón. Las diferencias significativas ($p < 0.001$) entre los rangos de kilómetros se marcaron. Fuente: elaboración propia.

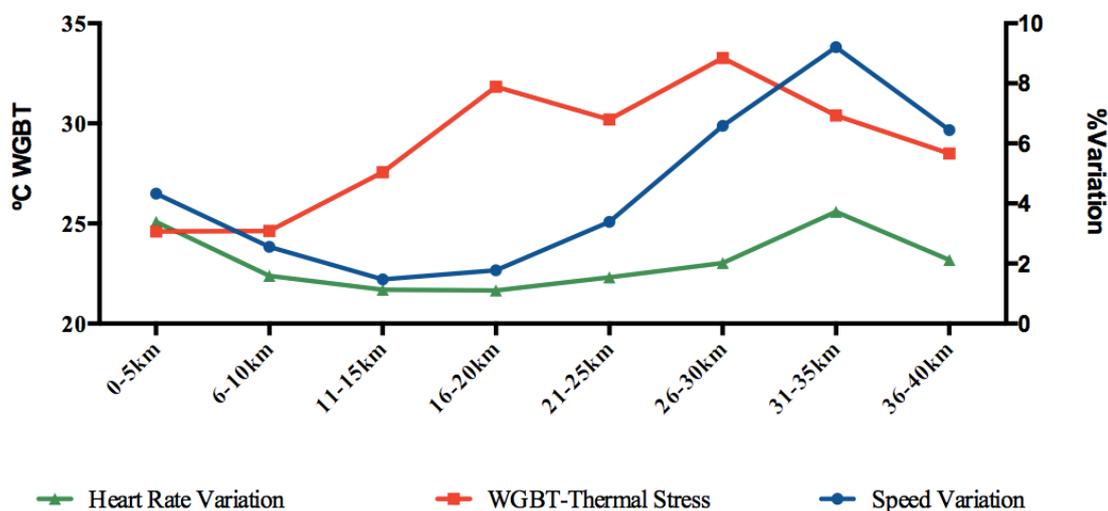


Figura 3. Variación de la tasa de velocidad y ritmo cardíaco en comparación con el índice de estrés termal durante la carrera. Fuente: elaboración propia.

Se encontró una correlación significativa entre el aumento de la temperatura y la variación de la velocidad ($r=0.168$; $p=0.049$). Asimismo, se encontraron relaciones directas entre la duración total de la carrera y la variación de velocidad ($r=0.675$; $p=0.003$) y la variación de la frecuencia cardíaca ($r=0.631$; $p=0.007$). La regresión escalonada múltiple mostró que el 61% y el 37% del tiempo de finalización del maratón se explicaron por la dinámica de velocidad entre los kilómetros 26-30 ($r^2 = 0.611$, $\beta=213.4$, $F=26.165$, $p<0.001$) y por la variación de la frecuencia cardíaca entre los kilómetros 31-35 ($r^2 = 0.370$, $\beta=230.9$, $F=10.379$, $p<0.001$), respectivamente.

DISCUSIÓN

El índice térmico es una variable fundamental que podría influir en el rendimiento de carrera durante carreras de larga distancia (El Helou et al., 2012; Junge et al., 2016; Knechtle et al., 2019; Maughan et al., 2010). A este respecto, es necesario estudiar este aspecto para mejorar los resultados en esta difícil condición ambiental. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue analizar la velocidad y la variación de la frecuencia cardíaca en los corredores durante un maratón en un ambiente caluroso (WGBT) en Costa Rica. En primer lugar, el WGBT promedio durante la competencia fue de 27.8 ± 3.52 °C, alcanzando un máximo de 33.26 °C. En relación con la investigación en ciencias del deporte, este WGBT está por encima de los límites sugeridos por el Colegio Americano de Medicina del Deporte (Armstrong et al., 2007) (WGBT > 28 °C) para el ejercicio físico seguro evitando complicaciones

fisiológicas graves. Por lo tanto, se puede considerar que la carrera se realizó en un entorno extremo.

Con respecto al tiempo total de finalización, el valor promedio fue 225 ± 37.61 min. Este tiempo fue más alto que los mostrados por Del Coso et al. (2013) que informaron de un tiempo final promedio de 192 ± 33 min en una carrera de 42-km un entorno caliente (27°C y 27% humedad relativa) y una altitud 600-655 msnm. Trubee et al. (2014) indican que el tiempo de maratón final para los hombres era de 255 ± 31 min y para las mujeres fue de 264 ± 25 min bajo una temperatura de 26°C . También es importante señalar que los corredores que registraron un lento promedio de velocidad podrían haber sido expuestos más tiempo a un índice térmico más alto que los corredores con una velocidad media más rápida. El primer participante terminó en una WGBT de $26,3^\circ\text{C}$, mientras que el último participante terminó en una WGBT de 30°C .

