



UNIVERSIDAD DE MURCIA
ESCUELA INTERNACIONAL DE
DOCTORADO

TESIS DOCTORAL

Aportaciones al estudio de la hipoxia normobárica y de la
variabilidad y adaptaciones de la frecuencia cardíaca. Aplicaciones
al paracaidismo.

D.^a Inés Albertus Cámara

2022



UNIVERSIDAD DE MURCIA
ESCUELA INTERNACIONAL DE
DOCTORADO

TESIS DOCTORAL

Aportaciones al estudio de la hipoxia normobárica y de la
variabilidad y adaptaciones de la frecuencia cardíaca. Aplicaciones
al paracaidismo.

Autor: D.^a Inés Albertus Cámara

Director/es: D. Ignacio Martínez González-Moro y
D. Vicente Ferrer López



**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD
DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

Aprobado por la Comisión General de Doctorado el 19-10-2022

D./Dña. Inés Albertus Cámara

doctorando del Programa de Doctorado en

Programa de Doctorado en Ciencias de la Salud

de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Murcia, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y titulada:

Aportaciones al estudio de la hipoxia normobárica y de la variabilidad y adaptaciones de la frecuencia cardíaca. Aplicaciones al paracaidismo.

y dirigida por,

D./Dña. Ignacio Martínez González-Moro

D./Dña. Vicente Ferrer López

D./Dña.

DECLARO QUE:

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Si la tesis hubiera sido autorizada como tesis por compendio de publicaciones o incluyese 1 o 2 publicaciones (como prevé el artículo 29.8 del reglamento), declarar que cuenta con:

- *La aceptación por escrito de los coautores de las publicaciones de que el doctorando las presente como parte de la tesis.*
- *En su caso, la renuncia por escrito de los coautores no doctores de dichos trabajos a presentarlos como parte de otras tesis doctorales en la Universidad de Murcia o en cualquier otra universidad.*

Del mismo modo, asumo ante la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada, en caso de plagio, de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Murcia, a 10 de noviembre de 2022 Firmado por Inés Albertus Cámara el 10/11/2022 con un certificado emitido por AC FNMT Usuarios

Fdo.: Inés Albertus Cámara

Esta DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD debe ser insertada en la primera página de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor.

Información básica sobre protección de sus datos personales aportados	
Responsable:	Universidad de Murcia. Avenida teniente Flomesta, 5. Edificio de la Convalecencia. 30003; Murcia. Delegado de Protección de Datos: dpd@um.es
Legitimación:	La Universidad de Murcia se encuentra legitimada para el tratamiento de sus datos por ser necesario para el cumplimiento de una obligación legal aplicable al responsable del tratamiento. art. 6.1.c) del Reglamento General de Protección de Datos
Finalidad:	Gestionar su declaración de autoría y originalidad
Destinatarios:	No se prevén comunicaciones de datos
Derechos:	Los interesados pueden ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación, oposición, limitación del tratamiento, olvido y portabilidad a través del procedimiento establecido a tal efecto en el Registro Electrónico o mediante la presentación de la correspondiente solicitud en las Oficinas de Asistencia en Materia de Registro de la Universidad de Murcia



UNIVERSIDAD DE
MURCIA

D. Ignacio Martínez González-Moro, Profesor Titular de Universidad del Área de en el Departamento de Fisioterapia, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada "Aportaciones al estudio de la hipoxia normobárica y de la variabilidad y adaptaciones de la frecuencia cardiaca. Aplicaciones al paracaidismo.", realizada por D. Inés Albertus Cámara, bajo mi inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 14 de octubre de 2022

Firmado por MARTINEZ GONZALEZ-MORO IGNACIO -
***3046** el día 14/10/2022 con un certificado
emitido por AC FNMT Usuarios



UNIVERSIDAD DE
MURCIA

D. Vicente Ferrer López, Doctor de Universidad del Área de
en el Departamento de Fisioterapia, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada "Aportaciones al estudio de la hipoxia normobárica y de la variabilidad y adaptaciones de la frecuencia cardíaca. Aplicaciones al paracaidismo.", realizada por D. Inés Albertus Cámara, bajo mi inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 14 de octubre de 2022

Mod:T-20

ID. DOCUMENTO	aXDowW62FW		Página: 1 / 1
FIRMADO POR		FECHA FIRMA	ID. FIRMA
FERRER LOPEZ VICENTE ANTONIO		16-10-2022 21:40:51	1665949260003
 aXDowW62FW			

AGRADECIMIENTOS

A los participantes, al personal de la Escuela Militar de Paracaidismo Méndez Parada, a su director, el Coronel Lens, a su Jefe de Estudios, el Teniente Coronel Siverio y al Escuadrón de Zapadores Paracaidistas (EZAPAC), en especial, al Teniente Coronel Arbolí y al Brigada Avilés por su colaboración y buen hacer durante todo el proyecto.

A la Patrulla Acrobática Paracaidista del Ejército del Aire y del Espacio Español (PAPEA), por el trato y el cariño con el que nos han recibido siempre. A su jefe, el Capitán Lomas, por su predisposición, coordinación e ideas aportadas.

Al personal del Centro de Medicina Aeroespacial de Madrid (CIMA) por enseñarnos sus instalaciones y compartir sus años de experiencia con nosotros.

A todo el personal del servicio de Rehabilitación Cardíaca del Centro Periférico de Especialidades Bola Azul de Almería, por el aprendizaje y la amabilidad. Especialmente a la Dr. María Carrasco, por recibirme y darme la oportunidad de aprender con vosotros.

A mi director, la clave de este proyecto, el Dr. Ignacio Martínez, por proponerme este reto y por el asesoramiento inestimable durante el mismo. Por ayudarme a crecer y mejorar académicamente desde el cariño y el afecto.

A mi codirector, el Dr. Vicente Ferrer por la ayuda y las aportaciones realizadas.

A María y María José, mis dos descubrimientos de esta etapa, por brindarme vuestro apoyo desde el inicio y convertir este camino en otro mucho mejor.

A mis amigos, por ser una pieza fundamental. Por entenderme y apoyarme en cada decisión, porque fuisteis los primeros voluntarios de este proyecto. Ni la distancia, una pandemia mundial o un estado de alarma os paró a vosotros. Siempre estáis, tengo a los mejores.

A mi hermana, mi apoyo incondicional, por confiar en mí incluso cuando ni yo lo hago. Por enseñarme la necesidad de parar, pero siempre cogermme de la mano para después seguir.

A mis padres, por tener el mejor espejo donde mirarme, referencia de trabajo diario, esfuerzo y constancia. Si hoy estoy escribiendo estas palabras es gracias a esos valores que nos habéis inculcado siempre. Nunca podré agradecerlos todo lo que hacéis por mi día tras día.

A ti, que, aunque hace unos años nos dejaste, sigues presente en cada paso y en cada etapa. Seguiré esforzándome y trabajando para que lo que veáis os haga estar orgullosos.

Gracias a todos los que, de una u otra forma, me habéis ayudado.

ÍNDICE

RELACIÓN DE ABREVIATURAS	1
RESUMEN	5
ABSTRACT	7
I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Conceptos generales	11
1.1.1. Hipoxia normobárica	11
1.1.2. Variabilidad de la frecuencia cardiaca	12
1.1.3. Adaptaciones de la frecuencia cardiaca	14
1.1.4. Paracaidismo.....	15
1.2. Tolerancia a la hipoxia	16
1.3. Mecánica ventilatoria e hipoxia	17
1.4. Relación entre el paracaidismo y la hipoxia	17
1.5. Frecuencia cardiaca, trabajo cardiaco y paracaidismo	18
1.6. La PAPEA	18
II. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	23
2.1. Justificación	23
2.2. Hipótesis	24
2.3. Objetivos	24
III. MATERIAL Y MÉTODO	27
3.1. Estudio 1: Revisión sistemática hipoxia normobárica en deportistas	27
3.1.1. Criterios de elegibilidad.....	27
3.1.2. Fuentes de datos y estrategia de búsqueda	29
3.1.3. Selección de estudios	29
3.1.4. Extracción y gestión de datos	29
3.2. Estudio 2: Variabilidad de la frecuencia cardiaca e hipoxia	32
3.2.1. Participantes	32
3.2.2. Instrumentos	32
3.2.3. Procedimiento previo.....	37
3.2.4. Realización de las pruebas de hipoxia.....	38
3.2.5. Test de tolerancia a la hipoxia	39
3.2.6. Sesión de exposición	40
3.2.7. Descripción de dominios de la variabilidad de la frecuencia cardiaca.	41
3.2.8. Procedimiento estadístico	42
3.3. Estudio 3: Mecánica ventilatoria y tolerancia a la hipoxia	43
3.3.1. Diseño	43
3.3.2. Participantes.....	43
3.3.3. Criterios de inclusión y exclusión	44
3.3.4. Medidas de resultado	45
3.3.5. Procedimientos preliminares	46
3.3.6. Prueba de tolerancia a la hipoxia.....	48
3.3.7. Análisis de los datos.....	51
3.4. Estudio 4: Frecuencia cardiaca y paracaidismo	52
3.4.1. Población.....	52
3.4.2. Primera fase (laboratorio).....	53
3.4.3. Segunda fase (saltos de precisión).....	57
3.4.4. Procedimiento estadístico	61

IV. RESULTADOS	65
4.1. Estudio 1: Revisión sistemática hipoxia normobárica en deportistas	65
4.1.1. Resultados de la búsqueda	65
4.1.2. Estudios incluidos	66
4.1.3. Medidas de resultado	75
4.2. Estudio 2: Variabilidad de la frecuencia cardiaca e hipoxia	78
4.2.1. Población	78
4.2.2. Test de tolerancia a la hipoxia normobárica	79
4.2.3. Sesión de hipoxia normobárica	80
4.3. Estudio 3: Mecánica ventilatoria y tolerancia a la hipoxia	81
4.3.1. Evaluación general	81
4.3.2. Duración del test de tolerancia a la hipoxia	82
4.3.3. Saturación de oxígeno arterial y muscular en el TTHN1	83
4.3.4. Saturación de oxígeno arterial y muscular en el TTHN2	84
4.4. Estudio 4: Frecuencia cardiaca y paracaaidismo	91
4.4.1. Valoración en el laboratorio	91
4.4.2. Saltos de precisión	95
V. DISCUSIÓN	103
5.1. Estudio 1: Revisión sistemática hipoxia normobárica en deportistas	103
5.1.1. Medidas de resultado	103
5.2. Estudio 2. Variabilidad de la frecuencia cardiaca e hipoxia	106
5.2.1. Dominio de tiempo y frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardiaca	107
5.3. Estudio 3. Mecánica ventilatoria y tolerancia a la hipoxia	109
5.4. Estudio 4. Frecuencia cardiaca y paracaaidismo	111
5.5. Discusión general	113
VI. CONCLUSIONES	119
VII. ANEXOS	143
ANEXO I. Informe de la Comisión de Ética de Investigación	143
ANEXO II. Consentimiento informado	144
ANEXO III: Producción científica para la Tesis Doctoral	145

RELACIÓN DE ABREVIATURAS

A: FC media en los tres minutos previos al embarque.

B: FC media en el interior del avión. Desde el embarque hasta el lanzamiento.

C: FC media durante el tiempo que está el paracaidista en el aire.

CO₂: Dióxido de carbono.

COVID-19: Enfermedad respiratoria contagiosa causada por el virus SARS-CoV-2.

D: FC pico durante el tiempo que está el paracaidista en al aire.

DE: Desviación Estándar.

E: FC media en los tres minutos tras el aterrizaje.

ECA: Ensayo Controlado Aleatorio.

ECG: Electrocardiograma.

ECO: Ecocardiograma.

EPO: Eritropoyetina.

EZAPAC: Escuadrón de Zapadores Paracaidista.

FC: Frecuencia Cardíaca.

FC_{máx}: Frecuencia Cardíaca Máxima.

FC_{min}: Frecuencia Cardíaca Mínima.

FiO₂: Fracción inspirada de oxígeno.

FR: frecuencia respiratoria

G1: Grupo uno de estudio.

G2: Grupo dos de estudio.

HAHO: *High Atitude High Opening* / Apertura de gran altitud.

HALO: *High Altitude Low Opening* / Apertura de baja altitud.

HF: Potencia de alta frecuencia.

HIIT: *High Intensity Interval Training* / entrenamiento de intervalos de alta intensidad.

HN: Hipoxia Normobárica.

HNI: Hipoxia Normobárica Intermitente.

HRV triangular index: la integral del histograma del intervalo RR dividido por la altura del histograma.

HRV: *Heart Rate Variability*.

IMC: Índice de Masa Corporal

LAIB: Laboratorio de Investigación Biosanitaria.

LF: *Low frequency* / potencia de baja frecuencia.

LF/HF: Cociente de LF y HF.

LHTH: *Living High-Training High* / vivir en altura, entrenar en altura.

LHTL: *Living High-Training Low* / vivir en altura, entrenar a nivel del mar.

LLTH: *Living Low-Training High* / vivir a nivel del mar, entrenar en altura.

MAM: Mal Agudo de Montaña.

MD: Media de las Diferencias

MGR: Masa Grasa Relativa.

O₂: Oxígeno

PAPEA-1: Primer equipo de la Patrulla Acrobática Paracaidista del Ejército del Aire y del Espacio Español.

PAPEA-2: Segundo equipo de la Patrulla Acrobática Paracaidista del Ejército del Aire y del Espacio Español.

PAPEA: Patrulla Acrobática Paracaidista del Ejército del Aire y del Espacio Español.

PCR: Reacción en Cadena de la Polimerasa.

PE: Prueba de Esfuerzo.

pNN50: Porcentaje de intervalos RR consecutivos que difieren entre si más de 50 milisegundos.

pO₂: Presión parcial de oxígeno.

PRISMA: *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses* / Elementos de información preferidos para las revisiones sistemáticas y los metaanálisis

rMSSD: raíz cuadrada de la media de la suma de las diferencias al cuadrado. de intervalos RR consecutivos.

RR medio: intervalo entre dos latidos (ondas R en el ECG).

SatO₂: Saturación arterial de oxígeno.

SDNN: Desviación estándar de los valores promedio de los intervalos RR registrados.

SmO₂: Saturación muscular de oxígeno.

SNA: Sistema Nervioso Autónomo.

SNPS: Sistema Nervioso Parasimpático.

SNS: Sistema Nervioso Simpático.

TAD: Tensión Arterial Diastólica.

TAS: Tensión Arterial Sistólica.

TINN: Anchura de la línea base del histograma del intervalo RR.

TTH: Test de Tolerancia a la Hipoxia.

TTHN: Test de Tolerancia a la Hipoxia Normobárica.

TTHN1: Primer Test de Tolerancia a la Hipoxia Normobárica.

TTHN2: Segundo Test de Tolerancia a la Hipoxia Normobárica.

TUC: Tiempo Útil de Conciencia.

VFC: Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca.

VLF: Very low frequency / Potencia de muy baja frecuencia.

VO₂máx: Consumo máximo de oxígeno.

VT1: Umbral ventilatorio uno.

VT2: Umbral ventilatorio dos.

RESUMEN

Objetivos

Analizar los métodos utilizados en la exposición a la hipoxia y detectar sus efectos en deportistas de resistencia. Además, establecer las variaciones que se producen en los dominios de la variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) después de la exposición a hipoxia normobárica (HN). Así como evaluar la influencia de la respiración controlada en la tolerancia a la hipoxia en paracaidistas. Finalmente, obtener, analizar y comparar las frecuencias cardiacas (FC) desarrolladas durante saltos de precisión en los dos equipos profesionales de la Patrulla Acrobática Paracaidista del Ejército del Aire y del Espacio Español (PAPEA).

Metodología

Se ha dividido la metodología en cuatro bloques. Cada uno de ellos responde a un objetivo planteado, en el que se ha descrito una población y un método diferente. El primer bloque corresponde a una revisión sistemática; en el segundo estudio han participado voluntarios jóvenes y sin patologías; el tercero lo forman dos grupos: estudiantes y paracaidistas profesionales del Escuadrón de Zapadores Paracaidistas y de la PAPEA. El cuarto estudio se ha realizado con los dos equipos profesionales de la PAPEA.

En el segundo y cuarto bloque se ha utilizado un pulsómetro Polar H10® para el registro de la FC y de la VFC. En el segundo y tercer objetivo se realizaron distintas exposiciones a HN con el simulador iAltitude Trainer v2.7®, se registró la saturación muscular de oxígeno (SmO₂) con un aparato Humon Hex® y la saturación arterial de oxígeno (SatO₂) con el dispositivo (Nonin® modelo 3018LP). En el cuarto estudio se realizó una prueba de esfuerzo con análisis de gases a los paracaidistas (*Analizador Cortex® modelo MetaLyzer 3B*). En todos los trabajos se obtuvieron datos de composición corporal (InBody 120® y Omron® BF511) y se realizaron, previo a cada estudio, diferentes pruebas para descartar contraindicaciones.

Resultados

- Las exposiciones cortas (menos de 3 h) a la hipoxia normobárica aumentan significativamente ($p < 0.05$) el tiempo hasta el agotamiento y los periodos largos (14 h o más) incrementan ($p < 0.05$) los valores de hemoglobina, mientras que los tiempos cortos de exposición no fueron efectivos ($p > 0.05$). Las altitudes y las duraciones de exposición a la hipoxia fueron muy heterogéneas, aunque la más utilizada es la de 3000 m.

- Una exposición de 10 minutos de duración máxima a 5050 m no provoca cambios ($p > 0.05$) en el dominio de tiempo y frecuencia de la VFC, así como tampoco ($p > 0.05$) una exposición a 3200m durante 64 minutos de forma interrumpida (4:4).

- Realizar respiraciones diafragmáticas controladas, con alto volumen y baja velocidad, incrementa el tiempo de exposición a HN ($p < 0.05$), los valores de SatO_2 y de SmO_2 ($p < 0.05$).

- El primer equipo de la PAPEA presenta valores de frecuencia cardiaca más bajos ($p < 0.05$) que el segundo equipo. Ambos equipos tienden a incrementar su FC en cada salto.

Conclusiones

-Se evidencia gran heterogeneidad de tiempos y altitudes a la hipoxia según el parámetro hematológico o deportivo sobre el que se pretenda actuar.

-La variabilidad de la frecuencia cardiaca no evidencia cambios significativos en el dominio de tiempo ni en el de frecuencia después de la exposición a hipoxia normobárica, no siendo un estímulo estresante.

-La respiración diafragmática controlada a un volumen alto y a una velocidad lenta mejora la tolerancia a la hipoxia, medida por una prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica a 5050 m de altitud.

-Los saltos de precisión de aterrizaje provocan un gran trabajo cardiaco y metabólico que se ve incrementado a menor experiencia del paracaidista y ante condiciones ambientales mayores de viento.

Palabras clave: hipoxia, variabilidad de la frecuencia cardiaca, control de la respiración, mecánica ventilatoria, paracaidismo.

ABSTRACT

Objectives

To analyze the methods used in hypoxia exposure and to detect its effects in endurance athletes. In addition, to establish the variations that occur in the domains of heart rate variability (HRV) after exposure to normobaric hypoxia (NH). As well as to evaluate the influence of controlled breathing on hypoxia tolerance in skydivers. Finally, to obtain, analyze and compare the heart rates (HR) developed during precision jumps in the two professional teams of the Acrobatic Patrooper Patrol of the Air Force (PAPEA).

Methodology

The methodology has been divided into four blocks. Each of them responds to a specific objective, in which a different population and a different method have been described. The first block corresponds to a systematic review; the second study involved young volunteers without pathologies; the third was made up of two groups: students and professional parachutists from the Parachute Sapper Squadron and the PAPEA. The fourth study was carried out with the two professional teams of the PAPEA.

In the second and fourth blocks, a Polar H10 heart rate monitor was used to record HR and HRV. In the second and third objectives, different HN exposures were performed with the iAltitude® Trainer v2.7 simulator, muscle oxygen saturation (SmO_2) was recorded with a Humon Hex® device and arterial oxygen saturation ($SatO_2$) with the device (Nonin model 3018LP). In the fourth study, a stress test with gas analysis was performed on skydivers (Cortex® Analyzer model MetaLyzer 3B). In all the studies, body composition data were obtained (InBody 120® and Omron BF511) and, prior to each study, different tests were performed to rule out contraindications.

Results

- Short exposures (less than 3 h) to normobaric hypoxia significantly ($p < 0.05$) increased time to exhaustion and long periods (14 h or more) increased ($p < 0.05$) hemoglobin values, while short exposure times were not effective ($p > 0.05$). Altitudes and durations of exposure to hypoxia were very heterogeneous, although 3000 m was the most commonly used.
- A 10 min maximum duration exposure at 5050 m does not cause changes ($p > 0.05$) in HRV time and frequency domain, nor ($p > 0.05$) does an exposure at 3200m for 64 min in an interrupted manner (4:4).
- Performing controlled diaphragmatic breaths, with high volume and low velocity, increases HN exposure time ($p < 0.05$), SatO_2 and SmO_2 values ($p < 0.05$).
- The first PAPEA team presents lower heart rate values ($p < 0.05$) than the second team. Both teams tend to increase their HR in each jump.

Conclusions

- Great heterogeneity of times and altitudes to hypoxia is evidenced according to the hematological or sports parameter on which it is intended to act.
- Heart rate variability does not show significant changes in the time or frequency domain after exposure to normobaric hypoxia, not being a stressful stimulus.
- Diaphragmatic breathing controlled at a high volume and slow rate improves hypoxia tolerance as measured by a normobaric hypoxia tolerance test at 5050 m altitude.
- Precision landing jumps cause a high cardiac and metabolic workload that is increased with less experience of the skydiver and in windier environmental conditions.

Keywords: hypoxia, heart rate variability, breathing control, ventilatory mechanics, skydiving.

I. INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Conceptos generales

1.1.1. Hipoxia normobárica

El entrenamiento en altitud ha sido un recurso de especial relevancia en el ámbito deportivo. Con el aumento de la altitud, la presión barométrica disminuye exponencialmente, dando lugar a una reducción progresiva de la presión parcial de oxígeno (pO_2) del ambiente, denominándose hipoxia hipobárica [McMorris et al., 2017]. Tradicionalmente, los atletas se desplazaban a la montaña con la finalidad de adaptar su organismo a la altura, provocar mejoras en los parámetros fisiológicos y que estos le indujeran a un mejor rendimiento físico. Existen diferentes métodos de aplicación de la hipoxia relacionados con el entrenamiento. "*Living High-Training High*" (LHTH) y "*Living High-Training Low*" (LHTL) son dos técnicas que requieren tiempos de exposición relativamente largos (12 horas al día durante un mínimo de 2 semanas) para poder acumular una dosis hipóxica [Wilber et al., 2007; Gore et al., 2013]. Los atletas se someten con frecuencia a dormir en cámaras de hipoxia [Scott et al., 2014] o realizan la pretemporada en zonas de gran altitud [McLean et al., 2013]. El método de entrenamiento hipóxico conocido como "*Living Low Training High*" (LLTH) está ganando popularidad porque los atletas viven en normoxia y realizan sus sesiones de entrenamiento en condiciones hipóxicas. Este tipo de exposición tiene una duración de 3 h y se realiza de dos a cinco veces por semana, por lo que no proporciona un estímulo hipóxico que introduzca cambios hematológicos, como ocurre con los métodos LHTH y LHTL [Wilber et al., 2007].

Sin embargo, las exposiciones prolongadas a altitud han ido perdiendo uso a partir del desarrollo de dispositivos que simulan la altitud a través de la hipoxia normobárica (HN) [Levine et al., 2002]. Este tipo se caracteriza porque sin cambiar la presión atmosférica (en la hipobárica sí varía) hay una reducción de la proporción de oxígeno.

Según el tiempo de administración a la hipoxia se distinguen: exposiciones agudas (breves en el tiempo) y crónicas (de mayor duración, de incluso horas o días). A su vez, dentro de las exposiciones agudas, existe las denominadas “intermitentes”. Estas consisten en intercambiar periodos de normoxia seguidos de periodos de hipoxia.

Por las ventajas aportadas, la hipoxia normobárica se está utilizando, además de en el entrenamiento deportivo, como complemento terapéutico en rehabilitación cardiaca [Wang et al., 2019], patologías respiratorias [Mateika et al., 2017] o neurológicas [Manukhina et al., 2016].

1.1.2. Variabilidad de la frecuencia cardiaca

En una persona sana, en reposo, los latidos cardiacos se van produciendo con una frecuencia variable, es decir, el tiempo (en milisegundos) entre dos latidos cardiacos va variando latido a latido. Este fenómeno representa el concepto de variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC o HRV, *Heart Rate Variability*, por sus siglas en inglés) [Calderón et al., 2020]. La medición de esta variabilidad se realiza habitualmente a partir de un electrocardiograma (ECG), donde se detecta cada una de las ondas R y se calcula el tiempo entre las ondas R consecutivas o intervalo R-R [Rodas et al., 2008].

A partir de las mediciones de los intervalos R-R se realiza el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardiaca mediante distintos métodos. Los más utilizados son los basados en el dominio de tiempo, en el dominio de frecuencia, en las medidas geométricas de los intervalos R-R y en las variables no lineales [Souza et al., 2021; Rodas et al., 2008]. La lista ordenada de los tiempos entre latidos, expresados en ms, es una serie de tiempo y su representación gráfica se denomina tacograma [Naranjo-Orellana., 2021] (figura 1).

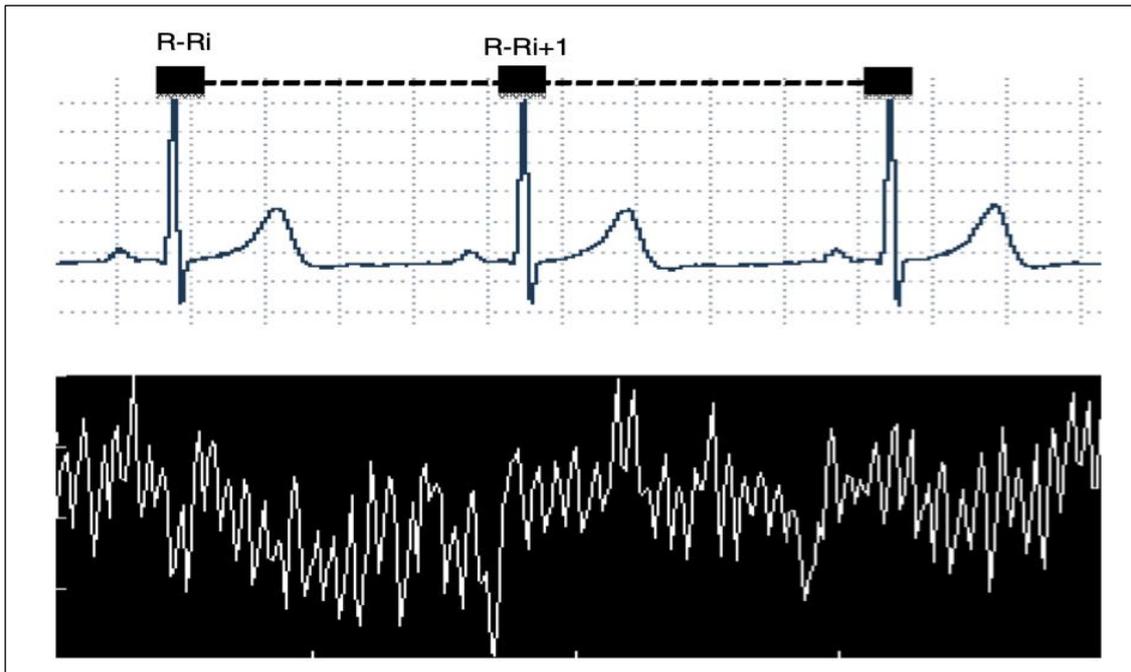


Figura 1. Ilustración de un trazado de electrocardiograma con intervalos R-R ($R-R_i$) en milisegundos (imagen superior) y un tacograma formado a partir de una serie temporal de $R-R_i$ recogidos (imagen inferior) [Catai et al., 2020]

Las variables del dominio de tiempo son distintos parámetros estadísticos que se extraen de la medición electrocardiógrafa de los intervalos R-R [Kleiger et al., 2005]. Por otro lado, las medidas del espectro de frecuencia de la VFC se obtienen a través de una transformación matemática, habitualmente la Transformación de Fourier. La mayor parte de la potencia de la señal oscila entre los 0 a 0.4 Hz, distinguiéndose así: potencia de muy baja frecuencia, potencia de baja frecuencia (*low frequency*, LF), potencia de alta frecuencia (*high frequency*, HF), potencia ultra alta frecuencia o la proporción LF/HF.

La función cardíaca y, más concretamente la frecuencia cardíaca (FC), se encuentra regulada e influida por el sistema nervioso autónomo (SNA). Este se compone por el sistema nervioso simpático y parasimpático o vagal, que influye sobre numerosas funciones, sistemas y órganos, entre ellos el corazón [García-Manso et al., 2013].

El SNA es quien nos aporta gran cantidad de relaciones y aplicaciones clínicas de los parámetros de VFC. Por ello, ha sido utilizada en distintas patologías como: la cardíaca [Carrasco-Poyatos et al., 2022b; Veloza et al.,

2019], enfermedades neurológicas [Schwarck et al., 2021], en la COVID-19 [Hasty et al., 2020; Bourdillon et al., 2020; Mol et al., 2021] o en estados como el embarazo [Alam et al., 2018]. La VFC ha sido utilizada también en el ámbito deportivo, con la finalidad, entre otras, de mejorar la adaptación o rendimiento de los atletas [Carrasco-Poyatos et al., 2022a].

Sobre la frecuencia cardiaca pueden influir numerosos y variados elementos y, por ende, afectar al análisis de la variabilidad de la frecuencia cardiaca. Estos factores pueden dividirse en intrínsecos o extrínsecos al organismo. En relación con los primeros se establecen: la edad (la FC disminuye con la edad) [Almeida-Santos et al., 2016], el sexo (en general, la FC es mayor en las mujeres) [Saleem et al., 2012], la posición del cuerpo (la FC es menor en posición supina) [Rodas et al., 2008] o el estrés laboral [Järvelin-Pasanen et al., 2018]. En relación con los factores extrínsecos destacan: la humedad [Abellán-Aynés et al., 2019], la hora del día a la que se realice la medición (la FC es más alta en las primeras horas de la mañana) [Rodas et al., 2008], la temperatura ambiental [Abellán-Aynés et al., 2021] o la ingesta de sustancias como la cafeína [Flueck et al., 2016; Sondermeijer et al., 2002]

Un estímulo sobre el que se ha investigado poco es sobre la influencia de la hipoxia normobárica (respirar un aire con una proporción de oxígeno disminuido a una presión atmosférica constante) en los dominios de la VFC [Lizamore et al., 2016; Botek et al., 2015].

