Respuesta del sistema nervioso autónomo durante 12 semanas de entrenamiento a partir de los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en competidores de *CrossFit*® entre 18 y 25 años del municipio de Tuluá

Diana Milena Bedoya Salazar

Jhom Fredy Ríos Cañas

Línea de investigación: Pedagogía de la motricidad y la cultura física

Sublínea: Fisiología del entrenamiento deportivo

Unidad Central del Valle del Cauca

Facultad de Ciencias de la Educación

Maestría en Pedagogía de la Cultura Física

Tuluá–Valle del Cauca

2023

Respuesta del sistema nervioso autónomo durante 12 semanas de entrenamiento a partir de los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en competidores de *CrossFit*® entre 18 y 25 años del municipio de Tuluá

Diana Milena Bedoya Salazar

Jhom Fredy Ríos Cañas

Trabajo para optar el título de Magister en Pedagogía de la Cultura Física

Director: Mg. Cesar Augusto Mazuera

Codirectora: Mg. Luz Adriana Suarez

Unidad Central del Valle del Cauca

Facultad de Ciencias de la Educación

Maestría en Pedagogía de la Cultura Física

Tuluá–Valle del Cauca

2023

Agradecimientos

Agradecemos primeramente a Dios, por permitirnos culminar con este proceso de formación y aprendizaje, a nuestras familias por su apoyo y amor incondicional, a nuestros asesores César Augusto Mazuera y Luz Adriana Suarez por todo el acompañamiento y sugerencias que fortalecieron nuestra resiliencia.

.

Dedicatoria

A nuestros padres, hijos, hermanos y conyugues. En especial a nuestras madres que nos inspiraron a convertirnos en docentes.

Tabla de contenido

Resumen…… 10
Abstract…..11
Introducción.....12
1 Respuesta del sistema nervioso autónomo a partir de los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en competidores de Crossfit.....20
1.1 Modulación del sistema nervioso autónomo durante el ejercicio físico.....20
1.1.1 Fisiología del Sistema Nervioso Autónomo.....23
1.1.2 Adaptaciones del sistema nervioso autónomo generadas por el ejercicio físico.....26
1.1.3 Ejercicio físico como estrés y la respuesta del sistema simpático y parasimpático……...29
1.2 Sistema nervioso autónomo y la variabilidad de la frecuencia cardiaca 31
1.2.1 Parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardíaca.....33
1.2.2 Influencia de las variables de la carga sobre los parámetros de dominio de tiempo y frecuencia…… 37
1.2.3 La variabilidad de la frecuencia cardíaca como predictor de enfermedades cardiovasculares….. 41
1.3 Monitorización de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en el *Crossfit*® 43
1.3.1 Características del Crossfit® y la carga de entrenamiento usadas en los WOD 45
2 Metodología 50
2.1 Enfoque…… 50
2.2 Diseño……. 50
2.3 Alcance y el corte 50
2.4 Instrumentos y materiales de evaluación.....50
2.5 Población y muestra.....52
2.6 Criterios de inclusión 52

2.7 Criterios de exclusión: 52

2.8 Protocolos de evaluación....53

2.8.1 Protocolo de evaluación de las magnitudes de la carga del WOD....53

2.8.2 Cuestionario de condiciones previas a la valoración de la variabilidad de la frecuencia cardiaca …….....53

2.8.3 Evaluación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca....54

2.9 Procesos estadísticos....55

3 Resultados....56

4 Análisis y discusión....62

5 Conclusiones....67

6 Recomendaciones....68

Referencias....69

Apéndices.. 78

Listado de tablas

Tabla 1 Parámetros estadísticos del dominio de tiempo.....35

Tabla 2 Dominio de frecuencia en grabaciones a corto plazo de cinco minutos.....36

Tabla 3 Parámetros de riesgo cardiovascular 43

Tabla 4 Medidas de dominio de tiempo y frecuencia de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca 51

Tabla 5 Características antropométricas y edad de la población.....56

Tabla 6 Medidas de tendencia central y dispersión de las variables de frecuencia de entrenamiento semanal y volumen de horas diarias 56

Tabla 7 Medidas porcentuales de la variable de intensidad del entrenamiento.....57

Tabla 8 Medidas de tendencia central y dispersión de las variables FCR, PAS, PAD 57

Tabla 9 Medidas de tendencia central, dispersión y significancia de los parámetros RMSSD, HLF/HF.....58

Tabla 10 Determinación de las diferencias entre las tres medidas de RMSSD y LF/HF.....58

Tabla 11 Valores porcentuales del parámetro LF/HF 59

Tabla 12 Modelo lineal general de medidas repetidas de los parámetros RR y pNN%.....59

Tabla 13 Modelo lineal general de medidas repetidas en las tres medidas del parámetro pNN% 60

Tabla 14 Correlaciones de variables paramétricas.....61

Listado de apéndices

Apéndice A 78

Apéndice B 78

Apéndice C 79

Lista de abreviaturas

FCR: Frecuencia Cardíaca en Reposo

HF: Dominio de frecuencia. Indicador de la actividad vagal

Hz: Hertz

kg: Kilogramos

LF/HF: Dominio de frecuencia. Balance entre sistema simpático y parasimpático

L.P.M: Latidos por minuto

Ms: Milisegundos

mmHg: Milímetro de mercurio.

PA: Presión arterial.

PNN%: Calcula diferencias entre los eventos sucesivos de los intervalos RR.

RMSSD: Raíz cuadrada media de la unión de los intervalos R-R adyacentes.

RR: Media de las desviaciones estándar de todos los intervalos RR para todos los segmentos de 5 minutos de toda la grabación (variabilidad total).

SNA: Sistema nervioso autónomo.

SDNN: Desviación estándar de los intervalos RR.

VFC: Variabilidad de la frecuencia cardíaca.

WOD: *Workout the day* (trabajo del día).

Resumen

En el presente estudio, se propuso identificar la respuesta del sistema nervioso autónomo a través de los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en competidores de *CrossFit*® entre 18 y 25 años del municipio de Tuluá. Se registraron tres medidas de los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en reposo, la presión arterial y la frecuencia cardíaca en reposo durante 12 semanas, con intervalos de un mes. Los parámetros fueron valorados durante cinco minutos en posición decúbito supino a 27 hombres mestizos físicamente activos y saludables. Los resultados mostraron cambios estadísticamente significativos (p = .05) en los dominios RMSSD y LF/HF durante los tres registros, aunque no se presentaron cambios estadísticos en la variable HF. Por otra parte, se observaron cambios estadísticamente significativos (p = .05) en la variable PNN% y un coeficiente de determinación (η^2) de .198, así como una óptima respuesta en el promedio de ondas RR en los tres registros, lo que se concluye que, la práctica del *Crossfit*® mejora la VFC global, indicando salud cardiovascular. Sin embargo, hay un desequilibrio porcentual en la variable LF/HF, mostrando una actividad sostenida del sistema simpático en la segunda y tercera medida, pudiendo reflejarse a largo plazo síndrome de sobreentrenamiento por las cargas acumulativas en el desarrollo de los *WOD*.

Palabras clave: *Crossfit*®, variabilidad de la frecuencia cardíaca, carga de entrenamiento, sistema nervioso autónomo, sistema cardiovascular.

Abstract

In the present study, we proposed to identify the response of the autonomic nervous system through the parameters of heart rate variability in CrossFit® competitors between 18 and 25 years old from the municipality of Tuluá. Three measurements of the parameters of heart rate variability at rest, blood pressure and heart rate at rest were recorded for 12 weeks, with one-month intervals. The parameters were assessed for five minutes in the supine position to 27 physically active and healthy mixed-race men. The results showed statistically significant changes (p = .05) in the RMSSD and LF/HF domains during the three recordings, although there were no statistical changes in the HF variable. On the other hand, statistically significant changes (p = .05) were observed in the variable PNN% and a coefficient of determination (η^2) of .198, as well as an optimal response in the average RR waves in the three recordings, which concludes that, the practice of Crossfit® improves global HRV, indicating cardiovascular health. However, there is a percentage imbalance in the LF/HF variable, showing a sustained activity of the sympathetic system in the second and third measures, which may reflect overtraining syndrome in the long term due to the cumulative loads in the development of WODs.

Key words; Crossfit®, heart rate variability, training load, autonomic nervous system, cardiovascular system.

Introducción

El *CrossFit*® es un programa de entrenamiento físico funcional conocido por sus entrenamientos del día "*Work out Day*" por sus siglas en inglés (Meier et al., 2023). Se basa en la ejecución de movimientos funcionales, que contiene una naturaleza hibrida de halterofilia, gimnasia, ejercicios aeróbicos y de fuerza, requiriendo un alto grado de esfuerzo físico y agilidad para ejecutarlos a una alta intensidad (Crossfit Training, 2021). Comúnmente, los entrenamientos se realizan de forma rápida, repetitiva y con poco o ningún tiempo de recuperación entre series, lo que lleva principalmente a la utilización del sistema energético glucolítico (Dominski et al., 2022).

La práctica del C*rossFit*® se ha relacionado con diversos beneficios fisiológicos como mejoras en la capacidad aeróbica y la composición corporal (Claudino et al., 2018; Kliszczewicz et al., 2018). Además, se han observado mejoras en factores psicológicos como la autoestima, motivación, beneficios sociales y construcción de la comunidad (Crossfit Training, 2021). De hecho, la creciente popularidad del programa ha generado un mayor interés científico duante los últimos años, y se han registrado ampliamente las respuestas agudas al entrenamiento de alta intensidad y sus beneficios (Meier et al., 2023).

Si bien, las investigaciones han señalado los beneficios y adaptaciones producidas por la práctica de *CrossFit*®, aún se desconoce el impacto en la salud de esta nueva modalidad de ejercicio físico a largo plazo, especialmente cuando se superan los límites biológicos por encima del umbral de adaptación de cada sujeto, en este caso frente a la magnitud de la carga empleadas en el *WOD*, en los que además se incluyen una gran variedad de movimientos técnicos caracterizados por ejercicios repetitivos de alta intensidad que no presentan periodos de descanso,

lo que podría representar posibles riesgos físicos o de sobreentrenamiento (Feito et al. 2018; Kliszczewicz et al., 2018; Willians et al., 2017). Asimismo, sobrecargar los sistemas de respuesta al estrés, principalmente el Sistema Nervioso Central (SNA), encargado de inducir la respuesta de participación del sistema nervioso simpático o parasimpático en función de la intensidad del ejercicio (Barroco- Ruiz et al., 2020; Nobrega et al., 2014).

Dentro de este orden de ideas, la variedad de ejercicios propuestos en cada *WOD* y la falta de interconexión de las variables de las cargas podrían dar lugar a periodos prolongados de desequilibrio del SNA, lo cual, se ha relacionado con la posibilidad de eventos adversos cardíacos de carácter agudo o el origen de lesiones osteoarticulares por el sobreentrenamiento (Eijsvogels et al., 2016). Esto se basa en que, el entrenamiento mixto e intenso, donde la magnitud de la carga hemodinámica y el ejercicio repetitivo con una duración mayor a 15 horas semanales de entrenamiento, puede desencadenar insuficiencias valvulares, como la regurgitación aórtica y la hipertrofia compensada, y sí la sobrecarga es excesiva, descompensación cardiaca reflejada en la disfunción miocárdica (Peidro, 2022).

Por lo anterior, estas modalidades de entrenamiento de alta intensidad son objeto de debate, dado que, se desconoce cómo las principales variables de la magnitud de la carga (intensidad, volumen y frecuencia) usadas en los protocolos del *WOD*, afectan la respuesta del SNA en los atletas competidores de *Crossfit*®. De acuerdo a lo anterior, se cuantificaron las variables de la magnitud de la carga: volumen, intensidad y frecuencia de entrenamiento y para ello, se encuestaron a 104 atletas competidores de *Crossfit*® de los distintos Boxes del municipio de Tuluá.

Se halló que el 90% de los deportistas destinaban entre 2 y 3 horas de entrenamiento por sesión. Respecto a la frecuencia de entrenamiento semanal, se evidenció que el 74.1% entrenaban

entre 5 y 6 días a la semana. En relación a la intensidad del entrenamiento, el 62.2% de los atletas respondieron que utilizaban una intensidad vigorosa y el 37.8% entrenaban a una intensidad moderada.

A partir del vacío teórico expuesto anteriormente, surge la pregunta de investigación: ¿Cuál es la respuesta del sistema nervioso autónomo durante 12 semanas de entrenamiento a partir de los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en competidores de *CrossFit*® entre 18 y 25 años del municipio de Tuluá?

Por tal motivo, se propuso como objetivo principal, identificar la respuesta del sistema nervioso autónomo durante 12 semanas de entrenamiento a través de los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en los competidores de *CrossFit*® entre 18 y 25 años del municipio de Tuluá. Para lograr esto, se caracterizaron las variables de carga como el volumen, la frecuencia y la intensidad, así como las variables fisiológicas, que incluyen la frecuencia cardíaca en reposo y la presión arterial sistólica y diastólica en los atletas practicantes de *CrossFit*®.

Posteriormente, se evaluó la VFC en forma periódica, una vez cada cuatro semanas, a lo largo del ciclo de entrenamiento durante 12 semanas, completándose así 3 evaluaciones cuyos resultados fueron comprobados mediante análisis estadístico; seguidamente se compararon y analizaron los resultados en los parámetros de dominio de tiempo y frecuencia en los competidores de *CrossFit*®. Por último, se establecieron correlaciones entre los índices de la variabilidad de la frecuencia cardíaca con las magnitudes de la carga y las variables fisiológicas de frecuencia cardíaca en reposo y la presión arterial en los atletas de *CrossFit*®.

Ahora bien, el principal motivo para llevar a cabo esta investigación, fue brindar un aporte teórico desde la fisiología del ejercicio, es decir, comprender cómo responde el SNA frente a las cargas utilizadas en un *WOD*, puesto que, es necesario identificar, el impacto de estas nuevas modalidades de ejercicio sobre el sistema cardiovascular y la integridad física. Del mismo modo, conocer a largo plazo cómo afecta el grado de interacción de las cargas de entrenamiento a nivel competitivo, usadas en el *Crossfit*® en los sistemas de respuesta al estrés como lo es, el sistema simpático y parasimpático, siendo indicadores de equilibrio homeostático, asimismo, mediante el estudio cuantitativo de variables propias establecidas para el análisis de la VFC, brindar aportes teóricos-prácticos al conocimiento de la respuesta del SNA cuando se practica el Crossfit mediante las denominadas unidades de entrenamientos WOD, que significa la rutina de ejercicios que hay que realizar en un día concreto.

Esta investigación, también permite realizar seguimiento en relación a la respuesta del SNA frente a la práctica del *Crossfit*® a nivel competitivo, propiciando recomendaciones en correspondencia a los regímenes de ejercicio físico seguro, propuesto por algunas organizaciones internacionales, entre ellas la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020) y el Colegio Americano de Medicina del Deporte (ACMS) (Claudino et al., 2018). Gracias a que, la medida de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), es un marcador útil y no invasivo que monitoriza la respuesta fisiológica de los atletas a la acumulación de las cargas y las adaptaciones producidas por la práctica de algún deporte o modalidad de ejercicio físico.