El coeficiente de variación de velocidad en este estudio fue en promedio de 4.5%, que es más bajo que el mostrado en investigaciones previas que encontraron entre 12-15% a $16.9 \pm 6.4\%$ (Haney 2010; Haney, y Mercer, 2011). Además, se encontró una correlación significativa entre el coeficiente de variación de la velocidad y el tiempo total de la carrera ($r=0.675$; $p=0.003$), por lo que una mayor variación en la dinámica de la velocidad provoca un mayor tiempo de finalización de la carrera. A este respecto, Haney (2010) descubrió que los corredores más rápidos tenían variaciones de ritmo de 20 segundos, mientras que los corredores más lentos tenían variaciones de ritmo de cerca de 3 minutos en períodos de 5 km.

Se observó una mayor variación de velocidad en las vueltas de 5 km después de completar la media distancia del maratón, específicamente en los períodos 26-30, 31-35 y 36-40 km. De hecho, en esta investigación, la velocidad se redujo del kilómetro 26 al kilómetro 40 de la carrera, la velocidad de carrera en las tres últimas vueltas fue de menos de 10 km/h (véase la [tabla 1](#)). Asimismo, el 61% del tiempo de finalización del maratón se explicó por la variación de velocidad entre los kilómetros 26-30 ($r^2 = 0.611$, $\beta = 213.4$, $F = 26.165$, $p < 0.001$). Estos hallazgos coinciden con lo reportado en estudios anteriores (Ely et al, 2008; Santos-Lozano et al, 2014), donde las variaciones más altas de velocidad se observaron en la última parte de la competencia. Esta dinámica generalmente se observa en competencias de resistencia como maratones (Ely et al., 2008; Renfree y Gibson, 2013). Sin embargo, es importante destacar que, en esta investigación, cuando casi todos los corredores completaron la mitad de la carrera (aproximadamente 2 horas después de comenzar la carrera), el WGBT excedió los límites sugeridos para un rendimiento físico óptimo (Armstrong et al., 2007) (Ver [figura 3](#)). Por lo tanto, este factor puede haber influido en la disminución del ritmo de carrera y

el aumento en la variación del coeficiente de velocidad de la segunda mitad del maratón, además de explicar la ligera correlación entre un aumento en la variación del coeficiente de velocidad con un aumento en el índice térmico ($r=0.168$, $p=0,049$).

En relación con las respuestas de frecuencia cardíaca, la media de los corredores se encontró entre 156 y 164 ppm, esto es similar a lo informado por Formenti et al. (2014) con 160 ± 5 ppm durante una carrera de esquí de fondo de maratón de 42 km. El coeficiente de variación de la frecuencia cardíaca en esta investigación fue 2.1 ± 0.9 %, que es inferior al valor obtenido en 10 corredores durante un maratón con una frecuencia cardíaca CoV superior al 7% (Billat, et al., 2009). También se encontró que la variación en la frecuencia cardíaca estaba relacionada con un tiempo más largo para terminar la competencia ($r = 0.631$; $p=0.007$). La frecuencia cardíaca puede estar asociada con variaciones en la intensidad de carrera y la técnica de carrera durante estas etapas de la carrera que causan cambios en las respuestas metabólicas y cardíacas (Reis et al., 2011; Tartagura et al., 2012). Del mismo modo, la [figura 2](#) muestra una variación mayor en la frecuencia cardíaca en los últimos periodos de 5- km de la carrera en comparación con los primeros, específicamente, después de 21-km el ritmo cardíaco CoV aumentó, mostrando esto una similitud relativa a la anteriormente mencionada velocidad variación después de la media maratón. Las condiciones ambientales como la humedad y el calor, pueden causar alteraciones cardiorrespiratorias, estas variaciones en la frecuencia cardíaca afectan el rendimiento durante el evento, principalmente en la segunda mitad de la maratón (El Helou et al, 2012; Flouris y Schlader , 2015; Junge et al., 2016; Maughan et al., 2012).