1.1.3. Adaptaciones de la frecuencia cardiaca

La FC es un parámetro fisiológico que permite conocer el trabajo cardiaco de un individuo. Para su medición, se suelen utilizar distintos aparatos tecnológicos no invasivos (electrocardiógrafo, pulsómetro, pletismógrafos o ecógrafos entre otros), y más recientemente con relojes inteligentes o pulseras de actividad. Esto va a tener una utilidad para la planificación y seguimiento del entrenamiento y rendimiento físico [Javaloyes et al., 2019]. Además de proteger la salud cardiovascular [Chen et al., 2018; Facioli et al., 2021].

El ejercicio físico influye de manera positiva en el sistema cardiovascular, ya que presenta una serie de desencadenantes moleculares como la liberación de sustancias vasodilatadoras (óxido nítrico), el estrés oxidativo [Moreira et al. 2020] o los marcadores de inflamación [Kleiven et al., 2019]. También, si se practica regularmente disminuye los factores clásicos de riesgo cardiovascular como son: el sedentarismo, la obesidad, la hipertensión, la hipercolesterolemia, la diabetes y el estrés [Schrader et al., 2022].

1.1.4. Paracaidismo

El paracaidismo fue definido por Cabeza et al., [1994] como: “el arte de lanzar desde un ingenio a la tierra, hombres, animales, armas o abastecimiento en condiciones que garanticen su integridad y aprovechamiento”.

Según la finalidad o el objetivo del salto, encontramos, principalmente, dos ámbitos: deportivo o militar. En el ambiente militar, es utilizado como forma de infiltración, es decir, movilizar a un grupo de personas y colocarlas en puntos estratégicos dentro de zonas de difícil acceso o combate [Dias et al., 2005].

De acuerdo con el estilo se distinguen distintos tipos de saltos. En el “salto en tándem” participan dos personas, siendo una de ellas la instructora o la experta en paracaidismo. En el ámbito militar tiene gran importancia, pues permite infiltrar a una persona que no tiene conocimientos paracaidistas ante situaciones de emergencia o ayuda como puede ser personal sanitario. Dentro del paracaidismo deportivo, destacan distintas disciplinas deportistas. El “vuelo en formación, en caída libre” se realiza en grupos de cuatro personas, saltan desde los 4000 metros realizando una secuencia de formaciones durante la caída libre (a 200 km/h), siendo el tiempo de puntuación de sólo 35 segundos [Federation Aeronautique Internationale, 2022]. El “vuelo en formación, en túnel de viento” es una disciplina reciente, siendo su reglamento igual al de formaciones en caída libre [Federation Aeronautique Internationale, 2022]. En esta disciplina se prescinde de los paracaídas y las secuencias se graban mediante cámaras instaladas dentro del dispositivo donde se realizan las formaciones, denominado túnel de viento [Florensa., 2005]. En los saltos de

“relativo de campana”, los paracaidistas realizan distintas figuras con el paracaídas abierto [Martínez-González-Moro et al., 2020]. En la modalidad de “precisión de aterrizaje”, los paracaidistas saltan en equipos de cinco desde una aeronave a 1000 metros, abriendo sus paracaídas secuencialmente, para permitir a cada competidor un aterrizaje escalonado de forma individual, sobre una diana electrónica de 16 centímetros de radio, cuyo centro tiene sólo un centímetro de radio. En esta modalidad gana quien menos centímetros suma, tras finalizar todas las rondas.

Otro tipo de saltos especiales son aquellos que se realizan en condiciones de altitud muy elevadas y, por ello, el paracaidista necesita la administración de oxígeno exógeno y una equipación específica para aguantar las extremas condiciones ambientales [Clemente-Suárez et al., 2017b]. Estos saltos son denominados como HALO (*High Altitude Low Opening*) y HAHO (*High Altitude High Opening*). En el salto HAHO el combatiente es lanzado desde un avión a alturas superiores a los 18000 pies y la apertura la realiza a alta cota al poco tiempo de saltar del avión [Clemente-Suárez et al., 2015].

1.2. Tolerancia a la hipoxia

La capacidad de respirar en ambientes de hipoxia se denomina tolerancia a la hipoxia [West., 2009]. La adaptación a respirar en ambientes de oxígeno disminuido es distinta para cada persona. Se ha evidenciado que influyen en ello distintos factores como: la edad [Puthon et al., 2017], la genética [MacInnis et al., 2016], el nivel de actividad física [Bjelica et al., 2022] y la toma de anticonceptivos orales, el ciclo menstrual o la menopausia [Richalet et al., 2020]. Por ello, para evaluar la respuesta de cada persona se realiza un test de tolerancia a la hipoxia. En el se realiza un seguimiento del nivel de saturación arterial del sujeto y, ante un descenso de la misma (sobre el 83-85%) el dispositivo interrumpe la exposición a hipoxia recuperando los valores de normalidad al volver a respirar en normoxia. Normalmente, los primeros efectos negativos a la hipoxia aparecen al disminuir el 80% de saturación arterial de oxígeno [Varis et al., 2019].

Realizar un test de tolerancia a la hipoxia resulta un paso previo importante antes de realizar sesiones de hipoxia para el tratamiento o rehabilitación de distintas patologías, así como antes de diseñar un programa con fines deportivos.

1.3. Mecánica ventilatoria e hipoxia

Hasta ahora y, como se describía anteriormente, se han identificado varios biomarcadores de susceptibilidad a la hipoxia [Dzhalilova et al., 2020]. Sin embargo, actualmente se conoce muy poco sobre cómo influye el tipo de respiración y cómo esta puede mejorar la tolerancia a la hipoxia. Tradicionalmente, es bien conocido el efecto de la respiración para reducir estados de ansiedad o estrés [Hayama et al., 2012] y la hipoxia puede ser un estímulo estresante para el organismo [Mohan., 2017].

Diversas técnicas orientales como el qiyong o el yoga [Mohan et al., 2017] y, más concretamente, el pranayama conllevan una respiración controlada [Jayawardena et al., 2020]. Se ha demostrado que la práctica del pranayama aumenta la capacidad vital forzada, disminuye la presión arterial sistólica y diastólica [Mason et al., 2013], mejora la saturación arterial de oxígeno y disminuye el estrés [Jiménez-Morgan et al., 2017]. Una forma de objetivar el efecto de la respiración controlada sobre la tolerancia a la hipoxia es la biorretroalimentación de la variabilidad de la frecuencia cardiaca [Lehrer et al., 2000].

1.4. Relación entre el paracaidismo y la hipoxia

Los saltos de alta cota (HALO-HAHO) se realizan a altitudes cercanas o superiores a los 8000 metros y se realizan en situaciones estratégicas dentro del ámbito militar para aproximaciones e inserciones lejanas, transportar equipamientos y suministros [Clemente-Suárez et al., 2015].

Este tipo de saltos requieren de una preparación muy exigente y constante, ya que son de gran dificultad por la privación de oxígeno. El riesgo de no respirar

oxígeno a más de 5500 metros supondría un fallo hipóxico casi inmediato. Esta situación desencadenaría hipoxia tisular y una serie de síntomas como: confusión, aturdimiento, cansancio, sofocos, mareos, hormigueo en la piel y alteraciones visuales [Bustamante-Sánchez et al., 2019]. La hipoxia también provoca una reducción de la memoria de trabajo, un deterioro de la toma de decisiones y efectos negativos en la actividad oculomotora [Cable et al., 2003].

Los valores del tiempo útil de conciencia (TUC) disminuyen bruscamente cuando aumenta la altitud debido a la baja presión parcial de oxígeno [Varis et al., 2019]. Es de vital importancia reconocer los síntomas de hipoxia lo más rápido posible para maximizar el TUC. En disciplinas como el paracaidismo, herramientas o técnicas que permitan la optimización de los valores de saturación arterial, puede ser fundamental ya que puede aumentar el TUC y salvar la vida de la persona.

1.5. Frecuencia cardiaca, trabajo cardiaco y paracaidismo

El paracaidismo deportivo y de exhibición conlleva una actividad física que demanda de un mayor gasto cardiaco y, por lo tanto, de FC. Durante los saltos, el paracaidista se puede enfrentar a distintas circunstancias como son: la ejecución técnica, un alto nivel de concentración, las circunstancias meteorológicas, el nivel de experiencia, la presión de la competición y del sentirse observado [Sánchez-Molina et al., 2017; Clemente-Suárez et al., 2017a; Schönfeld et al., 2017]. Esta práctica obliga a entrenar continuamente para minimizar los riesgos y obtener una mayor seguridad [Mouine et al., 2021].

1.6. La PAPEA

La Patrulla Acrobática de Paracaidismo del Ejército del Aire (PAPEA), tal y como se conoce hoy en día, se creó oficialmente el 15 de junio de 1978 [Ministerio de Defensa, 1978]. Es la más veterana de todas las Patrullas Acrobáticas del Ejército del Aire.

Desde su creación, la PAPEA ha logrado situarse y mantenerse en el top 10 de los Mejores Equipos de Paracaidismo del Mundo. En toda su historia, más de 90 hombres y mujeres han tenido el honor y el privilegio de pertenecer a esta Patrulla [Patrulla Acrobática de Paracaidismo Ejército del Aire, 2020].

La PAPEA entrena y compite en cuatro disciplinas deportivas diferentes (vuelo en formación, precisión de aterrizaje, estilo y exhibiciones), habiendo obtenido más de 90 trofeos en las distintas competiciones internacionales y campeonatos mundiales, tanto del ámbito militar como del civil (figura 2).



Figura 2. Precisión en aterrizaje.

La PAPEA se distingue por la espectacularidad de sus exhibiciones, especialmente en la ejecución de las conocidas “Maniobras de Relativo de Campana”, siendo la única Unidad Paracaidista de España instruida y autorizada a realizarlas. Destacan: el “Stack de 2” (figura 3), el “Espejo”, el “Invertido”, el “Espejo con Bandera de España”, el “Espejo de 3” (figura 4) y el “Diamante” (figura 4).



Figura 3. Stack de 2 con bandera e invertido.



Figura 4. Espejo de 3 (izquierda) y diamante (derecha).

II. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

II. JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. Justificación

En este proyecto se abordan tres temas principalmente: los cambios y la variabilidad de la frecuencia cardíaca, la hipoxia normobárica y las modificaciones del patrón ventilatorio durante la exposición a hipoxia. Todos ellos constituyen herramientas novedosas tanto para el ámbito deportivo como para el estudio de Ciencias de la Salud y, más concretamente, en la rehabilitación de ciertas patologías.

Por ello, ante la futura aplicación de estas técnicas en la rehabilitación de patologías cardíacas o respiratorias, se necesitan más estudios de investigación básica que, en relación con la exposición a hipoxia, permitan conocer las altitudes y tiempos de exposición más adecuados para cada uno de los objetivos que se pretenda.

Por su parte, la variabilidad de la frecuencia cardíaca es un instrumento no invasivo, de gran interés en la rehabilitación de distintas patologías, en el diseño de programas de entrenamiento deportivo y como método para cuantificar el trabajo cardíaco ante distintas actividades físico-deportivas.

La respiración controlada repercute en distintas características fisiológicas como la frecuencia cardíaca, la saturación arterial de oxígeno y saturación muscular de oxígeno. El control de la respiración constituye un método muy efectivo ante situaciones estresantes, por lo que puede tener implicaciones importantes ante estímulos como la exposición a hipoxia normobárica.

2.2. Hipótesis

La hipoxia normobárica y la variabilidad de la frecuencia cardiaca constituyen dos herramientas efectivas para la mejora y seguimiento del trabajo cardiorrespiratorio en paracaidistas. La tolerancia a la hipoxia se va a mejorar al realizar respiraciones diafragmáticas, lentas y controladas.

2.3. Objetivos

1. Analizar los métodos utilizados en la exposición a la hipoxia normobárica y detectar sus efectos en deportistas de resistencia.

2. Establecer las variaciones que se producen en los dominios de la variabilidad de la frecuencia cardiaca después de la exposición a hipoxia normobárica.

3. Evaluar la influencia de la respiración controlada en la tolerancia a la hipoxia en paracaidistas.

4. Obtener, analizar y comparar las frecuencias cardiacas desarrolladas durante saltos de precisión en los dos equipos profesionales de la Patrulla Acrobática Paracaidista del Ejército del Aire y del Espacio Español (PAPEA).

III.MATERIAL Y MÉTODO

III. MATERIAL Y MÉTODO

La presente tesis doctoral se compone de cuatro estudios, dando respuesta cada uno de ellos a los objetivos mencionados anteriormente. Para cada uno de ellos, se ha empleado una metodología distinta. El primer trabajo constituye una revisión sistemática publicada en la revista "*Biology*"; el segundo es un estudio prospectivo de intervención publicado en la revista "Archivos de Medicina del Deporte" y el tercer trabajo de la presente tesis doctoral ha sido enviado a la revista "*International Journal of Environmental Research and Public Health*". Finalmente, el cuarto estudio ha sido presentado al Premio Fidel Pagés Miravé que convoca el Ministerio de Defensa Español, con objeto de premiar trabajos de investigación realizados en Sanidad Militar.

3.1. Estudio 1: Revisión sistemática hipoxia normobárica en deportistas

Esta revisión se realizó siguiendo las políticas y directrices de la Colaboración Campbell para las revisiones sistemáticas, así como las "*The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*" (PRISMA) [Moher et al., 2009].

La revisión fue previamente registrada en PRÓSPERO 2020 CRD4202021109.

3.1.1. Criterios de elegibilidad

- Tipos de estudios

Se incluyeron siete ensayos controlados aleatorios (ECA) y cinco estudios cuasi-experimentales (n = 12; participantes: n = 202)

Se restringió la elegibilidad de los estudios por el idioma, pero no según su estado de publicación. Sin embargo, todos los estudios que componen esta revisión sistemática han sido publicados.

- Tipos de participantes

Se incluyeron estudios cuyos participantes eran corredores de media y/o larga distancia. Se incluyen trabajos compuestos tanto por hombres como por mujeres, y estudios que únicamente se conforman por hombres o mujeres.

- Idioma

Se incluyeron artículos publicados en inglés o español.

- Fecha de publicación

La búsqueda abarcó las fechas de publicación desde el inicio hasta diciembre de 2021.

- Criterios de exclusión

Se excluyeron los estudios que no consideraron medidas de rendimiento deportivo o parámetros hematológicos, y los estudios que incluyeron atletas con enfermedades o lesiones.

- Tipos de intervenciones

- Hipoxia en reposo o durante el ejercicio en tapiz rodante.
- Hipoxia en reposo o durante el ejercicio en cicloergómetro.
- Hipoxia normobárica intermitente o exposición prolongada a la hipoxia normobárica.

- Medidas de resultado

- Primarias:

Tiempo hasta el agotamiento.

- Secundarias:

Parámetros hematológicos.

Altitud y tiempo bajo hipoxia.

3.1.2. Fuentes de datos y estrategia de búsqueda

Se realizaron búsquedas de artículos relevantes en cinco bases de datos: PubMed, SportDiscus, Cochrane Library, Scopus y en PEDro.

Por lo tanto, sólo se utilizaron bases de datos, plataformas y fuentes fiables y revisadas por pares con herramientas de búsqueda que nos permitieran acceder a las fechas de los estudios y, por lo tanto, identificar sistemáticamente los trabajos. Se verificaron las listas de referencias de todos los estudios incluidos y las revisiones sistemáticas en busca de referencias adicionales.

Los términos utilizados para buscar en la base de datos fueron: *(normobaric hypoxia OR altitude) AND runners*.

3.1.3. Selección de estudios

Dos autores, uno de ellos el autor de la presente tesis, revisaron de forma independiente los títulos y resúmenes de todas las referencias recuperadas en Excel (Microsoft Excel 2018 para Windows). Se recuperaron los informes de estudios de texto completo para todas las citas que al menos un autor de la revisión consideró potencialmente relevantes. Dos autores de la revisión analizaron de forma independiente los artículos a texto completo, identificaron los estudios para su inclusión y registraron las razones de exclusión según los criterios descritos. Cualquier desacuerdo se resolvió mediante un debate entre los tres autores del manuscrito. El proceso de selección se detalla en un diagrama de flujo PRISMA [Moher et al., 2009].

3.1.4. Extracción y gestión de datos

Se utilizó un formulario de recopilación de datos estandarizado, realizado en Microsoft Excel 2018 para Windows. Se extrajeron las siguientes características del estudio y los datos de resultados: (i) Métodos: diseño del estudio; (ii) Participantes: número aleatorio, edad media o rango de edad de los participantes del estudio, ubicación y entorno del estudio, métodos de

reclutamiento, criterios de inclusión y exclusión, y tipo de deporte de resistencia; (iii) Intervenciones: una descripción de las características de la intervención de entrenamiento, la dosis y la duración de los programas de entrenamiento; (iv) Resultados: una descripción de los resultados primarios y secundarios de la revisión que se informaron en el ensayo, y una lista de otros resultados recogidos en el ensayo; (v) Notas: la financiación del ensayo y cualquier conflicto de intereses no tabulado de los autores del ensayo. Dos autores de la revisión extrajeron de forma independiente los datos de resultados de los estudios incluidos en hojas de cálculo de Microsoft Excel 2018, y compararon los datos para identificar cualquier discrepancia en las entradas de datos. Cualquier desacuerdo se resolvió por consenso entre doctoranda y directores.

3.1.5. Evaluación de la calidad metodológica

El análisis de la calidad metodológica de cada uno de los estudios se realizó con la Escala PEDro (tabla 1) [Maher et al., 2003]. La puntuación máxima fue de 7/10 [Julian et al., 2004; Hobbins et al., 2019] y la mínima de 3/10 [Brugniaux et al., 2006; Uryumtsev et al., 2020]. El resto de los artículos oscilaron entre 4/10 y 6/10 en su puntuación.

Tabla 1. Calidad metodológica (Escala PEDro).

APELLIDO, AÑO	Puntuación para cada uno de los ítems											P
	CE	AR	AO	CB	SC	TC	EC	SA	AIT	CEG	EPV	
Brugniaux et al., 2006	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	3/10
Burtscher et al., 2010	No	Si	No	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	5/10
Julian et al., 2004	No	No	Si	No	No	7/10						
Dufour et al., 2006	No	Si	No	Si	No	No	No	Si	Si	Si	Si	6/10
Hobbins et al., 2019	No	Si	No	Si	Si	No	No	Si	Si	Si	Si	7/10
Hoshikawa et al., 2013	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	4/10
Katayama et al., 2004	No	Si	No	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	5/10
Katayama et al., 2005	No	No	No	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	4/10
Neya et al., 2007	No	Si	No	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	5/10
Robertson et al., 2010b	No	Si	No	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	5/10
Robertson et al., 2010a	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	4/10
Uryumtsev et al., 2020	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	3/10

CE: criterios de elegibilidad fueron especificados; AR: los sujetos fueron asignados al azar a los grupos; AO: asignación oculta; CB: grupos similares al inicio en relación a los indicadores de pronóstico más importantes; SC: todos los sujetos fueron cegados; TC: todos los terapeutas que administraron la terapia fueron cegados; EC: todos los evaluadores que midieron al menos un resultado clave fueron cegados; MR: las medidas de al menos uno de los resultados clave fueron obtenidas de más del 85% de los sujetos inicialmente asignados a los grupos; AIT: se presentaron resultados de todos los sujetos que recibieron tratamiento o fueron asignados al grupo control, o cuando esto no pudo ser, los datos para al menos un resultado clave fueron analizados por "intención de tratar"; CEG: los resultados de comparaciones estadísticas entre grupos fueron informados para al menos un resultado clave; EPV: proporciona medidas puntuales y de variabilidad para al menos un resultado clave; P: puntuación.

3.2. Estudio 2: Variabilidad de la frecuencia cardiaca e hipoxia

Esta investigación es un estudio prospectivo de intervención. Los participantes fueron seleccionados bajo un criterio no probabilístico por conveniencia. Cada uno de ellos firmó el consentimiento informado de forma previa a la toma de datos. En él, se exponían los objetivos del estudio, las condiciones en las que se realizarían las mediciones, la confidencialidad y seguridad de la información obtenida. Previamente, se contó con la aprobación del Comité de Ética de Investigación de la Universidad de Murcia. En todos los casos se cumplieron los requisitos exigibles por el Código de Ética de la Asociación Médica Mundial (Declaración de Helsinki) para experimentos con seres humanos [World Medical Association., 2013].

3.2.1. Participantes

Trece sujetos conforman nuestro estudio (53.3% mujeres). La edad de los participantes estaba comprendida entre los 20 y los 29 años. No padecían ninguna enfermedad cardiaca o respiratoria previa.

Los criterios de inclusión fueron: 1) Expresar la voluntad de querer participar en el estudio habiendo comprendido los alcances del mismo, los riesgos y beneficios de la intervención, confirmando la voluntad de participar a través de la firma del consentimiento informado 2) Presentar una edad entre los 20 y 30 años. Se excluyeron a aquellos que tuvieran patologías que contraindicaran la realización de la prueba; la presencia de una temperatura corporal superior a 37°C y/o un test de anticuerpos positivo. 3) Haber pasado la enfermedad COVID-19 y no tener en el momento actual una prueba PCR negativa.

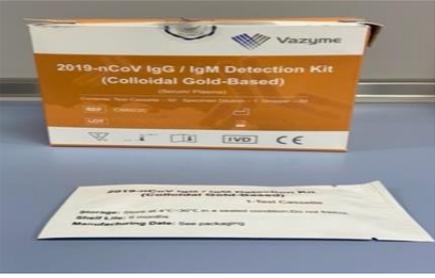
3.2.2. Instrumentos

En la tabla 2 se describen los instrumentos utilizados en la exploración previa a las sesiones de hipoxia. Para el estudio antropométrico se registró la talla (SECA 213®) y el peso (In Body 120®). El perímetro de cintura y cadera se obtuvo con una cinta metálica flexible Holtain®. La tensión arterial se evaluó

a través de un tensiómetro Omron® colocado en el brazo izquierdo del voluntario. Para la auscultación se usó un fonendoscopio Littmann Clasic®.

Además, por las circunstancias especiales a causa de la COVID-19, se tomó la temperatura mediante el termómetro digital Yuwell® y se realizó el test de anticuerpos “2019-nCoV IgG/IgM®” para descartar la presencia del virus SARS-CoV-2.

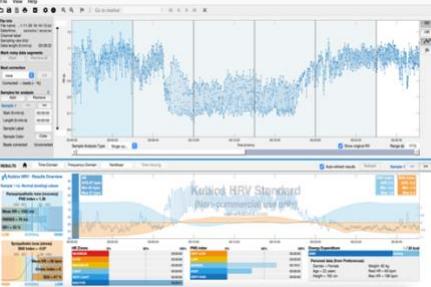
Tabla 2. Instrumentos utilizados en la exploración previa.

NOMBRE Y DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p>Termómetro digital Yuwell® y Cinta métrica Holtain®</p> <p>El termómetro mide la temperatura sin necesidad de que haya contacto con la piel. La cinta métrica mide con 1mm de precisión.</p>	
<p>Test de anticuerpos 2019-nCoV IgG/IgM</p> <p>El resultado negativo de IgM e IgG manifiesta la ausencia del virus SARS-CoV-2 causante de la enfermedad COVID-19.</p>	
<p>Tallímetro y báscula de bioimpedancia In Body® 120</p> <p>Mide un rango de estatura máxima de 205 cm con 1 mm de precisión. La báscula permite cuantificar un peso de 5 a 250 kg.</p>	
<p>Tensiómetro Omron® y fonendoscopio Littman Clasic®</p> <p>El tensiómetro se colocaba en el brazo derecho del paciente para cuantificar la tensión arterial. El fonendoscopio se utilizó en la auscultación de los sonidos cardiacos y respiratorios del cuerpo.</p>	
<p>Electrocardiógrafo Cardioline Click® ECG</p> <p>Realiza un trazado visual (ECG) de la actividad eléctrica del corazón en tiempo real, pudiendo guardar e imprimir el archivo para vistas posteriores.</p>	

ECG: electrocardiograma.

En la tabla 3 se muestran los dispositivos utilizados en la prueba de tolerancia a la hipoxia. El test de tolerancia y la sesión de entrenamiento se realizaron con un simulador de hipoxia iAltitude Trainer v2.7® conectado a una mascarilla específica. Durante ambas pruebas, a todos los participantes se les monitorizó la oxigenación muscular mediante el dispositivo Humon Hex® en el recto anterior del muslo derecho, la saturación de oxígeno con un pulsioxímetro (Nonin®) en el lóbulo de la oreja izquierda y la variabilidad de la frecuencia cardiaca con un pulsómetro Polar H10®.

Tabla 3. Instrumentos utilizados en la exposición a la hipoxia.

NOMBRE Y DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p data-bbox="411 331 746 367">Pulsómetro Polar H10®</p> <p data-bbox="258 405 900 472">Muestra la frecuencia cardiaca en latidos por minuto.</p>	
<p data-bbox="274 629 884 665">Monitor de oxígeno muscular Humon Hex®</p> <p data-bbox="258 703 900 804">Detecta el porcentaje de oxígeno muscular además de categorizarlo y asociarlo a un código de colores para una fácil comprensión.</p>	
<p data-bbox="392 931 766 967">Mascarilla y pulsioxímetro</p> <p data-bbox="258 1005 900 1173">La mascarilla cuenta con dos válvulas que permiten que el aire solo circule en una dirección de forma que siempre inhalamos aire procedente de la máquina y el CO₂ expulsado salga al exterior.</p>	
<p data-bbox="274 1234 884 1270">Simulador de hipoxia iAltitude Trainer v2.7.</p> <p data-bbox="258 1308 863 1408">Simula la disminución de oxígeno que se produce en altitudes elevadas (hasta los 6500 m).</p>	
<p data-bbox="316 1547 842 1615">Software Kubios® de análisis de la variabilidad de la frecuencia cardiaca</p> <p data-bbox="258 1653 900 1787">Permite extraer los parámetros de variabilidad de la frecuencia cardiaca de cada sujeto. Además, ofrece la posibilidad de exportar los datos en archivo PDF.</p>	

CO₂: dióxido de carbono

3.2.3. Procedimiento previo

Cada participante, después de firmar voluntariamente el consentimiento informado, se sometía a la medición de distintos parámetros antropométricos y, en segundo lugar, a una exploración médica para descartar cualquier alteración que contraindicara la realización de las pruebas. Los procedimientos previos y ambas pruebas de hipoxia se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación Biosanitaria (LAIB) de la Universidad de Murcia. La temperatura de la sala fue siempre constante, de 25°C.

Se comenzaba tomando la temperatura corporal, seguidamente se realizaba el test de anticuerpos y el estudio antropométrico. A continuación, el participante cumplimentaba un cuestionario sobre enfermedades y/o antecedentes familiares. Este era revisado por un facultativo a través de una entrevista directa.

En segundo lugar, se tomaba la tensión arterial en decúbito supino, se auscultaba y se realizaba un electrocardiograma en reposo. En la figura 5 se esquematizan las distintas fases del estudio

1. PROCEDIMIENTOS PREVIOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Toma de temperatura • Test COVID-19 	<ul style="list-style-type: none"> • Composición corporal • Auscultación
<ul style="list-style-type: none"> • ECG • Tensión arterial 	
2. PRUEBAS DE HIPOXIA NORMOBÁRICA	
2.1. TTHN	2.2. SESIÓN DE HNI
<p>Final del test: 10 min o <83% SatO₂</p> <p>Estado: ininterrumpida</p> <p>FiO₂: 0.11 (5050 m)</p> <p>Registro VFC: 5 minutos previos al inicio del TTHN y 5 minutos posteriores a la finalización del mismo.</p>	<p>Final del test: 64 min</p> <p>Estado: interrumpida (4:4)</p> <p>FiO₂: 0.14 (3250m)</p> <p>Registro VFC: 5 minutos previos al inicio de la sesión y 5 minutos posteriores a la finalización de la misma.</p>

Figura 5. Fases del procedimiento del estudio.

ECG: electrocardiograma; FiO₂: fracción inspirada de oxígeno; VFC: variabilidad de la frecuencia cardiaca; TTHN: test de tolerancia a la hipoxia; HNI: hipoxia normobárica intermitente.

3.2.4. Realización de las pruebas de hipoxia

Comprobada la inexistencia de patologías que contraindicaran la prueba, el participante se sometía a respirar un aire empobrecido de oxígeno monitorizando de manera continua su variabilidad de la frecuencia cardiaca. Se comenzaba con un test de tolerancia para comprobar la adaptación de la persona a la hipoxia para, después, realizar una sesión de exposición a la misma. En ambas pruebas, si el simulador de hipoxia detectaba valores en la saturación arterial de oxígeno inferiores a un 83% indicaba, a través de señales visuales y auditivas, la retirada de la mascarilla, respirando así en condiciones normóxicas y recuperando la concentración de oxígeno normal.

Para ambas pruebas, el participante se situaba en sedestación en un sillón, permitiéndole este el apoyo de cabeza y una flexión de cadera y rodilla de 90°. Se colocaba un rodillo de gomaespuma para el correcto apoyo lumbar, siendo una postura cómoda y relajada (figura 6). El paciente llevaba colocada una banda de pecho Polar H10®, vinculada a una tablet por conexión Bluetooth y, a través de la aplicación HRV elite®, se registraban los datos de la variabilidad.



Figura 6. Un participante realizando una prueba de hipoxia [Albertus-Cámara et al., 2022b]

3.2.5. Test de tolerancia a la hipoxia

En la posición anteriormente descrita, el paciente permanecía sentado y relajado 5 minutos antes de empezar el test de tolerancia para el registro de su VFC, en reposo y en normoxia.

Seguidamente, comenzaba el test de tolerancia. Consistía en respirar de manera ininterrumpida en condiciones hipóxicas (11% de oxígeno, equivalente a 5050 m de altitud) durante un tiempo máximo de 10 minutos (figura 7). Después de concluir el test, el sujeto seguía permaneciendo sentado para registrar los 5 minutos posteriores a la finalización del test de tolerancia.

Por tanto, se realizan dos medidas de la VFC, ambas en condiciones de normoxia. La primera muestra los cinco minutos previos a someter al sujeto al test de tolerancia a la hipoxia y, la segunda, registra los cinco minutos posteriores al finalizar dicho test.