Del mismo modo, el uso de dispositivos electrónicos como *software*, *smartphones* y tecnología de última generación, serán instrumentos que tendrán un alto impacto de innovación en la valoración y seguimiento de sujetos que inician con la práctica de ejercicio físico, pues permitirá

la monitorización ambulatoria y no invasiva que evaluará las adaptaciones cardiovasculares en respuesta al ejercicio, entendiendo de este modo, la funcionalidad del SNA como también, la planificación de las cargas que permitan realizar ejercicio seguro y practicar una modalidad deportiva sin riesgo de desequilibrios del SNA o sufrir sobreentrenamientos.

A continuación, se presentan los antecedentes que muestran los hallazgos de estudios previos relacionados con las variables de la presente investigación. A nivel internacional, se encontró un estudio que tuvo como objetivo correlacionar las interacciones entre la VFC, los componentes de la carga de entrenamiento y el riesgo de lesiones en atletas competitivos de Crossfit®. El estudio fue de tipo descriptivo longitudinal; en él, se evaluó semanalmente la VFC, la intensidad y la percepción de la carga de entrenamiento mediante la escala de Borg, los valores de la carga aguda diaria y el cuestionario de lesiones por sobrecarga del Centro de Investigaciones de Trauma Deportivo de Oslo, durante 16 semanas.

Los resultados revelaron un efecto de interacción significativo entre la raíz cuadrada (*rMSSD*) semanal y los porcentajes de lesiones según el cuestionario ($p = .009$), es decir, el sistema parasimpático disminuyó y las lesiones aumentaron en un grupo de siete competidores de *Crossfit*®. El estudio concluyó que la VFC es un marcador útil y no invasivo de la respuesta fisiológica de los atletas a la acumulación de cargas y adaptaciones. Además, permite la prescripción de la carga de entrenamiento, especialmente para aquellos atletas que experimentan una reducción en la VFC (Willians et al., 2017).

Por otro lado, Dalla et al. (2019) plantearon como objetivo identificar los efectos secundarios del entrenamiento físico en un grupo control que realizaba actividad física de manera regular, en comparación con un grupo experimental de triatletas que superaban las dosis de

ejercicio extenuante de alta intensidad y altos volúmenes sobre la regulación neurocardiovascular. La metodología utilizada fue de tipo cuasiexperimental, a través de evaluaciones con electrocardiograma, presión arterial, biomarcadores en pruebas de sangre y VFC.

Los hallazgos demostraron que los triatletas presentaron adaptaciones en el diámetro de la aurícula izquierda, en mayores volúmenes telediastólicos y telesistólicos, y una mayor VFC, lo que indica una mayor modulación simpática cardiovascular en general, junto con una menor actividad vagal cardíaca. La conclusión del autor fue que los triatletas se caracterizaron por mostrar signos de hiperactividad simpática cardiovascular sostenida, lo que podría representar un factor de riesgo para futuros eventos cardiovasculares, debido a la conocida asociación entre la actividad simpática excesiva crónica y el aumento del riesgo cardiovascular.

Otro estudio examinó la respuesta aguda SNA en hombres físicamente activos que realizaban ejercicio físico regularmente, después de ejecutar dos estilos comunes de entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT) de corta y larga duración. La metodología utilizada fue experimental y en ella se midió VFC antes y después de dos tipos de entrenamiento: un *WOD* Grace de 30 repeticiones de *Power Clean and Jerk* en 5 min, y otro de 15 minutos en el remoergómetro, seguido de 20 *Swings* con pesa rusa de 16 kg y 15 repeticiones de *Push Press* con mancuernas de 13.6 kg (Kliszczewicz et al., 2018).

Los resultados reportaron una reducción significativa en la depresión de la VFC en el dominio *RMSSD* (medida en milisegundos) en todas las mediciones posteriores al ejercicio ($p < .05$). Esta reducción fue mayor en el *WOD* corto, puesto que, la intensidad del ejercicio y los estímulos de fuerza provocaron las mayores alteraciones. Las conclusiones del estudio indicaron que la intensidad del ejercicio es el factor más influyente en la VFC, y se observaron

perturbaciones más pronunciadas como resultado de la respuesta aguda al ejercicio.

A nivel internacional, se realizó un estudio por Figueiredo et al. (2018) en el cual se comparó la respuesta del SNA a través de la VFC. Se utilizaron dos métodos, uno lineal y otro no lineal, para analizar un grupo de 20 atletas antes, durante y después de realizar un *WOD* de 5 y 10 minutos. En este entrenamiento, los atletas tenían que realizar la mayor cantidad de repeticiones en series de 10 *pull-ups*, 10 *push-ups*, 10 *power cleans* y 10 *shoulder press to overhead*, con la máxima intensidad, dentro de un límite de tiempo establecido.

Los resultados mostraron efectos significativos en todos los parámetros de respuesta del sistema nervioso simpático y parasimpático, utilizando tanto el método lineal de dominio de tiempo y frecuencia como el método no lineal de gráfico de concurrencia de SDNN ($p < .001$) y RMSSD ($p < .001$), así como en LF ($p < .001$). Los autores concluyeron que ambos tipos de entrenamientos indujeron un aumento agudo en la actividad simpática y una disminución en la actividad vagal.

Por otra parte, se identificó los efectos de diferentes *WOD* denominados *Fran, Megan* y *Diane*, sobre las respuestas de la presión arterial sistólica, la presión arterial diastólica y la VFC; se comprobó en los parámetros de dominio de tiempo *SDNN, RMSSD, RR*, presentaron una alta variabilidad, excepto el parámetro pNN50% y en los dominios de frecuencia LF, LF/HF, además, los principales hallazgos mostraron que posterior al *WOD*, se promueven reducciones significativas en la VFC a través de indicadores parasimpáticos *RMSSD* y aumento de la actividad simpática LF, LF/HF; del mismo modo, en la presión arterial se presentaron reducciones significativas en los valores de la presión arterial, independientemente del tipo de sesión; por último, se concluyó que en las tres sesiones indujeron una actividad similar, reduciendo la

actividad del SNA medida mediante VFC, así como una hipotensión postejercicio (Barreto et al., 2023).

Por último, a nivel nacional se halló un estudio que pretendió determinar los efectos del entrenamiento con ejercicios de moderada intensidad versus los ejercicios de alta intensidad sobre la VFC en adultos sedentarios. La metodología fue un ensayo clínico de tipo explicativo, cuasiexperimental con una duración de 12 semanas, con una frecuencia de tres veces a la semana, asimismo el monitoreo sobre la VFC fue registrado con banda polar H10; los parámetros fueron procesados con en el programa *Kubios*. Un grupo realizó ejercicio de moderada intensidad entre 55% y 75% en cinta durante 35 a 55 minutos por sesión; el grupo de alta intensidad debía correr al 85 -95% de su FC máxima durante 4 minutos y al 65% durante 4 minutos de recuperación respectivamente, aunque, no se presentó significancia (p = .206) en ambos grupos, como tampoco en la variable *RMSSD* (p = .180). Por otro lado, el estudio mostró una mejora de 3,4 ms en el dominio de tiempo *SSDN* en el grupo de entrenamiento de moderada intensidad y en el grupo *HIIT* mejoró 29,7 ms. Las conclusiones reportaron que, no hubo cambios estadísticamente significativos en ambos protocolos, sin ambargo, la VFC fue mayor en el protocolo de ejercicios de alta intensidad (Ramírez- Vélez, 2020).

1 Respuesta del sistema nervioso autónomo a partir de los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardiaca en competidores de Crossfit

Se ha verificado que el ejercicio físico es beneficioso para la salud cardiovascular, puesto que, se ha demostrado que tiene un impacto positivo en su funcionalidad. Sin embargo, las nuevas tendencias de ejercicio físico practicado a alta intensidad y grandes volúmenes como el *Crossfit®*, está menos estudiado (Difiori et al., 2014). El estrés agudo y crónico provocado por este tipo de entrenamiento físico tiene una importante influencia en el tipo de respuesta del SNA (Daniela et al., 2022).

Un fenómeno fisiológico que refleja el equilibrio del SNA es la VFC. Esta se manifiesta en las variaciones de tiempo entre latidos cardíacos y responde a factores como el cansancio, la relajación, los estados emocionales y, por supuesto, la tensión generada por el entrenamiento (Bompa & Buzzicheli, 2017). Su análisis, se utiliza ampliamente para caracterizar las funciones del SNA; además, se ha identificado que el SNA desempeña un papel importante en la respuesta cardiovascular y en la salud en general, constituyéndose en una de las formas de identificar las adaptaciones al ejercicio físico (Johnston et al., 2019).

1.1 Modulación del sistema nervioso autónomo durante el ejercicio físico

El SNA forma parte del sistema nervioso periférico y regula automáticamente lo que ocurre en el cuerpo. Se encarga de controlar los procesos fisiológicos involuntarios, tales como la frecuencia cardíaca, la presión arterial, la respiración, la digestión y la excitación sexual, jugando un papel importante en la homeostasis o equilibrio sistémico (Kliszczewicz et al., 2018). Este se compone de dos partes funcionales, llamados sistema nervioso simpático y parasimpático, ambos

sistemas se mantienen activos constantemente, es decir, proporcionan cierto grado de impulso nervioso a un tejido específicos en todo momento, influyendo en la actividad de la mayoría de los tejidos y sistemas de órganos del cuerpo, especialmente en el sistema cardiovascular (McCorry, 2007).

Cuando el sistema cardiovascular responde rápidamente a factores estresantes con el fin de adaptar mejor las funciones del organismo a las situaciones ambientales; estos cambios están influenciados por los sistemas simpático y parasimpático. Dicho de otro modo, cuando el sistema simpático se activa, aumenta la frecuencia cardíaca y la tensión arterial, mientras que, la activación el sistema parasimpático conlleva a una disminución de la frecuencia cardíaca y la tensión arterial (Bompa & Buzzicheli, 2017).

En consecuencia, la frecuencia cardíaca y el gasto cardíaco deben variar en respuesta a las necesidades de oxígeno y nutrientes de las células del cuerpo en diferentes condiciones como ocurre antes, durante y después del ejercicio físico. Esto se debe a que el corazón responde rápidamente a los requisitos cambiantes de los tejidos corporales y otros factores que regulan la frecuencia cardíaca y la contractilidad (Gordan et al., 2015).

Por consiguiente, el aparato cardiovascular debe asegurar el aporte y equilibro de oxígeno y nutrientes a los músculos durante el ejercicio, cubriendo sus necesidades metabólicas y favoreciendo la disipación del calor (Freeman et al., 2006). Es importante señalar que, una de las primeras respuestas a nivel cardiovascular frente al entrenamiento, corresponde a la fase anticipatoria; estos cambios generados en los momentos previos al ejercicio por los estímulos cerebrales suceden en la corteza y diencéfalo, lo que conlleva una disminución de las respuesta parasimpática, con un descenso de las concentraciones de acetilcolina y un aumento simultaneo

de la activación simpática, seguidamente sucede la segunda fase de liberación de catecolaminas, todo esto, gestionado por el SNA (Peidro, 2022).

En este sentido, Van Der Kolk (2020) expresa que el sistema simpático es el responsable de la activación de huida y lucha, incluida la respuesta a los estímulos del ejercicio físico, que es considerado un agente estresante. Esto provoca el aumento del flujo de la sangre a los músculos rápidamente, y en parte, haciendo que las glándulas suprarrenales liberen adrenalina, acelerando el ritmo cardíaco y aumentando la presión arterial.

Por el contrario, el sistema parasimpático desencadena la liberación de Acetilcolina para frenar la activación, reduciendo el ritmo cardíaco, relajando los músculos y recuperando la respiración normal. Precisamente cuando una persona respira (inspira y espira), controla las aceleraciones y desaceleraciones del corazón, esto para aumentar la amplitud de la frecuencia cardiaca, debido a ello, los dos latidos cardiacos no son nunca exactamente los mismo, de allí que, cuanta mayor fluctuación halla, mayor será la VFC, término usado para comprobar la flexibilidad de estos dos sistemas (Van Der Kolk, 2020).

Durante el ejercicio, se producen modificaciones en el organismo que afectan la frecuencia cardíaca y la contractibilidad del músculo cardíaco. Estos cambios son resultado de la estimulación simpática y pueden variar según diferentes factores, como el tipo de ejercicio, la edad, el grado de entrenamiento y la superficie corporal. Uno de los indicadores del rendimiento cardíaco es el volumen sistólico que representa la cantidad de sangre expulsada por cada sístole (Peidro, 2022).

En el esfuerzo máximo, este valor puede alcanzar entre 110 a 200 mililitros. Es importante mencionar que, la estimulación simpática y las catecolaminas circulantes incrementan la

contractibilidad de las fibras del músculo cardíaco, lo que a su vez contribuye a la elevación del volumen sistólico. Además, la intensidad del ejercicio tiene un efecto proporcional en el aumento de la frecuencia cardíaca, lo que implica que los tiempos de llenado de los ventrículos son menores durante el ejercicio intenso. En otras palabras, la combinación de la estimulación simpática y la actividad muscular en el ejercicio resulta en una mejora del rendimiento cardíaco (Peidro, 2022).

Es por esto que, el sistema cardiovascular juega un rol muy importante en los procesos de respuesta de reactivación parasimpática y como marcador de recuperación posterior al ejercicio físico entre los que se incluye, la eliminación de nutrientes y la termorregulación, como se describe en la teoría de la supercompesación, no obstante, todas estas respuesta parecen estar muy individualizadas, dado que, los cambios en la actividad autónoma cardíaca pueden proporcionar una medida aproximada de los cambios en la entrada autónoma a los órganos y por defecto de los requisitos de flujo sanguíneo para restaurar la homeostasis (Stanley et al., 2013).

(Stanley et al., 2013).

1.1.1 Fisiología del Sistema Nervioso Autónomo

Las fluctuaciones y signos vitales corporales son controlados por un sistema regulatorio único, resultado de la sincronía entre las dos ramas del SNA. El primero que actúa como acelerador del cuerpo y es conocido como el sistema simpático, y el segundo, ralentiza algunas funciones corporales y es denominado el sistema parasimpático. Ambos sistemas son recíprocos y desempeñan un papel muy importante en el manejo del flujo sanguíneo, la deglución, la salivación, la respiración, la dilatación de las pupilas, los cambios musculares. Especialmente tiene una influencia significativa en el ritmo cardiaco, convirtiendo el SNA en el sistema de supervivencia

más elemental del cerebro y corazón (Guyton & Hall, 2016).

Es así que, el SNA establece el patrón inicial de activación autonómica del corazón y los vasos sanguíneos al inicio del ejercicio físico. En efecto, la actividad física regular produce adaptaciones posteriores al ejercicio físico, mejorando la activación parasimpática y se vuelve más robusta y eficiente, un cambio que se propone para sustentar mejoras más amplias en el tono autonómico (Fu & Levine, 2013).

Según Guyton y Hall (2016), el mecanismo utilizado por los nervios del sistema simpático es la liberación de noradrenalina. Esta hormona y neurotrasmisor a su vez, activa los receptores hormonales β-adrenérgicos, que actúan como mediadores sobre la frecuencia cardíaca. De hecho, estos receptores aumentan la permeabilidad del sodio y el calcio, acelerando la excitabilidad del corazón, dando como resultado un aumento paulatino del ritmo cardíaco.