Tanto las demandas físicas y fisiológicas que estos eventos implican para los corredores (Del Coso et al., 2017; Lazzer et al., 2012; Millet y Millet, 2012; Rapoport, 2010), combinadas con las altas condiciones ambientales en las que la carrera se llevó a cabo puede causar manifestación de fatiga prematura en medio del evento. La deshidratación es uno de los principales efectos negativos de la carrera de larga distancia y su incidencia es mayor en ambientes calurosos. La pérdida de fluido esencial y minerales (por ejemplo: sodio, potasio, y calcio) puede causar disfunción neuromuscular, específicamente en la velocidad los impulsos nerviosos y eficaces contracciones musculares y por lo tanto afecta a la velocidad (Chevront et al, 2010; Maughan, 2010). Además, los biomarcadores sanguíneos como la creatina quinasa (CK), la mioglobina, el lactato deshidrogenasa (ALT) se ven afectados, lo que se libera como resultado del daño sufrido por las fibras musculares (Del Coso et al., 2013; Gutiérrez-Vargas et al., 2020; Rojas-Valverde et al., 2019). Todas estas respuestas hacen que los corredores experimenten fatiga central y periférica al disminuir su rendimiento (El Helou et al., 2012).

Finalmente, en carreras con un alto índice térmico, se recomienda controlar el ritmo, con una velocidad de inicio más lenta para mantenerla o aumentarla al final de la carrera (Trubee et al., [2014](#)). La dinámica más común durante un maratón es: (a) para ejecutar los primeros 5 kilómetros tan rápido como sea posible evitar la fatiga, a continuación, (b) disminución de estimulación a una velocidad que podría ser mantenido entre los kilómetros 10 y 25, a continuación, (c) desaceleración lentamente hasta kilómetro 35 y finalmente (d) aumento de la velocidad en los últimos 5 -7 km (Diaz et al, [2018](#); Ely et al., [2008](#); Skorski y Abbiss, [2017](#)).

CONCLUSIÓN

Un índice térmico alto es un factor importante en el funcionamiento de rendimiento, especialmente en carreras de larga distancia y durante eventos de resistencia debido a la alta carga mecánica y fisiológica. Las condiciones extremas de temperatura y humedad provocan una mayor variación en el ritmo de carrera y la frecuencia cardíaca, y una disminución en el rendimiento reflejada en el tiempo final de finalización. Además, la mayor variación de velocidad y ritmo cardíaco se encuentra en la última mitad de la carrera debido a la influencia de la fatiga. La evaluación de carga interna y el ritmo de rendimiento entre los kilómetros del 26 a 35 parece ser fundamental en la corriente del maratón.

APLICACIONES PRÁCTICAS

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se deben considerar diferentes aplicaciones prácticas:

- a) Mantener un cierto ritmo durante toda la carrera produce un mejor rendimiento en el maratón.
- b) Es aconsejable entrenar con las mismas condiciones de temperatura y humedad como con las que el maratón se llevará a cabo para retrasar el efecto de la fatiga.
- c) Se recomienda una estrategia "J" (comenzar a una velocidad más baja y terminar a una velocidad más rápida) para completar la carrera en condiciones óptimas.
- d) Deben realizarse algunos protocolos estrictos de ingesta de líquidos y alimentos antes, durante y después de una carrera realizada en condiciones de calor para reducir la carga interna y externa.
- e) Los protocolos de recuperación después de la carrera pueden ser efectivos para evitar complicaciones graves cuando se ejecuta en condiciones de calor.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean mostrar su agradecimiento a los programas de CIEMHCAVI CEDERSA, CIDISAD y PROCESA por la asistencia y el acceso al equipo de investigación. Los autores desean agradecer el apoyo financiero de INCIEMOSA para el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- Armstrong, L. E., Casa, D. J., Millard-Stafford, M., Moran, D. S., Pyne, S. W., y Roberts, W. O. (2007). American College of Sports Medicine position stand. Exertional heat illness during training and competition. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(3), 556-572. doi: <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31802fa199>
- Billat, V. L., Mille-Hamard, L., Meyer, Y., y Wesfreid, E. (2009). Detection of changes in the fractal scaling of heart rate and speed in a marathon race. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388(18), 3798-3808. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2009.05.029>
- Brocherie, F, y Millet, G.P. (2015). Is the wet-bulb globe temperature (WBGT) index relevant for exercise in the heat?. *Sports Medicine*, 45(11), 1619-1621. doi: <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0386-8>
- Cheuvront, S. N., Kenefick, R. W., Montain, S. J., y Sawka, M. N. (2010). Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *Journal of Applied Physiology*, 109(6), 1989-1995. doi: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00367.2010>
- Crouter, S. E., Clowers, K.G., y Bassett, D.R. (2006). A novel method for using accelerometer data to predict energy expenditure. *Journal of Applied Physiology*, 100(4), 1324-1331. doi: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00818.2005>
- Del Coso, J., Fernández, D., Abián-Vicen, J., Salinero, J. J., González-Millán, C., Areces, F., ... y Pérez-González, B. (2013). Running pace decrease during a marathon is positively related to blood markers of muscle damage. *PLoS One*, 8(2), e57602. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057602>
- Del Coso, J., Salinero, J. J., Lara, B., Abian-Vicen, J., Gallo-Salazar, C., y Areces, F. (2017). A comparison of the physiological demands imposed by competing in a half-marathon vs. a marathon. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 57(11), 1399-1406. doi: <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.17.07056-6>
- Díaz, J. J., Fernández-Ozcorta, E. J., y Santos-Concejero, J. (2018). The influence of pacing strategy on marathon world records. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 781-786. doi: <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1450899>