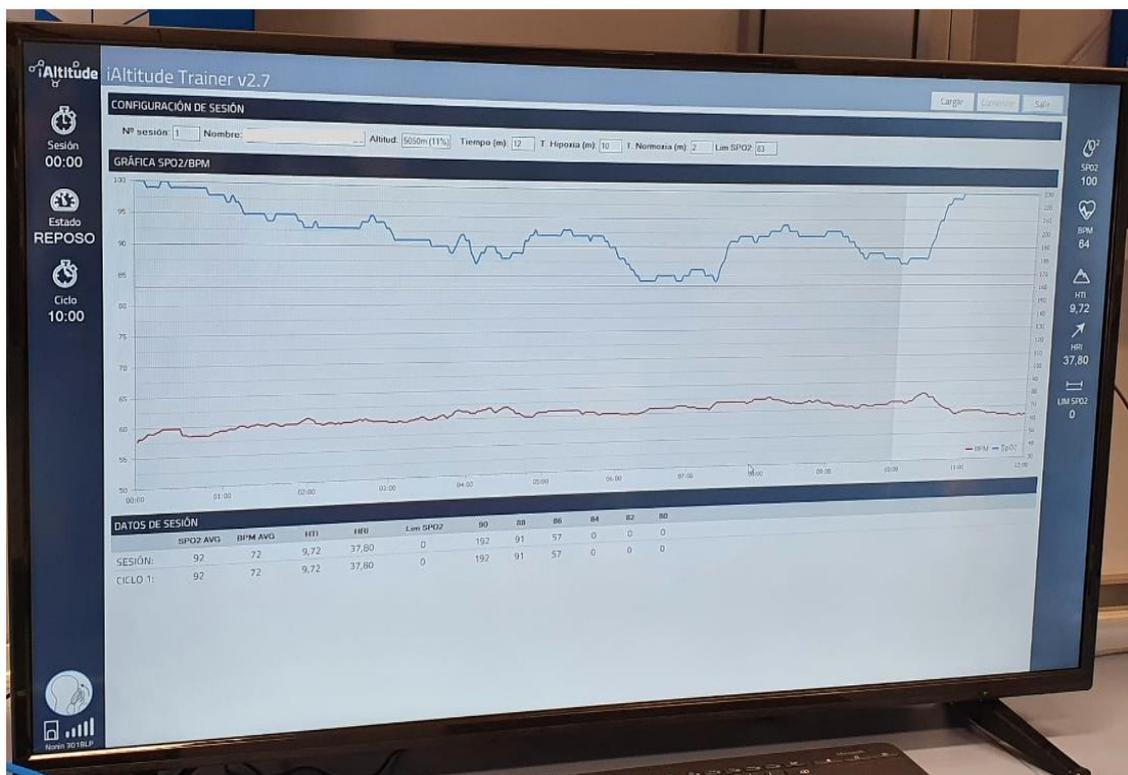


Figura 7. Registro de un test de tolerancia de un participante.

La línea de color rojo muestra la frecuencia cardiaca (latidos/minuto) y la línea azul representa el nivel de saturación parcial de oxígeno. El fondo de color gris evidencia el tiempo en hipoxia normobárica y, en color blanco, en condiciones de normoxia.

3.2.6. Sesión de exposición

Una vez finalizado el test de tolerancia, el voluntario seguía sentado en la posición anteriormente descrita para comenzar la segunda prueba de hipoxia. Se registraban los 5 minutos previos de la variabilidad de la frecuencia cardiaca. Trascurridos estos minutos, comenzaba la sesión de exposición a hipoxia intermitente. La duración de la sesión fue de 64 minutos, con un porcentaje de oxígeno del 14% (equivalente a 3250 m de altitud). El modo de aplicación es de forma interrumpida, es decir, se realizaban periodos de hipoxia (4 minutos) seguidos de periodos de normoxia (4 minutos) hasta completar la sesión, de 64 minutos de duración (figura 8). Al concluir dicha sesión se registraban los 5 minutos posteriores a la misma para analizar la VFC.

Por tanto, el registro de VFC se realizaba en dos ocasiones, ambas en condiciones de normoxia. El primer registro corresponde a los 5 minutos previos al inicio de la sesión de exposición a la hipoxia y, el segundo, inmediatamente al acabar dicha sesión. Ambos registros tenían una duración de 5 minutos de duración.

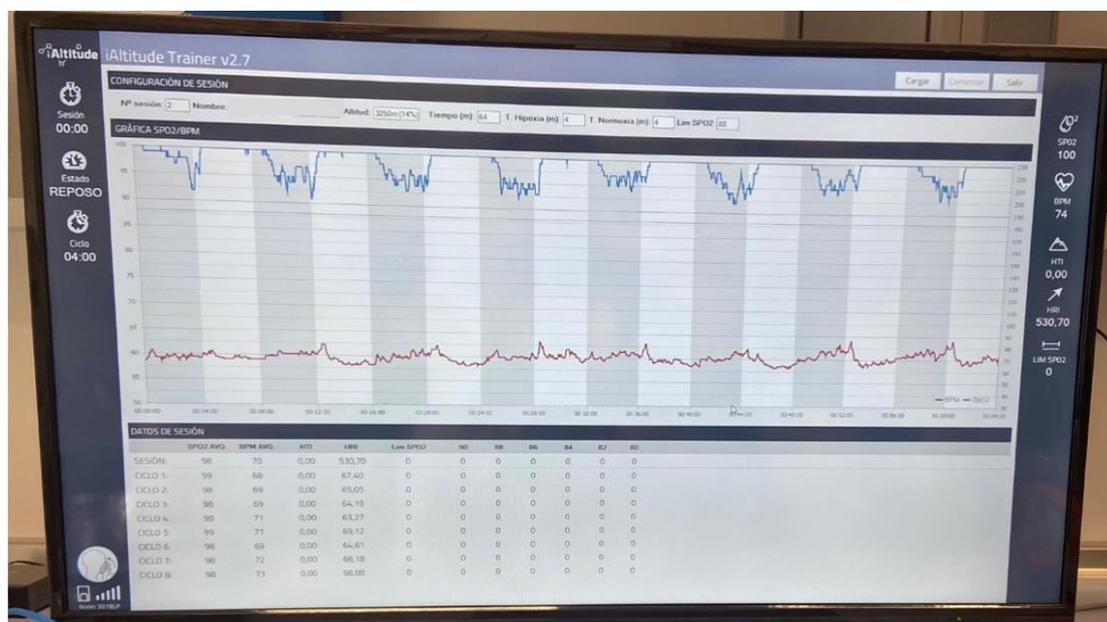


Figura 8. Registro de una sesión de entrenamiento de un participante. La línea de color rojo representa la evolución de la frecuencia cardiaca (latidos/minuto) y la línea azul muestra el nivel de saturación parcial de oxígeno. Las columnas de color gris indican los periodos de hipoxia y las de color blanco manifiestan los tiempos de normoxia, ambos de una duración de 4 minutos.

3.2.7. Descripción de dominios de la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

- Variables en el dominio temporal

En la tabla 4 se muestran las variables de dominio de tiempo y su aplicación.

Tabla 4. Descripción y aplicación de las variables temporales.

PARÁMETRO	CONCEPTO	APLICACIÓN
RR medio (ms)	Intervalo entre dos latidos (picos R en el electrocardiograma)	Muestra el valor principal de la variabilidad de la frecuencia cardíaca.
SDNN (ms)	Desviación estándar de los valores promedio de los intervalos RR registrados	Permite estratificar el riesgo de mortalidad cardiovascular
rMSSD	Raíz cuadrada de la media de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de cada RR u el adyacente	Se utiliza para observar la influencia del sistema nervioso parasimpático sobre el sistema cardiovascular.
pNN50 (%)	Porcentaje total (%) de las diferencias entre los intervalos RR adyacentes, mayores de 50ms	Un valor elevado nos proporciona valiosa información acerca de variaciones espontáneas de la FC. Está estrechamente relacionado con la actividad del SNPS.
FCmin (latidos/minuto)	Frecuencia cardíaca mínima	Valores bajos suelen relacionarse con mayor nivel de entrenamiento.
FCmáx (latidos/minuto)	Frecuencia cardíaca máxima	Se asocia con niveles de estrés elevados. [Pérez et al., 1998]
HRV triangular index	La integral del histograma del intervalo RR dividida por la altura del histograma	Predictor de la mortalidad cardiovascular [Hämmerle et al., 2020]
TINN (ms)	Anchura de la línea base del histograma del intervalo RR	Refleja la variabilidad de la frecuencia cardíaca general
Stress index, SI	La raíz cuadrada del índice de tensión de Baevsky	Valores altos de SI indican una variabilidad reducida y una elevada activación cardíaca simpática.

Información extraída y adaptada de Tarvainen et al., [2021]. SNPS: sistema nervioso parasimpático; FC: frecuencia cardíaca.

- Variables en el dominio de frecuencia

En la tabla 5 se describen las variables de dominio de frecuencia y su principal aplicación.

Tabla 5. Descripción y aplicación de las variables de dominio de frecuencia.

PARÁMETRO	CONCEPTO	APLICACIÓN
VLF (ms ²)	Muy baja frecuencia 0.003 a 0.4 Hz	Asociación con el sistema renina-angiotensina y los cambios en la volemia
LF (ms ²)	Baja frecuencia 0.04-0.15 Hz	Se relaciona con la estimulación simpática (tono simpático)
HF (ms ²)	Alta frecuencia 0.15 a 0.4 Hz	Proporcional a la profundidad de la respiración. Refleja cambios en la modulación del sistema parasimpático.
LF/HF (%)	Cociente o proporción de baja/alta frecuencia	Se puede estimar el equilibrio simpático-vagal.

Información extraída y adaptada de Tarvainen et al., [2021]; Rodas et al., [2010]

3.2.8. Procedimiento estadístico

Con los datos extraídos de las distintas aplicaciones y software informáticos, se elaboró una hoja de cálculo a través del programa Excel® y, a su vez, fueron analizados con el software estadístico SPSS® versión 24.0.

Las variables cuantitativas se describieron mediante la media y la desviación típica. Se usó el coeficiente de variación para comprobar la dispersión de los datos. Mediante la prueba de Levene se verificó la igualdad de varianzas. Las comparaciones intraindividuo se hallaron mediante el test de la T pareada y las intergrupo con el test de T Student. Se consideraba que había diferencias o relaciones significativas cuando $p < 0.05$.

3.3. Estudio 3: Mecánica ventilatoria y tolerancia a la hipoxia

3.3.1. Diseño

Todos los aspectos de este diseño de estudio cruzado se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación Biosanitaria (LAIB) de la Universidad de Murcia. Se siguieron la declaración CONSORT para ensayos clínicos aleatorios [Cobos-Carbó et al., 2011]. Este estudio recibió la aprobación del Comité de Ética de la Investigación de la Universidad de Murcia (ID: 3657/2021), de acuerdo con la Declaración de Helsinki [World Medical Association., 2013]. Los participantes firmaron un documento de consentimiento informado, pudiendo abandonar la investigación en cualquier momento.

3.3.2. Participantes

45 sujetos conformaron el estudio: 21 paracaidistas profesionales con experiencia (G1) en saltos de altura con uso de oxígeno (HALO-HAHO) y, un segundo grupo, compuesto por 24 estudiantes sanos (G2) sin experiencia en actividades hipóxicas (figura 9). El grupo de paracaidistas estaba formado por los miembros del Escuadrón de Zapadores Paracaidistas (EZAPAC) y la Patrulla Acrobática Paracaidista del Ejército del Aire y del Espacio Español (PAPEA). El estudio consta de dos grupos diferentes para analizar el efecto en dos poblaciones diferentes.

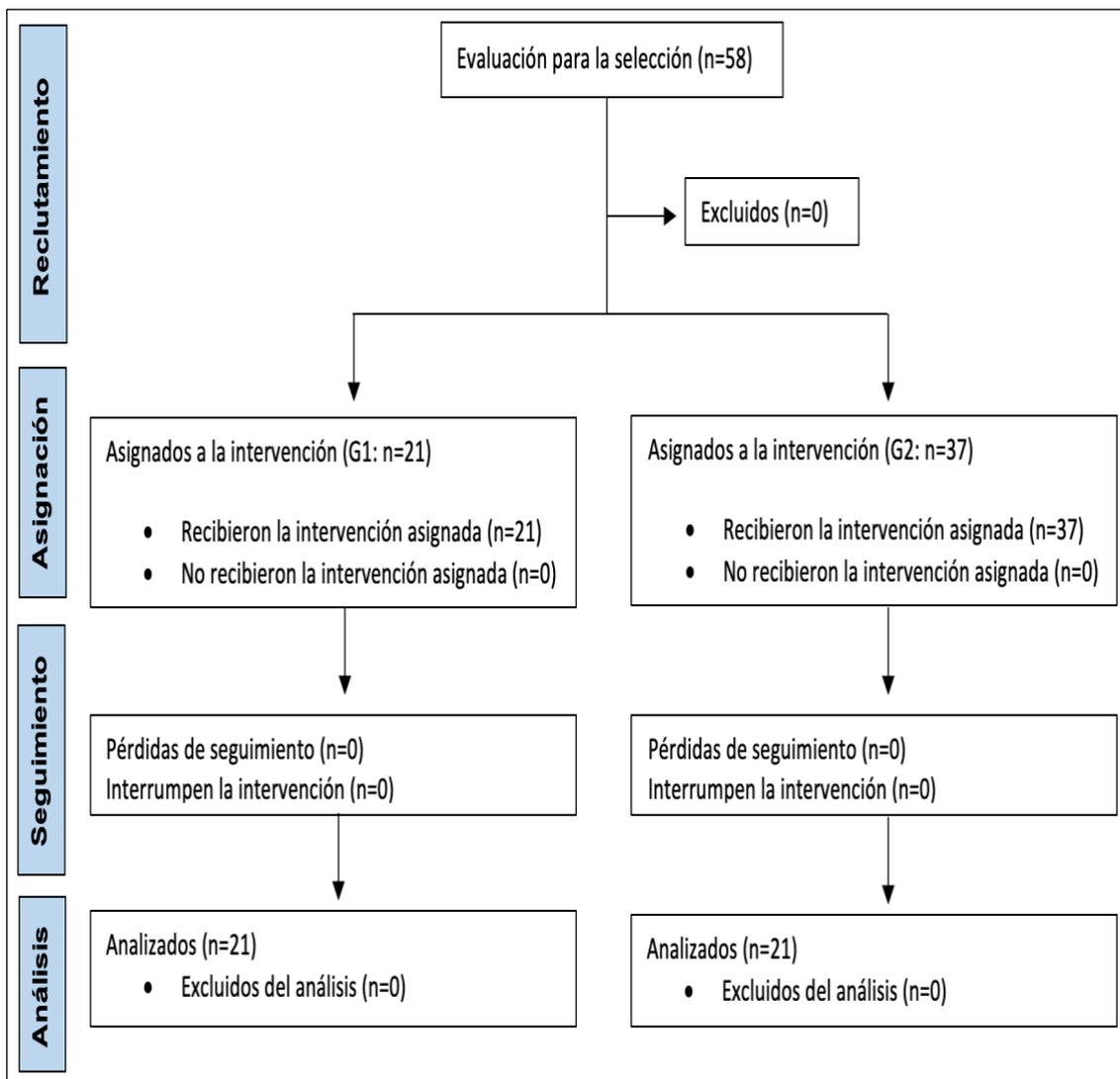


Figura 9. Diagrama de flujo de los participantes incluidos en el estudio según las directrices CONSORT [Cobos-Carbó et al., 2011].

3.3.3. Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión para el G1 fueron: ser paracaidista profesional con experiencia acreditada en saltos de altura que haya realizado actividades en hipoxia. Para el G2, se requería que fueran estudiantes sanos sin experiencia en actividades físico-deportivas relacionadas con la hipoxia (buceo, paracaidismo, montañismo, etc.).

Se excluyeron aquellos con trastornos cardíacos y/o respiratorios que contraindicaban las pruebas de hipoxia.

3.3.4. Medidas de resultado

Las medidas analizadas en el estudio fueron: porcentaje de saturación de oxígeno arterial (Nonin® modelo 3018LP), porcentaje de saturación de oxígeno muscular (Humon Hex®) y el tiempo de duración en la prueba de tolerancia a la hipoxia (simulador iAltitude® Trainer v2.7). El pulsioxímetro se colocó en la oreja izquierda del paciente y el dispositivo Humon Hex® en el centro del cuádriceps derecho siguiendo el procedimiento descrito por Paredes et al., [2021].

La altitud simulada fue de 5050 m, equivalente a una concentración de oxígeno del 11% ($FiO_2=0.11$). El simulador de hipoxia disponía de un tubo conectado a una mascarilla específica por la que circulaba aire reducido en oxígeno. Esta mascarilla contiene dos válvulas que permiten que el aire circule sólo en una dirección. De este modo, el aire se inhala siempre desde el dispositivo simulador de altitud y el dióxido de carbono se expulsa al exterior. La prueba de hipoxia se detenía cuando se alcanzaban los 10 minutos o cuando el valor de la saturación arterial de oxígeno ($SatO_2$) era inferior al 83%. En ese momento, el simulador de hipoxia emitía señales acústicas y visuales que indicaban la retirada de la mascarilla para seguir respirando en condiciones de normoxia y seguridad. Se determinó un valor de corte del 83%, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

La población se divide a lo largo del estudio en dos grupos: "completos" e "incompletos". Los "completos" son los sujetos que consiguen realizar la duración máxima de la prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica, mientras que los "incompletos" son los sujetos que no llegan a los 10 minutos en la prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica (el valor de $SatO_2$ desciende por debajo del 83%)

3.3.5. Procedimientos preliminares

Antes de iniciar la prueba de hipoxia, se realizó un examen clínico, por un médico especialista, para comprobar la ausencia de patologías cardíacas o respiratorias que contraindicasen la prueba de hipoxia.

En primer lugar, se midió la presión arterial y se auscultó al sujeto (Littmann Classic 125 III®) (tabla 6). A continuación, se realizó un electrocardiograma (Cardioline Click®) y un ecocardiograma (Clarius PA 126 HD®).

Tabla 6. Instrumentos utilizados en los procedimientos preliminares.

NOMBRE Y DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p>Báscula de bioimpedancia Omron® BF511</p> <p>Proporciona: el peso, el porcentaje de grasa corporal y de grasa visceral, el porcentaje de músculo esquelético, el metabolismo basal e IMC.</p>	
<p>Tensiómetro Omron® y fonendoscopio Littmann® Clasic</p> <p>Permite cuantificar la tensión arterial.</p> <p>Utilizado para la auscultación de los sonidos cardiacos y respiratorios del cuerpo.</p>	
<p>Ecocardiograma Clarius® PA HD₃</p> <p>Produce imágenes de ultrasonido de alta resolución y las transmite de forma inalámbrica a la mayoría de los dispositivos inteligentes. Evalúa la patología vascular con Doppler de onda de pulso</p>	
<p>Electrocardiógrafo Cardioline Click® ECG</p> <p>Realiza un trazado visual de la actividad eléctrica del corazón en tiempo real, pudiendo guardar e imprimir el archivo para vistas posteriores.</p>	

ECG: electrocardiograma.

3.3.6. Prueba de tolerancia a la hipoxia

Los participantes estuvieron sentados durante las dos pruebas de tolerancia a la hipoxia normobárica en un sillón. Se les colocó un respaldo lumbar y un reposapiés para mantener una postura correcta y confortable durante toda la prueba de hipoxia.

El paciente mantenía la máscara específica sobre su cara para respirar en condiciones de hipoxia (tabla 7). Directamente, frente a los sujetos había una pantalla que mostraba la evolución del test de tolerancia a la hipoxia normobárica (TTHN). El dispositivo trazaba una línea según los niveles de SatO_2 y otra según la frecuencia cardíaca. El sujeto podía ver el trascurso de cada TTHN a lo largo de su duración. Durante ambas pruebas se registraron los valores de saturación arterial de oxígeno y de saturación muscular de oxígeno (SmO_2). Ambos TTHN se realizaron en las mismas condiciones y a la misma altitud. La diferencia entre el primer (TTHN1) y el segundo test a la hipoxia normobárica (TTHN2) radica en la forma de respirar. En la primera prueba, los sujetos mantuvieron su frecuencia respiratoria (FR) habitual, cómoda y no forzada para cada sujeto (figura 10). No se les dio ninguna instrucción sobre cómo respirar. Tras completar el TTHN1, pasaron 15 minutos respirando en normoxia antes de comenzar la TTHN2. Para evitar la influencia de las instrucciones en la prueba de respiración libre (TTHN1), el orden de las pruebas no fue aleatorio. Los participantes desconocían los detalles de la prueba antes de la misma. Antes de comenzar el TTHN2, se explicó el tipo de respiración que se debía realizar durante esta segunda prueba de hipoxia (figura 11). Consistía en una respiración lenta, amplia y profunda, con respiraciones diafragmáticas. Se mantuvo una FR de 8-10 respiraciones por minuto. El sujeto practicó esta respiración varias veces en normoxia bajo la supervisión de la fisioterapeuta responsable. A continuación, el sujeto inició el TTHN2 manteniendo esta frecuencia y amplitud respiratoria. El personal responsable recordó periódicamente al sujeto la frecuencia respiratoria adecuada.

Tabla 7. Instrumentos utilizados en la prueba de hipoxia.

NOMBRE Y DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p data-bbox="411 344 746 376">Pulsómetro Polar H10®</p> <p data-bbox="258 416 849 483">Muestra la frecuencia cardiaca en latidos por minuto.</p>	
<p data-bbox="274 692 884 723">Monitor de oxígeno muscular Humon Hex®</p> <p data-bbox="258 763 896 864">Detecta el porcentaje de oxígeno muscular además de categorizarlo y asociarlo a un código de colores para una fácil comprensión.</p>	
<p data-bbox="392 1039 762 1070">Mascarilla y pulsioxímetro</p> <p data-bbox="258 1111 896 1279">La mascarilla cuenta con dos válvulas que permiten que el aire solo circule en una dirección de forma que siempre inhalamos aire procedente de la máquina y el CO₂ expulsado salga al exterior.</p>	
<p data-bbox="274 1386 884 1417">Simulador de hipoxia iAltitude Trainer v2.7.</p> <p data-bbox="258 1458 865 1559">Simula la disminución de oxígeno que se produce en altitudes elevadas (hasta los 6500 m).</p>	

CO₂: dióxido de carbono



Figura 10. Un paracaidista realizando el TTHN1.

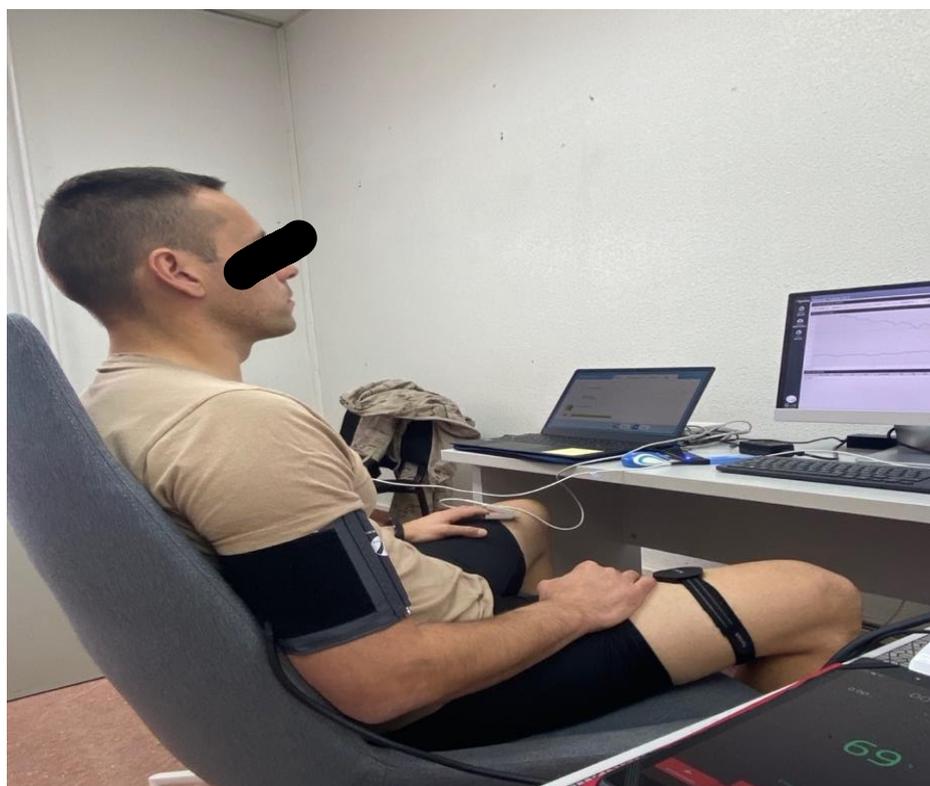


Figura 11. Un paracaidista practicando las respiraciones lentas, amplias y diafragmáticas previo al inicio del TTHN2.

En la figura 12 se resumen de forma esquemática las distintas fases del procedimiento utilizado en este estudio.

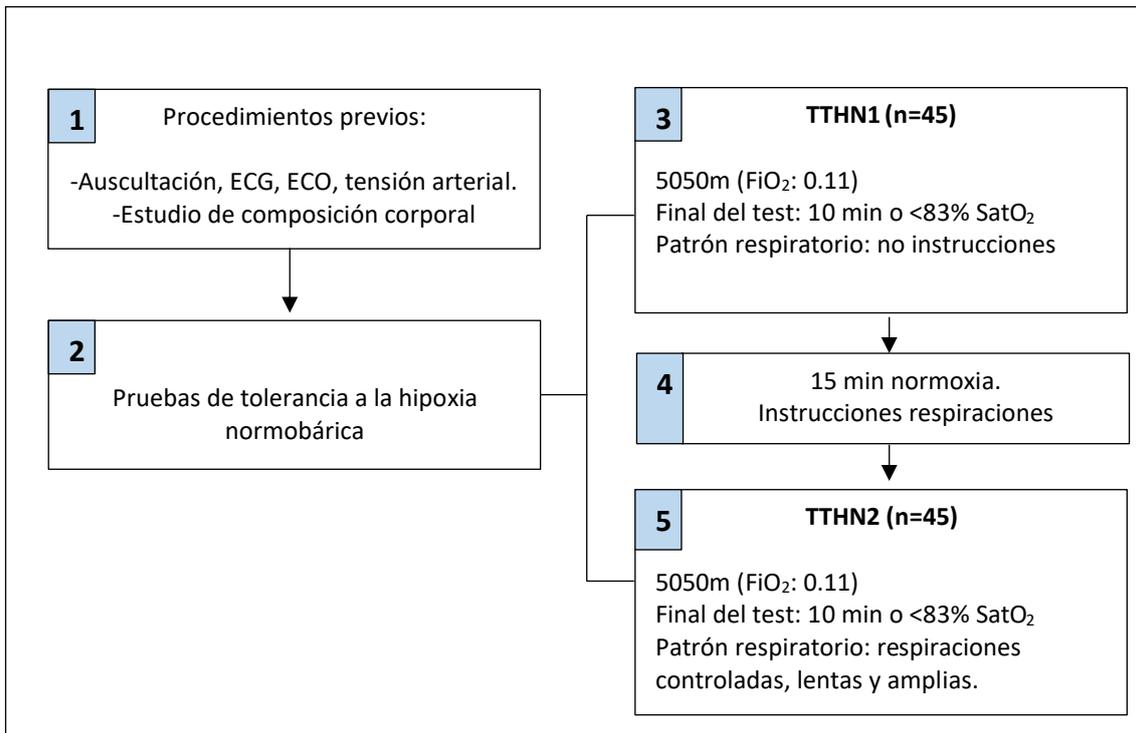


Figura 12. Fases del procedimiento utilizado en el estudio.

ECG: electrocardiograma; ECO: ecocardiograma; FiO₂: fracción de oxígeno inspirado; TTHN1: primer test de tolerancia a la hipoxia normobárica; TTHN2: segundo test de tolerancia a la hipoxia normobárica; SatO₂: saturación arterial de oxígeno.

3.3.7. Análisis de los datos

Tras descartar la presencia de errores, los datos se exportaron al paquete estadístico SPSS® versión 28 para ser analizados. Las variables cuantitativas se describieron con la media y la desviación estándar (DE) mientras que las variables cualitativas con la frecuencia absoluta y el porcentaje. La distribución normal de las variables se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la igualdad de varianzas mediante la prueba de Levene. La comparación de las medias de las variables independientes intergrupo se realizó mediante la prueba T de student, y la comparación de las medias de las variables relacionadas, se realizó mediante la prueba T emparejada. Para analizar las diferencias entre grupos se utilizó la prueba χ^2 (variables categóricas). El nivel mínimo de significación se estableció en $p < 0.05$.

3.4. Estudio 4: Frecuencia cardiaca y paracaidismo

Este trabajo es de tipo descriptivo transversal no intervencionista en el que se obtiene información de un mismo grupo de paracaidistas profesionales, componentes de la Patrulla Acrobática Paracaidista del Ejército Español del Aire y del Espacio en distintas actividades y situaciones.

Se cuenta con el informe favorable del Comité de Ética de Investigación de la Universidad de Murcia, el permiso de los mandos implicados y el consentimiento informado de los participantes, firmando el correspondiente documento. Se ha realizado teniendo en cuenta la Declaración de Helsinki, informando a todos los participantes que podían abandonar el mismo en cualquier momento sin que tuviese repercusión alguna.

Este estudio consta de dos fases: la primera se realiza en el LAIB y, la segunda, en la Base Aérea de Alcantarilla (Murcia) en la que la PAPEA realiza sus actividades.

En la primera parte se realizó un reconocimiento médico-deportivo, una valoración antropométrica y de composición corporal y una prueba de esfuerzo ergoespirométrica para determinar el comportamiento cardiaco ante esfuerzos máximos y se obtuvieron valores máximos de frecuencia cardiaca (FC_{máx}) y consumo máximo de oxígeno (VO₂_{máx}).

En la segunda fase se monitorizará la FC de cada participante recogiendo los datos de su actividad cardiaca durante varios saltos de la modalidad de precisión de aterrizaje. Posteriormente, se comparará la información obtenida en cada salto y se relacionará con la FC_{máx}.

3.4.1. Población

Han participado los ocho integrantes de los dos equipos de competición de la PAPEA del último año (PAPEA-1 y PAPEA-2).

Como criterios de inclusión se estableció formar parte activa en dichos equipos y, como criterios de exclusión, no firmar el consentimiento informado o padecer cualquier enfermedad, alteración o lesión que impida la realización de las exploraciones, pruebas o saltos paracaidistas que integran este estudio.

Con el fin de preservar el anonimato de los participantes, a cada uno se le ha asignado un número de dos dígitos, el primero indica el equipo al que pertenece y el segundo, un número aleatorio.

En la tabla 8 se muestran las características (edad, años en PAPEA, número de saltos y horas por semana de actividad física) de ambos equipos paracaidistas.