Ahora bien, las fibras vágales del sistema parasimpático se distribuyen principalmente en las aurículas y no tanto en los ventrículos, dicho de otro modo, el corazón está inervado principalmente por los nervios del sistema simpático, procedente de la cadena simpática cervical a la altura de los ganglios cervicales, los cuales son responsables de la contracción potente del corazón. Por el contrario, cuando se estimula el sistema parasimpático, estas fibras pueden detener el latido del corazón durante unos segundos, disminuyendo su fuerza contráctil entre un 20% al 30% (Guyton y Hall, 2016; Motiejunaite et al., 2021).

Esto explica la disminución de la frecuencia cardíaca inhibida por la estimulación vagal, gracias a que el mecanismo usado por los nervios vágales del sistema parasimpático es liberar Acetilcolina, influyendo en dos efectos principales en el corazón. El primero reduce el ritmo

cardíaco de la frecuencia del nódulo sinusal; y segundo, reduce la excitabilidad de las fibras de la unión auriculoventricular entre la musculatura auricular y el nódulo, retrasando la trasmisión del impulso cardíaco hacia los ventrículos. De este modo, una estimulación vagal débil reduce la frecuencia del bombeo del corazón y, por ende, el ritmo cardíaco (Guyton & Hall, 2016).

En otras palabras, en lo que respecta a la recuperación basal de la frecuencia cardiaca, la división parasimpática es la más influyente, dado que, los nervios vagos izquierdo y derecho que descienden a ambos lados del cuello cerca de la arteria carótida, son los principales transmisores de la actividad parasimpática al corazón, es decir, el nervio vago derecho afecta principalmente al nódulo sinoauricular, mientras el izquierdo influye en el disparo del nódulo auriculoventricular, pero no hay ningún efecto nervioso parasimpático directo sobre los ventrículos (Hale, 2003).

Así pues, el vago afecta a la frecuencia cardiaca, pero no a la contractilidad del músculo ventricular; todo resulta entonces, en un impulso nervioso enviado por las fibras nerviosas, haciendo que las vesículas liberen acetilcolina, que inunda el espacio y estimula los receptores de las membranas celulares de los dos ganglios; estos receptores se denominan receptores colinérgicos; el efecto final es una ralentización de la frecuencia cardiaca, ya que cuanto mayor es la estimulación, más lenta es la frecuencia cardiaca (Hale, 2003).

En este sentido, Guyton y Hall (2016) explican que la cantidad de sangre que se bombea cada minuto durante el gasto cardiaco, se puede aumentar a un 100% a partir de la estimulación simpática o durante el ejercicio de alta intensidad, aumentando la frecuencia cardíaca en jóvenes adultos, desde 70 latidos por minuto hasta 180 o 200, incrementando la fuerza de contracción cardíaca hasta el doble de lo normal, lo que a su vez aumenta el volumen de sangre eyectado, en otras palabras, todo depende del volumen de la precarga de sangre que, en atletas aumenta como

consecuencia de la intensidad del ejercicio físico, por ejemplo, los ciclistas de fondo y los triatletas son poseedores de los mayores volúmenes de sangre.

Cabe destacar entonces, que el SNA juega un papel crucial en la respuesta cardiovascular al ejercicio físico, puesto que, el corazón aumenta tres veces su rendimiento, comparado al estado de reposo, incrementando la frecuencia cardíaca y el volumen sistólico. En otras palabras, el grado en que cada una de las variables puede aumentar determina la respuesta cardiovascular y el restablecimiento del barorreflejo arterial durante el ejercicio físico para igualar con precisión el suministro de oxígeno sistémico con la demanda metabólica (Fu & Levine, 2013).

En función de lo plateado, el desequilibrio del sistema nervioso autonómico asociado al aumento de la actividad simpática y la reducción del tono parasimpático, se ha implicado fuertemente en la fisiopatología de la arritmogénesis y la muerte súbita cardiaca, puesto que, el SNA desempeña un papel importante no solo en situaciones fisiológicas, sino también en diversos entornos patológicos como la neuropatía diabética, el infarto de miocardio y la insuficiencia cardíaca congestiva (Sztajzel, 2004). Igualmente, se plantea que los atletas de resistencia con frecuencias cardiacas en reposo muy bajas, de 35 latidos por minuto, presentan tono vagal marcado, en efecto, una estimulación excesiva del parasimpático puede provocar un paro cardiaco y más durante el sueño (Hale, 2003).

1.1.2 Adaptaciones del sistema nervioso autónomo generadas por el ejercicio físico

La actividad física regular o el entrenamiento físico no solo protege contra las enfermedades cardiovasculares, hipertensión, cáncer de colon y de mama, la diabetes tipo II y obesidad (Fu & Levine, 2013; Rhodes et al., 2017). También es eficaz en pacientes con trastornos

del SNA, dado que, existe una evidencia convincente al relacionar los efectos protectores y terapéuticos del entrenamiento físico con los efectos sobre el SNA (Fu & Levine, 2013).

Del mismo modo, el SNA también desempeña un papel importante en las adaptaciones del corazón del deportista. Por ejemplo, el entrenamiento sistemático incrementa el tono vagal en reposo y disminuye el nivel de catecolaminas plasmáticas, lo que lleva a una mayor adaptación del sistema nervioso autónomo hacia el predominio parasimpático con una frecuencia cardiaca más baja (Peidro, 2022).

El entrenamiento físico aeróbico regular puede incrementar la modulación vagal de la frecuencia cardíaca y mejorar el funcionamiento cardiaco en respuesta al entrenamiento aeróbico individual, obteniendo mejoras en los picos de VO2máx (Carter et al., 2003). Como también, se ha demostrado que las sesiones de ejercicio aeróbico aceleran la recuperación, al disminuir el tono del sistema simpático (Bompa & Buzzicheli, 2017).

En este sentido, se ha mencionado ampliamente los distintos matices adaptativos que provoca el ejercicio físico, al producir cambios marcados en la frecuencia cardíaca durante el ejercicio de tipo aeróbico y después de las intervenciones de entrenamiento (Rhodes et al., 2017). Estos cambios en la frecuencia cardíaca se deben en gran parte a modificaciones en la actividad del SNA. Durante el ejercicio agudo, la frecuencia cardíaca se acelera debido a una reducción de la modulación vagal y un aumento de la actividad simpática. Tras el entrenamiento aeróbico crónico, el equilibrio autonómico se inclina hacia el predominio parasimpático debido a un aumento de la modulación vagal y, posiblemente, una disminución de la actividad simpática (Fu & Levine, 2013).

En cuanto al entrenamiento de resistencia aeróbica de intensidad y volumen moderado, que se aplica en personas sanas y en pacientes con enfermedades cardiovasculares hasta la edad de 70 años, según Hottenrott et al. (2006) conduce a una reducción de la frecuencia cardíaca en reposo y la frecuencia cardíaca submáxima durante el ejercicio, es decir aumenta la VFC global. Todos estos cambios son detectables a partir de 12 semanas de entrenamiento regular de resistencia aeróbica de intensidad moderada, reflejando un aumento en la actividad cardíaca eferente autonómica con un aumento neto en la modulación de la frecuencia cardíaca vagal.

Por otra parte, el entrenamiento con ejercicios estáticos, produce respuestas cardiovasculares donde hay una adaptación al tipo de ejercicio o carga, incluyendo disminuciones modestas en la presión arterial en reposo, aumento en la proporción de fibras capilares en el tejido muscular, aumento en la respuesta a la glucosa, mejora en los perfiles de lípidos y la insulina (Carter et al., 2003). Para lograr adaptaciones del SNA a través del entrenamiento, es recomendable realizar ejercicios que varíen en intensidad, con un rango de 150 a 300 minutos semanales distribuidos en 5 días (OMS, 2020).

Asimismo, el ejercicio físico estático, también conduce a una hipertrofia cardiaca concéntrica, especialmente en el ventrículo izquierdo, mientras que el ejercicio dinámico resulta en hipertrofia excéntrica; sin embargo, la magnitud de la hipertrofia cardíaca es menor en atletas que realizan ejercicios estáticos en comparación con los que realizan ejercicios dinámicos (Longhurst & Stebbins, 1992).

Por tanto, las respuestas cardiovasculares y mecanismos de adaptación del SNA frente al ejercicio físico, difieren de acuerdo a la duración, el tipo de ejercicio, la intensidad, a la posición del cuerpo, al número de grupos musculares involucrados y condiciones individuales del sujeto,

aunque se ha demostrado que la intensidad del ejercicio es el factor más influyente en las medidas de VFC, observándose mayores perturbaciones a mayores intensidades (Barreto et al., 2023).

Finalmente, el entrenamiento sistemático produce una serie de respuestas que caracterizan el síndrome del corazón del atleta, siendo más pronunciado en aquellos que practican actividades de alta intensidad que involucran ejercicios aeróbicos, de fuerza y potencia; sin embargo, la distinción entre estas adaptaciones y las señales de una posible cardiopatía no siempre es clara (Peidro, 2022).

1.1.3 Ejercicio físico como estrés y la respuesta del sistema simpático y parasimpático

El ejercicio físico es considerado como un agente estresante que altera el equilibrio corporal, poniendo a prueba el modo de respuesta de distintos sistemas y órganos. Para entender cómo responde el cerebro, se plantea que la amígdala inicia la detección del estrés, esta le ordena al eje hipotálamo-hipófisis-suprarrenal (HPA) que actúe en situaciones de supervivencia. Su trabajo es despertar la glándula pituitaria para liberar las hormonas mensajeras en el sistema de respuesta al estrés, acelerando los latidos del corazón, el flujo sanguíneo y la respiración para absorber más oxígeno y ralentizar la digestión para almacenar grasa y azúcar para obtener energía (Mastorakos et al., 2005).

Por ende, al realizar cualquier modalidad de ejercicio se genera estrés agudo, desencadenando una reacción adaptativa normal de los sistemas simpático y parasimpático frente a la amenaza, no obstante, el estrés crónico puede desencadenar eventos cardíacos o conducir a la muerte súbita (Dalla et al., 2019). Por ejemplo, si una persona está expuesta a estrés crónico constantemente, los sistemas de estrés se sobreactivan y eventualmente pueden colapsar, puesto

que, el estrés prolongado puede influir negativamente en la salud. En otras palabras, es un aumento continuo del sistema simpático y disminución de la actividad del sistema parasimpático (Daniela et al., 2022).

Es por ello que, el SNA juega un papel crucial en la respuesta cardiovascular al ejercicio o estrés agudo (Fu & Levine, 2013). Gracias a que las respuestas dinámicas del sistema simpático y parasimpático se dan en un corazón sano, lo que permite al sistema cardiovascular ajustarse rápidamente a desafíos físicos repentinos para conservar la homeostasis. Por ello, el sistema simpático se encarga de activar el proceso de liberar corticotropinas, como el cortisol, para enviar energía a músculos, aumentar el ritmo cardíaco y la respiración (Mastorakos et al., 2005).

De otro lado, la depresión del sistema parasimpático indica una modulación normal del sistema simpático en respuesta a las demandas sistémicas provocadas por el estrés físico, mientras que, su tasa de recuperación sugiere una ganancia homeostática y preparación sistémica, o una adecuada modulación parasimpática (Mangine et al., 2019).

Ahora bien, se sabe que, el SNA parece jugar un papel importante en la forma en que un organismo reacciona al estrés oxidativo, dado que está relacionado con una disminución del estrés inducido por el esfuerzo físico (Mastorakos et al., 2005). Por tanto, las divisiones del SNA pueden influir en la respuesta del cuerpo al estrés y a la inflamación (McCorry, 2007). Es decir, las actividades del sistema simpático y parasimpático están en equilibrio dinámico, lo que indica un sistema fisiológico sano y flexible (Van Der Kolk, 2020).

Visto de esta forma, las modalidades de entrenamiento practicadas a una alta intensidad, pueden considerarse estresores fisiológicos agudos o crónicos, todo dependerá también del tipo de

ejercicio, la duración y las características individuales de la persona (edad, sexo, estado de enfermedad, historial deportivo, entre otros). El impacto, tanto negativo como positivo del ejercicio físico parece estar relacionado con el estrés oxidativo inducido por el esfuerzo (Bergeron et al., 2011).

En función de lo planteado, Daniela et al. (2022) han demostrado que el sistema parasimpático tiene efectos antiinflamatorios, mientras que el sistema simpático tiene efectos tanto proinflamatorios como antiinflamatorios. Por tanto, si una persona mantiene intensidades y volúmenes demasiados elevados durante la práctica del entrenamiento como sucede en el *Crossfit*®, podría sobreactivar recurrentemente el sistema simpático, lo que podría desencadenar efectos proinflamatorios y de sobreentrenamiento. Estos efectos, podrían ocurrir en personas que inician sus rutinas de entrenamiento, sin tener antecedentes adaptativos y participación previa al ejercicio físico, lo que podría originar una respuesta cardiovascular débil o anormal, especialmente durante el ejercicio de intensidad vigorosa (Fu & Levine, 2013).

1.2 Sistema nervioso autónomo y la variabilidad de la frecuencia cardiaca

La VFC registra la función neurocardiaca y es generada por las interacciones corazón-cerebro, así como los procesos dinámicos del SNA, en otras palabras, la VFC es una propiedad emergente de sistemas reguladores interdependientes que operan en diferentes escalas temporales para adaptarse a los retos ambientales y psicológicos estresantes. Refleja la regulación del equilibrio autónomo, la presión arterial, el intercambio gaseoso, el intestino, el corazón y el tono vascular, que se refiere al diámetro de los vasos sanguíneos que regulan la presión arterial (Shaffer & Ginsberg, 2017).

Además de su aplicación clínica en la estratificación del riesgo de muerte cardíaca súbita y neuropatía autonómica diabética, la VFC, también, está adquiriendo una creciente importancia en la ciencia y la medicina deportiva, pues en estos campos, la VFC se está examinando actualmente como parámetro de diagnóstico de rendimiento, control del estrés y como control de la intensidad de la carga de entrenamiento (Hottenrott et al., 2006; Willians et al., 2017). De ahí que, las medidas estándar en el análisis de VFC son consideradas técnicas no invasivas utilizadas en diversos ámbitos.

La VFC se compone de índices o parámetros de dominio de tiempo y de frecuencia. El análisis del dominio de frecuencia describe las oscilaciones periódicas en la señal de frecuencia cardíaca descompuesta en diferentes frecuencias y amplitudes, y proporciona información sobre la cantidad de su intensidad relativa (denominada varianza o potencia) en el ritmo sinusal del corazón; por otra parte, los dominios de tiempo miden los cambios en la frecuencia cardíaca a lo largo del tiempo o los intervalos entre ciclos cardíacos normales sucesivos. El valor predictivo de la aplicación clínica de la evaluación de la VFC está limitada por la falta de una metodología estandarizada debido a las particularidades que varían según el sexo, la edad, los medicamentos y las enfermedades de cada sujeto (Sztajzel, 2004).

Sin embargo, los dominios de tiempo y frecuencia se emplean como datos clínicos basados en numerosas investigaciones. Esto se debe a que la VFC evalúa la función nerviosa autónoma relacionada con la función cardiovascular en individuos; en consecuencia una VFC más alta se considera indicativa de una buena salud cardiovascular, en cambio, una VFC más baja se ha asociado con el riesgo de enfermedad cardiovascular, en otras palabras, la disminución de la VFC global es un fuerte predictor de una mayor mortalidad cardíaca y arrítmica, especialmente en

pacientes en riesgo tras un infarto de miocardio o con insuficiencia cardíaca (Sztajzel, 2004).