- El Helou, N., Tafflet, M., Berthelot, G., Tolaini, J., Marc, A., Guillaume, M., ... y Toussaint, J. F. (2012). Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS One*, 7(5), e37407. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037407>
- Ely, M. R., Martin, D. E., Cheuvront, S. N., y Montain, S. J. (2008). Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(9), 1675-1680. doi: <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181788da9>
- Flouris, A. D., y Schlader, Z. J. (2015). Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine y Science in Sports*, 2(S1), 52-64. doi: <https://doi.org/10.1111/sms.12349>
- Formenti, D., Trecroci, A., Cavaggioni, L., Caumo, A., y Alberti, G. (2014). Heart rate response to a marathon cross-country skiing race: a case study. *Sport Sciences for Health*, 11, 125–128. doi: <https://doi.org/10.1007/s11332-014-0187-8>
- Gutiérrez-Vargas, R., Martín-Rodríguez, S., Sánchez-Ureña, B., Rodríguez-Montero, A., Salas-Cabrera, J., Gutiérrez-Vargas, J.C., ... y Rojas-Valverde, D. (2020). Biochemical and muscle mechanical post-marathon changes in hot and humid conditions. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(3), 847-856. doi: <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002746>
- Haney, T. A. (2010). *Variability of pacing in marathon distance running* (Doctoral Dissertation). University of Nevada, Las Vegas. Retrieved from <https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1780&context=thesedissertations>
- Haney, T.A., y Mercer, J.A. (2011). A description of the variability of pacing in marathon distance running. *International Journal of Exercise Science*, 4(2), 133–140. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4738997/>
- Junge, N., Jørgensen, R., Flouris, A. D., y Nybo, L. (2016). Prolonged self-paced exercise in the heat—environmental factors affecting performance. *Temperature*, 3(4), 539-548. doi: <https://doi.org/10.1080/23328940.2016.1216257>
- Knechtle, B., Di Gangi, S., Rüst, C. A., Villiger, E., Rosemann, T., y Nikolaidis, P. T. (2019). The role of weather conditions on running performance in the Boston

Marathon from 1972 to 2018. *PLoS one*, 14(3), e0212797.
doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212797>

Lazzer, S., Salvadego, D., Rejc, E., Buglione, A., Antonutto, G., y Di Prampero, P. E. (2012). The energetics of ultra-endurance running. *European Journal of Applied Physiology*, 112, 1709-1715. doi: <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2120-z>

March, D. S., Vanderburgh, P. M., Titlebaum, P. J., y Hoops, M. L. (2011). Age, sex, and finish time as determinants of pacing in the marathon. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2), 386-391.
doi: <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181bffd0f>

Martin, D. E., y Coe, P. N. (2007). *Entrenamiento para corredores de fondo y medio fondo*. Barcelona, Spain: Paidotribo. Retrieved from <http://www.paidotribo.com/running/228-entrenamiento-para-corredores-de-fondo-y-medio-fondo-cartone.html>

Maughan, R. J. (2010). Distance running in hot environments: a thermal challenge to the elite runner. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(3), 95-102.
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01214.x>

Maughan, R. J., Otani, H., y Watson, P. (2012). Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *European Journal of Applied Physiology*, 112, 2313-2321. doi: <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2206-7>

Millet, G. P., y Millet, G. Y. (2012). Ultramarathon is an outstanding model for the study of adaptive responses to extreme load and stress. *BMC Medicine*, 10, 77.
doi: <https://doi.org/10.1186/1741-7015-10-77>

Rapoport, B. I. (2010) Metabolic Factors Limiting Performance in Marathon Runners. *PLoS Computational Biology*, 6(10), e1000960.
doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000960>