Tabla 8. Características básicas de los paracaidistas.

EQUIPO	P	EDAD	AÑOS EN PAPEA	NÚMERO SALTOS	HORAS/SEMANA
PAPEA 1	11	28	4	1200	5
	12	37	7	3000	5
	13	40	11	5500	10
	14	39	17	7500	10
	M±DE	36±5.4	9.7±5.6	4300±2767	7.5±2.8
PAPEA 2	21	36	3	1000	9
	22	34	3	2000	10
	23	32	4	1100	10
	24	26	4	1100	5
	M±DE	32±4.3	3.5±0.5	1300±469	8.5±2.3

P: paracaidista; M: media; Horas/semana: horas por semana de actividad física; DE: desviación estándar.

3.4.2. Primera fase (laboratorio)

Tras transmitir a cada participante los objetivos generales del estudio y, de forma específica, de la prueba de esfuerzo, se procedió a firmar el documento de consentimiento informado y la recogida de datos de antecedentes médicos, deportivos y paracaidistas mediante un cuestionario. Se registró datos

antropométricos (talla, peso y perímetro de cadera) y se obtuvo la masa corporal total y los porcentajes de grasa corporal y masa muscular (báscula de bioimpedancia Omron® BF511).

Como paso previo a la prueba de esfuerzo se realizó una exploración cardiorrespiratoria en reposo por un facultativo consistente en auscultación, toma de presión arterial y electrocardiograma (ECG) en decúbito supino. Seguidamente, se realizó la prueba de esfuerzo (PE) colocando 10 electrodos adhesivos en las localizaciones habituales, para recoger las derivaciones precordiales y de las extremidades. Para ello se usó el electrocardiógrafo de esfuerzo Cardioline click BT® (tabla 9). Con el fin de evitar las interferencias producidas por el movimiento de los cables durante el ejercicio, se puso a los participantes una malla en forma de camiseta (figura 13). También se colocó un pulsómetro Polar® N2965 para el envío de la información de la FC al analizador de gases y una mascarilla para la recogida del aire espirado conectada al analizador.

Tabla 9. Instrumentos utilizados en la valoración inicial (primera fase).

NOMBRE Y DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p data-bbox="300 324 861 358">Báscula de bioimpedancia InBody® 120</p> <p data-bbox="258 394 858 461">La báscula permite cuantificar un peso de 5 a 250kg.</p>	
<p data-bbox="272 638 887 705">Electrocardiógrafo de esfuerzo Cardioline® click BT</p> <p data-bbox="258 741 898 880">Realiza un trazado visual (ECG) de la actividad eléctrica del corazón en tiempo real, pudiendo guardar e imprimir el archivo para vistas posteriores.</p>	
<p data-bbox="395 960 761 994">Pulsómetro Polar® N2965</p> <p data-bbox="258 1030 847 1097">Muestra la frecuencia cardiaca en latidos por minuto.</p>	
<p data-bbox="272 1270 887 1337">Analizador Cortex® modelo MetaLyzer 3B y mascarilla específica</p> <p data-bbox="258 1395 898 1525">Permite la medición de consumo de oxígeno y generación de dióxido de carbono en pruebas de esfuerzo realizadas en bicicleta o banda ergométrica en laboratorios.</p>	

ECG: electrocardiograma



Figura 13. Preparación e inicio de la prueba de esfuerzo.

La prueba de esfuerzo se realizó sobre un tapiz rodante marca Runner® con un seguimiento continuo del trazado electrocardiográfico mediante el programa CUBE® y de la evolución del consumo de oxígeno, de la producción de dióxido de carbono (CO_2), del cociente respiratorio (RER) y de la ventilación (VE) con el analizador Cortex® modelo MetaLyzer 3B. En la figura 14 se observa a un paracaidista realizando una prueba de esfuerzo con análisis de gases y, el personal encargado, supervisando y anotando los datos evaluados.



Figura 14. Realización de una prueba de esfuerzo a un paracaidista.

Antes de comenzar la prueba se explicaba el procedimiento del protocolo a seguir.

Se realizaba un calentamiento de dos minutos a una velocidad de 6 km/h con una pendiente constante del 1% y, seguidamente, se iba aumentando de forma paulatina la velocidad de carrera un kilómetro por hora cada minuto. La prueba finalizaba cuando el participante consideraba que había llegado al agotamiento y no podía seguir corriendo, esto lo notificaba haciendo con un gesto con su mano derecha y, en ese momento, el responsable de la prueba iniciaba el periodo de recuperación.

Durante la recuperación se anotaban las cifras de presión arterial y FC en los minutos 1, 3 y 5 minutos desde el fin de la misma. También se registraba el motivo de finalización y las posibles alteraciones clínicas y electrocardiográficas en los diferentes periodos.

Se consideró que las pruebas eran máximas y válidas cuando se superaba el 85% de la frecuencia cardiaca máxima teórica (220-edad) y el RER era superior a 1.15 (Howley 1995).

Mediante el *software* del analizador de gases MetaLyzer® se obtuvo el valor del consumo máximo de oxígeno (VO₂máx) y se determinaron los umbrales ventilatorios VT1 y VT2. A partir de la evolución de la ventilación, los equivalentes ventilatorios del oxígeno y del CO₂ y de las presiones parciales de ambos. (Abeytua et al., 2019).

3.4.3. Segunda fase (saltos de precisión)

Se realizan en la Base Aérea de Alcantarilla. Consiste en la monitorización de la frecuencia cardiaca durante la realización de tres saltos por cada uno de los paracaidistas de la PAPEA (figura 15). En todos los saltos cada paracaidista porta un reloj *Smartwatch Garmin TactixDelta*®, sincronizado con un pulsómetro Polar H10®.



Figura 15. Secuencia de la llegada a la diana eléctrica en un salto de precisión.

El pulsómetro recoge latido a latido toda la actividad cardiaca y la transmite al reloj dónde se archivan los datos y posteriormente se transfieren a un ordenador con el programa “GoldenCheetah” para Windows10, versión 3.5. Este software permite extraer los datos encriptados del *smartwatch*, y analizar la frecuencia cardiaca y su variabilidad.

En la tabla 10 se describen los instrumentos y materiales utilizados para la recogida y análisis de los datos.

Tabla 10. Instrumentos utilizados en los saltos paracaidistas (segunda fase).

NOMBRE Y DESCRIPCIÓN	IMAGEN
<p data-bbox="422 320 746 351">Pulsómetro Polar H10®</p> <p data-bbox="260 394 847 454">Muestra la frecuencia cardiaca en latidos por minuto.</p>	
<p data-bbox="284 618 890 678">Reloj inteligente Smartwatch Garmin Tactix Delta®</p> <p data-bbox="260 723 895 853">Ofrece funciones tácticas especializadas, mapas, funciones de entrenamiento avanzado, altímetro y otras características para cumplir con los estándares y misiones militares.</p>	
<p data-bbox="387 949 767 981">Software Golden Cheetah®</p> <p data-bbox="260 1021 895 1151">Programa de análisis de datos de entrenamiento. Posee la posibilidad de analizar entrenamientos individuales, evolución del entrenamiento y el rendimiento del atleta.</p>	

La actividad de los paracaidistas la hemos dividido en cuatro intervalos por salto y se ha obtenido para cada uno de ellos la FC media durante el mismo; además, en el tercer intervalo (de vuelo o paracaidista en el aire) se ha recogido la su FC máxima o FC pico (tabla 11). Cada una de las FC se ha relativizado en función de la FC máxima conseguida en el laboratorio, obteniéndose el porcentaje de la misma.

Tabla 11. Variables de estudio. Frecuencias cardiacas.

FRECUENCIAS CARDIACAS	DESCRIPCIÓN
A	FC media en los tres minutos previos al embarque
B	FC media en el interior del avión. Desde el embarque hasta el lanzamiento
C	FC media durante el tiempo que está el paracaidista en el aire
D	FC pico durante el tiempo que está el paracaidista en el aire
E	FC media en los tres minutos tras el aterrizaje

Todos los saltos han sido grabados en video, mediante una cámara SONY Handycam VCHD®, por dos observadores que también fueron registrando la hora de inicio de cada fase y el momento de llegada a tierra de cada paracaidista. Los observadores se colocaron en un punto, en la zona de salto de la Base Aérea, situado en la vertical de los aviones en el momento del lanzamiento y desde el que se visualiza la pista de aterrizaje (figura 16).

Se ha sincronizado la hora del reloj de la cámara con el de los *Smartwatch* de los paracaidistas y el cronómetro de los observadores. Estos anotan la hora en la que embarcan los paracaidistas, despegar el avión, se realiza el salto y llegan a tierra.



Figura 16. Imágenes desde la zona de saltos.

Posteriormente se transfirieron los datos de cada *Smartwatch* al ordenador. Con la aplicación citada se analizó cada intervalo de tiempo relacionándolo con la frecuencia cardiaca desarrollada. A partir de estos datos se configuró una hoja de Excel® en la que se asignó una fila a cada saltador y una columna a cada variable.

En este estudio hemos considerado como variables dependientes a las frecuencias cardiacas (A, B, C, D y E) y al tiempo de duración de cada salto; como variables independientes, las de los datos obtenidos en la prueba de esfuerzo, junto a las características antropométricas de los paracaidistas.

3.4.4. Procedimiento estadístico

Una vez rellena la hoja de Excel® con todos los datos se exportó al paquete estadístico de IBM SPSS v26®. Las variables cuantitativas se describieron mediante su media, desviación típica, coeficiente de variación y valores mínimos y máximos. Las variables cualitativas mediante la frecuencia absoluta y el porcentaje. Con la prueba de Levene se verificó la igualdad de varianzas y con la Kolmogórov-Smirnov la distribución normal de las variables. Las comparaciones intraindividuo se realizaron mediante el test de T Pareada para muestras relacionadas y las comparaciones intergrupo a través del test de la T de Student para muestras independientes. Las correlaciones entre variables cuantitativas se establecieron con la prueba de Pearson. Se consideró que había diferencias o relaciones significativas cuando el valor de p era menor de 0.05.

IV. RESULTADOS

IV. RESULTADOS

4.1. Estudio 1: Revisión sistemática hipoxia normobárica en deportistas

4.1.1. Resultados de la búsqueda

La investigación inicial comprendía 158 estudios. Tras eliminar los duplicados, se revisaron 88 títulos y resúmenes de artículos. Tras este proceso, se leyeron en profundidad 19 (texto completo) y, de ellos, se incluyeron finalmente 12 para la revisión sistemática. El diagrama de flujo PRISMA ilustra el proceso de búsqueda y selección (figura 17).

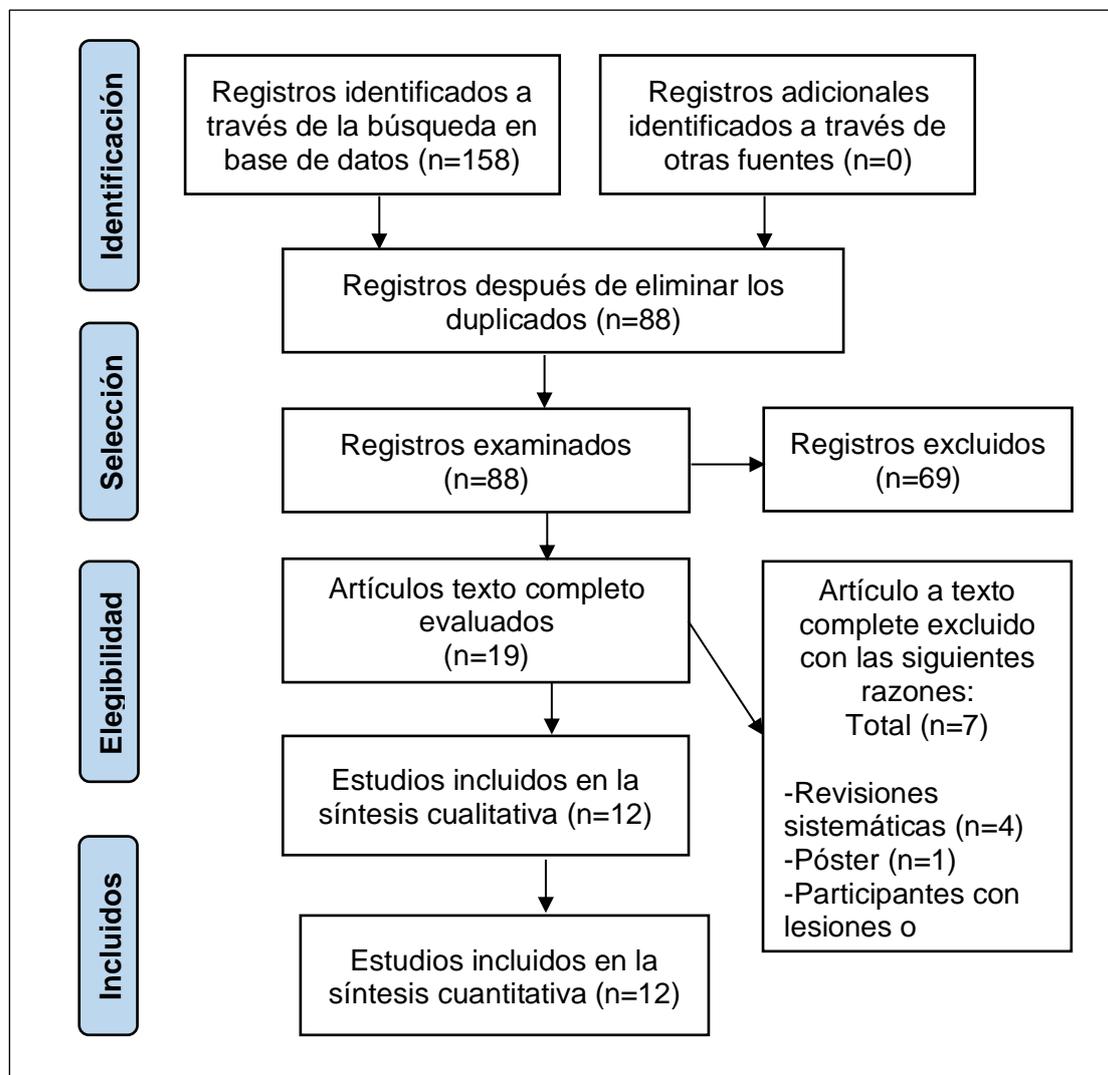


Figura 17. Diagrama de los Elementos de Información Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Meta-Análisis (PRISMA) del proceso de selección de estudios para examinar el efecto de la hipoxia normobárica en corredores.

4.1.2. Estudios incluidos

Doce estudios conformaron esta revisión sistemática (figura 18). Es importante destacar que algunos de ellos presentaban varios grupos de intervención, y que, para cada uno de estos grupos, los procedimientos implicaban diferencias; por ejemplo, en el momento del día en que se administraba la hipoxia (noche/día), en la posición (reposo y/o actividad física), o en el tiempo y la forma de administración de la hipoxia.

Sólo ocho de los estudios científicos tenían un grupo de control para sus intervenciones [Julian et al., 2004; Brugniaux.,2006; Burtscher et al., 2010; Dufour et al., 2006; Katayama et al., 2004; Katayama et al., 2005; Neya et al., 2007; Robertson et al., 2010a]. Los grupos de control de los estudios [Julian et al., 2004; Brugniaux et al., 2006; Burtscher et al., 2010; Katayama et al., 2004; Katayama et al., 2005] no recibieron la hipoxia en reposo, mientras que sus correspondientes grupos de intervención sí la recibieron. Además, los grupos de control de Neya et al., [2007] y Dufour et al., [2006] eran físicamente activos, pero con una presión inspiratoria del 20,9%, factores ambos que se consideran condiciones de normoxia.

Name, Year	n	Sex	Age	VO ₂ Max mL/kg/min	Duration	Session [Day/Week]	Intervention Moment	Sport	Sport Level
Brugniaux et al., 2006 [22]	11	M	23.5	63.3	18 days	7 days/week	-	Middle-distance runners	Elite
Butscher et al., 2010 [24]	11	M F	21.8	59.65	13 weeks	3 days/week	2 months after the end of the season	Middle-distance runners	National level
Julian et al., 2004 [20]	14	F M	25	4.9625 mL/min	4 weeks	5 days/week	-	Middle-and-long-distance runners	National level
Dufour et al., 2006 [25]	18	M	30.3	62.85	6 weeks	2 days/week	-	Long-distance runners	Local athletic teams
Hobbins et al., 2019 [21]	19	M F	33.4	-	1 week	3 days/week	-	-	-
Hoshiwaka et al., 2013 [26]	7	F	19.6	-	1 week	7 days/week	During the season	Middle-distance runners	Intercollege level
Katayama et al., 2004 [27]	15	M	22.2	-	2 weeks	7 days/week	7 weeks before the championship.	Long-distance runners	Intercollege level
Katayama et al., 2004 [28]	29	M	21.05	-	CONT ₁ : 1 week INT ₂ : 2 weeks CONT ₂ : 2 weeks	7 days/week	-	Endurance runners	Intercollege level
Neya et al., 2007 [29]	25	M	20.6	60.3	31 days	INT ₁ : 7 days/week INT ₂ : 7 days/week	-	Middle-and-long-distance runners	Intercollege level
Robertson et al., 2010 [30]	17	M F	-	65.5	3 weeks	4 days/week	-	Middle-distance runners	-
Robertson et al., 2010 [31]	16	M F	-	68.75	6 weeks	7 days/week	-	Middle-and-long-distance runners	Elite
Uryumtsev et al., 2020 [23]	20	M	21.5	-	-	-	-	Middle-distance runners	-

INT1: Group 1 of intervention; INT2: Group 2 of intervention; CONT1: control group 1; CONT2: control group 2; F: female; M: male.

Figura 18. Características de los estudios [Albertus-Cámara, 2022a].

En la figura 19 se representan los principales resultados del estudio.

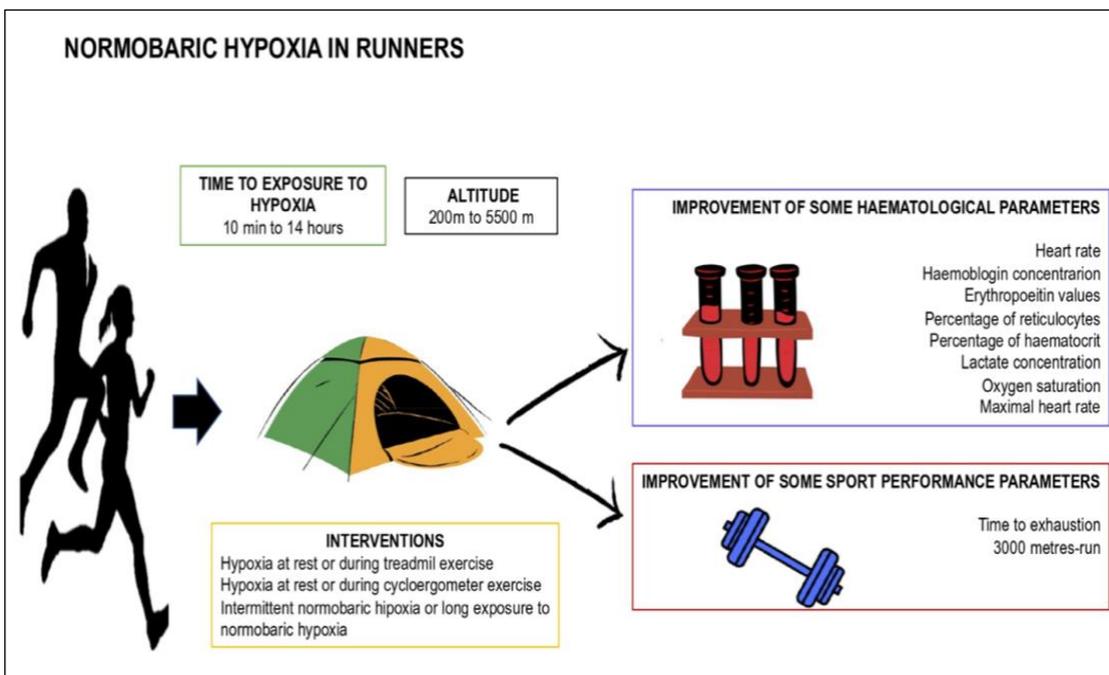


Figura 19. Representación esquemática de los resultados obtenidos [Albertus-Cámara et al., 2022a].

- Ubicación de los estudios

Los estudios tuvieron lugar en diferentes países: cuatro en Japón [Hoshikawa et al., 2013; Katayama et al., 2004; Katayama et al., 2005; Neya et al., 2007], dos en Australia [Robertson et al., 2010a; Robertson et al., 2010b], dos en Francia [Brugniaux et al., 2006; Dufour et al., 2006], uno en Estados Unidos [Julian et al., 2004], uno en Rusia [Uryumtsev et al., 2020], uno en Austria [Burtscher et al., 2010] y uno en Inglaterra [Hobbins et al., 2019].

- Tamaño de la muestra y años de los estudios

El tamaño de la muestra de cada uno de los estudios tuvo una variación de 7 a 29 sujetos. Los estudios más antiguos datan de 2004 [Julian et al., 2004; Katayama et al., 2004; Katayama et al., 2004], y los más recientes de 2020 [Uryumtsev et al., 2020].

- Duración del programa de hipoxia

La duración del programa de exposición a la hipoxia normobárica y las sesiones por semana fueron variables (figura 20). Tres de los estudios tuvieron una duración del programa de una semana [Hobbins et al., 2019; Hoshikawa et al., 2013; Katayama et al., 2005], mientras que la duración máxima fue de trece semanas, lo que ocurrió sólo en uno de los casos [Burtscher et al., 2010]. En cuanto a las sesiones por semana, la mitad de los estudios expusieron a los sujetos a la hipoxia todos los días [Brugniaux et al., 2006; Hoshikawa et al., 2013; Katayama et al., 2004; Katayama et al., 2005; Neya et al., 2007; Robertson et al., 2010a], mientras que el resto osciló entre dos y cinco sesiones por semana.

Name, Year	Exposure Type	Exposure Time	Altitude Simulated/Saturation	Administration Hypoxia	Hypoxia Moment	Other
Brugniaux et al., 2006 [22]	INT ₁ : HR (sleeping) CONT ₁ : no hypoxia	INT ₁ : 14 h/day	HR: (FiO ₂ = 6 nights at 2500 m/0.174, 12 nights at 3000 m/0.164). CONT ₁ :1200 m	Hypoxic room	-	INT ₁ and CONT trained at 1200 m normoxia
Butscher et al., 2010 [24]	INT ₁ : HR (position not described) CONT ₁ : no hypoxia	2 h session/3 times per week for 10 weeks	FiO ₂ = 15%(3200 m)-11% (5500 m)	Hypoxic room	-	-
Julian et al., 2004 [20]	INT ₁ : HR CONT ₁ : no hypoxia	5:5 min during 70 min, 5 times a week.	INT ₁ : FiO ₂ changed from week 1 to week 4, was: 0.12, 0.11, 0.10, 0.10, respectively. CONT ₁ : FiO ₂ = 0.209	Hypoxic room	1-2 h after or before exercise training	-
Dufour et al., 2006 [25]	INT ₁ : HE. Different each week; 24 to 40 min in treadmill CONT: HE	Week 3 and 6: 24 min/session Week 4 and 7: 32 min/session Week 5 and 8: 40 min/session	INT ₁ : (FiO ₂ = 14.5%) o 3000 m CONT ₁ : (FiO ₂ = 20.9%)	Facemask	-	-
Hobbins et al., 2019 [21]	INT ₁ : HE (4 × 4 min running × 3 min at rest (28 min total hypoxia) CONT ₁ : no hypoxia	28 min/session. (2 sessions)	INT ₁ : (FiO ₂ = 15% o 2700 m) CONT ₁ :(FiO ₂ = 20.9%)	Facemask	-	-
Hoshiwaka et al., 2013 [26]	INT ₁ : HR (sleeping) and HE (cyclo-ergometer and treadmill)	HR: 7 h/night (6 nights) HE: 1 h aprox/session	HR: (FiO ₂ = 16.4% or 2000 m) HE: (FiO ₂ = 14.4% or 3000 m)	HR: hypoxic room HE: (not indicated)	-	-
Katayama et al., 2004 [27]	INT ₁ : HR CONT ₁ : no hypoxia	3 h/session during 14 consecutive days.	INT ₁ : (FiO ₂ = 12.3%) CONT ₁ : no hypoxia	Hypoxic tent	-	-
Katayama et al., 2004 [28]	INT ₁ and CONT ₁ :HR (sitting) INT ₂ and CONT ₂ : HR (sitting)	INT ₁ and CONT ₁ : 3 h/day during 1 week INT ₂ and CONT ₂ : 3 h/day during 2 weeks	INT ₁ and INT ₂ : FiO ₂ = 12.3-12% CONT ₁ and CONT ₂ = normal FiO ₂ (no hypoxia)	Hypoxic tent	-	-
Neya et al., 2007 [29]	INT ₁ : HR (sleeping) INT ₂ : HE 30 min treadmill CONT ₁ : HE	INT ₁ : 10-12 h during 29 nights. INT ₂ : 30 min during 12 days CONT ₁ : no hypoxia	INT ₁ :3000 m (FiO ₂ = 0.144) INT ₂ :3000 m (FiO ₂ = 0.144)	Hypoxic room INT ₁ : 50 m ³ INT ₂ : 100 m ³	-	-
Robertson et al., 2010 [30]	INT ₁ : HE (treadmill) INT ₂ : HR y HE (treadmill)	INT ₁ : 4-5 h hypoxia in exercise/week INT ₂ : 4-5 h hypoxia in exercise/week +14 h per day 3000 m rest	HE: 2200 m HR: 3000 m	Hypoxic room	-	-
Robertson et al., 2009 [31]	INT ₁ : HR (Not described) CONT ₁ : no hypoxia	INT ₁ :14 h/day	INT ₁ :(FiO ₂ = 3000 m) CONT ₁ :resided near sea level (600 m)	Hypoxic room	-	-
Uryumtsev et al., 2020 [23]	INT ₁ : HR (sitting)	10:10 min	(FiO ₂ = 10%)	Facemask	-	-

INT1: Group 1 of intervention; INT2: Group 2 of intervention; CONT: Control group; HR: Hypoxia at rest; HE: Hypoxia during exercise.

Figura 20. Características de la hipoxia normobárica [Albertus-Cámara et al., 2022a]

- Participantes

Los niveles deportivos o profesionales a los que pertenecían las distintas poblaciones de corredores de los diferentes artículos eran muy heterogéneos (figura 18): 76 pertenecían a equipos universitarios, 18 formaban parte de un equipo de atletismo local, 25 eran corredores nacionales con la selección de Estados Unidos, 28 se consideraban de élite y había 37 participantes cuyo nivel profesional no se especificaba. La media del VO₂ máximo (ml/min/kg) no se incluyó en todos los estudios, mientras que el máximo se registró en 68.75 y el mínimo en 59.65. Todos los participantes eran corredores de media o larga distancia. Sólo tres de los estudios describieron el momento en que los participantes se sometieron al programa de hipoxia: Katayama et al. [Katayama et al., 2004] realizaron su estudio siete semanas antes del inicio de un campeonato, Hoshikawa et al., [2013] lo hicieron durante la temporada de entrenamiento, mientras que el estudio de Burstcher et al., [2010] tuvo lugar dos meses después del final de la temporada.

Las edades de los participantes oscilaban entre los 19.6 y los 33.4 años. En cuanto al género, cinco de los estudios incluían a hombres y mujeres [Julian et al., 2004; Hobbins et al., 2019; Burtscher et al., 2010; Robertson et al., 2010a; Robertson et al., 2010b], seis incluían sólo a hombres [Brugniaux et al., 2006; Urymtsev et al., 2010; Dufour et al., 2006; Katayama et al., 2004; Katayama et al., 2005; Neya et al., 2007] y en un estudio los participantes eran sólo mujeres [Hoshikawa et al., 2013].

- Intervención

Modelo de intervención

La hipoxia normobárica se administró a los participantes en dos estados: en reposo o realizando actividades físicas (Figura 20).

Algunos de los estudios incluyeron varios grupos de intervención en los que los participantes se sometieron a hipoxia normobárica en reposo y/o hipoxia

normobárica mientras realizaban actividades físicas. El estudio de Robertson et al., [2010b] presentó dos grupos de intervención: al primero se le administró la hipoxia sólo durante la actividad física, mientras que al segundo se le administró el tratamiento en ambos estados, es decir, en reposo y durante la actividad física. Del mismo modo, Neyra et al., [2007] establecieron dos grupos de intervención: al primero se le administró hipoxia en reposo y al segundo se le administró hipoxia durante la actividad física. Los estudios restantes administraron hipoxia sólo en reposo [Julian et al., 2004; Brugniaux et al., 2006; Uryumsev et al., 2020; Burtscher et al., 2010; Katayama et al., 2004; Katayama et al., 2005; Robertson et al., 2010a], sólo durante la actividad física [Hobbins et al., 2019; Dufour et al., 2006] y tanto en reposo como durante la actividad física [Hoshikawa et al., 2013].

Entre los estudios que administraron hipoxia en reposo, cuatro no explicaron la posición física específica de los participantes en el momento de la administración [Julian et al., 2004; Burtscher et al., 2010; Katayama et al., 2004; Robertson et al., 2010a]. En un grupo del estudio de Neyra et al. [2007] y en el estudio de Brugniaux et al. [2006], los participantes recibieron hipoxia mientras dormían. Las administraciones de hipoxia duraron 10-12 h/sesión y 14 h/sesión, respectivamente. En dos de los estudios, los participantes estaban sentados en una silla [Uryumstev et al., 2020; Katayama et al., 2005]. En cuanto a la forma de exposición, Uryumstev et al., [2020] realizaron una administración normobárica intermitente, con una duración de 10:10 por sesión, es decir, 10 minutos de normoxia seguidos de 10 minutos de hipoxia, mientras que Katayama et al., [2005] administraron 3 h de forma continua.

En el estudio de Robertson et al., [2010b] (segundo grupo) y de Hoshikawa et al., [2013], los participantes fueron sometidos a hipoxia en ambos estados. Este último estudio administró hipoxia normobárica a los sujetos en posición supina durante 7 h cada noche. Además, combinó ejercicios en cinta rodante y cicloergómetro para la actividad física. El segundo grupo del estudio de Robertson et al., [2010b] también utilizó la cinta rodante para realizar ejercicios en condiciones de hipoxia durante una hora aproximadamente por sesión. Sin embargo, para administrar la hipoxia en reposo, no se describió la posición exacta utilizada.

Los sujetos de los estudios de Dufour et al., [2006] y Hobbins et al., [2019], así como del segundo grupo de intervención de Neya et al., [2007] y del primer grupo de intervención de Robertson et al., [2010b] se sometieron a hipoxia normobárica mientras realizaban la actividad física, utilizando todos ellos la cinta rodante para realizar la actividad.