Por otra parte, la VFC, también ha sido utilizada como medidor del estrés agudo de las cargas de entrenamiento, permitiendo monitorear la VFC junto con las cargas de trabajo, proporcionando información valiosa sobre los efectos de las carga de entrenamiento en un atleta, es decir, muestra la posible aparición de una lesión o de lo contrario, si hay adaptación al entrenamiento; juntos pueden usarse para equilibrar de manera óptima los riesgos o beneficios del entrenamiento (Willians et al., 2017).

1.2.1 Parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardíaca

El análisis de la VFC se utiliza ampliamente para caracterizar las funciones del SNA. Los modelos fisiológicos como el desarrollo de nuevas tecnologías, permiten la cuantificación y caracterización clínica de los análisis de dominio del tiempo, que es el número de veces que se repite un proceso periódico por unidad de tiempo y la frecuencia que es el número de elementos comprendidos dentro de un intervalo en una distribución determinada, mediante *Softwares* como el *Kubios* y *SinuCor*. Estos programas presentan correlaciones predictivas en estados de reposo y actividad (Veloza et al., 2019). Similarmente en 1996, la *Task Force* creada por la Sociedad Europea de Cardiología y la Sociedad Norteamericana de Marcapasos y Electrofisiología sugirieron estándares de medición, interpretación fisiológica y uso clínico que se referían a la VFC en el dominio de tiempo y frecuencia (Sassi et al., 2015).

De hecho, los parámetros de VFC en el dominio de tiempo y frecuencia, cuantifican la variabilidad observada durante periodos de monitorización, específicamente la variación en el dominio del tiempo refleja la flexibilidad del SNA para responder a la variabilidad de la presión

arterial con el fin de controlar el gasto cardíaco, además, proporciona una visualización de la actividad neuronal simpática en reposo en el nódulo sinoauricular a través de informes de índices de dominio de frecuencia alta (HF) y baja (LF) (Shaffer & Ginsberg, 2017).

Las dos medidas más comunes en el dominio de tiempo son la desviación estándar de los intervalos (RR), que mide la variabilidad general; y el cuadrado medio de las diferencias sucesivas de los intervalos (*RMSSD*), que cuantifica la variabilidad latido a latido; este último a veces se calcula de forma ligeramente diferente como la desviación estándar de diferencias sucesivas (Michael et al., 2017).

Es por esto que, a medida que aumenta la intensidad del ejercicio, el control cardíaco transita de un predominante control parasimpático a un predominante control simpático. Durante la recuperación, los mecanismos que provocaron la aceleración cardíaca durante el ejercicio se invierten, ya que la regulación de la frecuencia cardíaca regresa gradualmente a un predominante control parasimpático (Michael et al., 2017).

Por esta razón, se puede inferir que la VFC engloba cambios y fluctuaciones en los intervalos de tiempo entre latidos consecutivos adyacentes, denominados intervalos de onda RR (Singh et al., 2018). En este contexto, Sztajzel (2004) explica el uso de los parámetros estadísticos en el dominio de tiempo (ver tabla 1). Por otra parte, el porcentaje PNN50 mide los intervalos RR adyacentes con una diferencia de duración superior a 50 milisegundos. Cabe aclarar que los índices RMSSD y PNN50 predominantemente representan la modulación parasimpática.

Tabla 1

Parámetros estadísticos del dominio de tiempo

Dominio de Tiempo		
Variable	Unidades	Descripción
RMSSD	milisegundo	La raíz cuadrada de la media de la suma de los cuadrados de las diferencias entre intervalos NN adyacentes (actividad parasimpática)
RR	milisegundo	Media de las desviaciones estándar de todos los intervalos RR para todos los segmentos de 5 minutos de toda la grabación (variabilidad total)
pNN50	%	Recuento de NN50 dividido por el número total de todos los intervalos de NN (actividad parasimpática)

Nota. RMSSD = raíz cuadrada media de la unión de los intervalos R-R adyacentes; RR = promedio de la desviación de todos los intervalos RR; pNN50 = recuento de NN50 dividido por el número total de todos los intervalos de NN; % = porcentaje. Adaptada de "Advances in heart rate variability signal analysis: joint position statement by the e-Cardiology ESC Working Group and the European Heart Rhythm Association co-endorsed by the Asia Pacific Heart Rhythm Society," by R. Sassi, S. Cerutti, F. Lombardi, M. Malik, H. Huikuri, C. Peng, G. Schmidt, Y. Yamamoto, 2015, *Journal Europace*, 17, p. 1341-1353 (doi:10.1093/europace/euv015).

Además de los datos proporcionados en la tabla 1, se pueden hallar la modulación simpática, simbolizada por LF o baja frecuencia y la parasimpática. Esta última indica la actividad simpática y parasimpática, aumentando en respuesta al estrés físico o psicológico y volviendo a la línea de base cuando se elimina dicho estrés. Por otro lado, el parámetro de HF corresponde a alta frecuencia, revelando la actividad parasimpática (Sassi et al., 2015).

La relación LF/HF, calculada en reposo, refleja el equilibrio entre el sistema simpático y parasimpático, representando la resistencia del sistema nervioso autónomo ante factores

estresantes (tabla 2). Si esta relación se ve comprometida, puede indicar una enfermedad o una mala adaptación a las cargas de entrenamiento. Si su valor es elevado, este parámetro se convierte en uno de los más relevantes para comprender el balance entre el sistema simpático y el parasimpático (Claiborne et al., 2021).

En el contexto de los dominios de frecuencia, se han asociado rangos óptimos con un menor riesgo cardiovascular. Estos rangos son: 0.01 a 0.04 Hz para la muy baja frecuencia, 0.04 a 0.15 Hz para la baja frecuencia cardiaca y 0.15 a 0.40 Hz para la alta frecuencia (Veloza et al., 2019).

Tabla 2

Dominio de frecuencia en grabaciones a corto plazo de cinco minutos

		Dominio de frecuencia	
Variable	Unidades	Descripción	Característica
LF/HF	ms 2	Potencia en rango (1.5 – 2,0)	Balance entre sistema simpático y parasimpático.
HF	ms 2	Potencia en rango HF ($0.15 \leq f \leq 0.40$ Hz)	Es considerado un indicador de la actividad vagal

Nota. LF/HF = indicador del balance entre el sistema simpático y parasimpático; HF = indicador de la actividad vagal; ms = milisegundos; Hz = hertz. Adaptada de "Advances in heart rate variability signal analysis: joint position statement by the e-Cardiology ESC Working Group and the European Heart Rhythm Association co-endorsed by the Asia Pacific Heart Rhythm Society," by R. Sassi, S. Cerutti, F. Lombardi, M. Malik, H. Huikuri, C. Peng, G. Schmidt, Y. Yamamoto, 2015, *Journal Europace*, 17, p. 1341-1353 (doi:10.1093/europace/euv015).

Desde el punto de vista fisiológico, el interés de los investigadores para el estudio de la VFC ha sido identificar la respuesta del SNA y utilizarlo como control del sobreentrenamiento a través de la recuperación de la frecuencia cardíaca y la bradicardia ocasionada por el

entrenamiento, por lo tanto, para un registro de cinco minutos en posición decúbito supino, los valores de relación en el dominio de frecuencia de LF/HF, indican como se ha mencionado anteriormente, el balance entre la actividad parasimpática y simpática, donde debe apreciarse un rango entre 1.5 y 2.0; los valores sobre este rango indicarán un mayor predominio simpático y valores por debajo reflejarán un mayor predominio parasimpático (Calderón et al., 2020).

1.2.2 Influencia de las variables de la carga sobre los parámetros de dominio de tiempo y frecuencia

Los estímulos del ejercicio físico son unos de los grandes generadores de estrés fisiológico que, dependiendo de las variables con las que se gradúa el ejercicio (intensidad, frecuencia, duración de los estímulos) puede comprometer la homeostasis orgánica. Estos factores, de hecho, tienen el potencial de generar diversos efectos en la actividad autonómica cardíaca y en los parámetros de la VFC. Aunque su interpretación puede ser de gran utilidad en entornos clínicos y de alto rendimiento, es importante resaltar que generalmente se miden durante el descanso. Esto subraya la importancia de considerar cómo la dosis de ejercicio en sí misma puede influir en la respuesta del Sistema Nervioso Parasimpático (SNP) en estado de reposo, más que durante el entrenamiento (Michael et al., 2017).

Resulta evidente que el entrenamiento basado en ejercicios aeróbicos incrementa la VFC en reposo, y que aquellos ejercicios con mayor frecuencia e intensidad tienden a favorecer un retorno más efectivo a la homeostasis en estado de reposo. Este equilibrio, reflejado en una relación LF más baja, ilustra el balance entre el sistema simpático y parasimpático. Importante destacar que incluso individuos sedentarios y de edad avanzada que se someten a entrenamientos físicos

intensos han demostrado mejoras en los dominios de tiempo y frecuencia de la VFC. Dichas mejoras se traducen en una mayor salud cardiovascular y estado físico (Claiborne et al., 2021).

De hecho, Claiborne et al.(2021) hicieron un seguimiento en la respuesta del SNA, donde se evaluó ocho parámetros de VFC en reposo, durante 10 meses a 176 atletas que practicaban distintos tipos de deportes y diferentes modalidades de ejercicio aeróbico, potencia y entrenamiento cruzado; los resultados mostraron una relación LF/HF más baja en reposo debido al fuerte efecto vagal en el corazón; finalmente, se determinó que el tipo de entrenamiento no tuvo efecto sobre los parámetros de VFC medidos, por lo que el entrenamiento de potencia puede obtener beneficios similares en la función neurocardíaca como el entrenamiento aeróbico o mixto, todos los tipos de ejercicio y deporte compartieron medidas de VFC favorables que se correlacionaron con factores de riesgo cardiovascular bajos e indicaron un equilibrio entre los sistema simpático y parasimpático.

En la misma línea, el análisis de la VFC se erige como un indicador útil para medir la intensidad de la carga en diferentes deportes y etapas de programación del ejercicio. Esto permite ajustar las cargas en función de los parámetros de tiempo y frecuencia en respuesta al Sistema Nervioso Autónomo (SNA), evitando así el sobreentrenamiento o adaptaciones inadecuadas (Daniłowicz et al., 2011).

Atletas altamente entrenados, representan ejemplos claros de individuos con una relación LF/HF más baja en reposo debido al fuerte efecto vagal en el corazón. Incluso los sujetos sedentarios y de edad avanzada que participan en entrenamientos físicos intensos experimentan mejoras en la VFC, lo que sugiere una relación continua entre el estado físico y la salud cardiovascular. Si bien los criterios definitivos para una VFC saludable aún no se han establecido,

esta métrica pueda servir como un método no invasivo más preciso que simplemente medir la frecuencia cardíaca en reposo (Claiborne et al., 2021).

En investigaciones realizadas por Sandercock et al. (2005), se encontró que los sujetos más jóvenes experimentaban un aumento mayor en el intervalo RR, acompañado de un incremento más modesto y no significativo en la HF. Esto sugiere que otros factores además del aumento de la actividad parasimpática pueden contribuir a la bradicardia observada. Además, se observó que el aumento del intervalo RR fue más pronunciado en intervenciones de ejercicio aeróbico moderado de más de 12 semanas.

Algo semejante, se demostró en un estudio realizado por Kliszczewicz et al. (2018) donde se mostró la respuesta de la frecuencia cardíaca en 10 hombres sanos, después de realizar un *WOD* denominado Cindy, caracterizada por utilizar las variables de intensidad y volumen incremental durante 20 minutos, reportando incrementos porcentuales en valores entre 76.0% y 96.0% de la frecuencia cardíaca máxima y esta respuesta sería causada principalmente por la abstinencia parasimpática y un aumento en la actividad simpática.

Del mismo modo, descubrieron que la variación en el índice *RMSSD* tiene una mayor correlación con el volumen que con la intensidad, por lo tanto, cuanto menor es esta variación, mayor es la actividad parasimpática y la capacidad de soportar el estrés del ejercicio, un factor que está relacionado con el nivel de acondicionamiento físico, dado que los ejercicios intermitentes, con pausas de descanso incompletas como sucede en el *CrossFit*® y en WOD de corta duración, las modulaciones autonómicas cambian según la intensidad, lo que sugiere que un bajo número de repeticiones a cargas moderadas a intensas serían los principales factores para el estrés cardiovascular (Kliszczewicz et al., 2018).

En estudios realizados por Iwasaki et al. (2003), se observó un aumento mayor en el intervalo RR que en la HF en sujetos jóvenes previamente sedentarios después de un año de entrenamiento. En este caso, parece que la modulación vagal parasimpática puede ser responsable de los aumentos iniciales en el intervalo RR, mientras que, otros factores como los cambios en la geometría del corazón, podrían contribuir a adaptaciones a largo plazo. De manera similar, la presión arterial y el control autónomo también se ven afectados por el entrenamiento. Puesto que, se demostró que los entrenamientos moderados durante tres meses, redujeron la presión arterial, la frecuencia cardíaca y la resistencia periférica total, junto con un aumento en la VFC y la sensibilidad barorrefleja. Sin embargo, entrenamientos más prolongados e intensos no necesariamente llevaron a una mejor VFC total.

Por tal motivo, la VFC ha sido usada en el ámbito deportivo, en este sentido los mecanismos potenciales para esta reducción pueden incluir cambios en la presión arterial y el control autónomo, dado que, el entrenamiento físico moderado durante tres meses disminuyó la presión arterial, la FC, la resistencia periférica total, mayor VFC y sensibilidad barorrefleja arterial, en sentido opuesto, el entrenamiento más prolongado e intenso no aumentó más estos cambios y la mayoría regresaron a los valores de control a los 12 meses a pesar de una duración e intensidad de entrenamiento marcadamente mayores equivalentes a las observadas en las rutinas utilizadas por los atletas competitivos (Iwasaki et al., 2003).

En otras palabras, parece que las dosis de ejercicios a intensidades moderadas de entrenamiento durante tres meses son suficientes para lograr estas respuestas, así como un modesto efecto hipotensor al disminuir la resistencia vascular, aunque, un entrenamiento más prolongado e intenso no conduce necesariamente a una mejora del control de la presión arterial y una mayor

VFC, como se halló en el estudio realizado por Bonaduce at al. (1998), donde se encontraron aumentos en el intervalo RR, la masa ventricular izquierda, las dimensiones y la capacidad aeróbica en atletas de élite, mientras que la VFC permaneció sin cambios; la reducción de la presión arterial parece relacionarse predominantemente con la disminución de la resistencia periférica total a través de mecanismos que incluyen la reducción de la actividad simpática, así como alteraciones en el control vascular.

Por otro lado, los estudios de la VFC en deportistas adultos de elite han demostrado correlaciones entre la masa ventricular izquierda, es decir una mayor hipertrofia del ventrículo y el incremento de los parámetros de variabilidad en los dominios de tiempo y frecuencia, mientras que en deportistas de mayor edad se demostraron incrementos de la variabilidad en los componentes de baja y muy baja frecuencia; no obstante, en futbolistas profesionales, se observó una mayor variabilidad de frecuencia con incrementos en la desviación estándar de los RR y la raíz cuadrada de las diferencias de los intervalos RR con respecto a sujetos sedentarios sanos de la misma edad (Peidro, 2022).