Renfree, A., y Gibson, A. (2013). Influence of different performance levels on pacing strategy during the women's World Championship marathon race. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(3), 279-285.
doi: <https://doi.org/10.1123/ijsp.8.3.279>

- Reis, V. M., Van den Tillaar, R., y Marques, M. C. (2011). Higher precision of heart rate compared with VO₂ to predict exercise intensity in endurance-trained runners. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10, 164-168. Retrieved from <https://www.jssm.org/hfabst.php?id=jssm-10-164.xml#popup>
- Rodríguez-Marroyo, J. A., González-Lázaro, J., Higinio, F., Arribas-Cubero, H. F., y Villa, J. G. (2018). *Physiological demands of mountain running races*. *Kinesiology*, 50(Suppl.1), 60-66. Retrieved from <https://hrcak.srce.hr/file/285302>
- Rojas-Valverde, D., Olcina, G., Gutiérrez-Vargas, R. y Crowe, J. (2019). Heat Strain, External Workload, and Chronic Kidney Disease in Tropical Settings: Are Endurance Athletes Exposed?. *Frontiers in Physiology*, 10, 1403. doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01403>
- Rojas-Valverde, D., Sánchez-Ureña, B., Pino-Ortega, J., Gómez-Carmona, C., Gutiérrez-Vargas, R., Timón, R. y Olcina, G. (2019). External Workload Indicators of Muscle and Kidney Mechanical Injury in Endurance Trail Running. *International Journal of Environmental Research Public Health*, 16(20),3909. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph16203909>
- Rojas-Valverde, D., Ugalde Ramírez, J.A., Sánchez-Ureña, B., y Gutiérrez-Vargas, R. (2019). Influence of Altitude and Environmental Temperature on Muscle Functional and Mechanical Activation After 30' Time Trial Run. *MHSalud: Revista En Ciencias Del Movimiento Humano y Salud*, 17(1), 1-15. doi: <https://doi.org/10.15359/mhs.17-1.2>
- Santos-Lozano, A., Collado, P. S., Foster, C., Lucia, A., y Garatachea, N. (2014). Influence of Sex and Level on Marathon Pacing Strategy. Insights from the New York City Race. *International Journal of Sports Medicine*, 35(11), 933-938. doi: <https://doi.org/10.1055/s-0034-1367048>
- Sawyer, B. J., Blessinger, J. R., Irving, B. A., Weltman, A., Patrie, J. T., y Gaesser, G. A. (2010). Walking and running economy: Inverse association with peak oxygen uptake. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(11), 2122–2127. doi: <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181de2da7>
- Skorski, S., y Abbiss, C.R. (2017). The Manipulation of Pace within Endurance Sport. *Frontiers in Physiology*, 8. doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00102>

- Tartaruga, M. P., Brisswalter, J., Peyré-Tartaruga, L. A., Vargas Ávila, A. O. V., Alberton, C. L., Coertjens, M., ... y Krueel, L. F. M. (2012). The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 83(3), 367-375. doi: <https://doi.org/10.1080/02701367.2012.10599870>
- Trubee, N. W., Vanderburgh, P. M., Diestelkamp, W. S., y Jackson, K. J. (2014). Effects of Heat Stress and Sex on Pacing in Marathon Runners. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(6), 1673-1678. doi: <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000295>
- Vallverdú, M., Ruiz-Muñoz, A., Roca, E., Caminal, P., Rodríguez, F. A., Irurtia, A., y Perera, A. (2017). Assessment of Heart Rate Variability during an Endurance Mountain Trail Race by Multi-Scale Entropy Analysis. *Entropy*, 19(12), 658. doi: <https://doi.org/10.3390/e19120658>
- Verdaguer-Codina, J., Pujol, P., Rodriguez, A., y Ortiz, E. (1995). Predictive climatology for the Olympic Marathon and race walking events in Barcelona 1992. *Sports Medicine, Training and Rehabilitation*, 6(1), 7-13. doi: <https://doi.org/10.1080/15438629509512031>
- World Medical Association. (2018). *Declaration of Helsinki of the World Medical Association. Ethical principles for medical research in humans*. Retrieved from: <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/>
- Wu, S. S., Peiffer, J. J., Brisswalter, J., Nosaka, K., y Abbiss, C. R. (2014). Factors influencing pacing in triathlon. *Open Access Journal of Sports Medicine*, 5, 223-234. doi: <https://doi.org/10.2147/OAJSM.S44392>