Programa de actividad física durante la exposición a la hipoxia normobárica

El segundo grupo del estudio de Neya et al., [2007] entrenó en una cinta de correr durante 30 minutos en cada sesión. La intensidad era del 80-90% de la frecuencia cardíaca máxima (FC_{máx}) alcanzada durante la prueba de VO₂_{máx} a nivel del mar antes de la intervención. Los sujetos comenzaron a un 80% de su FC_{máx} durante los primeros 10 minutos, y aumentaron gradualmente la velocidad durante los siguientes 20 minutos hasta alcanzar el 90% de su FC_{máx}.

La duración del ejercicio en el programa de actividad física del estudio de Dufour et al., [2006] cambió según la semana de intervención. Durante las semanas 3 y 6, los participantes corrieron durante dos períodos de 12 minutos cada uno, mientras que durante las semanas 4 y 7, la duración de cada período de carrera se incrementó a 16 minutos, y durante las semanas 5 y 8, los participantes corrieron durante dos períodos de 20 minutos cada uno.

Robertson et al., [2010] presentaron dos grupos de intervención. Durante la semana realizaron una sesión de larga duración, una sesión de duración moderada y dos sesiones de intervalos o de alta intensidad. La intensidad durante cada sesión no se describe en dos estudios [Dufour et al., 2006; Robertson et al., 2010b].

Hobbins et al., [2019] propusieron un programa HIIT (High Intensity Interval Training) durante la hipoxia. Éste consistía en cuatro sesiones de carrera de 4 minutos de duración. Entre cada una de las sesiones había un tiempo de descanso de 3 min, también en condiciones de hipoxia normobárica. La intensidad durante los primeros 30 s del HIIT fue determinada por la velocidad de carrera favorita del participante; después de 30 s, el participante indicaba un aumento o una disminución de la velocidad haciendo una señal hacia arriba o

hacia abajo con el pulgar. Cada participante estuvo en hipoxia normobárica durante 28 minutos por sesión.

El programa de entrenamiento elegido por Hoshikawa et al., [2013] consistía en cinco series de 30 s en cicloergómetro, 4 min de descanso entre ejercicios, seis periodos de 5 min de carrera a una frecuencia cardíaca de 120-180 pulsaciones por minuto y, por último, 30 min de ejercicio en cicloergómetro a 80 rpm.

- Duración de la exposición a la hipoxia por sesión y duración de la intervención

La duración de la hipoxia por sesión fue variable entre los distintos grupos de intervención, tanto en reposo como durante la actividad física. En cuanto al primer grupo (en reposo), dos estudios realizaron la exposición de forma intermitente [Julian et al., 2004; Uryumtsev et al., 2020]. Julian et al., [2004] realizaron 5:5, es decir, 5 min de hipoxia seguidos de 5 min de normoxia durante 70 min, 5 veces por semana durante 4 semanas, mientras que Uryumtsev et al., [2020] siguieron una pauta de 10:10 min en cada sesión. Este último artículo no proporciona información sobre el número de sesiones por semana ni sobre la duración total.

Entre los estudios en los que la hipoxia se realizó mientras se dormía, Neyá et al., [2007] aplicaron hipoxia durante 10-12 h a lo largo de 29 noches, Brugniaux et al., [2006] siguieron un programa de 14 h al día durante 18 días y Hoshikawa et al., [2013] administraron hipoxia 7 h al día durante 6 noches. En todos los casos, estas sesiones tuvieron lugar en noches consecutivas.

En cuanto a los estudios [Burtscher et al., 2010; Katayama et al., 2004; Katayama et al., 2005; Robertson et al., 2010a] en los que todos los participantes estaban sentados, o en los que no se especificaba la posición en el estudio, los participantes tuvieron una media de 5 h de exposición por sesión, y el programa de hipoxia duró una media de 29.4 días.

En cuanto a los grupos que se sometieron a la hipoxia mientras realizaban una actividad física, la duración media de las sesiones fue de 45 minutos y el programa de hipoxia duró una media de 19.5 días.

- Dispositivo de simulación de altitud e hipoxia

La hipoxia se generó utilizando diferentes dispositivos simuladores de altitud. Se utilizaron máscaras faciales en el 41.67% de los estudios [Burtscher et al., 2010; Dufour et al., 2006; Hoshikawa et al., 2013; Katayama et al., 2004; Robertson et al., 2010a] y se utilizaron salas hipóxicas en el 58.63% [Julian et al., 2004; Hobbins et al., 2019; Brugniaux et al., 2006; Uryumtsev et al., 2020; Katayama et al., 2005; Neya et al., 2007; Robertson et al., 2010b].

Las altitudes simuladas variaron mucho entre los estudios. En tres estudios [Julian et al., 2004; Brugniaux et al., 2006; Burtscher et al., 2010], las altitudes simuladas cambiaron durante la intervención. Los participantes del estudio de Julian et al., [2004] fueron expuestos a diferentes altitudes a lo largo de las 4 semanas de hipoxia. La primera semana la fracción de oxígeno inspirado fue de 0.12, en la segunda semana disminuyó a 0.11 y en las dos últimas semanas bajó a 0.10. Brugniaux et al., [2006] simularon una altitud de 2500 metros durante las seis primeras noches del estudio, y de 3000 metros durante las doce noches siguientes. Asimismo, Burtscher et al., [2010] variaron la altitud entre un 15% y un 11%, lo que equivale a fluctuaciones de 3200 a 5500 metros, respectivamente. Además, varios autores optaron por variar la altitud y el porcentaje de oxígeno en función de la presencia o ausencia de actividad física. Hoshikawa et al., [2013] administraron una fracción inspirada de oxígeno (FiO_2) del 16.4% en reposo y una $FiO_2 = 14.4%$ en estado activo, es decir, equivalente a 2000 y 3000 metros, respectivamente. Robertson et al., [2010b] hicieron una distinción similar, estipulando 3000 metros cuando se realiza una actividad física y 2200 metros cuando se está en reposo. Neya et al., [2007], Dufour et al., [2006] y Robertson et al., [2010] estipularon 3000 metros para los corredores. Katayama et al., [2004] y Katayama et al., [2005] administraron una fracción de oxígeno inspirado del 12.3%. Uryumtsev et al., [2020] no especificaron la altitud simulada.

4.1.3. Medidas de resultado

Las medidas de resultado fueron muy heterogéneas entre los diferentes artículos incluidos. Esto se debe a que, aunque todos los estudios administraron hipoxia normobárica a corredores de media y larga distancia, los objetivos de algunos estudios incluían resultados muy específicos. En esta revisión sistemática, clasificamos las medidas de resultado en dos grupos: medidas de rendimiento deportivo y parámetros hematológicos

- Medidas de rendimiento deportivo

Estas medidas se ejecutaron mediante pruebas de campo o de laboratorio. En este grupo incluimos el tiempo hasta el agotamiento y las pruebas de carrera de 3000 m (figura 21).

Name, Year	3000 m-Run:	Time to Exhaustion
Julian et al., 2004 [20]	Did not improve after hypoxia exposure ($p > 0.05$)	
Dufour et al., 2006 [25]		Significantly improved ($p < 0.05$)
Katayama et al., 2004 [27]	Improving trend after intervention ($p = 0.06$)	Significantly improved ($p < 0.05$)
Katayama et al., 2004 [28]		
Neya et al., 2007 [29]		The groups exposed to hypoxia trend to significance ($p = 0.07$)

Figura 21. Medidas de rendimiento deportivo [Albertus-Cámara et al., 2022a]

- Parámetros hematológicos

Este apartado incluye los siguientes parámetros: concentración de hemoglobina, concentración de lactato, porcentaje de reticulocitos, saturación de oxígeno, frecuencia cardíaca, frecuencia cardíaca máxima, porcentaje de hematocrito y valores de eritropoyetina (figura 22).

Name, Year	Maximal Heart Rate or Heart Rate	Hemoglobin Concentration	Percentage of Hematocrit	Lactate Concentration	Percentage of Reticulocytes	Erythropoietin Values	Oxygen Saturation
Brugniaux et al., 2006 [22]	HRmax: No significant difference between the groups.						
Butscher et al., 2010 [24]		Significantly increased during the 5th week in comparison to the pre-intervention data, but this improvement did not remain during weeks 8 and 13. There were no significant differences between the groups ($p > 0.05$)	Significant increase in the intervention group during the 5 weeks of training in comparison with the values obtained before starting the intervention. However, there were no significant changes when comparing the two following measures during weeks 8 and 13 with the values from pre-intervention ($p > 0.05$).				
Julian et al., 2004 [20]	No significant difference between the groups	No significant differences between the values obtained after the intervention and those obtained pre-intervention ($p > 0.05$)		No significant changes ($p > 0.05$)	Significant increase in both groups after 12 days of intervention in comparison to 10 days after finishing ($p < 0.05$)	The group exposed to hypoxia obtained a significant decrease in comparison to the value before starting ($p < 0.05$)	
Dufour et al., 2006 [25]	HR max: no significant difference between the groups			No significant changes ($p > 0.05$)			
Hobbins et al., 2019 [21]				Major increase in INT ₁ ($p < 0.05$).			Significantly smaller ($p < 0.01$) in INT ₁ group in comparison to the CONT ₁ group.

Cont.

Name, Year	Maximal Heart Rate or Heart Rate	Hemoglobin Concentration	Percentage of Hematocrit	Lactate Concentration	Percentage of Reticulocytes	Erythropoietin Values	Oxygen Saturation
Hoshiwaka et al., 2013 [26]	HR: values on the 1st night under hypoxia compared with those under normoxia indicated a significant increase after hypoxia ($p < 0.05$).						Decreased on the first night sleeping in oxygen-poor air conditions and on the sixth night (the last one of intervention), in comparison to the night in normoxia ($p < 0.05$).
Katayama et al., 2004 [27]	HR max: no differences between the groups ($p > 0.05$) HR: decreased ($p < 0.05$) after IH. Decreased (first to final night under hypoxia) ($p < 0.05$)	Any significant rise was produced in that measure after the intervention. No significant differences between groups ($p > 0.05$)	No significant difference in this outcome measure for the INT ₁ group after the hypoxia, and no significant differences between the groups ($p < 0.05$)		No significant improvements in favour of INT ₁ group, and no significant improvements found when comparing this group with the CONT ₁ group ($p < 0.05$).	No significant changes in the INT ₁ group after the exposure and no significant changes between the groups ($p < 0.05$)	
Katayama et al., 2004 [28]							INT ₂ values increased after the end of the intervention ($p < 0.05$). However, after 2 weeks the values were the same as the initial values. INT ₁ increased significantly after the end of the intervention ($p < 0.05$)

Cont.

Name, Year	Maximal Heart Rate or Heart Rate	Hemoglobin Concentration	Percentage of Hematocrit	Lactate Concentration	Percentage of Reticulocytes	Erythropoietin Values	Oxygen Saturation
Neya et al., 2007 [29]	HR: no significant differences in the INT ₁ and INT ₂ after being exposed to hypoxia ($p < 0.05$)			No significant changes ($p > 0.05$)			
Robertson et al., 2010 [30]		Compared with INT ₁ , INT ₂ had substantially higher values at week 1, 2 and 3.		No significant changes ($p > 0.05$)	INT ₂ substantially increased during weeks 1 and 3. No data for week 2. INT ₁ had no substantial changes in percent reticulocytes ($p > 0.05$).	INT ₁ had no substantial changes in percent reticulocytes.	
Robertson et al., 2010 [31]		INT ₁ had substantially higher values after block 2 than CONT ₁ . After block 1 the differences were negligible.				Significant increase in INT ₁ during days 2 and 6 of exposure, both in block 1 and 2. Even so, these effects did not remain during days 20 and 27 in either of the two blocks of the intervention.	
Uryumtsev et al., 2020 [23]	HR: NT ₁ increased significantly ($p < 0.05$) during hypoxia by 31%.						INT ₁ decreased ($p < 0.05$) during hypoxia by 21%

INT1: Group 1 of intervention; INT2: Group 2 of intervention; CONT1: Control group; EPO: erythropoietin; HR: heart; IH: intermittent hypoxia; HRmax: maximal heart rate; HR: heart rate.

Figura 22. Resultados de los parámetros hematológicos [Albertus-Cámara et al., 2022a]

4.2. Estudio 2: Variabilidad de la frecuencia cardíaca e hipoxia

4.2.1. Población

6 varones y 7 mujeres conforman la población de estudio. En la tabla 12 se describen las características de la población en general y separadas por sexo. Se evidencian diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sexos en las variables de talla, peso y contorno de cintura, obteniéndose en los varones valores superiores.

Tabla 12. Características de la población global y separada por sexo.

VARIABLE	POBLACIÓN	MEDIA	DE	CV (%)	t	Sig. (bilateral)
Edad (años)	Global (n=13)	23	2.58	11.22	-1.41	0.194
	Varones (n=6)	22.0	1.26	5.73		
	Mujeres (n=7)	23.86	3.19	13.37		
Talla (cm)	Global (n=13)	173.75	9.24	5.32	6.129	0.000*
	Varones (n=6)	182.18	4.97	2.72		
	Mujeres (n=7)	166.51	4.25	2.55		
Peso (Kg)	Global (n=13)	72.72	12.80	17.60	4.270	0.001*
	Varones (n=6)	83.21	5.27	6.33		
	Mujeres (n=7)	63.72	10.01	15.71		
C.Cintura (cm)	Global (n=13)	77.02	8.33	10.82	3.411	0.006*
	Varones (n=6)	83.21	4.99	6.00		
	Mujeres (n=7)	71.71	6.82	9.51		
C.Cadera (cm)	Global (n=13)	98.13	6.40	6.52	1.667	0.124
	Varones (n=6)	101.11	4.69	4.63		
	Mujeres (n=7)	95.57	6.87	7.19		
IMC (kg/m ²)	Global (n=13)	23.94	2.74	11.45	1.45	0.176
	Varones (n=6)	25.08	1.44	5.74		
	Mujeres (n=7)	22.97	3.30	14.37		

C.cintura: contorno de cintura; C.cadera: contorno de cadera; CV: coeficiente de variación; DE: desviación estándar; Sig. (bilateral): significación bilateral; DE: desviación estándar. * $p < 0.05$

4.2.2. Test de tolerancia a la hipoxia normobárica

Al comparar los valores de la VFC previos y posteriores a la realización del test de tolerancia no se han encontrado diferencias significativas en ninguno de los dominios: tiempo (tabla 13) y frecuencia (tabla 14).

Tabla 13. Diferencias en el componente de dominio de tiempo de la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes y después al test de tolerancia (n=13).

VARIABLES	MEDIA	SD	MD	SD DE LA MD	t	p
Inicio Mean RR	869.35	143.16	4.207	60.0367	0.253	0.805
Final Mean RR	865.14	109.06				
Inicio SDNN	73.21	21.19	-6.599	24.809	-0.959	0.356
Final SDNN	79.81	35.09				
Inicio rMSSD	50.40	23.73	1.115	11.527	0.349	0.733
Final rMSSD	49.29	24.03				
Inicio pNN50	26.09	19.76	1.562	9.444	0.596	0.562
Final pNN50	24.53	19.70				

Mean RR: media de los intervalos RR; SDNN: desviación estándar de los intervalos RR; rMSSD: raíz cuadrada de las diferencias medias al cuadrado entre intervalos RR sucesivos; pNN50: porcentaje de RR sucesivos > 50 ms; SD: desviación estándar; MD: media de las diferencias

Tabla 14. Diferencias del dominio de frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes y después al test de tolerancia (n=13).

VARIABLES	MEDIA	SD	MD	SD DE LA MD	t	p
Inicio VLF	2299.84	1664.02	-1866.11	5979.313	-1.125	0.282
Final VLF	4165.95	5925.52				
Inicio LF	2341.87	1972.07	-25.82077	1580.123	-0.059	0.954
Final LF	2367.69	2039.74				
Inicio HF	980.11	668.23	29.19838	249.249	0.422	0.68
Final HF	950.91	716.12				
Inicio LF/HF	3.05	2.45	-0.3728	1.487	-0.904	0.384
Final LF/HF	3.42	2.39				

VLF: muy baja frecuencia; HF: alta frecuencia; LF/HF: cociente de baja frecuencia entre alta; LF: baja frecuencia; SD: desviación estándar; MD: media de las diferencias.

4.2.3. Sesión de hipoxia normobárica

En la sesión de hipoxia intermitente no se obtuvo diferencias significativas al comparar los valores del dominio de tiempo previos a la intervención de HNI con los obtenidos al final de la misma (tabla 15). En el dominio de frecuencias (tabla 16) tampoco se encontraron cambios significativos ($p>0.05$).

Tabla 15. Diferencias en el de dominio de tiempo de la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes y después a la sesión de hipoxia (n=13).

VARIABLES	MEDIA	SD	MD	SD DE LA MD	t	p
Inicio Mean RR	854.55	106.70	36.47	58.58	2.157	0.054
Final Mean RR	891.02	120.05				
Inicio SDNN	81.74	35.92	-1.73	18.81	-0.319	0.756
Final SDNN	80.01	24.45				
Inicio rMSSD	47.09	23.70	0.134	8.83	0.055	0.957
Final rMSSD	47.23	17.47				
Inicio pNN50	21.48	17.06	2.25	5.44	1.436	0.179
Final pNN50	23.73	15.72				

Mean RR: media de los intervalos RR; SDNN: desviación estándar de los intervalos RR; rMSSD: raíz cuadrada de las diferencias medias al cuadrado entre intervalos RR sucesivos; pNN50: porcentaje de RR sucesivos > 50 ms; SD: desviación estándar; MD: media de las diferencias

Tabla 16. Diferencias en el dominio de frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes y después a la sesión de exposición a HNI (n=13).

VARIABLE	MEDIA	SD	MD	SD DE LA MD	t	p
Final VLF	3085.77	2073.66	349.61	3059.15	0.396	0.700
Inicio VLF	2736.16	3362.20				
Final LF	2289.60	1708.52	-213.92	1068.16	-0.694	0.502
Inicio LF	2503.52	2068.12				
Final HF	731.98	461.18	-146.22	482.91	-1.049	0.317
Inicio HF	878.19	696.04				
Final LF/HF	3.43	2.62	-0.24	1.67	-0.505	0.623
Inicio LF/HF	3.67	2.31				

VLF: muy baja frecuencia; HF: alta frecuencia; LF/HF: cociente de baja frecuencia entre alta; LF: baja frecuencia; SD: desviación estándar; MD: media de las diferencias

4.3. Estudio 3: Mecánica ventilatoria y tolerancia a la hipoxia

4.3.1. Evaluación general

Participaron 45 sujetos: paracaidistas expertos (85.7% hombres) y estudiantes sanos (54.2% hombres). Los paracaidistas tenían una media de 2259 y una mediana de 1100 saltos totales y 14.9 ± 10.3 saltos medios realizados con suministro de oxígeno. La tabla 17 muestra las características antropométricas separadas por sexo. Las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los grupos (paracaidistas y estudiantes) son evidentes.

Tabla 17. Características antropométricas y de composición corporal divididas por sexo y grupo.

SEXO	VARIABLE	GRUPO	n	MEDIA	DE	t	p
Hombres	Edad (años)	G1	18	39.2	8.6	7.423	0.000*
		G2	13	22.7	3.4		
	Talla (cm)	G1	18	178.17	7.19	2.084	0.023*
		G2	13	173.38	4.81		
	Peso (kg)	G1	18	80.13	9.85	2.585	0.008*
		G2	13	71.60	7.84		
	IMC (kg/m ²)	G1	18	25.24	2.17	1.685	0.051
		G2	13	23.83	2.48		
	MGR (kg)	G1	18	20.69	3.02	1.462	0.077
		G2	13	18.65	4.78		
Mujeres	Edad (años)	G1	3	41.7	10.7	2.901	0.049*
		G2	11	23.6	2.4		
	Talla (cm)	G1	3	167.33	9.45	0.709	0.246
		G2	11	163.56	7.89		
	Peso (kg)	G1	3	66.33	15.30	0.977	0.213
		G2	11	57.54	5.75		
	IMC (kg/m ²)	G1	3	23.47	2.87	1.224	0.122
		G2	11	21.57	2.27		
	MGR (kg)	G1	3	31.10	5.04	1.763	0.052
		G2	11	27.05	3.13		

MGR: masa grasa relativa; IMC: Índice de Masa corporal; DE: desviación estándar. * $p < 0.05$

Las características fisiológicas antes de la primera exposición a la hipoxia se muestran en la tabla 18, sin diferencias entre los grupos, excepto para la FC.

Tabla 18. Características fisiológicas basales.

VARIABLE	GRUPO	MEDIA	DE	t	p
FC (lpm)	G1	68.81	13.58	-2.159	0.018*
	G2	77.92	14.57		
Presión arterial sistólica (mmHg)	G1	124.48	14.06	-0.639	0.263
	G2	127.38	16.08		
Presión arterial sistólica (mmHg)	G1	82.00	9.83	0.687	0.248
	G2	80.04	9.29		
SatO ₂ (%)	G1	99.24	0.94	0.292	0.386
	G2	99.13	1.54		
SmO ₂ (%)	G1	63.68	6.02	0.599	0.276
	G2	61.56	14.21		

FC: frecuencia cardiaca; Lpm: latidos por minuto; mmHg: milímetros de mercurio; SatO₂: saturación arterial de oxígeno; SmO₂: saturación muscular de oxígeno; DE: desviación estándar *p<0.05.

4.3.2. Duración del test de tolerancia a la hipoxia

No hay diferencias significativas ($p>0.05$) entre la finalización de la prueba y el grupo en ninguna de las dos pruebas de tolerancia a la hipoxia normobárica. La tabla 19 muestra esta distribución según el grupo.

Tabla 19. Distribución de la población en subgrupos según la realización de la prueba.

TEST	GRUPO	TOTAL			χ^2 test	p- value
		Incompleto	Completo			
TTHN1	G1	Cuenta	13	8	21	0.111 0.739
		% dentro del supergrupo	61.9%	38.1%	100.0%	
	G2	Cuenta	16	8	24	
		% dentro del supergrupo	66.7%	33.3%	100.0%	
	Total	Cuenta	29	16	45	
		% dentro del supergrupo	64.4%	35.6%	100.0%	
TTHN2	G1	Cuenta	3	18	21	0.804 0.370
		% dentro del supergrupo	14.3%	85.7%	100.0%	
	G2	Cuenta	6	18	24	
		% dentro del supergrupo	25.0%	75.0%	100.0%	
	Total	Cuenta	9	36	45	
		% dentro del supergrupo	20.0%	80.0%	100.0%	

TTHN1: primera prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; TTHN2: segunda prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; G1: 197 paracaidistas; G2: estudiantes 198 * $p < 0.05$; χ^2 test: prueba de chi-cuadrado.

4.3.3. Saturación de oxígeno arterial y muscular en el TTHN1

La tabla 20 muestra la SatO_2 y la SmO_2 separadas por grupo y subgrupo en la primera prueba de tolerancia. Los paracaidistas (61.9%) y los estudiantes (66.7%) que no completaron el TTHN1, se observaron diferencias ($p < 0.05$) entre los valores iniciales y finales de ambos valores. En los paracaidistas (38.1%) y los estudiantes (33.3%) que sí completaron el TTHN1, se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los valores iniciales y finales de SatO_2 , pero no en la saturación de oxígeno muscular en ninguno de los dos subgrupos.

Tabla 20. Diferencias en SatO₂ y SmO₂ en la primera prueba separadas por subgrupo y grupo.

GRUPO	SUBGRUPO	VARIABLE	MEDIA	DE	t	p			
G1	Incompleto (61.9%)	SatO ₂	Inicio	99.00	1.00	26.429	0.000*		
			Final	81.77	2.42				
		SmO ₂	Inicio	65.00	6.62			3.120	0.005*
			Final	61.92	7.83				
	Completo (38.1%)	SatO ₂	Inicio	99.63	0.74	4.123	0.002*		
			Final	91.13	5.62				
		SmO ₂	Inicio	61.43	4.35			0.795	0.229
			Final	60.86	4.85				
G2	Incompleto (66.7%)	SatO ₂	Inicio	98.94	1.81	13.314	0.000*		
			Final	83.63	4.53				
		SmO ₂	Inicio	64.42	10.77			5.326	0.000*
			Final	60.92	10.33				
	Completo (33.3%)	SatO ₂	Inicio	99.50	0.76	5.000	0.001*		
			Final	90.75	4.86				
		SmO ₂	Inicio	55.83	19.28			0.863	0.214
			Final	53.50	14.10				

G1: paracaidistas; G2: estudiantes; Incompleto: sujetos que no han completado el TTHN1; Completo: sujetos que han completado el TTHN1; SatO₂: saturación arterial de oxígeno; SmO₂: saturación muscular de oxígeno; DE: desviación estándar.

*p<0.05

4.3.4. Saturación de oxígeno arterial y muscular en el TTHN2

Al analizar el comportamiento de SatO₂ y SmO₂ en la segunda prueba en los mismos subgrupos en los que hemos dividido la población, según su comportamiento en la primera prueba, observamos, como se muestra en la tabla 21, que existen diferencias significativas en los valores iniciales y finales de SatO₂ en G1 (tanto en los que completan la prueba como en los que no). En el G2 sólo se observan diferencias significativas (p<0.05) en los sujetos que han realizado la prueba incompleta. En ninguno de los grupos y subgrupos hay diferencias significativas (p>0.05) entre los valores iniciales y finales de SmO₂.

Tabla 21. Diferencias en SatO₂ y SmO₂ en la segunda prueba separadas por grupo y subgrupo.

GRUPO	SUBGRUPO	VARIABLE	MEDIA	DE	t	p			
G1	Incompleto (14.3%)	SatO ₂	Inicio	99.08	0.86	3.387	0.003*		
			Final	92.54	7.07				
		SmO ₂	Inicio	67.58	4.42			1.795	0.050
			Final	65.75	7.24				
	Completo (85.7%)	SatO ₂	Inicio	99.25	0.71	4.217	0.002*		
			Final	95.88	2.17				
SmO ₂		Inicio	64.83	5.23	0.881			0.209	
		Final	64.00	4.00					
G2	Incompleto (25%)	SatO ₂	Inicio	99.13	0.72	6.717	0.000*		
			Final	89.13	5.99				
		SmO ₂	Inicio	69.40	9.12			2.302	0.023
			Final	66.00	8.77				
	Completo (75%)	SatO ₂	Inicio	98.63	3.50	1.263	0.124		
			Final	96.00	4.11				
SmO ₂		Inicio	56.20	15.77	-1.773			0.075	
		Final	58.40	13.35					

G1: paracaidistas; G2: estudiantes; Incompleto: sujetos que no han completado el TTHN1; Completo: sujetos que han completado el TTHN1; SatO₂: saturación arterial de oxígeno; SmO₂: saturación muscular de oxígeno; DE: desviación estándar.

*p<0.05

Los valores de saturación arterial, saturación muscular y tiempo de duración de TTHN1 y TTHN2 divididos por grupos se comparan en la tabla 22. En ambos grupos (G1 y G2) hay valores significativamente ($p < 0.05$) más altos en TTHN2.

Tabla 22. Diferencias entre la primera y la segunda prueba por grupos.

GRUPO	VARIABLE	n	MEDIA	DE	t	p
G1	Tiempo TTHN1	21	7.09	2.91	-3.655	0.001*
	Tiempo TTHN2	21	9.28	2.19		
	SatO ₂ TTHN 1	21	85.33	6.02	-4.983	0.000*
	SatO ₂ TTHN 2	21	93.81	5.86		
	SmO ₂ TTHN 1	18	61.78	6.86	-4.644	0.000*
	SmO ₂ TTHN 2	18	65.89	4.17		
G2	Tiempo TTHN1	24	6.38	3.31	-3.537	0.001*
	Tiempo TTHN2	24	8.51	2.70		
	SatO ₂ TTHN 1	24	86.00	5.69	-3.560	0.001*
	SatO ₂ TTHN 2	24	91.42	6.28		
	SmO ₂ TTHN 1	16	57.94	12.51	-5.375	0.000*
	SmO ₂ TTHN 2	16	63.00	10.69		

G1: paracaidistas; G2: estudiantes; TTHN1: primera prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; TTHN2: segunda prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; SatO₂: saturación arterial de oxígeno; SmO₂: saturación muscular de oxígeno; DE: desviación estándar

*p<0.05

En la figura 23 se muestra la evolución de los dos test de tolerancia a la hipoxia en el mismo paracaidista. La figura 23a corresponde al TTHN1 y la figura 23b al TTHN2.



Figura 23a. TTHN1 de un paracaidista.

La línea superior (azul) muestra la evolución de la saturación arterial de oxígeno y la línea inferior (roja) señala el progreso de la FC. El fondo de la gráfica en color gris representa el tiempo en hipoxia y, el color blanco, el periodo de tiempo en normoxia.

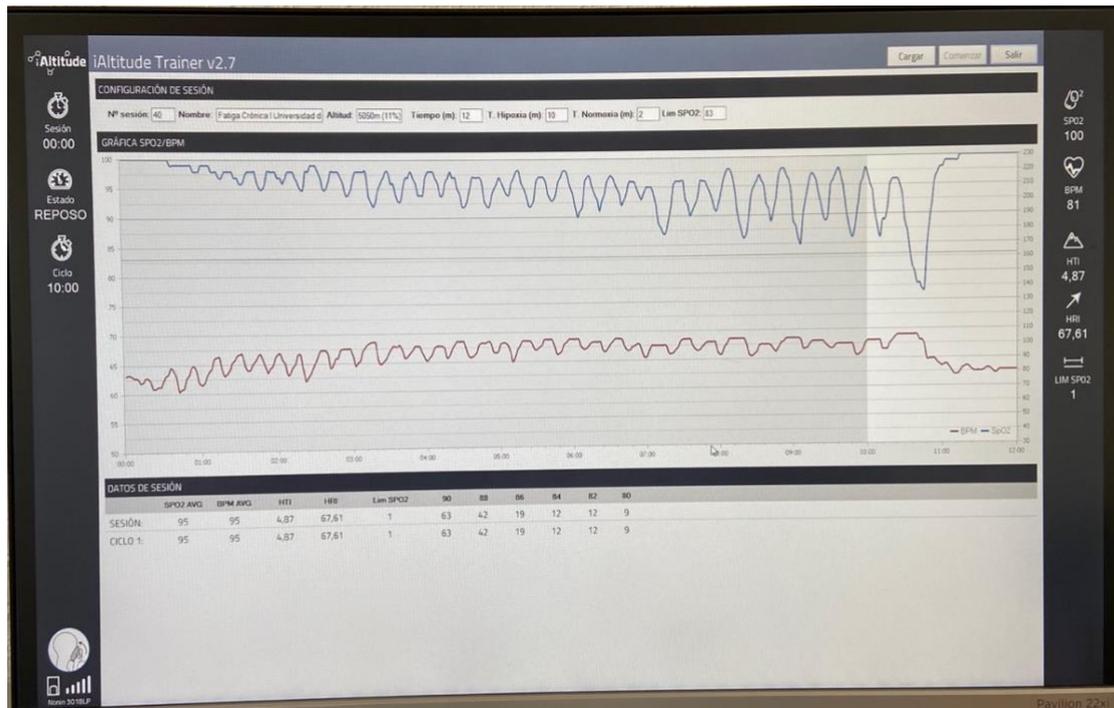


Figura 23b. TTHN2 de un paracaidista.