1.2.3 La variabilidad de la frecuencia cardíaca como predictor de enfermedades cardiovasculares

La homeostasis de la función cardiovascular se encuentra mayormente regulada por el sistema nervioso autónomo (SNA), junto con sus ramas simpáticas y parasimpáticas. Esta regulación permite al organismo mantener un equilibrio constante incluso en situaciones de estrés o agresión. Es importante destacar que una menor VFC se relaciona con un mayor riesgo de eventos cardiovasculares y mortalidad. Por lo tanto, la disminución de la VFC podría indicar una

salud cardíaca deficiente. Aunque el grado exacto de esta asociación aún no está completamente claro, estos mecanismos reguladores son los encargados de controlar de manera continua, segundo a segundo, la función y el gasto cardíaco en individuos sanos, incluso durante el reposo. La elevada VFC, por otro lado, ha demostrado ser un predictor de bienestar, especialmente en lo que respecta a la salud del corazón y la longevidad (Malik et al., 1996).

En este contexto, previamente se ha planteado la importancia de investigar la respuesta del sistema nervioso autónomo (SNA) en relación con el sistema cardiovascular a través del análisis de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC). Esto se debe a que las fluctuaciones en los intervalos de tiempo en milisegundos entre las ondas R-R permiten discernir la influencia predominante del sistema simpático o parasimpático. En particular, cuando se identifica una predominancia del sistema parasimpático, se sugiere que existe una conservación óptima de la perfusión en el ventrículo izquierdo, lo cual indica la ausencia de microisquemias. Además, una adecuada distensibilidad aórtica en este contexto se interpreta como una señal de baja resistencia vascular (Veloza et al., 2019).

Del mismo modo, para determinar los valores de riesgo se han sugerido los parámetros en alto, moderado y bajo, como se presenta en la tabla 3; es por ello que, la aplicación clínica de la VFC permite determinar el pronóstico de infarto de miocardio y el riesgo de muerte cardíaca súbita (Johnston et al., 2019).

Tabla 3

Parámetros de riesgo cardiovascular

Parámetro	Alto	Moderado	Bajo
Intervalo RR	< 750 ms	750 - 900 ms	> 900 ms
pNN50	< 3%		> 3 %

Nota. RR = Promedio de la desviación de todos los intervalos RR; pNN50 = recuento de NN50 dividido por el número total de todos los intervalos de NN; Ms = milisegundos. Adapta de "Variabilidad de la frecuencia cardiaca como factor predictor de las enfermedades cardiovasculares," by L.Veloza, C. Jiménez, D. Quiñones, F. Polanía, L. Pachón Valero, C. Rodriguez, C. 2019. *Revista Colombiana de Cardiología*, 26, p. 205-210 (doi: https://doi.org/10.1016/j.rccar.2019.01.006).

Finalmente, las variables específicas derivadas de la VFC ayudan a evaluar la respuesta del SNA, frente a la calidad y el desarrollo de diferentes modalidades de ejercicio entre la población en general, usualmente la VFC puede mejorar después del entrenamiento físico, incluidas sus variables o parámetros como lo son el dominio de tiempo y frecuencia (Songsorn et al., 2022).

1.3 Monitorización de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en el *Crossfit*®

El SNA juega un papel dinámico en la regulación del dolor, la inflamación y la reparación de tejido, por lo tanto, han postulado que monitorear la VFC, puede ser usada como una medida indirecta de la homeostasis del SNA y este tiene el potencial de indicar signos tempranos de sobrecarga del tejido somático antes del inicio del dolor o lesión completamente desarrollada (Esco & Flatt, 2014). De ahí que, la VFC sea una herramienta popular para monitorear la adaptación al entrenamiento y la preparación en los atletas de *Crossfit*®, puesto que los índices derivados de VFC reflejan la actividad parasimpática y simpática (Willians et al., 2017).

Usualmente, las sesiones de ejercicio se dividen en bloques y pueden durar desde dos minutos hasta más de 30 minutos en la realización de un solo *WOD*; en consecuencia, se desconoce cómo estas variaciones influyen en el estrés cardiovascular y pueden generar preocupación por posibles riesgos para la salud, como períodos prolongados de desequilibrio del SNA, que se ha relacionado con mayores probabilidades de eventos cardíacos agudos (Kliszczewicz et al., 2018).

Debido a los múltiples componentes, esquemas de repetición y duraciones que componen el entrenamiento de *Crossfit*®, el diseño de una sesión puede variar desde ejercicios de peso corporal realizados en un circuito cronometrado hasta esquemas más complicados que involucran levantamientos olímpicos con cargadas y arranques, para un número determinado de repeticiones, lo que hace que la prescripción sea ilimitada (Crossfit Training, 2021).

También, se ha reportado que los componentes de este sistema de entrenamiento, exponen al atleta a un alto estrés osteomuscular, fatiga y síndrome de sobreentrenamiento, lo cual se refleja en lesiones musculares y osteoarticulares (Figueiredo et al., 2018; Williams et al., 2017). Igualmente, Barroco-Ruiz et al. (2020) evidenciaron, que las zonas de mayor riesgo de lesión son las rodillas, los hombros y espalda; todo esto, debido a la intensidad vigorosa que se maneja en cada *WOD* (Shaw et al., 2015).

En efecto, un estudio que comparó el entrenamiento de *CrossFit*® con un enfoque de entrenamiento basado en las recomendaciones del Colegio Americano de Medicina del Deporte (ACSM) informó que el entrenamiento de *CrossFit*® era más extenuante y que los participantes lo consideraban una actividad muy difícil; también informaron mayor fatiga, mayor dolor e hinchazón muscular y dificultades de movimiento de las extremidades durante o dentro de las 48 horas posteriores al entrenamiento; también se tomaron muestras de lactato, donde las

concentraciones alcanzaron los 14 mmol/L luego de la ejecución de un *WOD* denominado Cindy, la frecuencia cardiaca máxima fue del 98%, igualmente, se presentó una respuesta aguda al estrés oxidativo en sangre similar a una sesión tradicional de carrera en cinta rodante de alta intensidad (Claudino et al., 2018). Una de las formas de medir la respuesta del SNA de manera ambulatoria es mediante la VFC, que es un indicador medible del equilibrio entre el tono simpático y parasimpático (Claiborne et al., 2021).

En este orden de ideas, la VFC se utiliza como un marcador del estado cardíaco y como predictor de eventos cardiovasculares (Singh et al., 2018). Además, las variables específicas derivadas de la VFC ayudan a evaluar la respuesta del SNA en relación con la calidad y el desarrollo de diferentes modalidades de ejercicio (Songsorn et al., 2022). También se ha recomendado el estudio de la VFC para detectar sobreentrenamiento, optimizar el rendimiento (Williams et al., 2017) y predecir enfermedades cardiovasculares (Veloza et al., 2019).

Asimismo, los antecedentes evidencian respuestas agudas que muestran beneficios a nivel metabólico, muscular, emocional, cognitivo y cardiovascular. Sin embargo, cada vez hay más pruebas que indican que los volúmenes y la intensidad extremos del ejercicio, pueden aumentar el riesgo de eventos cardíacos (Peidro, 2022).

1.3.1 Características del Crossfit® y la carga de entrenamiento usadas en los WOD

La organización *Crossfit Training* (2021), es una entidad que surgió en 1996, logrando consolidarse en el 2001, siendo su gestor Greg Glassman. La metodología y aplicación del *Crossfit®*, lo hace una modalidad de entrenamiento con movimientos de mediana y alta complejidad y esfuerzos de tipo funcional. Al respecto, Baz Madrazo (2016) expone que, se ha

convertido similarmente al deporte practicado a un alto rendimiento, y que este, en los últimos años ha tenido un evolución exponencial y es registrado como uno de los modos de entrenamiento funcional de alta intensidad de más rápido crecimiento; cifras que han sido registradas en la página oficial de la *CrossFit*®, con una afiliación de más de 10.000 atletas en 142 países de siete continentes.

Asimismo, la Crossfit Training (2021) propone una forma de trabajo denominada *WOD* en sus siglas, significa *Work Of Day*, este modelo de entrenamiento se caracteriza por tener circuitos que combina diferentes ejercicios de varios deportes o de un deporte en específico, involucrando entrenamiento de resistencia anaeróbica o aeróbica, levantamiento olímpico y gimnasia, requiriendo principalmente de la vía metabólica glucolítica (Escobar et al., 2017).

El *CrossFit*® se basa en un modelo de entrenamiento con exigencias mixtas, es decir, requiere de distintas capacidades condicionales como fuerza, resistencia, movilidad y velocidad, de las distintas vías metabólicas y de la aplicación de potencia anaeróbica y aeróbica de acuerdo a sus características; también exige un alto consumo de oxígeno y capacidad cardiorrespiratoria (Escobar et al., 2017).

Estos mismos autores, evidenciaron que el *CrossFit*® es un método de acondicionamiento metabólicamente exigente que depende en gran medida de la producción de energía tanto aeróbica como anaeróbica, donde el índice respiratorio y el lactato sanguíneo, estuvo por encima de las concentraciones preliminares al ejercicio (Escobar et al., 2017).

La estrategia de entrenamiento de *Crossfit*® tiene como objetivo evitar formar una estructura lineal en su programación diaria, semanal y mensual, en cambio, intenta variar

constantemente el estímulo para promover mejoras simultáneas y generalizadas en la forma física, puesto que, los eventos de competencia *Crossfit*® reflejan este esfuerzo mediante la programación variable de entrenamientos para desafiar la aptitud física en cualquier combinación de fuerza, resistencia, potencia y habilidad a través de múltiples modalidades, de ahí que, los contenidos y organización de las cargas no tengan una interconexión, obviando la periodización del entrenamiento que propenda por adaptaciones progresivas (Mangine & Seay, 2022).

En efecto, la intensidad que se trabaja en los *WOD* se correlaciona con la potencia y, la intensidad es la variable más comúnmente asociada con la maximización de la adaptación favorable al ejercicio, por ende, la Crossfit Training (2021) propone la prescripción de sesiones en función de la variación constante de la intensidad, es decir, el objetivo siempre será superar tiempos, marcas, pesos, repeticiones; todos clasificados por el *WOD*, siendo los ejercicios o tareas que se deben realizar en la sesión de entrenamiento.

Es por ello, que normalmente la dosificación de un entrenamiento de *CrossFit*®, pueden recibir una prescripción específica o indefinida, es decir, se pueden asignar cargas absolutas, relativas o de repetición máxima (RM); por ejemplo, basadas en porcentaje para un número específico o indefinido de repeticiones o duraciones, series o rondas, y la prescripción puede variar dentro y entre cada ejercicio, siendo cada atleta el encargado de percibir la intensidad de su propio esfuerzo, o percepción del mismo; a excepción de la competencia, los atletas siempre y cuando tienen la opción de escalar la prescripción para que coincida con sus capacidades, fuerza y condición física (Mangine & Seay, 2022).

Aunque, Bergeron et al. (2011) comprobaron que, pueden existir unos efectos colaterales o secundarios en relación a la práctica del mismo, puesto que, algunos programas son demasiado

exigentes y requieren un alto rendimiento físico para participar en algunas competencias locales o nacionales, donde se necesita niveles avanzados durante las repeticiones máximas de ejercicio cronometrado, especialmente para las personas que no tienen experiencia previa, ni un historial deportivo; generando posibles afecciones musculares, lesiones, lumbalgias y otras complicaciones.

Por ende, durante la ejecución de un *WOD*, se resta importancia a lograr objetivos de entrenamiento específicos a favor de promover adaptaciones generalizadas en todos los dominios del fitness; siendo imprescindibles en competencias, donde la aptitud física requiere una amplia gama de atributos fisiológicos para un mayor rendimiento, sin embargo el número de objetivos de entrenamiento presenta una trampa potencial para los participantes, porque varias combinaciones de objetivos requieren una secuencia adecuada para un entrenamiento efectivo y seguro (Mangine & Seay, 2022).

Esto también incluye la escala de intervalos de descanso entre ejercicios, series y rondas; el descanso en un entrenamiento de *Crossfit*® rara vez se define y, en cambio, el atleta lo autorregula, es decir, descansa según sea necesario (Mangine & Seay, 2022). De ahí, que la sobrecarga puede provocar fatiga temprana, estrés oxidativo adicional, menor resistencia a la tensión del ejercicio repetitivo posterior, mayor percepción del esfuerzo y ejecución de movimientos inseguros, dado que, los atletas reciben instrucciones complementarias que definen la puntuación y el rendimiento, y generalmente promueven un esfuerzo de alta intensidad al maximizar la densidad (Mangine & Seay, 2022).

Debido a esto, actualmente en el *Crossfit*® no hay estandarización en los contenidos y las cargas que se deben desarrollar en una sesión de un entrenamiento y en una competencia, lo que causa novedad y retos para las personas que lo practican, aunque, la gran variedad de actividades

y estímulos, y a la poca experiencia de los practicantes, se puede apreciar malas ejecuciones técnicas, lesiones, deserciones y afectaciones en la salud como lo expresa Baz Madrazo (2016), al argumentar que las variables de las cargas mal interconectadas, no generan una adecuada base en el *Crossfit*® haciendo que su actividad se vuelva de riesgo y no beneficiosa para la salud.

Asimismo, es necesario profundizar y comprender los efectos de esta modalidad de ejercicio durante prácticas extenuantes de alta intensidad y volumen, dado que, pruebas significativas respaldan la importancia de conocer la respuesta del SNA en relación con la salud cardiovascular, pronóstico e interpretación fisiológica (Freeman et al., 2006; Ortiz Cárdenas & Riveros Medina, 2015). Asimismo, en ocasiones no se cumplen los principios de supercompensación y organización de las cargas de entrenamiento (Ortiz Cárdenas & Riveros Medina, 2015). De ahí que, sea importante conocer la respuesta fisiológica del SNA y los posibles riesgos para la salud asociados a la práctica del *Crossfit*®.

2 Metodología

2.1 Enfoque

La presente investigación presentó un enfoque cuantitativo, teniendo en cuenta que los resultados brindaron datos numéricos que fueron procesados estadísticamente para analizar las variables de la investigación (Hernández Sampieri, 2018).

2.2 Diseño

Esta investigación tuvo un diseño no experimental, dado que no se manipuló ninguna variable, asimismo, presentó una fase correlacional con valoraciones de los parámetros de la VFC y las variables fisiológicas de frecuencia cardíaca basal, presión arterial y las variables de la magnitud de la carga, volumen, intensidad y frecuencia de entrenamiento.

2.3 Alcance y el corte

El alcance de este estudio fue de tipo descriptivo con corte longitudinal, puesto que, identificó la respuesta del SNA a partir de los parámetros de la VFC de dominio de tiempo y frecuencia (tabla 4) en un período de 12 semanas de entrenamiento con tres registros mensuales.

2.4 Instrumentos y materiales de evaluación

La VFC fue valorada, mediante la banda censora Polar H10®, que permite registrar la actividad eléctrica del corazón en la aplicación Elite HRV®. Los datos fueron procesados en el software *Kubios* versión 3.5 (Singh et al., 2018; Esco & Flatt, 2014). Para valorar diferentes variables que cuantifican la carga de entrenamiento aplicada, se utilizó un cuestionario y una

encuesta, donde se registró el volumen de entrenamiento diario en horas, frecuencia de entrenamiento semanal y para la percepción subjetiva de la intensidad, se utilizó la escala subjetiva de Borg (1998). La talla y el peso se valoró por medio de báscula con tallímetro marca *Health O´meter*®, modelo 402 kl y la presión arterial con fonendoscopio marca *Littman*® y tensiómetro marca *Riester*®.