La línea superior (azul) muestra la evolución de la saturación arterial de oxígeno y la línea inferior (roja) señala el progreso de la FC. El fondo de la gráfica en color gris representa el tiempo en hipoxia y, el color blanco, el periodo de tiempo en normoxia.

La tabla 23 muestra la duración de la prueba y la saturación de oxígeno arterial y muscular en la primera y segunda prueba por subgrupo y grupo. En el subgrupo de sujetos que realizaron la prueba incompleta, se produjo un aumento significativo ($p < 0.05$) del tiempo y de la saturación de oxígeno muscular en ambos grupos. Una mejora significativa ($p < 0.05$) en los valores de saturación arterial sólo se evidenció en el grupo de paracaidistas, pero no en los estudiantes ($p > 0.05$). Por otro lado, los sujetos que realizaron el TTHN completo no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en los valores de saturación arterial ni en la saturación de oxígeno muscular.

Tabla 23. Diferencias entre la primera y la segunda prueba divididas en subgrupos y grupos.

SUBGRUPO	GRUPO	VARIABLE	n	MEDIA	DE	t	p
Incompleto	G1	Tiempo TTHN1	13	5.30	2.23	-4.689	0.000*
		Tiempo TTHN2	13	8.84	2.73		
		SatO ₂ TTHN1	13	81.77	2.42	-4.731	0.000*
		SatO ₂ TTHN2	13	92.54	7.07		
		SmO ₂ TTHN1	12	61.92	7.83	-4.088	0.001*
		SmO ₂ TTHN2	12	66.83	4.22		
	G2	Tiempo TTHN1	16	4.58	2.51	-4.100	0.000*
		Tiempo TTHN2	16	7.76	3.07		
		SatO ₂ TTHN1	16	83.63	4.53	-2.673	0.009
		SatO ₂ TTHN2	16	89.13	5.99		
		SmO ₂ TTHN1	11	60.64	10.79	-5.885	0.000*
		SmO ₂ TTHN2	11	66.36	8.92		
Completo	G1	SatO ₂ TTHN1	8	91.13	5.62	-2.357	0.025
		SatO ₂ TTHN2	8	95.88	2.17		
		SmO ₂ TTHN1	6	61.50	4.97	-2.712	0.021
		SmO ₂ TTHN2	6	64.00	3.69		
	G2	SatO ₂ TTHN1	8	90.75	4.86	-2.430	0.023
		SatO ₂ TTHN2	8	96.00	4.11		
		SmO ₂ TTHN1	5	52.00	15.22	-1.668	0.085
		SmO ₂ TTHN2	5	55.60	11.39		

Incompleto: sujetos que no han completado el TTHN1; Completo: sujetos que han completado el TTHN1; G1: paracaidistas; G2: estudiantes; TTHN1: primera prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; TTHN2: segunda prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; SatO₂: saturación arterial de oxígeno; SmO₂: saturación muscular de oxígeno; DE: desviación estándar. *p<0.05

La figura 24 muestra la evolución de la SatO₂ de ambos grupos en las dos pruebas. Se observa que en ambos grupos los valores de SatO₂ al inicio de la primera prueba son similares, disminuyendo más al final de la primera prueba en los que no completan el TTHN1. Al principio de la segunda prueba, los valores de los cuatro subgrupos son similares, pero al final de la segunda prueba el porcentaje de saturación arterial disminuye menos en todos ellos.

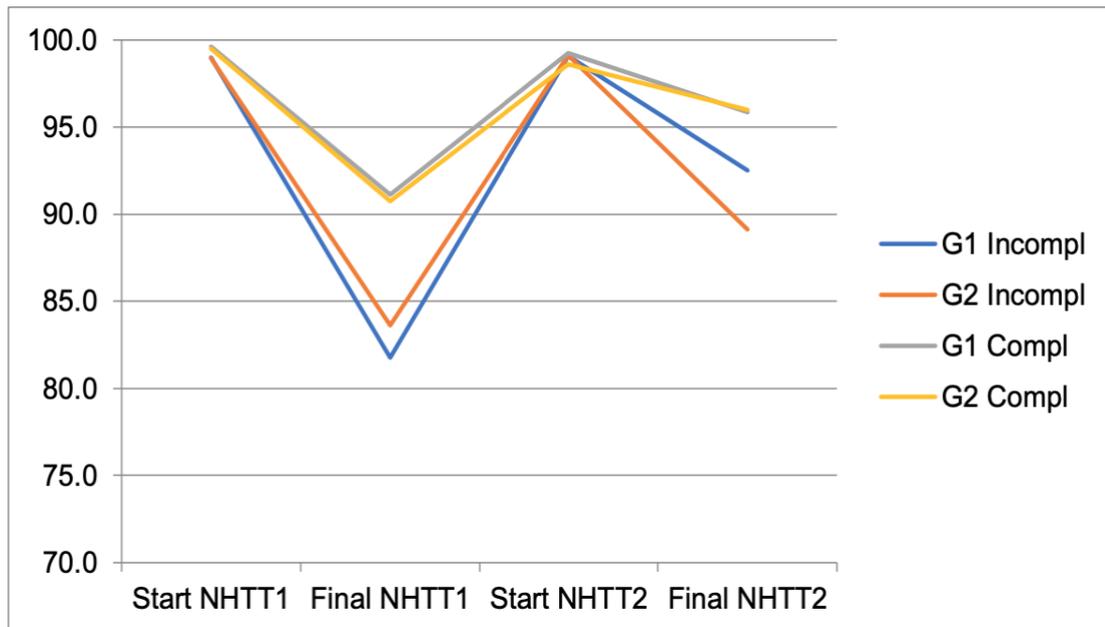


Figura 24. Evolución de la SatO₂ (%) en ambas pruebas y subgrupos. NHTT1: primera prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; NHTT2: segunda prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; G1 Incompl: grupo de paracaidistas con prueba incompleta; G2 Incompl: grupo de estudiantes con prueba incompleta; G1 Compl: grupo de paracaidistas con prueba completa; G2 Compl: grupo de estudiantes con prueba completa.

La figura 25 muestra la evolución de la SmO₂ al principio y al final de la primera y la segunda prueba. Es evidente que los valores son similares al principio y disminuyen al final de la primera prueba para los cuatro. Se observa un efecto de supercompensación al inicio de la segunda prueba, es decir, los valores al inicio de TTHN2 son más altos que al inicio de la primera prueba. Al final del TTHN2 disminuyen menos que al final del TTHN1.

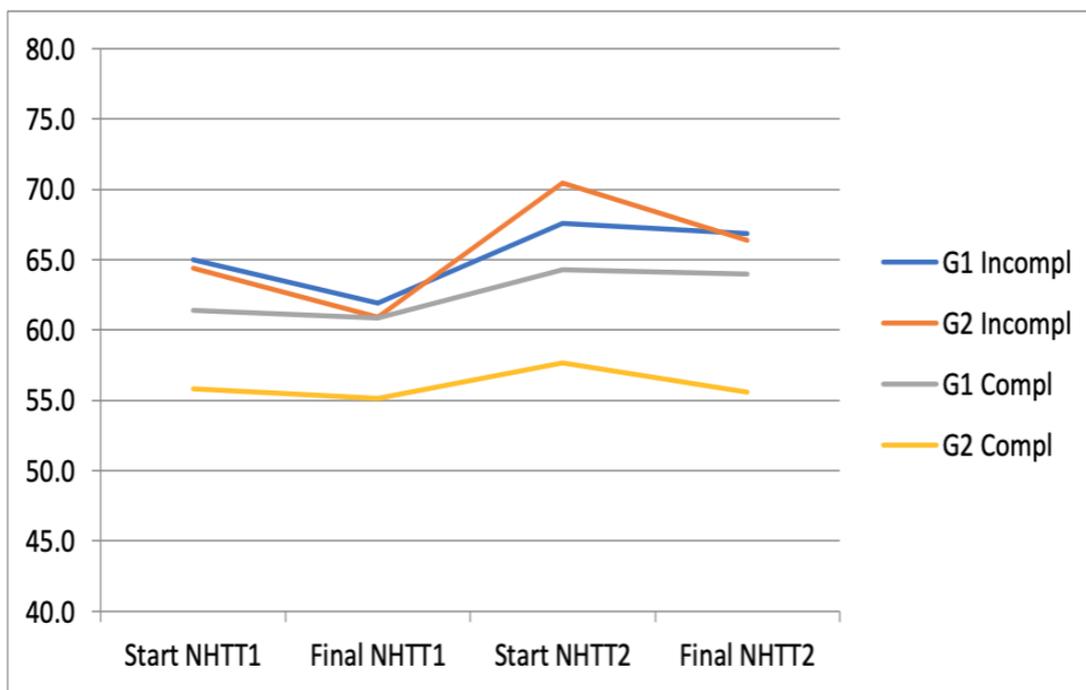


Figura 25. Evolución de la SmO₂ (%) en ambas pruebas y subgrupos.

NHTT1: primera prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; NHTT2: segunda prueba de tolerancia a la hipoxia normobárica; G1 incompl: grupo de paracaidistas con prueba incompleta; G2 Incompl: grupo de estudiantes con prueba incompleta; G1 Compl: grupo de paracaidistas con prueba completa; G2 Compl: grupo de estudiantes con prueba completa.

4.4. Estudio 4: Frecuencia cardiaca y paracaidismo

4.4.1. Valoración en el laboratorio

En la tabla 24 mostramos la comparación entre equipos de las características antropométricas. Se observa que no existen diferencias significativas en ninguna variable. El Índice de Masa Corporal (IMC), la relación cintura/talla y el porcentaje de masa grasa se encuentran por debajo de los límites considerados de riesgo cardiovascular. El porcentaje de masa muscular supera los valores de normalidad, indicando un desarrollo muscular aceptable.

Tabla 24. Comparación de las variables antropométricas y de composición corporal entre los equipos PAPEA 1 (n=4) y PAPEA 2 (n=4).

VARIABLE	EQUIPO	M	DE	t	p
Talla (cm)	PAPEA 1	176.1	7.0	0.324	0.757
	PAPEA 2	174.4	7.4		
Peso (kg)	PAPEA 1	76.0	8.2	0.846	0.451
	PAPEA 2	72.3	2.5		
IMC (kg/cm ²)	PAPEA 1	24.5	2.3	0.432	0.681
	PAPEA 2	23.8	1.9		
Perímetro de cintura (cm)	PAPEA 1	79.5	6.5	0.665	0.531
	PAPEA 2	77.0	3.5		
Perímetro de cadera (cm)	PAPEA 1	95.25	3.8	1.647	0.151
	PAPEA 2	92.00	0.8		
Relación cintura/cadera	PAPEA 1	0.83	0.0	-0.085	0.935
	PAPEA 2	0.84	0.0		
Masa grasa (%)	PAPEA 1	13.60	5.6	-0.491	0.641
	PAPEA 2	15.05	1.8		
Masa muscular (%)	PAPEA 1	50.84	5.6	0.541	0.608
	PAPEA 2	49.02	3.7		

M: media; DE: desviación estándar.

La exploración cardio-respiratoria en reposo fue normal en todos los paracaidistas. Ninguno presentó ruidos anormales en la auscultación pulmonar, con un murmullo vesicular conservado. Tampoco se oyeron soplos ni ruidos patológicos en la auscultación cardiaca. Todos los electrocardiogramas en decúbito se consideran compatibles con la normalidad. Los datos referentes a la frecuencia cardiaca basal y a las cifras de presión arterial se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Datos de la exploración cardiovascular en reposo.

PARACAIDISTA	FC DECÚBITO	TAS	TAD	ECG
11	67	128	61	Normal
12	71	132	65	Normal
13	65	130	65	Bloqueo incompleto rama derecha
14	45	145	75	Bradicardia sinusal
22	76	130	65	Normal
21	61	129	68	Normal
23	80	135	70	Normal
24	69	131	64	Normal

FC: frecuencia cardiaca; TAS: presión arterial sistólica; TAD: presión arterial diastólica; ECG: electrocardiograma

Las medias y desviaciones típicas de las frecuencias cardiacas máximas teóricas (220-edad) de cada grupo, las de las máximas en test de esfuerzo en el laboratorio y el porcentaje entre ellas se recogen en la tabla 26. Además, comparamos los valores medios del VO_2 máx, y las frecuencias cardiacas de aparición de cada uno de los umbrales ventilatorios de ambos equipos, no observándose diferencias significativas entre ellos.

Tabla 26. Diferencias de FC entre los equipos.

VARIABLE	EQUIPO	MEDIA	DE	t	p
FC máxima teórica	PAPEA 1	184	5.5	0.324	0.757
	PAPEA 2	188	4.3		
FC máxima (lat/min)	PAPEA 1	183.5	4.4	0.846	0.451
	PAPEA 2	184.3	6.6		
Porcentaje FCmáx (%)	PAPEA 1	99.8	2.8	0.432	0.681
	PAPEA 2	98.0	3.6		
VO ₂ máx (ml/Kg/min)	PAPEA 1	51.5	6.8	0.405	0.699
	PAPEA 2	53.5	7.2		
VT1 (lat/min)	PAPEA 1	134.8	3.7	0.388	0.722
	PAPEA 2	139.0	21.6		
VT1 (% FCmáx)	PAPEA 1	72.7	2.3	0.447	0.883
	PAPEA 2	75.0	10.0		
VT2 (lat/min)	PAPEA 1	166.8	8.4	0.972	0.369
	PAPEA 2	171.8	5.9		
VT2 (% FCmáx)	PAPEA 1	90.5	3.0	1.447	0.198
	PAPEA 2	92.9	1.6		

DE: desviación estándar; VT1: umbral ventilatorio 1; VT2: umbral ventilatorio 2; FCmáx: frecuencia cardíaca máxima.

Tras la prueba de esfuerzo de gases espirados durante la misma. Se ha visualizado la curva de la producción VO₂ en función del tiempo de ejercicio, hasta la consecución del VO₂máx. Determinándose de forma gráfica los puntos de aparición de los umbrales ventilatorios 1 (VT1) y 2 (VT2). En la figura 26, se muestra un ejemplo de las gráficas que genera el analizador de gases para el VO₂máx y de los umbrales mediante los métodos de seguimiento de equivalentes ventilatorios y de las presiones parciales. De cada umbral se selecciona la FC en la que aparece y su porcentaje con respecto a la FC en la que se obtiene el VO₂max (FCmáx).

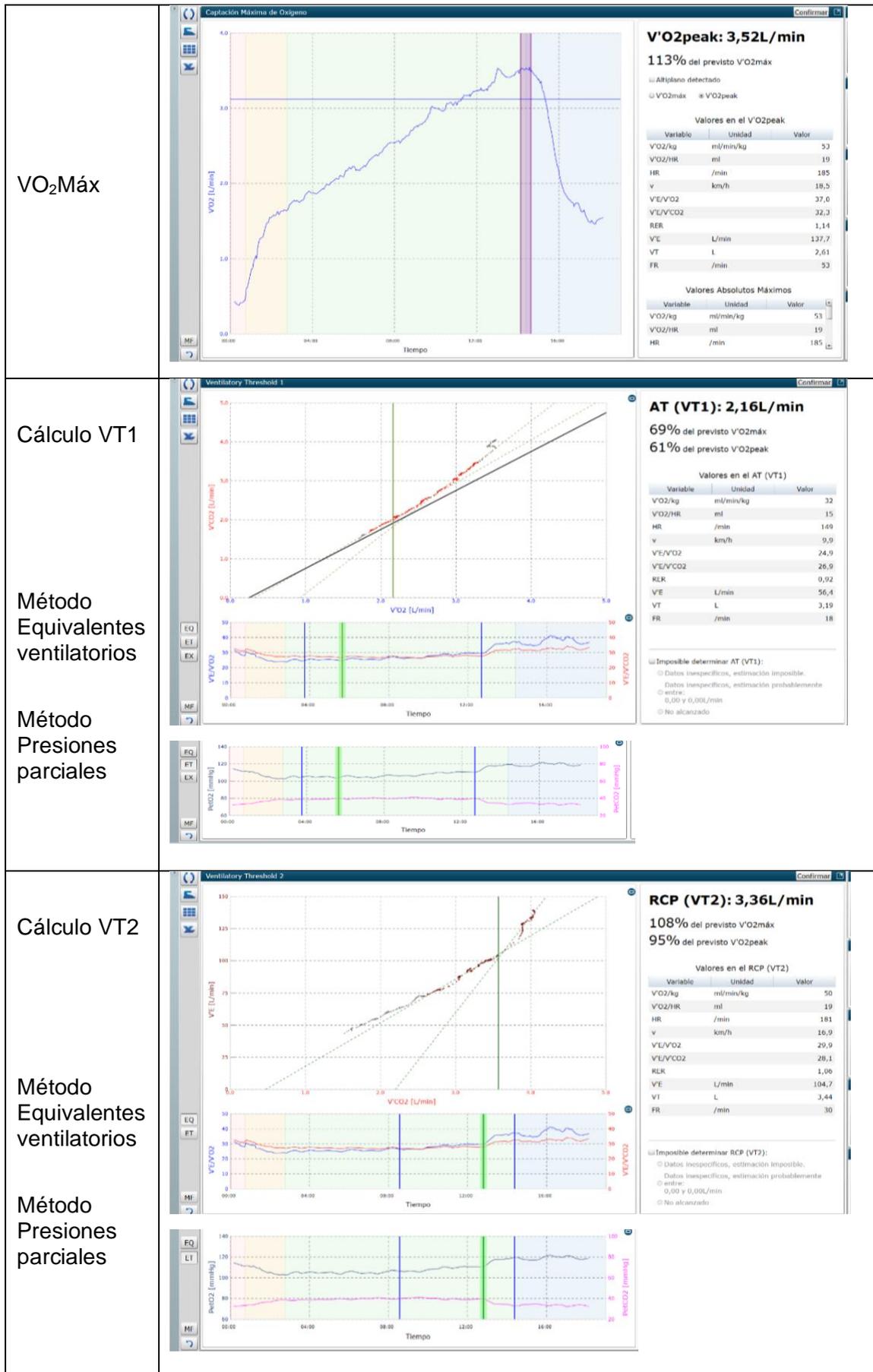


Figura 26. Gráficas del VO₂máx y determinación de VT1 y VT2.

4.4.2. Saltos de precisión

En la tabla 27 se recogen los tiempos de vuelo y las FC en cada fase, de cada paracaidista y salto. Destacamos que, en todos los paracaidistas, el salto en el que se obtiene la FC_{máx} más elevada, durante el vuelo (D), es en el tercero. Solo un paracaidista (el número 23) supera los 150 latidos/minutos en los tres saltos.

Tabla 27. Tiempo de vuelo y FC por paracaidista y salto.

FRECUENCIAS CARDIACAS (lat/min)							
Paracaidista	Salto	Tiempo (min)	A	B	C	D	E
11	1	3.03	83	72	106	140	108
	2	2.97	91	107	95	101	80
	3	2.83	104	93	133	150	115
12	1	2.67	88	86	120	133	128
	2	2.65	85	84	125	125	106
	3	2.45	96	89	129	141	128
13	1	3.03	61	71	106	117	91
	2	2.42	88	78	119	135	109
	3	1.97	92	85	121	136	108
14	1	3.33	60	67	78	106	75
	2	3.55	78	72	78	111	82
	3	3.4	75	68	91	121	96
22	1	3.7	97	87	129	136	121
	2	3.98	108	112	134	143	130
	3	3.43	105	97	132	147	115
23	1	3.03	101	92	140	157	120
	2	2.72	110	106	147	163	126
	3	2.93	113	103	148	160	122
24	1	2.65	104	96	130	139	124
	2	1.75	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
	3	2.48	103	100	123	144	112

A: FC media en los tres minutos previos al embarque; B: FC desde el embarque hasta el lanzamiento; C: FC media durante el tiempo que está el paracaidista en el aire; D: FC media en los tres minutos tras el aterrizaje; FC: frecuencia cardiaca; lat/min: latidos por minuto.

La comparación, entre saltos, de las FC medias alcanzadas por cada paracaidista en la fase de vuelo (C) las mostramos en la figura 27. Se observa que uno solo de ellos mantiene esta FC por debajo de los 80 latidos por minuto.

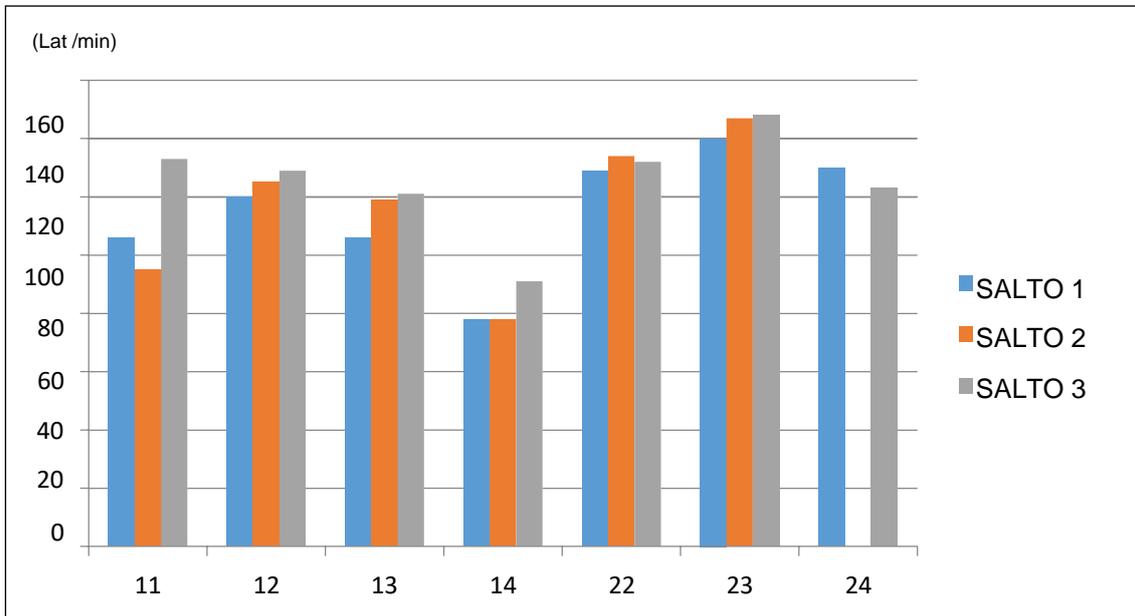


Figura 27. FC medias (C) de cada paracaidista y salto de precisión.

En la figura 28 se observan las frecuencias cardiacas pico durante el vuelo (D) de cada paracaidista y salto. En la mayoría de ellos se aprecia la tendencia a aumentarla FC en cada salto.

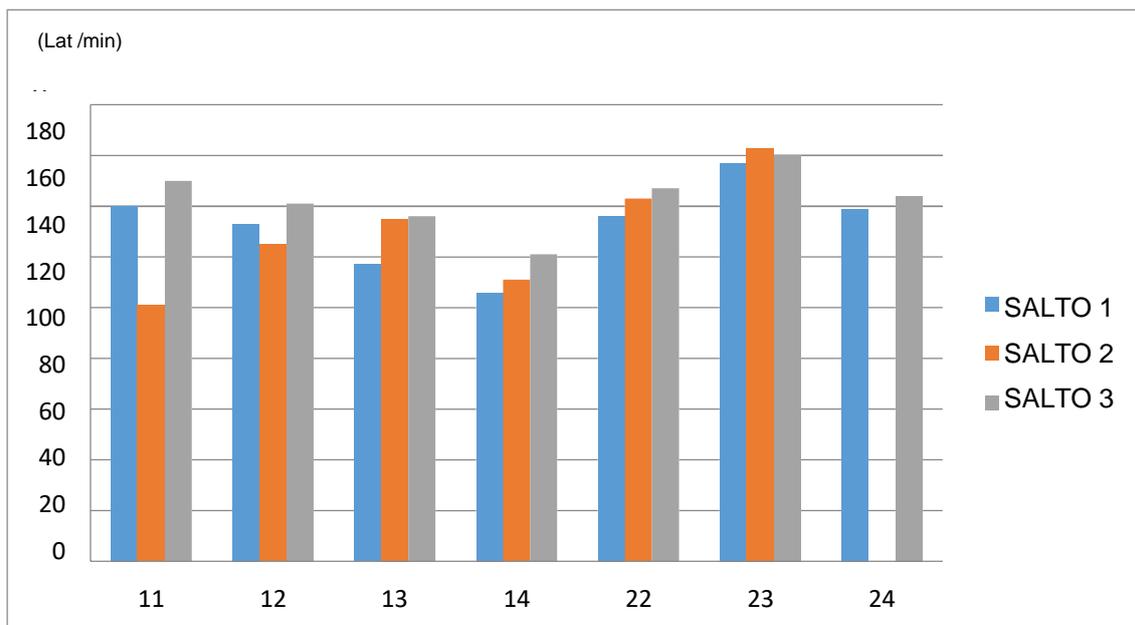


Figura 28. Frecuencias cardiacas (D) de cada paracaidista y salto de precisión.

La tabla 28 muestra la comparación de las medias de las FC entre los dos equipos de PAPEA. Se evidencia que en aquellas FC con diferencias significativas ($p < 0.05$), PAPEA 1 presenta valores más bajos que PAPEA 2.

Tabla 28. Comparación de las FC (lat/min) entre equipos.

SALTO	F	EQUIPO	MEDIA	DE	t	p
Precisión 1	A	PAPEA 1	73.0	14.6	-3.656	0.028*
		PAPEA 2	100.7	3.5		
	B	PAPEA 1	74.0	8.3	-3.293	0.022*
		PAPEA 2	91.7	4.5		
	C	PAPEA 1	102.5	17.6	-3.216	0.034*
		PAPEA 2	133.0	6.1		
	D	PAPEA 1	124.0	15.4	-1.882	0.119
		PAPEA 2	144.0	11.4		
	E	PAPEA 1	100.5	22.8	-1.568	0.178
		PAPEA 2	121.7	2.1		
Precisión 2	A	PAPEA 1	85.5	5.6	-5.198	0.003*
		PAPEA 2	106.3	4.7		
	B	PAPEA 1	85.3	15.3	0.396	0.708
		PAPEA 2	72.7	63.0		
	C	PAPEA 1	104.3	21.8	0.256	0.808
		PAPEA 2	93.7	81.4		
	D	PAPEA 1	118.0	15.0	0.365	0.730
		PAPEA 2	102.0	88.9		
	E	PAPEA 1	94.3	15.4	0.206	0.855
		PAPEA 2	85.3	73.9		
Precisión 3	A	PAPEA 1	91.8	12.2	-1.987	0.104
		PAPEA 2	107.0	5.3		
	B	PAPEA 1	83.8	11.0	-2.438	0.059
		PAPEA 2	100.0	3.0		
	C	PAPEA 1	118.5	19.0	-1.237	0.271
		PAPEA 2	134.3	12.7		
	D	PAPEA 1	137.0	12.1	-1.612	0.168
		PAPEA 2	150.3	8.5		
	E	PAPEA 1	111.8	13.4	-0.553	0.604
		PAPEA 2	116.3	5.1		

DE: desviación estándar. A: FC media en los tres minutos previos al embarque; B: FC desde el embarque hasta el lanzamiento; C: FC media durante el tiempo que está el paracaidista en el aire; D: FC media en los tres minutos tras el aterrizaje; FC: frecuencia cardiaca; lat/min: latidos por minuto. $p < 0.05^*$

En lo que respecta a la relativización de las FC en función de la FC_{máx} obtenemos los valores que mostramos en la tabla 29.

Tabla 29. Porcentaje de FC_{máx} por paracaidista y salto.

PORCENTAJES DE FRECUENCIAS CARDIACAS MÁXIMAS (lat/min)						
Paracaidista	Salto	A	B	C	D	E
11	1	44.86	38.92	57.30	75.68	58.38
	2	49.19	57.84	51.35	54.59	43.24
	3	56.22	50.27	71.89	81.08	62.16
12	1	46.56	45.50	63.49	70.37	67.72
	2	44.97	44.44	66.14	66.14	56.08
	3	50.79	47.09	68.25	74.60	67.72
13	1	33.89	39.44	58.89	65.00	50.56
	2	48.89	43.33	66.11	75.00	60.56
	3	51.11	47.22	74.60	75.56	60.00
14	1	33.33	37.22	65.00	58.89	41.67
	2	43.33	40.00	75.00	61.67	45.56
	3	41.67	37.78	75.56	67.22	53.33
22	1	55.11	49.43	58.89	77.27	68.75
	2	61.36	63.64	61.67	81.25	73.86
	3	59.66	55.11	67.22	83.52	65.34
23	1	52.60	47.92	72.92	81.77	62.50
	2	57.29	55.21	76.56	84.90	65.63
	3	58.85	53.62	77.08	83.33	63.54
24	1	56.22	51.89	70.27	75.14	67.03
	2	54.59	xxx	xxx	xxx	xxx
	3	55.68	54.05	66.49	77.84	60.54

A: FC media en los tres minutos previos al embarque; B: FC desde el embarque hasta el lanzamiento; C: FC media durante el tiempo que está el paracaidista en el aire; D: FC media en los tres minutos tras el aterrizaje; FC: frecuencia cardiaca; lat/min: latidos por minuto.

Igual que los valores absolutos, los porcentajes más altos han aparecido durante el tercer salto, señalar que este salto se hizo con una mayor intensidad de viento. En seis situaciones (paracaidista-salto) se han superado frecuencias cardiacas pico del 80% de la FC_{máx} y en 15 de los 21 saltos controlados el 75%.

En las comparaciones entre equipos, en las que las diferencias han sido significativas, los porcentajes alcanzados por PAPEA-2 han sido más altos que los de PAPEA-1 (tabla 30). En el tercer salto, los porcentajes de ambos equipos superan el 74% de FCmáx, llegando en PAPEA-2 al 81% en este salto y al 83% en el segundo.

Tabla 30. Comparación de los porcentajes de FCmáx (%) entre equipos.

SALTO	FC	EQUIPO	Media	DE	t	p
Precisión 1	A	PAPEA 1	39.66	7.02	-4.081	0.019*
		PAPEA 2	54.64	1.85		
	B	PAPEA 1	40.27	3.61	-4.039	0.010*
		PAPEA 2	49.75	2.00		
	C	PAPEA 1	55.75	8.69	-3.155	0.025*
		PAPEA 2	72.16	1.65		
	D	PAPEA 1	67.49	7.20	-2.318	0.068
		PAPEA 2	78.06	3.38		
	E	PAPEA 1	54.58	11.10	-1.705	0.149
		PAPEA 2	66.09	3.23		
Precisión 2	A	PAPEA 1	46.60	2.90	-4.687	0.005*
		PAPEA 2	57.75	3.41		
	B	PAPEA 1	46.40	7.85	-2.025	0.113
		PAPEA 2	59.42	5.97		
	C	PAPEA 1	56.73	11.33	-2.309	0.082
		PAPEA 2	76.35	0.30		
	D	PAPEA 1	64.35	8.55	-2.878	0.045*
		PAPEA 2	83.07	2.58		
	E	PAPEA 1	51.36	8.30	0.205	0.856
		PAPEA 2	69.74	5.81		
Precisión 3	A	PAPEA 1	49.95	6.05	-2.180	0.081
		PAPEA 2	58.06	2.10		
	B	PAPEA 1	45.59	5.41	-2.695	0.043*
		PAPEA 2	54.27	0.75		
	C	PAPEA 1	64.48	9.49	-1.343	0.237
		PAPEA 2	72.86	5.61		
	D	PAPEA 1	74.62	5.70	-1.871	0.120
		PAPEA 2	81.56	3.23		
	E	PAPEA 1	60.80	5.95	-0.630	0.556
		PAPEA 2	63.14	2.42		

FC: frecuencia cardiaca; DE: desviación estándar. $p < 0.05^*$

V. DISCUSIÓN

V. DISCUSIÓN

5.1. Estudio 1: Revisión sistemática hipoxia normobárica en deportistas

Hasta donde sabemos, esta es la primera revisión sistemática que evalúa los cambios producidos por la exposición a la hipoxia normobárica en corredores de media y/o larga distancia de diferentes niveles de competición.

En cuanto al tiempo de exposición, la mayoría de los estudios utilizaron 3 h o menos; este tipo se denomina hipoxia aguda [Millet et al., 2010]. En la actualidad, este parece ser el tipo más utilizado, ya que los artículos con las fechas de publicación más antiguas fueron los que tenían las exposiciones más largas (más de 12 h/día) [Brugniaux., 2006; Neya et al., 2007; Robertson et al., 2010a].

La sala hipóxica fue el simulador de hipoxia más utilizado. Los estudios con un tiempo de exposición corto (menos de una hora) utilizaron una máscara facial [Hobbins et al., 2019; Uryumtsev et al., 2020; Dufour et al., 2006]. Esto puede deberse a que la sala o habitación hipóxica son más cómodas para tiempos de exposición más prolongados.

Hoshikawa et al., [2013] fue el único estudio de esta revisión que utilizó altitudes mayores durante el ejercicio que en reposo. Esto es llamativo, ya que las sesiones de ejercicio en hipoxia suponen una mayor tensión, fatiga, inmunosupresión y estrés para el organismo que las realizadas en normoxia [Vogt et al., 2010], y unido al aumento de la altitud, provocan un estímulo aún mayor para el organismo.

5.1.1. Medidas de resultado

Parece que no es necesario aplicar largos tiempos de exposición [Neya et al., 2007] para obtener un aumento significativo del tiempo hasta el agotamiento, siendo eficaces las intervenciones de tres horas o menos [Dufour et al., 2006; Katayama et al., 2004], y la eficacia del tratamiento no depende del estado de

actividad en el que se aplique (en reposo o en ejercicio). El programa HIIT, llevado a cabo por Dufour et al., [2006], aumentó esta medida de resultado en los corredores. Además, Vallier et al., [1996], informaron de que un programa HIIT en condiciones de hipoxia durante 3 semanas también aumentó el tiempo hasta el agotamiento en triatletas de élite.

El estudio de Katayama et al., [2004] fue el único que mostró una tendencia de mejora en la carrera de 3000 m, mientras que Julian et al., [2004] no mostraron ningún cambio significativo. Esto puede ser consecuencia de haber utilizado sesiones demasiado cortas en tiempo (70 min) y, además, alternaron entre estados de normoxia con tiempos donde respiraban aire empobrecido en oxígeno (hipoxia intermitente), por lo que no alcanzaron los 70 min de hipoxia. Aun así, algunos autores han conseguido mejoras significativas en el tiempo de carrera de 3000 m utilizando hipoxia hipobárica [Katayama et al., 2003]. Sin embargo, sabemos que la hipoxia hipobárica es un estímulo más intenso que la hipoxia normobárica [Sousa et al., 2021], por lo que habría que probar estos parámetros utilizando hipoxia normobárica para comprobar si se producen mejoras similares en los tiempos de carrera de 3000 m.

Para aumentar la concentración de hemoglobina, los estudios coincidieron en la necesidad de tiempos de exposición prolongados [Ashenden et al., 1999; Rusko et al., 1999]. Sin embargo, no hubo consenso sobre el tiempo exacto, ya que algunos afirmaron que son necesarias de 12 a 16 h/día durante 25 días [Rusko et al., 1999], mientras que otros afirmaron que son suficientes de 8 a 10 h/día [Ashenden et al., 1999]. Esta puede ser la razón por la que los estudios de Julian et al., [2004], Katayama et al., [2004] y Burtscher et al., [2010] no aumentaron la concentración de hemoglobina (utilizando exposiciones cortas), mientras que los estudios de nuestra revisión que utilizaron exposiciones de 14 h/día o más consiguieron un aumento tras la intervención [Robertson et al., 2010a; Robertson et al., 2010b].

En los estudios que mostraron una mejora en el porcentaje de reticulocitos [Juliane et al., 2004; Robertson et al., 2010b] o en el hematocrito [Burtscher et al., 2010], se evidencia sólo durante los días siguientes de la exposición a hipoxia

y, con el paso del tiempo, (después de que esta hubiera terminado), estas mejoras no se mantenían. Julian et al., [2004] aumentaron la altitud semana a semana y, a pesar de estas variaciones en el estímulo, el aumento de reticulocitos no se mantuvo tras el final de la intervención.

La saturación de oxígeno (SatO₂) disminuyó en tres estudios [Hobbins et al., 2019; Hoshikawa et al., 2013; Robertson et al., 2010a]. Hoshikawa et al., [2013] pretendían relacionar los efectos de la hipoxia normobárica con los parámetros del sueño por lo que la exposición a hipoxia se realizaba mientras los pacientes dormían. Este estudio evidenció que la exposición a la hipoxia provoca una disminución de la SatO₂, y esto a su vez conduce a un sueño más ligero. Este hallazgo se suma a otros en la literatura [Hoshikawa et al., 2007]. Esto puede sugerir que la aplicación de un programa de hipoxia mientras los atletas duermen puede afectar a la calidad de su descanso. Sin embargo, no podemos relacionar esto con una reducción de su rendimiento deportivo, porque en su estudio, Hoshikawa et al., [2013] no tuvieron en cuenta las pruebas de campo o de laboratorio que evaluaban el rendimiento deportivo de los participantes.

La disminución de la SatO₂ en el estudio de Hoshikawa et al., [2013] estaba relacionada con un aumento de la frecuencia cardíaca durante la primera noche después de respirar aire pobre en oxígeno en comparación con la normoxia. Sin embargo, al comparar la última noche de hipoxia con la primera, se produjo un descenso significativo, que se derivó de los efectos del entrenamiento sobre el sistema nervioso autónomo, y no de la aclimatación a la hipoxia. La aclimatación del sistema nervioso autónomo tuvo lugar durante seis días en el estudio de Hoshikawa et al., [2013] (de la primera a la sexta noche de hipoxia), ocurriendo lo mismo en el estudio de Astorino et al., [2011].

De los artículos incluidos en esta revisión, los valores de EPO sólo aumentaron en el estudio de Robertson et al., [2010a], cuya duración de la administración de hipoxia fue de 14 h/día, y cuyos participantes eran corredores de élite de media y larga distancia. Aumentó en los días 2 y 6 de exposición (tanto en el bloque 1 como en el 2), pero no se mantuvo en los días 20 y 27 en

ninguno de los bloques de intervención. En los estudios de Katayama et al., [2004] y Julian et al., [2004], 3 h/día y 70 min/sesión, respectivamente, no fueron suficientes para estimular un aumento significativo de la concentración de EPO. Los hallazgos de esta revisión son ratificados por la literatura, ya que muchos autores defienden la idea de que el uso de sesiones diarias de exposición inferiores a 12 h no produce ninguna mejora en la producción de glóbulos rojos en los atletas. [Ashenden et al., 1999; Ashenden et al., 1999; Robach et al., 2006; Saunders et al., 2004].

5.2. Estudio 2. Variabilidad de la frecuencia cardiaca e hipoxia

En este estudio se ha analizado la respuesta de la variabilidad de la frecuencia cardiaca tras realizar un test de tolerancia y una sesión de exposición a la hipoxia normobárica. Se ha evidenciado que la hipoxia, a la altitud y tiempo de exposición descrito, no ocasiona cambios significativos en los dominios de tiempo y frecuencia de la VFC.

La población del presente estudio la componen 13 sujetos, tamaño que está en concordancia con la de otros autores [Buchheit et al., 2004; Bhaumik et al., 2013; Basualto-Alarcón et al., 2012]. De la misma forma ocurre con la edad media de los sujetos (23 ± 2.58 años) siendo muy similar a la expuesta en otros estudios [Bhaumik et al., 2013; Basualto-Alarcón et al., 2012; Botek et al., 2015]. Este hecho puede ser debido a que, actualmente, hay pocos estudios que analicen este fenómeno y, como paso previo, se ha realizado en personas jóvenes y sanas para, en un futuro, poder realizarlo en otras poblaciones sujetas a mayores riesgos, trabajando así en condiciones de seguridad.

La altitud simulada y el tiempo de exposición que hemos utilizado ha sido distinto dependiendo de si se realiza un test de tolerancia o una sesión de exposición a la hipoxia. En nuestro caso, durante el test de tolerancia se simuló una altitud de 5050 metros (11% de O_2) durante un máximo de 10 minutos mientras que, Buchheit et al., [2004] sometieron a sus participantes a una altitud ligeramente inferior, 4800 metros (11.5% O_2) durante dicho test. Sin embargo, el protocolo utilizado por estos autores difiere del nuestro, pues alternaban periodos

de hipoxia en descanso con hipoxia durante el ejercicio físico, dificultando la comparación con nuestro estudio.

5.2.1. Dominio de tiempo y frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardíaca

Hemos comprobado, a través de otros trabajos, cómo puede variar la respuesta de la VFC según sea: una exposición breve [Buchheit et al., 2004; Basualto-Alarcón et al., 2012; Botek et al., 2015; Giles et al., 2016] o más prolongada a la hipoxia [Halliwill et al., 2003; Guger et al., 2008]; la manera de administrar la hipoxia, es decir, de forma gradual [Iwasaki et al., 2006; Zhang et al., 2014] o súbitamente [Buchheit et al., 2004; Basualto-Alarcón et al., 2012]; la intensidad de la altitud: alta [Buchheit et al., 2004; Guger et al., 2008; Zhang et al., 2014], moderada [Bhaumik et al., 2013] o baja [Iwasaki et al., 2006]; así como los diferentes tipos de hipoxia utilizados: normobárica [Buchheit et al., 2004; Botek et al., 2015] o hipobárica [Basualto-Alarcón et al., 2012; Zhang et al., 2014], ya que la respuesta del organismo ante cada uno de ellos es distinta y dificulta la comparación. Por ello, es importante determinar qué duración, intensidad y tipo de hipoxia influyen de forma favorable sobre la VFC.

Algunos autores coinciden en que una exposición a hipoxia normobárica genera una disminución en la rMSSD y un aumento del cociente LF/HF, es decir, una mayor activación del sistema nervioso simpático [Basualto-Alarcón., 2012; Rupp et al., 2013] mientras que otros autores defienden un aumento del sistema nervioso parasimpático [Zhang et al., 2014; Bhaumik et al., 2013]. Sin embargo, en el test de tolerancia que realizamos en el presente estudio, no se encontró diferencias significativas en las variables de dominio de tiempo y frecuencia de VFC. Este hallazgo puede corroborar lo que otros autores sugerían y es que, para inducir cambios significativos en algunas variables, como en el cociente LF/HF, es necesario duraciones más prolongadas, al menos de 30 minutos [Bernardi et al., 2001]. No obstante, Botek et al., [2015] estipularon 10 minutos de exposición, pero con la diferencia que sometieron a sus participantes a una altitud mayor de la que describía la bibliografía, a 6200 m (9.6% O₂). Estos autores [Botek et al., 2015] obtuvieron una disminución en la LF y un aumento

en la HF. Por lo tanto, parece que mientras que en 2001 Bernardi et al., [2001] indicaban que era necesario más de 30 minutos de exposición a hipoxia para generar cambios en los dominios de VFC, Botek et al., [2015], años más tarde, han conseguido influir sobre los dominios de VFC manteniendo exposiciones agudas (10 minutos), pero aumentando el estímulo de la altitud. Por esta razón, nuestro estudio evidencia que 5050 metros durante diez minutos no es altitud suficiente para influir sobre la VFC, siendo necesario disminuir más la proporción de oxígeno.

Durante la sesión de entrenamiento se realizó un tiempo de exposición más prolongado (64 minutos) que, en el test de tolerancia, pero disminuyendo la altitud y de manera interrumpida (hipoxia normobárica intermitente). Los 3250 metros en los que se realizó la segunda prueba de hipoxia en este estudio pueden ser insuficientes para generar cambios en la variabilidad de la frecuencia cardiaca pese a realizar una exposición con una duración más prolongada. De esta manera, coincidirían estos hallazgos con Yamatho et al., [1996], quienes tampoco encontraron cambios significativos en su estudio. Estos autores [Yamatho et al., 1996] preveían que una altitud inferior a los 3500 metros no era suficiente, apoyando esta hipótesis los datos de nuestro estudio ahora.

En algunos trabajos se emplea la exposición a la hipoxia de manera simultánea a la práctica de ejercicio físico [Yamatho et al., 1996; Lizamore et al., 2016]. En este caso sí parece haber más unanimidad en que los dominios de tiempo y frecuencia absolutos varían más que al administrar la hipoxia en reposo. Sin embargo, esto puede ser debido al estímulo propio del ejercicio físico y no debido a la hipoxia. Por eso, consideramos que debe esclarecerse qué tiempos y qué altitudes son necesarias para generar un efecto beneficiario sobre la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes de incluir otro estímulo de manera sincrónica como puede ser el ejercicio físico.

5.3. Estudio 3. Mecánica ventilatoria y tolerancia a la hipoxia

Esta investigación evidencia un aumento en la tolerancia a la hipoxia normobárica cuando los sujetos realizan respiraciones diafragmáticas controladas mientras respiran en condiciones hipóxicas.

Cuando los voluntarios realizan una respiración controlada (TTHN2) obtienen mejores resultados que cuando realizan una respiración libre (TTHN1). Esto puede deberse a distintas causas. La exposición a hipoxia produce una activación del sistema nervioso simpático, pero esta se ve neutralizada por la respiración controlada, que es un método popular y eficaz en la reducción del estrés [Muscatell et al., 2012]. Otros autores han descubierto que la musculatura inspiratoria disminuye su fatiga mediante el control de la frecuencia respiratoria [Burtch et al., 2017]. Además, se ha demostrado que los distintos tipos de patrones respiratorios tienen efectos fisiológicos diferentes. En el caso de respiraciones lentas y profundas, se produce un aumento en la captación de oxígeno, un aumento del volumen corriente [Wasserman et al., 1978], un aumento de la saturación arterial y un aumento del volumen alveolar [Keyl et al., 2003]. Estos resultados demuestran que las respiraciones lentas y controladas optimizan los valores de saturación arterial y, por tanto, los sujetos de nuestro estudio aumentan la tolerancia a la hipoxia en la segunda prueba.

El método desempeñado en este estudio demuestra que es eficaz cuando los sujetos se exponen a una altitud de 5050 m (11% de O₂). Sin embargo, otros autores han demostrado que a diferentes altitudes también se consiguen los mismos efectos positivos. Nepal et al., [2012] realizaron dos grupos de sujetos en su investigación: un grupo fue expuesto a una altitud de 2800 m y el segundo grupo a 3760 metros. Todos los sujetos respiraron profunda y lentamente durante cuatro minutos en hipoxia hipobárica. Compararon los valores de saturación arterial y descubrieron que la respiración profunda mejoraba el valor de SatO₂ en ambos grupos, en ambas altitudes. Bilo et al., [2012] expusieron a sus voluntarios a mayores altitudes (4559 m y 5400 m, cada grupo) y también mostraron valores de SatO₂ más altos con este tipo de respiración. Por lo tanto, se evidencia que es efectivo tanto en altitudes inferiores [Nepal et al., 2012] como

superiores [Bilo et al., 2012] a las utilizadas por nosotros. Los estudios anteriormente mencionados utilizaban la hipoxia hipobárica en sus exposiciones. Sin embargo, en nuestro trabajo se realiza en condiciones de hipoxia normobárica, demostrando que las respiraciones lentas y controladas tienen el mismo efecto (aumentan la tolerancia) ante ambos tipos de hipoxia (hipobárica o normobárica).

Botella de Maglia et al., [2005] analizaron la influencia de la experiencia en actividades hipóxicas sobre los valores de saturación arterial. Encontraron que cuando los montañeros se exponían a condiciones ambientales hipóxicas, tenían valores de SatO₂ más altos que las personas sin experiencia en altitud. Sin embargo, la realización de respiraciones lentas y profundas, iguales a las propuestas en nuestro estudio, mejoraron la adaptación a la hipoxia en ambos grupos [Botella de Maglia et al., 2005]. En nuestra investigación, los sujetos que no lograron completar el TTHN1 mejoraron el tiempo de exposición a la hipoxia y los valores de saturación arterial al realizar respiraciones controladas en el TTHN2. Por otro lado, los sujetos que sí completaron la primera prueba consiguieron terminar la segunda con mejores valores de SatO₂. Es evidente que este método es beneficioso tanto para los sujetos con una buena adaptación inicial a la hipoxia como para los que tienen una mala adaptación.

La tolerancia a la hipoxia es una característica de cada sujeto, por lo que en el estudio de Botek et al., [2015] dividieron la población en dos grupos: sujetos resistentes a la hipoxia y sensibles a la hipoxia. Este estudio utilizó hipoxia normobárica y el mismo tiempo de exposición que nuestro estudio (10 minutos). Sin embargo, Botek et al., [2015] sólo incluyeron hombres en su estudio, y la influencia del sexo en la tolerancia a la hipoxia es tradicionalmente conocida [Richalet et al., 2015]. Por tanto, sería interesante conocer nuevos estudios que incluyan más mujeres, consolidando así los hallazgos obtenidos en nuestro estudio.

Una mala adaptación a la hipoxia puede provocar el Síndrome de Mal Agudo de Montaña (MAM) [Smedly et al., 2013]. Ya en 1998, Roach et al., [1998] demostraron que los sujetos con hipoxemia a 4200m en reposo tenían un mayor

riesgo de sufrir MAM. Siguiendo el diseño de nuestro estudio, se podría realizar un TTHN para diagnosticar la susceptibilidad y predecir el riesgo individual a ambientes hipóxicos. Además, se podría analizar la respuesta al control de la respiración. La reducción de la frecuencia respiratoria da lugar a un aumento de la sensibilidad barorrefleja cardíaca-vagal, que está relacionada con la salud mental y física [Bernardi et al., 2002; Raupach et al., 2008]. El deterioro del mecanismo barorreflejo se produce en enfermedades como la hipertensión arterial, la diabetes o el infarto cardíaco [Timmeers et al., 2003].

5.4. Estudio 4. Frecuencia cardíaca y paracaidismo

Hemos estudiado a la Patrulla Acrobática de Paracaidismo del Ejército del Aire (PAPEA), grupo deportivo de paracaidistas de élite de ámbito internacional. Se ha valorado la evolución de la FC durante tres saltos de precisión. Además, hemos relacionado las FC desarrolladas durante el salto en función de la FC_{máx} obtenida en una prueba de esfuerzo realizada sobre tapiz rodante. De ello se han obtenido datos de forma indirecta sobre el trabajo cardíaco de este colectivo durante los diferentes saltos.

Dada la juventud de la modalidad y de los pocos practicantes que hay del paracaidismo acrobático y de exhibición, se dispone de pocos estudios sobre el mismo y una escasa evidencia sobre el comportamiento de la FC y del trabajo cardíaco durante los saltos paracaidistas. Es importante destacar que la actividad que realizan los miembros de la PAPEA puede resultar estresante a nivel físico y psíquico, lo que afecta directamente a la actividad cardíaca. Este estrés ha sido estudiado también por Sánchez-Molina et al., [2016] en un grupo de soldados de la Brigada Paracaidista del Ejército de Tierra Español, aunque ellos solo reflejaron la FC tras el salto, no durante el mismo.

Hemos comparado a los dos equipos de la PAPEA, encontrando diferencias solo en la edad, años de experiencia y número de saltos, pero no en cuanto a las variables antropométricas y de composición corporal. Esto se debe, evidentemente a los diferentes años de servicio y a que al pertenecer a la misma

unidad militar adoptan similares planes de preparación física. Tampoco se han visto diferencias significativas entre los dos equipos de la PAPEA.

La FC_{máx} real y el VO₂_{máx} los hemos determinado, igual que Figueredo et al., [2021] mediante una prueba de esfuerzo en tapiz rodante; estos autores estudiaron a 16 soldados del ejército estadounidense obteniendo unas frecuencias cardíacas máximas del 97% del teórico y un VO₂_{máx} de 50 ml/Kg/min, valores muy parecidos a los nuestros. En otro trabajo realizado para valorar la condición física de militares americanos especializados como “atletas tácticos” por las misiones que desempeñan se obtuvieron valores algo más bajos (47 ml/kg/min) que los nuestros, aunque usaron un protocolo diferente [Swearingen et al., 2018]. La realización de la prueba ergométrica en condiciones de laboratorio aporta una mayor exactitud en los resultados que proporciona un medio controlado, lo que da lugar a un aumento en la fiabilidad de las comparaciones [Myers et al., 2009; Stocker et al., 2020].

Referente a los datos obtenidos en la FC y umbrales ventilatorios durante la prueba de esfuerzo, nuestros datos son superiores a los del trabajo de Swearingen et al., [2018], siendo similares a los aportados por Hierholzer et al., [2022] en un grupo de militares.

Otros estudios han empleado diversos métodos para analizar la respuesta cardíaca, Clemente-Suárez et al., [2015] emplearon un pulsómetro registrando la FC y la VFC durante un salto a gran altitud HALO, encontrando un rango de frecuencias cardíacas durante el mismo entre 123 y 154 lat/min con una media de 142 lat/min. Estos datos son similares a los obtenidos en nuestro estudio, pero algo inferiores a los descritos por Martínez-González-Moro et al., [2020] que llevaron a cabo el análisis del trazado electrocardiográfico y la evaluación de la FC durante la realización de una figura acrobática, perteneciente a otra modalidad distinta a la realizada en este trabajo (precisión de aterrizaje). En lugar de un pulsómetro, estos autores utilizaron un dispositivo Nuubo®, similar a un Holter cardíaco con el que seleccionaron segmentos libres de interferencias para determinar además la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

En referencia a los saltos de precisión de aterrizaje realizados en nuestro estudio, evidenciamos que la FC_{máx} es mayor en el tercer salto, pudiendo deberse este hecho a distintos factores. Uno de ellos la fatiga acumulada, ya que entre cada dos saltos no existe un periodo de descanso como tal, sino que ese tiempo se emplea en plegar el paracaídas y dirigirse a la zona de embarque para realizar un nuevo salto. A pesar de ser la misma técnica de salto la fatiga o déficit de recuperación puede influir sobre las pulsaciones incrementándolas en acciones sucesivas [Hernández-Cruz et al., 2022]. Las diferencias entre saltos también pueden deberse al efecto de las variaciones significativas en las condiciones meteorológicas, ya que cambios importantes en la intensidad y dirección del viento a diferentes altitudes, así como la existencia de turbulencias, aumentan las exigencias psico-físicas y con ello la FC. También podría influir el interés y motivación del paracaidista por conseguir un mejor salto y optimizar la precisión y la puntuación.

En los saltos de precisión hay una tendencia a que los integrantes del equipo PAPEA 2 muestren FC más altas en las FC “C” y “D” pero no todas son significativas debido al bajo número de sujetos de cada equipo. Todos los integrantes de la PAPEA son paracaidistas con experiencia y dominan suficientemente los aspectos técnicos del salto, aunque las diferencias entre los equipos pueden deberse a los años de práctica, al número de saltos y a la experiencia en la PAPEA. Coincide que el paracaidista con más experiencia y de mayor nivel es el que realiza los saltos con una menor FC; aunque las diferencias entre sujetos y saltos pueden deberse a la idiosincrasia de los mismos y a aspectos circunstanciales. Clemente-Suárez et al., [2017b] indican que la experiencia de los saltadores tiene un efecto directo en su respuesta físico-psíquica ya que paracaidistas noveles mostraron una mayor respuesta que los veteranos, pero sin afectar a la motricidad fina ni a la actividad muscular.

5.5. Discusión general

En la presente tesis doctoral se abordan, principalmente, dos recursos o herramientas novedosas (hipoxia normobárica y variabilidad de la frecuencia

cardíaca) que pueden tener ambas, grandes aplicabilidades en el ámbito deportivo y en el de la rehabilitación de ciertas patologías.

Centrándonos en el deporte, los hallazgos relacionados con la hipoxia que evidencia esta tesis doctoral pueden tener gran repercusión en distintas modalidades deportivas como el alpinismo, la escalada y, fundamentalmente y sobre el que nos hemos centrado en este estudio, el paracaidismo.

El paracaidismo es una actividad de riesgo y, en particular, el paracaidismo de altura es una actividad estresante extra para el deportista [Clemente-Suárez et al., 2017b]. La realización respiraciones lentas y diafragmáticas durante el descenso del salto paracaidista podría aumentar el tiempo de tolerancia a la hipoxia y mejorar el rendimiento deportivo. Además, podría ser un recurso para situaciones de emergencia como el fallo o la desconexión de la botella de oxígeno. Realizar respiraciones a baja velocidad y alto volumen puede constituir un recurso ante estas situaciones de urgencia vital, pues provocaría una mayor optimización de los valores de saturación arterial de oxígeno y aumentaría el tiempo útil de conciencia [Shaw et al., 2021]. Además, este patrón respiratorio mitiga estados de estrés o ansiedad, como podría ser el descrito anteriormente. Por lo tanto, las respiraciones controladas podrían ser aún más beneficiosas para las personas expuestas a deportes de altura de alto riesgo.

Por su parte, la variabilidad de la frecuencia cardíaca resulta un método de gran ayuda para el diseño de un programa de entrenamiento físico. Resulta un marcador muy eficiente, pues tiene en cuenta de manera individual a cada atleta, poniendo el enfoque sobre cada individuo y no comparando con valores de referencia en otras poblaciones o en otras modalidades deportivas. De esta manera, es totalmente personalizado y se adapta a las circunstancias del deportista para conseguir el máximo rendimiento deportivo.

En el ámbito de la salud, la hipoxia y la VFC constituyen dos técnicas emergentes que pueden servir de complemento terapéutico en ciertas patologías cardiorrespiratorias, tanto de manera independiente como de forma relacionada.

La variabilidad de la frecuencia cardíaca es una herramienta que proporciona información sobre la evolución y el progreso de ciertas patologías cardíacas como puede ser la rehabilitación de un infarto de miocardio. A través de la VFC, podemos conocer cómo se adapta el sistema nervioso autónomo ante un programa de ejercicio terapéutico y analizar así la evolución del paciente. Una de las principales ventajas es que resulta un método de bajo coste económico y no resulta invasivo para el paciente. Actualmente, existen diversas aplicaciones móviles que permiten obtener la medición de las distintas variables cardíacas a través de fotopletimografía. En este caso, colocando el dedo índice del paciente en el sensor de la cámara del smartphone. De esta forma, la sesión de fisioterapia cardíaca resultaría mucho más eficiente, pues tenemos un valor objetivo de la progresión del paciente y podemos adaptar cada una de las sesiones de fisioterapia según sea el estado del paciente cada día. Con esta novedosa praxis se conseguiría una atención más personalizada y centrada en las necesidades de la persona y en cada momento de la intervención fisioterapéutica.

Como anteriormente comentábamos, el análisis de la VFC se puede utilizar de manera sincrónica a la exposición de hipoxia. En este caso, los valores obtenidos de VFC podrían aportar información de los efectos que la hipoxia tendría en el paciente. En este caso, la hipoxia puede constituir una herramienta ante distintas enfermedades respiratorias o cardíacas. Un ejemplo de ello podría ser en las secuelas que padecen algunas personas que han padecido la infección por COVID-19. La fatiga o la mala adaptación a las actividades de la vida diaria podría mejorarse a través de exposiciones a hipoxia normobárica, resultando una opción más cómoda (al no necesitar traslado a zonas de altitud), económica y menos intensa (es un estímulo menor) que la exposición a la hipoxia hipobárica.

Respirar en condiciones de oxígeno reducido puede provocar, por el mecanismo de supercompensación, una mejor adaptación a condiciones de normoxia. Además, para mejorar la tolerancia a la hipoxia inicial, el paciente puede influir con su patrón respiratorio, pues como se ha demostrado en este estudio, las respiraciones lentas y amplias, consiguen mejorar la adaptación a la

hipoxia. De esta forma, el paciente no involucra musculatura de las extremidades como sí ocurre en las clásicas sesiones de rehabilitación cardiorrespiratoria ante un ejercicio en tapiz rodante. Por ello, podría ser un complemento terapéutico en otras patologías donde no se pueda involucrar ciertas extremidades como una hemiplejía en estado agudo. Asimismo, actuaríamos de manera precoz, evitando la aparición de ciertas secuelas y mejorando la involucración y calidad de vida del paciente.

En relación con las limitaciones de la presente tesis doctoral, destacamos, en el estudio 1, la población de los artículos incluidos en la revisión sistemática. Se centralizó sobre corredores de resistencia, pues no existían trabajos realizados que evaluaran el efecto de la hipoxia normobárica en paracaidistas. Los corredores de resistencia de media y/o larga distancia es la población más estudiada y parecida a los paracaidistas profesionales.