Tabla 4

Identificación y caracterización de las variables para la medida de la VFC, referidas a los dominios de tiempo y de frecuencia.

Variables	Unidades	Descripción	Utilidad
RMSSD	Ms	Es la raíz cuadrada media de la unión de los intervalos R-R adyacentes.	Indicador cardíaco vagal (Actividad parasimpática)
pNN50	%	Calcula diferencias entre los eventos sucesivos de los intervalos RR	Actividad parasimpática y la salud cardiovascular
HF		Está sobre un rango de 0.2 a 0.5 Hz dependiendo de la frecuencia respiratoria	Indicador de la actividad vagal (parasimpática)

Nota. RMSSD = raíz cuadrada media de la unión de los intervalos R-R adyacentes; RR = promedio de la desviación de todos los intervalos RR; pNN50 = recuento de NN50 dividido por el número total de todos los intervalos de NN; HF = indicador de la actividad vagal; Adaptada de “Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use.” by (Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, 1996). *Journal Circulation* 93, p. 1043-1065 (doi: http://dx.doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868).

2.5 Población y muestra

Se encuestó inicialmente atletas practicantes de *Crossfit*® (N = 104), con experiencia en participación en competencias a nivel local y regional (ver apéndice A). Los participantes fueron seleccionados mediante contacto personal y a través de visitas a los establecimientos de acondicionamiento físico. Posteriormente, se seleccionó una muestra a conveniencia de 38 hombres mestizos entre 18 y 25 años, que cumplieron con los criterios de inclusión, aunque solo 27 hombres, accedieron a participar en el estudio. Finalmente, los atletas firmaron los formatos de asentimiento y consentimiento informado, conforme a las directrices éticas establecidas por la Resolución de Helsinki (Asociación Médica Mundial, 2013) y lo dispuesto en la Resolución 8430 de octubre 4 de 1993, presentando un riesgo mínimo. De igual forma, todos los procedimientos fueron aprobados por el Comité de Ética de la Unidad Central del Valle del Cauca.

2.6 Criterios de inclusión

- Hombres con edades entre 18 y 25 años.
- Hombres que presentaran un historial deportivo en *Crossfit* de al menos 1 año.
- Atletas que hayan superado la evaluación médica por parte del médico general.
- Haber firmado consentimiento informado (Apéndice C).
- Los atletas que hayan cumplido con las tres mediciones de la VFC.

2.7 Criterios de exclusión:

- Atletas que presentaban limitaciones cardiopulmonares, hipertensión arterial, diabetes mellitus y/o insuficiencia renal crónica u otras afecciones neurológicas.

- Atletas que no hayan cumplido con las recomendaciones previas a la evaluación de la VFC, entre ellas, haber realizado actividad física extenuante 12 horas antes de la valoración, no haber dormido entre 7 y 9 horas y haber padecido una calamidad doméstica.
- Atletas que tengan anomalías cardiacas como valvulopatías, hipertrofia ventricular izquierda, *Shunts* cardiacos, síndrome de preexcitación y bloqueo cardiaco.
- Atletas que consumieran anabolizantes, aceleradores de oxidación de grasas y fumaran.

2.8 Protocolos de evaluación

2.8.1 Protocolo de evaluación de las magnitudes de la carga del WOD

El atleta respondió a un cuestionario de 10 preguntas relacionadas con el volumen de entrenamiento diarios, la frecuencia de entrenamiento semanal y cómo percibía la intensidad de sus entrenamientos, de este modo se caracterizó la magnitud de la carga. Cabe aclarar que cada atleta tuvo una percepción de la intensidad del entrenamiento de acuerdo a la escala subjetiva de Borg.

2.8.2 Cuestionario de condiciones previas a la valoración de la variabilidad de la frecuencia cardiaca

Inicialmente, se aplicó un cuestionario de 10 preguntas, que consistían en identificar las condiciones físicas y emocionales previas a la valoración de la VFC, tales como la cantidad de horas de sueño, el tipo de alimentación, y el estado emocional y confirmar, si no habían realizado

algún entrenamiento extenuante 12 horas antes de la valoración (ver apéndice B). Seguidamente, el atleta se ubicó en sedestación y un profesional de la salud, valoró la presión arterial con fonendoscopio marca *Littman*® y tensiómetro marca *Riester*®.

2.8.3 Evaluación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca

Para la evaluación de la VFC, los participantes cumplieron con los siguientes criterios: dormir la noche anterior entre 7 y 9 horas aproximadamente, no haber padecido una calamidad doméstica o alteraciones emocionales fuertes, la no realización de una actividad física extenuante de al menos 12 horas antes de la evaluación y haber tenido una alimentación sin consumo excesivo de grasas y azúcares, todo esto, se verificó a través de encuesta previa a cada valoración. En total, se realizaron tres registros durante el seguimiento, los cuales se llevaron a cabo en el mes de enero, febrero y marzo del año 2023, esto con el fin de medir la respuesta del SNA a los estímulos acumulativos producidos por las cargas del entrenamiento del *WOD*.

El protocolo de valoración de la VFC, se realizó en horas de la mañana donde todos los participantes estuvieron en una habitación insonorizada (Johnston et al., 2019). Consecutivamente, un profesional de la salud solicitó al atleta posicionarse en decúbito supino durante cinco minutos y valoró la frecuencia cardiaca en reposo. Seguidamente, se ubicó la banda polar H10® alrededor del tórax y se adicionó un tiempo aproximado de 10 minutos en la misma posición, con una respiración lenta y controlada para estabilizar la FC, pasado este período, se inició la medición de la VFC (Shaffer & Ginsberg, 2017), se registraron simultáneamente los parámetros de la VFC en la aplicación *Elite HRV*® durante 5 minutos, exportando finalmente los datos, al *software Kubios*® *Scientific* versión 3.5, con el fin de eliminar estímulos ambientales de artefactos o sonidos y

procesarlos para su respectivo análisis (Esco & Flatt, 2014; Singh et al., 2018).

2.9 Procesos estadísticos

Una vez recabados los datos, éstos fueron sistematizados en el paquete estadístico SPSS versión 28 (Licencia de la Unidad Central del Valle del Cauca). A continuación, se calcularon medidas de tendencia central y de variabilidad o dispersión para variables cuantitativas incluidas en el estudio, permitiendo así realizar el análisis descriptivo.

Seguido, se comprobó la normalidad por medio de la prueba de Shapiro-Wilk ($p > .05$) y las variables que no cumplieron con dicho supuesto se sometieron a las pruebas de hipótesis no paramétricas de Friedman ($p < .05$) con la cual, se determinó la existencia de diferencias estadísticamente significativas y posteriormente la prueba de Wilcoxon ($p < .05$) como prueba *post hoc* para determinar entre qué medidas existieron diferencias.

En cuanto a las variables que cumplieron con el supuesto de normalidad, se sometieron a la prueba de ANOVA de medidas repetidas. En primera instancia se les evaluó la esfericidad por medio de la prueba de *W* de Mauchly ($p > .05$), y las mismas que satisficieron la hipótesis fueron evaluadas por medio la prueba con esfericidad asumida, por el contrario, las variables que no presentaron esfericidad se evaluaron con las pruebas de corrección de Greenhouse-Geisser ($p < .75$) y Huynh-Feldt ($p > .75$), seguido se verificaron los estadísticos de la prueba *post hoc*. Por último, para evaluar la correlación se empleó las pruebas estadísticas de Pearson ($p < .05$), para las variables que cumplieron con el supuesto de normalidad.

3 Resultados

Tabla 5

Características antropométricas y edad de la población

	Edad en años	Peso en kg	Talla en m
n	27	27	27
$\bar{x}$	22.44	76.96	1.7296
M_e	23.00	76.00	1.7300
DE	2.154	8.355	.05331
Mín.	18	67	1.63
Máx.	25	111	1.87

Nota. N 104 *(n =27),* $\bar{x}$ = media; DE = desviación estándar; Me = dispersión; Mín. = mínimo; Máx. = máximo.

Tabla 6

Medidas de tendencia central y dispersión de las variables de frecuencia de entrenamiento semanal y volumen de horas diarias

Variables de la carga	$\bar{x}$ (DE)	M_e	Mín	Máx.
Frecuencia	5.89 ± .751	6	4	7
Volumen	2.48 ± .643	2	2	4

Nota. Se observa que el volumen máximo de entrenamiento alcanzó las 4 horas diarias. Respecto a la frecuencia de entrenamiento, se acercó al máximo de siete días a la semana. $\bar{x}$ = media; DE = desviación estándar; Me = dispersión; Mín. = mínimo; Máx. = máximo.

Tabla 7

Medidas porcentuales de la variable de intensidad del entrenamiento

Intensidad	Frecuencia	%
Moderada	6	22.2
Vigorosa	21	77.8
Total	27	100

Nota. Se observa que el 77% de los sujetos percibían el esfuerzo del entrenamiento como vigoroso y solo el 22% lo percibía moderado, en ningún caso se observó una percepción del esfuerzo leve.

Tabla 8

Medidas de tendencia central y dispersión de las variables FCR, PAS, PAD

	x̄ (DE)			Me			Min.			Máx.		
	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
FCR l.p.m	56.93 ± 6	57.67 ± 5.7	56.81 ± 4.6	58	58	58	43	42	44	68	68	64
PAS mmHg	116 ± 7.3	113.4 ± 4.9	115.9 ± 4.9	116	112	115	100	102	107	134	125	127
PAD mmHg	70.37 ± 7.9	72.04 ± 7.5	74.7 ± 7.4	70	72	74	53	60	60	89	89	89

Nota. Se observa que las variables fisiológicas evidenciadas en la tabla, se encontraban dentro de los rangos normales. FCR = frecuencia cardiaca en reposo; PAS = presión arterial sistólica; PAD= presión arterial diastólica; l.p.m = latidos por minuto; mmHg = milímetro de mercurio; x̄ = media; DE = desviación estándar; 1ª = primera medida; 2ª = segunda medida; 3ª = tercera medida; Me = mediana; Mín. = mínimo; Máx. = máximo.

Tabla 9

Medidas de tendencia central, dispersión y significancia de los parámetros RMSSD, HLF/HF

Parámetros de la VFC	x̄ (DE)			*P*	M_e			Min.			Máx		
	1ª	2ª	3ª		1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
RMSSD	75.3 ± 31	84.7 ± 24	88.8 ± 25	.010*	66	83	98	23	41	47	147	134	130
HF	.15 ± .07	.15 ± .07	.15 ± .07	.524	.16	.16	.16	.01	.01	.01	.36	.36	.36
LF/HF	2.18 ± .67	3.3 ± .73	4.5 ± .99	.000*	1.99	3.2	4.6	1.1	2.0	3.0	4.6	4.8	6.1

Nota. Se hallaron diferencias estadísticamente significativas al comparar los tres registros del dominio de tiempo RMSSD, considerado un índice que aumentó la actividad vagal en reposo. Así como el dominio de frecuencia LF/HF, presentando un desequilibrio en la activación del sistema simpático en el último registro. RMSSD = raíz cuadrada media de la unión de los intervalos R-R adyacentes; HF = indicador de la actividad vagal; LF/HF = indicador del balance entre el sistema simpático y parasimpático; $\bar{x}$= media; DE = desviación estándar 1ª = primera medida; 2ª= segunda medida; 3ª= tercera medida; Me = mediana; Mín. = mínimo; Máx. = máximo.

*$p < .05$.

Tabla 10

Determinación de las diferencias entre las tres medidas de RMSSD y LF/HF

Parámetros de la VFC	1ª -2ª	1ª -3ª	2ª -3ª
RMSSD	.013*	.006*	.330
LF/HF	.000*	.000*	.000*

Nota. RMSSD = raíz cuadrada media de la unión de los intervalos R-R adyacentes; LF/HF = indicador del balance entre el sistema simpático y parasimpático; 1ª = primera medida; 2ª= segunda medida; 3ª= tercera medida.

*$p < .05$.

Tabla 11

Valores porcentuales del parámetro LF/HF

LF/HF	1ª		2ª		3ª	
	Frecuencia	%	Frecuencia	%	Frecuencia	%
Balance	12	44.4	1	3.7	0	0.0
Activación Parasimpática	2	7.4	0	0.0	0	0.0
Activación Simpática	13	48.1	26	96.3	27	100

Nota. LF/HF = indicador del balance entre el sistema simpático y parasimpático; 1ª = primera medida; 2ª= segunda medida; 3ª= tercera medida; % = porcentaje.

Tabla 12

Modelo lineal general de medidas repetidas de los parámetros RR y pNN%

	x̄ (DE)			*P*	η²	pt	Me			Mín			Máx		
	1ª	2ª	3ª				1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
RR	1060 ± 139	1036 ± 65	1057 ± 94	.505	.024	.150	1036	1032	1087	848	881	881	1488	1177	1245
pNN	49.9 ± 17	55.4 ± 14	57.1 ± 12	.010*	.198	.755	52.8	56.7	58	15	30	30	76.5	76.8	76.5

Nota. El η² explica que el 19% se debe a la práctica del *Crossfit*® en el parámetro pNN (actividad parasimpática), asumiendo un bajo riesgo cardiovascular. Para las medidas de tendencia central en el parámetro RR, fueron superiores a 900 ms en las tres medidas, lo cual indicaría un posible bajo riesgo cardiovascular. η² = eta parcial al cuadrado; pt = Potencia observada. RR = media de las desviaciones estándar de todos los intervalos RR para todos los segmentos de 5 minutos de toda la grabación (variabilidad de la frecuencia total); pNN50% = recuento de NN50 dividido por el número total de todos los intervalos de NN; x̄ = media; DE = desviación estándar; Me = dispersión; Mín. = mínimo; Máx. = máximo.

*$p < .05$.

Tabla 13

Modelo lineal general de medidas repetidas en las tres medidas del parámetro pNN%

(I) Entrenamiento	(J) Entrenamiento	(I-J) Diferencias de medias	Error estándar	*p*
1ª	2ª	-5.503	2.677	.150
	3ª	-7.252	2.110	.006*
2ª	1ª	5.503	2.677	.150
	3ª	-1.749	1.317	.587
3ª	1ª	7.252	2.110	.006*
	2ª	1.749	1.317	.587

Nota. Se observó cambios estadísticamente significativos entre la primera y tercera medida, lo que implica un aumento progresivo en el parámetro pNN%, considerado como un indicador de la actividad parasimpática, paralelo a un bajo riesgo cardiovascular. 1ª = primera medida; 2ª= segunda medida; 3ª= tercera medida.

*$p < .05$.

Tabla 14

Correlaciones de variables paramétricas

Variables	*P*	Coef (r)
Segunda medida del promedio RR- PAD	.000*	-.652
Primera medida de FCR- segunda medida del promedio RR	.047*	-.386
Frecuencia de entrenamiento – segunda medida del promedio RR	.007*	.507
Frecuencia de entrenamiento – tercera medida del promedio RR	.006*	.516
Primera medida de la FCR- Primera medida del promedio RR	.001*	-.612

Nota. RR = media de las desviaciones estándar de todos los intervalos RR para todos los segmentos de 5 minutos de toda la grabación (variabilidad de la frecuencia total); PAD = presión arterial diastólica; FCR = frecuencia cardíaca en reposo; *r* = fuerza de asociación.

*$p < .05$.

4 Análisis y discusión

Este estudio identificó la respuesta del Sistema Nervioso Autónomo (SNA) a partir de los parámetros de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC) en 27 atletas competidores de *Crossfit*®. Los resultados mostraron cambios estadísticamente significativos ($p < .05$) en los dominios de tiempo RMSSD y dominios de frecuencia LF/HF cuando se compararon entre sí los tres registros, aunque no se presentaron cambios estadísticos en la variable HF. Probablemente, porque el índice HF es más utilizado durante el ejercicio y no en reposo (Michael et al., 2017) y la intensidad vigorosa del ejercicio se asocia con una recuperación más lenta de este parámetro (Stanley et al., 2013).

Por otra parte, se observaron cambios estadísticamente significativos ($p < .05$) en la variable PNN% y un coeficiente de determinación (η^2) de .198, lo que indica que el entrenamiento influyó en un 19% en este cambio. Igualmente, los índices RMSSD, LF/HF y PNN% fueron favorables en las tres medidas obtenidas en reposo; estos cambios parecen seguir el curso temporal a la restauración de la homeostasis (Stanley et al., 2013). En efecto, los parámetros de la VFC se miden durante el descanso, lo que lo convierte en un enfoque de monitoreo valioso en entornos clínicos y en los procesos de recuperación post-entrenamiento (Michael et al., 2017).

Además, los resultados estuvieron alineados con la revisión propuesta por Veloza et al. (2019), situando al *Crossfit*® como una modalidad de ejercicios con bajo riesgo cardiovascular. Esto se traduce como ausencia de microisquemias, una distensibilidad aórtica apropiada y una baja resistencia vascular. Así como una modulación adecuada del SNA frente al entrenamiento de *Crossfit*® (Willians et al., 2017). Los participantes también mostraron una respuesta óptima en el

promedio RR en los tres registros, lo que respalda en cierto modo la hipótesis de Songsorn et al. (2022) afirmando que, el entrenamiento mejora la VFC global; como consecuencia, al observar un aumento de la VFC total, se puede analizar la salud cardiaca y el bienestar (Iwasaki et al., 2003; Sandercock et al., 2005). Del mismo modo, el régimen de entrenamiento dosificado en el *WOD* tiene efectos similares al entrenamiento aeróbico, *HIIT* y mixto sobre la función cardíaca y la VFC (Claiborne et al., 2021; Ramírez-Vélez et al., 2020).

Al analizar los tres promedios alcanzados en el parámetro RMSSD, se observó un aumento paulatino en milisegundos en cada valoración y cambios estadísticamente significativos como se presentó en el estudio de Daniłowicz et al. (2011); esto demuestra una respuesta fisiológica favorable en los procesos de adaptación observados en el grupo estudiado, como respuesta al estrés agudo producido por el ejercicio (Daniela et al., 2022), coincidiendo paralelamente con Figueiredo et al. (2018), donde se presentaron cambios estadísticamente significativos representados en mayores efectos parasimpáticos y reduciendo al mismo tiempo la actividad simpática (Barreto et al., 2023; Wilmore & Costill 2016). Sin embargo, después de realizar un *WOD* corto de intensidad vigorosa, como se mostró en el estudio de Kliszczewicz et al. (2018), se evidenció una depresión del parámetro RMSSD (p = .05) posterior al ejercicio. No obstante, al interpretar estos índices es importante considerar cómo la dosis del ejercicio en sí misma puede influir en la respuesta del SNA en reposo (Michael et al., 2017).

Por otra parte, los hallazgos obtenidos mediante el cuestionario inicial mostraron una frecuencia de entrenamiento semanal de 5.89 ± 0.751 días a la semana y un volumen de entrenamiento diario de 2.48 ± 0.643 horas. Asimismo, en la variable intensidad, se evidenció que el 77.8% de los atletas entrenaban con una intensidad vigorosa y un 27% con intensidad moderada.

Esto excedía la dosis de ejercicio recomendada por la OMS (2020). Además, se encontró que el volumen total de horas semanales de entrenamiento tiene un promedio de 15 horas, lo cual, según Peidro (2022) es un punto de preocupación ya que, podría generar una mayor carga hemodinámica a nivel cardiovascular.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los cuestionarios, los atletas percibieron, mediante la escala subjetiva de Borg, la intensidad vigorosa de sus entrenamientos. Esto concuerda con el reporte realizado por Claudino et al. (2018), dado que la práctica de algunos *WOD* produce cambios bruscos en las respuestas autonómicas (Jacob et al., 2020). Esto expone al atleta a un alto estrés osteomuscular, fatiga y síndrome de sobreentrenamiento, lo que podría originar lesiones debido al entrenamiento extenuante (Figueiredo et al., 2018; Williams et al., 2017).

En consonancia con el ACSM, donde se advierte que el entrenamiento de *CrossFit*® se considera una actividad muy demandante, los participantes presentaban mayor fatiga y tumefacción muscular (Claudino et al., 2018). Esto facilita un mayor riesgo de lesiones en las zonas de las rodillas, hombros y espalda (Barroco-Ruiz et al., 2020). Esto puede relacionarse, según Mangine y Seay (2022), con que durante las sesiones de *CrossFit*® se promueve un esfuerzo de alta intensidad constante. Con ello, la programación resta importancia al enfoque en objetivos de entrenamiento específicos a favor de promover adaptaciones, convirtiéndose en una trampa potencial para los participantes. Esto se debe a que varias combinaciones de objetivos requieren una secuencia adecuada de las cargas para un entrenamiento efectivo y seguro (Baz Madrazo, 2016).

Los registros obtenidos en las tres medidas de la frecuencia cardíaca en reposo arrojaron 56.93 ± 6 FCR, 57.67 ± 5.7 FCR y 56.81 ± 4.6 FCR, respectivamente. Esto muestra una

recuperación cardiovascular adecuada, asociada a una mayor reactivación parasimpática después de una sesión de entrenamiento, por lo cual, el aumento de la VFC está fuertemente asociado con una disminución de la frecuencia cardíaca en reposo, lo que se relaciona con un menor riesgo cardiovascular (Shaffer & Ginsberg, 2017); no obstante, pueden existir condiciones patológicas subyacentes que también pueden producir una alta VFC (Stanley et al., 2013).

Sin embargo, la Presión Arterial Sistólica (PAS) de 116 ± 7.3 mmHg, 113.4 ± 4.9 mmHg y 115.9 ± 4.9 mmHg no reflejó cambios. Similar resultado se encontró en el estudio de Iwasaki et al. (2003), dado que, el entrenamiento intenso de tipo vigoroso, observado en las rutinas utilizadas por los atletas competitivos durante 12 meses, mantuvo los mismos promedios de PAS y Presión Arterial Diastólica (PAD), al igual que la población objeto de estudio. Por tal razón, Longhurst y Stebbins (1992) exponen que se presenta una mayor disminución en la PAS en ejercicios isométricos y aeróbicos practicados a una moderada intensidad, que en ejercicios practicados recurrentemente a una intensidad vigorosa.

Por otra parte, los hallazgos obtenidos entre el balance simpático y parasimpático del índice del dominio de frecuencia LF/HF se observaron en la primera medida 2.18 ± 0.67, en la segunda medida 3.3 ± 0.73 y en la tercera medida 4.5 ± 0.99. Según Sassi et al. (2015), esto cuantifica un equilibrio entre los dos sistemas. En este caso puntual, solo el 48.1 % de los atletas en el primer mes mostró un equilibrio del parámetro LF/HF, que representa la resistencia del SNA a los factores estresantes causados por el ejercicio (Claiborne et al., 2021; Plews et al., 2013). Sin embargo, en la segunda y tercera medida se presentaron valores por encima de 2.0 Hz, revelando un mayor predominio simpático, como se reportó en el estudio de Calderón et al. (2020). Esto evidencia la posibilidad de sufrir a largo plazo adaptaciones inadecuadas a las cargas del entrenamiento

(Claiborne et al., 2021), así como signos de hiperactividad simpática cardiovascular sostenida, lo que podría representar un factor de riesgo cardiovascular (Dalla et al., 2019).

En relación a los resultados encontrados en las correlaciones, se observan cambios significativos entre la variable del segundo promedio de ondas RR y la PAD, aunque con una fuerza de asociación negativa. Esto significa que, mientras aumenta la VFC total, la PAD disminuye. Lo mismo sucedió entre la primera medida de FCR y la segunda medida del promedio de RR, y entre la primera medida de FCR y la primera medida del promedio de RR. Esto coincide con Barreto et al. (2023), que afirma que mientras hay una reducción de las variables fisiológicas de Frecuencia Cardíaca (FC) y Presión Arterial (PA), la VFC debe aumentar. Por otra parte, la frecuencia de entrenamiento semanal y el RR obtuvieron una significancia positiva (*r*), mostrando que la frecuencia de entrenamiento semanal es el factor más influyente en el aumento de la VFC total de cada atleta (Kliszczewicz et al., 2018).

5 Conclusiones

La valoración de la VFC permitió identificar la respuesta del SNA a partir de los parámetros de dominio de tiempo y frecuencia en hombres competidores de *Crossfit*®, entre 18 y 25 años durante un periodo de 12 semanas de seguimiento, se presentó cambios estadísticamente significativos al comparar los tres registros en los parámetros RMSSD, LF/HF y PNN%, aunque no se presentó cambios significativos en la variable HF.

La VFC fue un indicador preciso que reflejó el equilibrio entre el tono simpático y parasimpático, utilizado como marcador del estado cardíaco y predictor de eventos cardiovasculares, asimismo, las variables específicas derivadas de la VFC ayudaron a evaluar la respuesta del SNA, frente a la calidad y el desarrollo de la práctica del *Crossfit*®.

La dosificación de entrenamiento que se empleó en los *WOD* (trabajo del día) en las variables intensidad, volumen y frecuencia, superó los límites de exigencia física que se han recomendado mundialmente por la OMS y el ACSM, dado que la aplicación de cargas en los atletas que practican *Crossfit*® fue elevada, por lo que se plantea el riesgo de desequilibro entre el sistema simpático y parasimpático, evidenciando poca restitución a los estímulos acumulativos de la carga de entrenamiento, a lo que se denomina sobreentrenamiento.

El promedio de ondas RR y el parámetro PNN50% se observó en todas las medidas durante 12 semanas de seguimiento, un bajo riesgo cardiovascular, sin embargo, en el parámetro LF/HF, mostró cambios estadísticamente significativos, evidenciando en datos porcentuales un desequilibrio en el segundo y tercer mes, pudiendo ocasionar a largo plazo un desajuste en la respuesta del SNA frente a las variables de la carga de entrenamiento usadas en los *WOD*.

6 Recomendaciones

Se sugiere en futuras investigación, incluir otras variables de estudio como la muestras con biomarcadores tales como cortisol, CPK, urea, entre otros, que permitan identificar y caracterizar la influencia de la práctica del *Crossfit*® sobre la función cardiovascular y salud en general.

Se aconseja utilizar los parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardíaca como monitorización de la magnitud de la carga de entrenamiento en el *Crossfit*® a los practicantes y a los entrenadores, con el fin de planificar adecuadamente la intensidad, el volumen y la frecuencia de entrenamiento, alcanzando su forma deportiva, sin la posibilidad de sufrir algún riesgo de lesión o sobreentrenamiento.

Se recomienda a futuros investigadores, continuar con el estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en respuesta a la práctica de otros deportes de fuerza y potencia, identificando de este modo, la respuesta del sistema nervioso autónomo antes y después de eventos que requieren un alto esfuerzo físico, así como la respuesta del sistema parasimpático y simpático frente a la práctica de nuevas tendencias de ejercicio físico que se practican a nivel recreativo con enfoque competitivo, como sucede en el *Crossfit*®.

Referencias

Baz Madrazo, A. (2016). *Propuesta de planificacion del sistema de preparacion fisica en el CrossFit.* [Tesis de pregrado, Universidad de León]. http://hdl.handle.net/10612/6473

Barreto, A., Medeiros, A., Silva Araujo, G., Vale, R., Vianna, j., Alkimin, R., . . . Da Silva, J. (2023). Heart rate variability and blood pressure during and after three CrossFit® sessions. *Retos, 47,* 311-316. doi.org/10.47197/retos.v47.93780

Barroco Ruiz, Y., Villa González, E., Martinez Amat, A., & Da Silva, M. (2020). Prevalence of Injuries in Exercise Programs Based on Crossfit®,Cross Training and High-Intensity Functional Training Methodologies: A Systematic Review. *Journal of Human Kinetics, 73*(1), 251-265. doi:10.2478/hukin-2020-0006

Bergeron, M., Nindl, B., Deuster, P., Baumgartner, N., Kane, S., Kraemer, W., . . . O`connor, F. (2011). Consortium for Health and Military Performance and American College of Sports Medicine consensus paper on extreme conditioning programs in military personnel. *Current sports medicine reports, 10*(6), 383-389. doi:10.1249/JSR.0b013e318237bf8a

Bompa, T., & Buzzicheli, C. (2017). *Periodización del entrenamiento deportivo.* Paidotribo.

Bonaduce, D., Petretta, M., Cavallaro, V., Apicella, C., Ianniciello, A., Romano, M., . . . Marciano, F. (1998). Intensive training and cardiac autonomic control in high level athletes. *Medice & Science in Sports & Exercise, 30*(5), 691-696. doi.org/10.1097/00005768-199805000-00008

Borg, G. (1998). *Borg's Perceived Exertion and Pain scales.* Kinetics.

Calderón, F., Cupeiro, R., Peinado, A., & Capella, L. (2020). Heart Rate Variability and Exercise, Is There a Physiological Basis? . *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, 20*(78), 299-320. doi.org/10.15366/rimcafd2020.78.008

Carter, J., Banister, E., & Blaber, A. (2003). Effect of endurance exercise on autonomic control of heart rate. *Sports Medicine, 33*(1), 33-46. doi:10.2165/00007256-200333010-00003

Claiborne, A., Alessio, H., Slattery, E., Haughes, M., Barth, E., & Cox, R. (2021). Heart Rate Variability Reflects Similar Cardiac Autonomic Function in Explosive and Aerobically Trained Athletes. *International journal of environmental research and public health, 18*(20), 10669. doi.org/10.3390/ijerph182010669

Claudino, J., Gabbett, T., Bourgeois, F., Sá Souza, H., Chagas Miranda, R., Mezencio, B., . . . Serrao, J. (2018). CrossFit Overview: Systematic Review and Meta-analysis. *Sports medicine, 4*(11). doi.org/10.1186/s40798-018-0124-5

CrossFit Training. (2021). *Guía de entrenamiento nivel 1.* http://library.crossfit.com/free/pdf/CFJ_Level1_Spanish_Latin_American.pdf

Dalla Vecchia, L., Barbic, F., De María, B., Cozzolino, D., Gatti, R., Dipaola, F., . . . Furlan, R. (2019). Can strenuous exercise harm the heart? Insights from a study of cardiovascular neural regulation in amateur triathletes. *Plos One, 14*(7). doi:10.1371/journal.pone.0216567

Daniela, M., Catalina, L., LLie, O., Paula, M., Daniel Andrei, J., & Loana, B. (2022). Effects of Exercise Training on the Autonomic Nervous System with a Focus on Anti-Inflammatory and Antioxidants Effects. *Antioxidants, 11*(2), 350. doi.org/10.3390/antiox11020350

Daniłowicz Szymanowicz, L., Figura Chmielewska, M., Raczak, M., & Szwoch, A. (2011). The assessment of influence of long-term exercise training on autonomic nervous system

activity in young athletes preparing for competitions. *Polski merkuriusz lekarski : organ Polskiego Towarzystwa Lekarskiego, 30*(175), 19- 25. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00059-006-2855-1.pdf

Difiori, J., Benjamín , H., Brenner, J., Gregorio, A., Juyanthi, N., Landry, G., & Lucas, A. (2014). Overuse injuries and burnout in youth sports: a position statement from the American Medical Society for Sports Medicine. *British journal of sports medicine, 48*(4), 287-288. doi.org/10.1136/bjsports-2013-093299

Dominski, F., Tibana, A., & Andrade, A. (2022). "Functional Fitness Training", CrossFit, HIMT, or HIFT: What Is the Preferable Terminology? *Frontiers sports Act Living, 4*. doi.org/10.3389/fspor.2022.882195

Eijsvogels, T., Fernandez, A., & Thompson, P. (2016). Are There Deleterious Cardiac Effects of Acute and Chronic Endurance Exercise? *Physiological Reviews, 96*(1), 99-125. doi:10.1152/physrev.00029.2014

Esco , M., & Flatt, A. (2014). Ultra-Short-Term Heart Rate Variability Indexes at Rest and Post-Exercise in Athletes: Evaluating the Agreement with Accepted Recommendations. *Journal of Sports Science and Medicine, 13*(3), 535-541. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4126289/pdf/jssm-13-535.pdf

Escobar, K. A., Morales, j., & Vandusseldorp, T. A. (2017). Metabolic profile of a crossfit training bout. *Journal of Human Sport and Exercise, 12*(4), 1248-1255. doi:http://dx.doi.org/10.14198/jhse.2017.124.11

Feito, Y., Hoffstetter, W., Serafine, P., & Mangine, G. (2018). Changes in body composition, bone metabolism, strength, and skill-specific performance resulting from 16-weeks of HIFT. *Plos One, 13*(6). doi:10.1371/journal.pone.0198324

Figueiredo, R., Pereira , R., & Pinto Neto, O. (2018). Nonlinear analysis is the most suitable method to detect changes in heart autonomic control after exercise of different durations. *Computers in Biology and Medicine, 97,* 83-88. doi.org/10.1016/j.compbiomed.2018.04.011

Freeman, J., Dewey, F., Hadley, D., Myers, J., & Froelicher, V. (2006). Autonomic nervous system interaction with the cardiovascular system during exercise. *Progress in Cardiovascular Diseases, 48*(5), 342-362. doi:10.1016/j.pcad.2005.11.003

Fu, Q., & Levine, B. (2013). Exercise and the autonomic nervous system. *Clinical neurology, 117*, 147-160. doi:10.1016/B978-0-444-53491-0.00013-4

Gordan, R., Gwathmey, J., & Xie, L.-H. (2015). Autonomic and endocrine control of cardiovascular function. *World Journal of Cardiology, 7*(4), 204-214. doi: 10.4330/wjc.v7.i4.204

Guyton, A., & Hall, J. (2016). *Tratado de Fisiología Médica* (13 ed.). Elsevier España.

Hale, T. (2003). *Exercise Physiology.* Wiley.

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.* McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.

Hottenrott, k., Hoos, O., & Dieter Esperer, H. (2006). Heart Rate Variability and Physical Exercise. CurrentStatus. *Heart Cardiovascular Diseases, 31,* 544-522. doi.org/10.1007/s00059-006-2855-1

Iwasaki, K.-I., Zhang, R., Zuckerman, J., & Levine, B. (2003). Dose-response relationship of the cardiovascular adaptation to endurance training in healthy adults: how much training for what benefit? *Journal of Applied Physiology, 95*(4), 1575-1583. doi:10.1152/japplphysiol.00482.2003

Jacob, N., Novaes, J., Behm, D., Vieira, J., Dias, M., & Vianna, J. (2020). Characterization of Hormonal, Metabolic, and Inflammatory Responses in CrossFit® Training: A Systematic Review. *Frontiers in Physiology, 11*(1001). doi:10.3389/fphys.2020.01001

Johnston, B., Barrett Jolley, R., krige, A., & Welters, I. (2019). Heart rate variability: Measurement and emerging use in critical care medicine. *Journal of the Intensive Care Society, 21*(2), 148-157. doi:10.1177/1751143719853744

Kliszczewicz, B., Williamson, C., Bechke, E., McKenzie, M., & Hoffstetter, W. (2018). Autonomic response to a short and long bout of high-intensity functional training. *Journal of Sports Sciences, 36*(16), 1872-1879. doi.org/10.1080/02640414.2018.1423857

Longhurst, J., & Stebbins, C. (1992). The isometric athlete. *Cardiology Clinics, 10*(2), 281-294. doi:https://doi.org/10.1016/S0733-8651(18)30244-3

Malik, M., Bigger, T., Camm, J., Kleiger, R., Malliani, A., Moss, A., & Schwartz, P. (1996). Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation, 17*(3), 354-381. doi:http://dx.doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868

Mangine, G., & Seay, T. (2022). Quantifying CrossFit®: Potential solutions for monitoring multimodal workloads and identifying training targets. *Frontiers in Sports and Active Living, 4*(949429). doi.org/10.3389/fspor.2022.949429

Mangine, G., Kliszczewicz, B., Boone, J., Williamson, C., & Bechke, E. (2019). Pre-Anticipatory Anxiety and Autonomic Nervous System Response to Two Unique Fitness Competition Workouts. *Sport, 7*(9), 199. doi.org/10.3390/sports7090199

Mastorakos, G., Pavlatou, M., Diamanti Kandarakis, E., & Chrousos, G. (2005). Exercise and the stress system. *Hormonos (Athens, Greece), 4*(2), 73-89. http://www.hormones.gr/57/article/article.html

McCorry, L. K. (2007). Physiology of the Autonomic Nervous System. *American Journal of Pharmaceutical Education, 71*(4), 78. doi:https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1959222/pdf/ajpe78.pdf

Meier, N., Sietmann, D., & Schmidt, A. (2023). Comparison of Cardiovascular Parameters and Internal Training Load of Different 1-h Training Sessions in Non-elite CrossFit® Athletes. *Journal of Science in Sport and Exercise*. doi.org/10.1007/s42978-022-00169-x

Michael , S., Graham, K., & Davis, G. (2017). Cardiac Autonomic Responses during Exercise and Post-exercise Recovery Using Heart Rate Variability and Systolic Time Intervals—A Review. *Frontiers in physiology, 8*(301). doi.org/10.3389/fphys.2017.00301

Motiejunaite, J., Amar, L., & Vidal-Petiot , E. (2021). Adrenergic receptors and cardiovascular effects of catecholamines. *Annales d'endocrinologie, 82*(3-4), 193-197. doi.org/10.1016/j.ando.2020.03.012

Nobrega, A., O'Learly, D., Moreira, B., & Marongiu, E. (2014). Neural Regulation of Cardiovascular Response to Exercise: Role of Central Command and Peripheral Afferents. *BioMed Research International, 2014,* 1-20. doi:10.1155/2014/478965

Organización Mundial de la Salud. (25 de 11 de 2020). *Directrices de la OMS sobre actividad física y hábitos sedentarios.* https://apps.who.int/iris/handle/10665/337004

Ortiz Cárdenas, J., & Riveros Medina, M. (2015). Entrenamiento de Alta Intensidad; Concepto, Características, Usos y Riesgos en Salud Actividad Física y Deporte. *Revista Digital: Actividad Física y Deporte, 1*(2), 169-178. doi.org/10.31910/rdafd.v1.n2.2015.318

Peidro, R. (2022). *Cardiología, ejercicio y deportes* . Journal.

Plews, D., Laursen, P., Stanley, J., Kilding, A., & Buchheit, M. (2013). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports medicine, 43*(9), 773-781. doi.org/10.1007/s40279-013-0071-8

Ramírez Vélez, R., Tordecilla- Sanders, A., Téllez, L., Prieto, D., Hernández-Quiñonez, P., Correa-Bautista, J., . . . Izquierdo, M. (2020). Effect of Moderate- Versus High-Intensity Interval Exercise Training on Heart Rate Variability Parameters in Inactive Latin-American Adults: A Randomized Clinical Trial. *Randomized Controlled Trial, 34*(12), 3403-3415. doi:10.1519/JSC.0000000000001833

Rhodes, R., Janssen, I., Bredin, S., Warbuton, D., & Bauman, A. (2017). Physical activity: Health impact, prevalence, correlates and interventions. *Phycology and health, 32*(8), 942-975. doi:10.1080/08870446.2017.1325486

Sandercock, G., Bromley, P., & Brodie, D. (2005). Effects of exercise on heart rate variability: Inferences from meta-analysis. *Medicine & Science in sportr & exercise, 37*(3), 433-439. doi:10.1249/01.MSS.0000155388.39002.9D

Sassi, R., Cerutti, S., Lombardi, F., Malik, M., Huikuri, H., Peng, C., . . . Yamamoto, Y. (2015). Advances in heart rate variability signal analysis: joint position statement by the e-Cardiology ESC Working Group and the European Heart Rhythm Association co-endorsed by the Asia Pacific Heart Rhythm Society. *Europace, 17*(9), 1341-1353. doi:10.1093/europace/euv015

Shaffer, F., & Ginsberg, J. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in public health, 5*(258), 1-17. doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258

Shaw, B., Dullabh, M., Forbes, G., Brandkamp, J.-L., & Shaw, I. (2017). Analysis of physiological determinants during a single bout or Crossfit. *International Journal of Performance Analysis in Sport, 15*(3), 809-815. doi:10.1080/24748668.2015.11868832

Singh, N., Moneghetti, K., Christle, J., Hadley, D., Froelicher, V., & Plews, D. (2018). Heart Rate Variability: An Old Metric with New Meaning in the Era of Using mHealth technologies for Health and Exercise Training Guidance. Part Two: Prognosis and Training. *Arrhythm Electrophysiol Review, 7*(4), 247-255. doi:10.15420/aer.2018.30.2

Songsorn, P., Somnarin, K., Jaitan, S., & Kupradit, A. (2022). The effect of whole-body high-intensity interval training on heart rate variability in insufficiently active adults. *Journal of Exercise Science & Fitness, 20*(1), 48-53. doi.org/10.1016/j.jesf.2021.10.003

Stanley, J., Peake, J., & Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports Medicine, 43*, 1259-1277. doi:10.1007/s40279-013-0083-4

Sztajzel, J. (2004). Heart rate variability: a noninvasive electrocardiographic method to measure the autonomic nervous system. *Swiss medical weekly, 134*(35 -36), 514-522. doi:10.4414/smw.2004.10321

Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation, 93*(1), 1043-1065. doi:8598068

Van Der Kolk, B. (2020). *El Cuerpo lleva la Cuenta.* Eleftheria, S,L.

Veloza, L., Jiménez, C., Quiñones, D., Polanía, F., Pachón Valero, L., & Rodríguez Triviño, C. (2019). Variabilidad de la frecuencia cardiaca como factor predictor de las enfermedades cardiovasculares. *Revista Colombiana de Cardiología, 26*(4), 205-210. doi.org/10.1016/j.rccar.2019.01.006

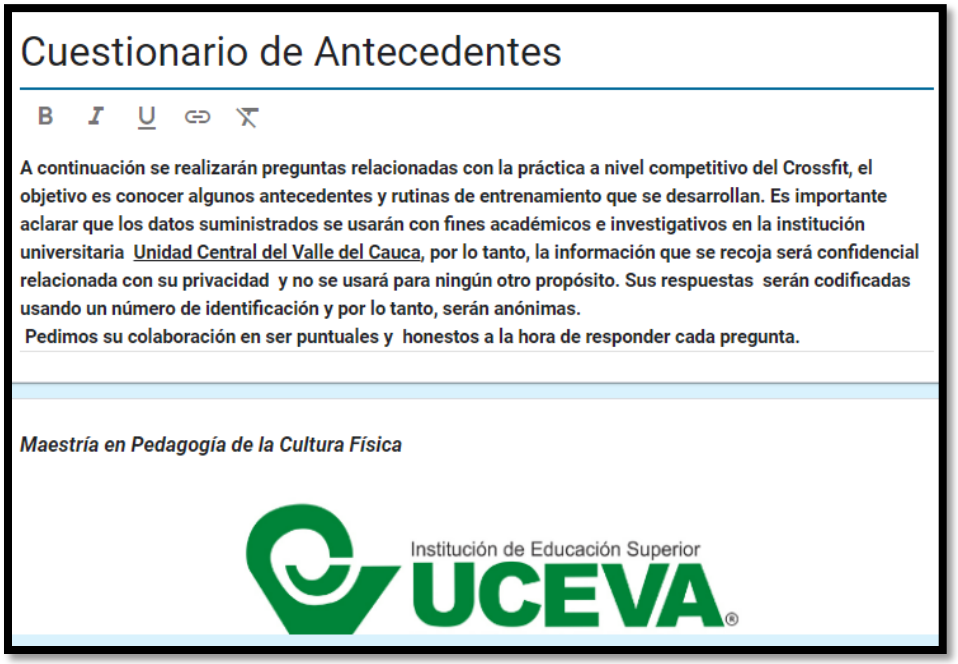
Willians, S., Booton, T., Watson, M., Rowland, D., & Altini, M. (2017). Heart Rate Variability is a Moderating Factor in the Workload-InjuryRelationship of Competitive CrossFit™ Athletes. *Journal of Sports Science & Medicine, 16*(4), 443-449. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5721172/

Wilmore, J. H., & Costill, D. (2016). *Fisiología del esfuerzo y del deporte* (sexta edi.). Paidotribo.

Apéndices

Apéndice A

Apéndice B



Apéndice C

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Estimada(o) Participante,

El propósito del presente consentimiento informado es proveer información clara y concisa sobre la naturaleza de esta investigación.

La meta del estudio es investigar sobre *Respuesta del Sistema Nervioso Autónomo a partir de los Parámetros de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca en Competidores de Crossfit en el Municipio de Tuluá* y es conducida por estudiantes de la *Maestría en Pedagogía de la Cultura Física* de la Unidad Central Del Valle, UCEVA.

Si usted accede a participar en este estudio, se le pedirá responder una serie de preguntas elaboradas en un cuestionario de antecedentes, esto tomará aproximadamente 5 minutos de su tiempo. Además, se realizarán tres valoraciones de la VFC cada mes, frecuencia cardíaca basal y presión arterial, con una duración aproximada de 10 minutos, además deben presentarse siguiendo las recomendaciones previas al examen.

La participación en el presente estudio es estrictamente voluntaria. La información que se recoja será confidencial relacionada con su privacidad y no se usará para ningún otro propósito fuera de los de la investigación, lo cual es estrictamente académico. Sus respuestas de la encuesta serán codificadas usando un número de identificación y por lo tanto, serán anónimas.

Si tiene alguna duda sobre el proyecto, puede hacer preguntas en el momento que desee durante su participación, a las siguientes personas Diana Milena Bedoya Salazar, celular 3178811867, Jhom Fredy Ríos, celular,3163508802, para ello se le entregará una copia de este formato, una vez lo haya firmado.