Por otro lado, en el estudio 2, se realizó una única sesión de hipoxia, por lo que desconocemos si en esas mismas condiciones de altitud y tiempo de exposición, pero en días más prolongados, modificaría los dominios de tiempo y/o frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardiaca.

En el trabajo número 3 incluimos a paracaidistas veteranos, con gran experiencia en saltos en condiciones de hipoxia, pudiendo ser distinto el comportamiento en profesionales noveles. Otra limitación en dicho estudio es que hemos modificado la frecuencia respiratoria del participante de forma libre, sin utilizar ningún dispositivo, para simular las condiciones más parecidas a las que se someten los paracaidistas.

De las múltiples disciplinas deportivas de las que se compone el paracaidismo deportivo, en el estudio 4, nos centramos únicamente en los saltos de precisión de aterrizaje. Resulta una de las modalidades más representativas.

VI. CONCLUSIONES

VI. CONCLUSIONES

1. Las altitudes y los tiempos de exposición a la hipoxia fueron muy heterogéneas en los estudios incluidos. Estos valores difieren en función de los parámetros hematológicos o deportivos que se pretenden mejorar. Sin embargo, la altitud más utilizada es la de 3000 m. Las exposiciones cortas (menos de 3 h) a la hipoxia normobárica aumentan el tiempo hasta el agotamiento y los periodos más prolongadas (14 h o más) aumentan los valores de hemoglobina, no siendo efectivos tiempos más breves.

2. La variabilidad de la frecuencia cardíaca no evidencia cambios significativos en el dominio de tiempo ni en el de frecuencia después de la exposición a hipoxia normobárica en la altitud y tiempo desarrollados. Por ello, consideramos que estos estímulos no son lo suficientemente estresantes para ocasionar cambios de forma aguda.

3. La respiración diafragmática controlada, a alto volumen y a velocidad lenta, aumenta la tolerancia a la hipoxia medida a través de una prueba a la hipoxia normobárica a 5050 m de altitud.

4. Los saltos de precisión provocan un gran trabajo cardíaco que se ve incrementado ante menor experiencia del paracaidista y ante mayores condiciones de viento.

VII. REFERENCIAS

VII. REFERENCIAS

1. Abellán-Aynés O, López-Plaza D, Alacid F, Naranjo-Orellana J, Manonelles P. Recovery of heart rate variability after exercise under hot conditions: the effect of relative humidity. *Wilderness Environ Med.* 2019;30(3):260-267. doi: 10.1016/j.wem.2019.04.009.
2. Abellán-Aynés O, Manonelles P, Alacid F. Cardiac Parasympathetic Withdrawal and Sympathetic Activity: effect of heat exposure on heart rate variability. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(11):5934. doi: 10.3390/ijerph18115934.
3. Abeytua-Jiménez M, Berenguel-Senén A, Castillo-Martin JL. *Comprendiendo la ergometría con gases.* Omnicordis SLP. 2019. Madrid.
4. Alam T, Choudhary AK, Kumaran SD. Maternal heart rate variability during different trimesters of pregnancy. *Natl J Physiol Pharm Pharmacol.* 2018;8(10):1475-1480. doi:10.5455/njppp.2018.8.0723327072018.
5. Albertus-Cámara I, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. The Effect of normobaric hypoxia in middle- and/or long-distance runners: systematic review. *Biology (Basel).* 2022a;11(5):689. doi: 10.3390/biology11050689.
6. Albertus-Cámara I, Paredes-Ruiz MJ, Jódar-Reverte M, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. Estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca tras la exposición a la hipoxia normobárica. *Arch Med Deporte.* 2022b;39(4):132-138. doi: 10.1817/archmeddeporte.00095.
7. Almeida-Santos MA, Barreto-Filho JA, Oliveira JL, Reis FP, da Cunha Oliveira CC, Sousa AC. Aging, heart rate variability and patterns of autonomic regulation of the heart. *Arch Gerontol Geriatr.* 2016;63:1-8. doi: 10.1016/j.archger.2015.11.01

8. Ashenden MJ, Gore CJ, Dobson GP, Hahn AG. "Live high, train low" does not change the total haemoglobin mass of male endurance athletes sleeping at a simulated altitude of 3000 m for 23 nights. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1999;80(5):479-484. doi: 10.1007/s004210050621.
9. Ashenden MJ, Gore CJ, Martin DT, Dobson GP, Hahn AG. Effects of a 12-day "live high, train low" camp on reticulocyte production and haemoglobin mass in elite female road cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1999;80(5):472-478. doi: 10.1007/s004210050620.
10. Astorino TA, Allen RP, Roberson DW, Jurancich M, Lewis R, McCarthy K, et al. Adaptations to high-intensity training are independent of gender. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111(7):1279-1286. doi: 10.1007/s00421-010-1741-y.
11. Basualto-Alarcón C, Rodas G, Galilea PA, Riera J, Pagés T, Ricart A, et al. Cardiorespiratory parameters during submaximal exercise under acute exposure to normobaric and hypobaric hypoxia. *Apunts Med Esport.* 2012;47:65-72. doi:10.1016/j.apunts.2011.11.005
12. Bernardi L, Passino C, Wilmerding V, Dallam GM, Parker DL, Robergs RA, et al. Breathing patterns and cardiovascular autonomic modulation during hypoxia induced by simulated altitude. *J Hypertens.* 2001;19:947-958
13. Bernardi L, Porta C, Spicuzza L, Bellwon J, Spadacini G, Frey Awn, et al. Slow breathing increases arterial baroreflex sensitivity in patients with chronic heart failure. *Circulation.* 2002;105(2):143-145. doi: 10.1161/hc0202.103311.
14. Bhaumik G, Dass D, Bhattacharyya D, Sharma YK, Singh SB. Heart rate variability changes during first week of acclimatization to 3500 m altitude in Indian military personnel. *Indian J Physiol Pharmacol.* 2013;57:16-22.
15. Bilo G, Revera M, Bussotti M, Bonacina D, Styczkiewicz K, Caldara G, et al. Effects of slow deep breathing at high altitude on oxygen saturation, pulmonary and systemic hemodynamics. *PLoS One.* 2012;7(11):e49074. doi: 10.1371/journal.pone.0049074.

16. Bjelica D, Dusko, Popovic S, Akpinar S. Abstracts from the 19th Annual Scientific Conference of Montenegrin Sports Academy "Sport, Physical Activity and Health: Contemporary Perspectives". Dubrovnik, Croatia. 7-10 abril 2022. *Monten J Sport Sci Med.*2020;11(S1):9 doi: 10.26773/mjssm.220401.
17. Botek M, Krejčí J, De Smet S, Gába A, McKune AJ. Heart rate variability and arterial oxygen saturation response during extreme normobaric hypoxia. *Auton Neurosci.* 2015;190:40-45. doi: 10.1016/j.autneu.2015.04.001.
18. Botella de Maglia J, Compte-Torrero L. Saturación arterial de oxígeno a gran altitud. Estudio en montañeros no aclimatados y en habitantes de alta montaña. *Med Clin (Barc).* 2005;124(5):172-176.
19. Bourdillon N, Yazdani S, Schmitt L, Millet GP. Effects of COVID-19 lockdown on heart rate variability. *PloS One.* 2020;15(11):e0242303. doi:10.1371/journal.pone.0242303.
20. Brugniaux JV, Schmitt L, Robach P, Nicolet G, Fouillot JP, Moutereau S, et al. Eighteen days of "living high, training low" stimulate erythropoiesis and enhance aerobic performance in elite middle-distance runners. *J Appl Physiol.*2006;100(1):203-211. doi: 10.1152/jappphysiol.00808.2005.
21. Buchheit M, Richard R, Doutreleau S, Lonsdorfer-Wolf E, Brandenberger G, Simon C. Effect of acute hypoxia on heart rate variability at rest and during exercise. *Int J Sports Med.* 2004;25:264-269. doi: 10.1055/s-2004-819938.
22. Burtch AR, Ogle BT, Sims PA, Harms CA, Symons TB, Folz RJ, et al. Controlled frequency breathing reduces inspiratory muscle fatigue. *J Strength Cond Res.* 2017;31(5):1273-1281. doi: 10.1519/JSC.0000000000001589.
23. Burtscher M, Gatterer H, Faulhaber M, Gerstgrasser W, Schenk K. Effects of intermittent hypoxia on running economy. *Int J Sports Med.* 2010;31(9):644-650. doi: 10.1055/s-0030-1255067.

24. Bustamante-Sánchez Á, Delgado-Terán M, Clemente-Suárez VJ. Psychophysiological response of different aircrew in normobaric hypoxia training. *Ergonomics*. 2019;62(2):277-285. doi: 10.1080/00140139.2018.1510541.
25. Cabeza JM, Monray A. Paracaidismo. Madrid: Dossat, 1944.
26. Cable GG. In-flight hypoxia incidents in military aircraft: causes and implications for training. *Aviat Space Environ Med*. 2003;74(2):169-172.
27. Calderón FJ, Cupeiro R, Peinado AB, Lorenzo-Capella I. Variabilidad de la frecuencia cardíaca y ejercicio ¿Fundamentación fisiológica?. *Rev int med cienc act fís deporte*.2020;20(78):299-320. doi: 10.15366/rimcafd2020.78.008
28. Carrasco-Poyatos M, González-Quílez A, Altini M, Granero-Gallegos A. Heart rate variability-guided training in professional runners: Effects on performance and vagal modulation. *Physiol Behav*. 2022a;244:113654. doi: 10.1016/j.physbeh.2021.113654.
29. Carrasco-Poyatos M, Granero-Gallegos A, López-García GD, López-Osca R. HRV-guided training for elders after stroke: a protocol for a cluster-randomized controlled trial. *Int J Environ Res Public Health*. 2022b;19(17):10868. doi: 10.3390/ijerph191710868.
30. Catai AM, Pastre CM, Godoy MF, Silva ED, Takahashi ACM, Vanderlei LCM. Heart rate variability: are you using it properly? Standardisation checklist of procedures. *Braz J Phys Ther*. 2020;24(2):91-102. doi: 10.1016/j.bjpt.2019.02.006.
31. Chen X, Cheng J, Song R, Liu Y, Ward R, Wang ZJ. Video-based heart rate measurement: recent advances and future prospects. *IEEE*. 2018;68(10): 3600-3615. doi: 10.1109/TIM.2018.2879706.
32. Clemente-Suárez VJ, Delgado-Moreno R, González-Gómez B, Robles-Pérez JJ. Respuesta psicofisiológica en un salto táctico paracaidista HAHO: caso de Estudio. *Sanid Mil*.2015;71(3): 179-182. doi: 10.4321/S1887-85712015000300004

33. Clemente-Suárez VJ, Robles-Pérez JJ, Fernández-Lucas J. Psychophysiological response in an automatic parachute jump. *J Sports Sci.* 2017a;35(19):1872-1878. doi: 10.1080/02640414.2016.1240878.
34. Clemente-Suárez VJ, Robles-Pérez JJ, Herrera-Mendoza K, Herrera-Tapias B, Fernández-Lucas J. Psychophysiological response and fine motor skills in high-altitude parachute jumps. *High Alt Med Biol.* 2017b;18(4):392-399. doi: 10.1089/ham.2017.0071.
35. Cobos-Carbó A, Augustovski F. Declaración CONSORT 2010: actualización de la lista de comprobación para informar ensayos clínicos aleatorizados de grupos paralelos. *Med Clin (Barc).* 2011;137(5):213-215.
36. Dias US, Tubino MJG. Paracaidistas: diferencias entre el civil y militar. *Fit Perf J.* 2005;4(3):137-144. doi: 10.3900/fpj.4.3.137.s.
37. Dufour SP, Ponsot E, Zoll J, Doutreleau S, Lonsdorfer-Wolf E, Geny B, et al. Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. I. Improvement in aerobic performance capacity. *J Appl Physiol.* 2006;100(4):1238-1248. doi: 10.1152/jappphysiol.00742.2005.
38. Dzhalilova D, Makarova O. Differences in Tolerance to Hypoxia: physiological, biochemical, and molecular-biological characteristics. *Biomedicines.* 2020;8(10):428. doi: 10.3390/biomedicines8100428.
39. Facioli TP, Philbois SV, Gastaldi AC, Almeida DS, Maida KD, Rodrigues JAL, et al. Study of heart rate recovery and cardiovascular autonomic modulation in healthy participants after submaximal exercise. *Sci Rep.* 2021;11(1):3620. doi: 10.1038/s41598-021-83071-w.
40. Federation Aeronautique Internationale. Competition rules for indoor formation skydiving and indoor vertical formation skydiving. Suiza: FAI; 2022.
41. Figueiredo PS, Looney DP, Pryor JL, Doughty EM, McClung HL, Vangala SV, et al. Verification of maximal oxygen uptake in active military personnel during treadmill running. *J Strength Cond Res.* 2022;36(4):1053-1058. doi: 10.1519/JSC.0000000000004019.

42. Florensa A. ¡Preparados para saltar! *Revista Española de Defensa*. 2005;18(211):50-3.
43. Flueck JL, Schaufelberger F, Lienert M, Schäfer O, Stad D, Wilhelm M, Perret C. Acute effects of caffeine on heart rate variability, blood pressure and tidal volume in paraplegic and tetraplegic compared to able-bodied individuals: a randomized, blinded trial. *PLoS One*. 2016;11(10):e0165034. doi: 10.1371/journal.pone.0165034
44. García-Manso JM. Aplicación de la variabilidad de la frecuencia cardiaca al control del entrenamiento deportivo: análisis en modo frecuencia. *Arch Med Deporte*. 2013;30(1):43-51.
45. Giles D, Kelly J, Draper N. Alterations in autonomic cardiac modulation in response to normobaric hypoxia. *Eur J Sport Sci*. 2016;16:1023-31. doi: 10.1080/17461391.2016.1207708.
46. Gore CJ, Sharpe K, Garvican-Lewis LA, Saunders PU, Humberstone CE, Robertson EY, et al. Altitude training and haemoglobin mass from the optimised carbon monoxide rebreathing method determined by a meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2013;47 Suppl 1(Suppl 1):i31-9. doi: 10.1136/bjsports-2013-092840.
47. Guger C, Krausert S, Domej W, Edlinger G, Tannheimer M. EEG, ECG and oxygen concentration changes from sea level to a simulated altitude of 4000 m and back to sea level. *Neurosci Lett*. 2008;442:123-7. doi: 10.1016/j.neulet.2008.06.075
48. Halliwill JR, Morgan BJ, Charkoudian N. Peripheral chemoreflex and baroreflex interactions in cardiovascular regulation in humans. *J Physiol*. 2003;552:295-302. doi: 10.1113/jphysiol.2003.050708.
49. Hämmerle P, Eick C, Blum S, Schlageter V, Bauer A, Rizas KD, et al. Heart rate variability triangular index as a predictor of cardiovascular mortality in patients with atrial fibrillation. *J Am Heart Assoc*. 2020;9(15):e016075. doi: 10.1161/JAHA.120.016075.

50. Hasty F, García G, Dávila H, Wittels H, Hendricks S, Chong S. Heart rate variability as a possible predictive marker for acute inflammatory response in COVID-19 patients. *Mil Med.* 2020;186(1-2):e34-e38. doi: 10.1093/milmed/usaa405
51. Hayama Y, Inoue T. The effects of deep breathing on 'tension-anxiety' and fatigue in cancer patients undergoing adjuvant chemotherapy. *Complement Ther Clin Pract.* 2012;18(2):94-98. doi: 10.1016/j.ctcp.2011.10.001
52. Hernández-Cruz G, Estrada-Meneses EF, Ramos-Jiménez A, Rangel-Colmenero BR, Reynoso-Sánchez LF, Miranda-Mendoza J, et al. Relationship between physical exercise type and fatigue quantified through HRV, CK, and blood lactate. *Retos.*2022;44:176-182.
53. Hierholzer K, Briggs R, Tolston M, Mackowski N, O'Connor M, Barrett K, et al. Heart rate variability metrics from commercial devices predicts strength and cardiovascular performance in a military. *AJSS.* 2022;10(1):14-23. doi: 10.11648/j.ajss.20221001.13
54. Hobbins L, Gaoua N, Hunter S, Girard O. Psycho-physiological responses to perceptually-regulated interval runs in hypoxia and normoxia. *Physiol Behav.* 2019;209:112611. doi: 10.1016/j.physbeh.2019.112611.
55. Hoshikawa M, Suzuki Y, Oriishi M. Effects of normobaric hypoxia equivalent to 2000-m altitude on sleep and physiological conditions of athletes: a study using sheet-type sensor. *J Strength Cond Res.* 2013;27(8):2309-2313. doi: 10.1519/JSC.0b013e318295d338.
56. Hoshikawa M, Uchida S, Sugo T, Kumai Y, Hanai Y, Kawahara T. Changes in sleep quality of athletes under normobaric hypoxia equivalent to 2000-m altitude: a polysomnographic study. *J Appl Physiol.* 2007;103(6):2005-2011. doi: 10.1152/jappphysiol.00315.2007.
57. Howley ET, Bassett DR Jr, Welch HG. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27(9):1292-301.

58. Iwasaki K, Ogawa Y, Aoki K, Saitoh T, Otsubo A, Shibata S. Cardiovascular regulation response to hypoxia during stepwise decreases from 21% to 15% inhaled oxygen. *Aviat Space Environ Med.* 2006;77:1015-9.
59. Järvelin-Pasanen S, Sinikallio S, Tarvainen MP. Heart rate variability and occupational stress-systematic review. *Ind Health.* 2018;56(6):500-511. doi: 10.2486/indhealth.2017-0190.
60. Javaloyes, A, Sarabia JM, Lamberts RP, Moya-Ramon M. Training prescription guided by heart-rate variability in cycling. *Int J Sports Physiol Perform.* 2019;14(1):23-32. doi: 10.1123/ijsp.2018-0122
61. Jayawardena R, Ranasinghe P, Ranawaka H, Gamage N, Dissanayake D, Misra A. Exploring the Therapeutic Benefits of Pranayama (Yogic Breathing): A Systematic Review. *Int J Yoga.* 2020;13(2):99-110. doi: 10.4103/ijoy.IJOY_37_19.
62. Jiménez-Morgan S, Molina-Mora JA. Effect of heart rate variability biofeedback on sport performance, a systematic review. *Appl Psychophysiol Biofeedback.* 2017;42(3):235-245. doi: 10.1007/s10484-017-9364-2.
63. Julian CG, Gore CJ, Wilber RL, Daniels JT, Fredericson M, Stray-Gundersen J, et al. Intermittent normobaric hypoxia does not alter performance or erythropoietic markers in highly trained distance runners. *J Appl Physiol.* 2004;96(5):1800-7. doi: 10.1152/jappphysiol.00969.2003.
64. Katayama K, Matsuo H, Ishida K, Mori S, Miyamura M. Intermittent hypoxia improves endurance performance and submaximal exercise efficiency. *High Alt Med Biol.* 2003;4(3):291-304. doi: 10.1089/152702903769192250.
65. Katayama K, Sato K, Matsuo H, Hotta N, Sun Z, Ishida K, et al. Changes in ventilatory responses to hypercapnia and hypoxia after intermittent hypoxia in humans. *Respir Physiol Neurobiol.* 2005;146(1):55-65. doi: 10.1016/j.resp.2004.11.007.

66. Katayama K, Sato K, Matsuo H, Ishida K, Iwasaki K, Miyamura M. Effect of intermittent hypoxia on oxygen uptake during submaximal exercise in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2004;92(1-2):75-83. doi: 10.1007/s00421-004-1054-0.
67. Keyl C, Schneider A, Gamboa A, Spicuzza L, Casiraghi N, Mori A, et al. Autonomic cardiovascular function in high-altitude Andean natives with chronic mountain sickness. *J Appl Physiol.* 2003;94(1):213-219. doi: 10.1152/jappphysiol.01258.2001.
68. Kleiger RE, Stein PK, Bigger JT Jr. Heart rate variability: measurement and clinical utility. *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 2005;10(1):88-101. doi: 10.1111/j.1542-474X.2005.10101.x.
69. Kleiven Ø, Omland T, Skadberg Ø, Melberg TH, Bjørkavoll-Bergseth MF, Auestad B, et al. Race duration and blood pressure are major predictors of exercise-induced cardiac troponin elevation. *Int J Cardiol.* 2019;283:1-8. doi: 10.1016/j.ijcard.2019.02.044.
70. Lehrer PM, Vaschillo E, Vaschillo B. Resonant frequency biofeedback training to increase cardiac variability: rationale and manual for training. *Appl Psychophysiol Biofeedback.* 2000;25(3):177-191. doi: 10.1023/a:1009554825745.
71. Levine BD. Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Alt Med Biol.* 2002;3(2):177-193. doi: 10.1089/15270290260131911. PMID: 12162862.
72. Lizamore CA, Kathiravel Y, Elliott J, Hellemans J, Hamlin MJ. The effect of short-term intermittent hypoxic exposure on heart rate variability in a sedentary population. *Physiol Int.* 2016;103(1):75-85. doi: 10.1556/036.103.2016.1.7.
73. MacInnis MJ, Koehle MS. Evidence for and against genetic predispositions to acute and chronic altitude illnesses. *High Alt Med Biol.* 2016;17(4):281-293. doi: 10.1089/ham.2016.0024.

74. Manukhina EB, Downey HF, Shi X, Mallet RT. Intermittent hypoxia training protects cerebrovascular function in Alzheimer's disease. *Exp Biol Med (Maywood)*. 2016;241(12):1351-1363. doi: 10.1177/1535370216649060.
75. Martínez-González-Moro I, Carrasco-Poyatos M, Lomas-Albaladejo JL, Ferrer-López V. Cardiac stress associated with display parachuting. *Arch Med Deporte*. 2020;37(1):24-29.
76. Mason H, Vandoni M, Debarbieri G, Codrons E, Ugargol V, Bernardi L. Cardiovascular and respiratory effect of yogic slow breathing in the yoga beginner: what is the best approach? *Evid Based Complement Alternat Med*. 2013;2013:743504. doi: 10.1155/2013/743504.
77. Mateika JH, Komnenov D. Intermittent hypoxia initiated plasticity in humans: a multipronged therapeutic approach to treat sleep apnea and overlapping co-morbidities. *Exp Neurol*. 2017;287(Pt 2):113-129. doi: 10.1016/j.expneurol.2016.05.011.
78. McLean BD, Buttifant D, Gore CJ, White K, Liess C, Kemp J. Physiological and performance responses to a preseason altitude-training camp in elite team-sport athletes. *Int J Sports Physiol Perform*. 2013;8(4):391-399. doi: 10.1123/ijsp.8.4.391.
79. McMorris T, Hale BJ, Barwood M, Costello J, Corbett J. Effect of acute hypoxia on cognition: a systematic review and meta-regression analysis. *Neurosci Biobehav Rev*. 2017;74(Pt A):225-232. doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.01.019.
80. Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JP. Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med*. 2010;40(1):1-25. doi: 10.2165/11317920-000000000-00000.
81. Ministerio de Defensa. Instrucción 1/78. Normas generales sobre organización y funciones de la Patrulla Acrobática de Paracaidismo del Ejército del Aire. Boletín Oficial Ministerio de Defensa, 15 de junio de 1978.

82. Mohan R, Kumar A, Ahanger AM, Bansal SK, Sonia. To study the effect of yoga exercise “pranayama” breathing exercise and meditation on cardiorespiratory parameters in young healthy volunteers. *J Evolution Med Dent Sci.* 2017;6(3):235-237. doi: 10.14260/Jemds/2017/54
83. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Med.* 2009;6(7):e1000097. doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
84. Mol MBA, Strous MTA, van Osch FHM, Vogelaar FJ, Barten DG, Farchi M, et al. Heart-rate-variability (HRV), predicts outcomes in COVID-19. *PLoS One.* 2021;16(10):e0258841. doi: 10.1371/journal.pone.0258841.
85. Moreira JBN, Wohlwend M, Wisløff U. Exercise and cardiac health: physiological and molecular insights. *Nat Metab.* 2020;2(9):829-839. doi: 10.1038/s42255-020-0262-1.
86. Mouine N, Parada T, Amah G, Gagey S, Guity C, Duval M, et al. Prediction of peak oxygen consumption by incremental 6 minutes walking test in patients with Ischemic heart disease after cardiac rehabilitation. *Arch Cardiovasc Dis Supplements.* 2021;13(1):119. doi.org/10.1016/j.acvdsp.2020.10.250
87. Muscatell KA, Eisenberger NI. A social neuroscience perspective on stress and health. *Soc Personal Psychol Compass.* 2012;6(12):890-904. doi: 10.1111/j.1751-9004.2012.00467.x.
88. Myers J, Arena R, Franklin B, Pina I, Kraus WE, McInnis K, et al. Recommendations for clinical exercise laboratories: a scientific statement from the american heart association. *Circulation.* 2009; 119(24):3144-3161. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.109.192520.
89. Naranjo-Orellana J. Variabilidad de la frecuencia cardiaca. Fundamentos y aplicaciones a la actividad física y el deporte [Internet]. 1.^a ed. 2021 [citado 8 septiembre 2022]. Disponible en: <http://doctornaranjo.blogspot.com>.

90. Nepal O, Pokharel BR, Khanal K, Mallik SL, Kapoor BK, Koju R. Relationship between arterial oxygen saturation and hematocrit, and effect of slow deep breathing on oxygen saturation in Himalayan high altitude populations. *Kathmandu Univ Med J (KUMJ)*. 2012;10(39):30-34. doi: 10.3126/kumj.v10i3.8014.
91. Neya M, Enoki T, Kumai Y, Sugoh T, Kawahara T. The effects of nightly normobaric hypoxia and high intensity training under intermittent normobaric hypoxia on running economy and hemoglobin mass. *J Appl Physiol*. 2007;103(3):828-834. doi: 10.1152/jappphysiol.00265.2007.
92. Ortigosa J, Reigal RE, Carranque G, Hernández-Mendo A. Variabilidad de la frecuencia cardíaca: investigación y aplicaciones prácticas para el control de los procesos adaptativos en el deporte. *Rev iberoam psicol ejerc deporte*. 2018;13(1):121-130.
93. Paredes-Ruiz MJ, Jódar-Reverte M, Martínez-González-Moro I, Ferrer-López V. Effects of gender on oxygen saturation of thigh muscles during maximal treadmill exercise testing. *Sport Mont*.2021;19(1):7-11. doi: 10.26773/smj.210203
94. Patrulla Acrobática de Paracaidismo Ejército del Aire. Patrulla Acrobática de Paracaidismo Ejército del Aire. 2020. Recuperado 2 de marzo de 2022, de <https://papea.defensa.gob.es/>.
95. Pérez AB, Fernández LS. El corazón del deportista: hallazgos electrocardiográficos más frecuentes. *Rev Esp Cardiol*.1998;51(5):356-368.
96. Puthon L, Bouzat P, Robach P, Favre-Juvin A, Doutreleau S, Verges S. Effect of ageing on hypoxic exercise cardiorespiratory, muscle and cerebral oxygenation responses in healthy humans. *Exp Physiol*. 2017;102(4):436-447. doi: 10.1113/EP085949.
97. Raupach T, Bahr F, Herrmann P, Luethje L, Heusser K, Hasenfuss G, et al. Slow breathing reduces sympathoexcitation in COPD. *Eur Respir J*. 2008;32(2):387-392. doi: 10.1183/09031936.00109607.

98. Richalet JP, Lhuissier F, Jean D. Ventilatory response to hypoxia and tolerance to high altitude in women: influence of menstrual cycle, oral contraception, and menopause. *High Alt Med Biol.* 2020;21(1):12-19. doi: 10.1089/ham.2019.0063.
99. Richalet JP, Lhuissier FJ. Aging, tolerance to high altitude, and cardiorespiratory response to hypoxia. *High Alt Med Biol.* 2015;16(2):117-124. doi: 10.1089/ham.2015.0030.
100. Roach RC, Greene ER, Schoene RB, Hackett PH. Arterial oxygen saturation for prediction of acute mountain sickness. *Aviat Space Environ Med.* 1998;69(12):1182-1185.
101. Robach P, Schmitt L, Brugniaux JV, Nicolet G, Duvallet A, Fouillot JP, et al. Living high-training low: effect on erythropoiesis and maximal aerobic performance in elite Nordic skiers. *Eur J Appl Physiol.* 2006;97(6):695-705. doi: 10.1007/s00421-006-0240-7.
102. Robertson EY, Saunders PU, Pyne DB, Aughey RJ, Anson JM, Gore CJ. Reproducibility of performance changes to simulated live high/train low altitude. *Med Sci Sports Exerc.* 2010a;42(2):394-401. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181b34b57.
103. Robertson EY, Saunders PU, Pyne DB, Gore CJ, Anson JM. Effectiveness of intermittent training in hypoxia combined with live high/train low. *Eur J Appl Physiol.* 2010b;110(2):379-387. doi: 10.1007/s00421-010-1516-5.
104. Rodas G, Pedret C, Capdevila L, Ramos J. Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos (I). *Arch Med Deporte.* 2008;23(1):41-47.
105. Rupp T, Leti T, Jubeau M, Millet GY, Bricout VA, Levy P, et al. Tissue deoxygenation kinetics induced by prolonged hypoxic exposure in healthy humans at rest. *J Biomed Opt.* 2013;18:095002. doi: 10.1117/1.JBO.18.9.095002.

106. Rusko H, Tikkanen H, Paavolainen L, Hamalainen I, Kalliokoski K, Puranen A. Effect of living in hypoxia and training in normoxia on sea level VO_{2max} and red cell mass. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31:S86. doi:10.1097/00005768-199905001-00277
107. Saleem S, Hussain MM, Majeed SM, Khan MA. Gender differences of heart rate variability in healthy volunteers. *J Pak Med Assoc.* 2012;62(5):422-425.
108. Sánchez-Molina J, Robles-Pérez JJ, Clemente-Suárez VJ. Effect of parachute jump in the psychophysiological response of soldiers in urban combat. *J Med Syst.* 2017;41(6):99. doi: 10.1007/s10916-017-0749-9.
109. Saunders PU, Telford RD, Pyne DB, Cunningham RB, Gore CJ, Hahn AG, et al. Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *J Appl Physiol.* 2004;96(3):931-937. doi: 10.1152/jappphysiol.00725.2003.
110. Schönfeld P, Preusser F, Margraf J. Costs and benefits of self-efficacy: differences of the stress response and clinical implications. *Neurosci Biobehav Rev.* 2017;75:40-52. doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.01.031.
111. Schrader B, Bünker AM, Conradi C, Lüders S, Vaske B, Koziolok M, et al. Regular exercise is associated with a more favorable cardiovascular risk profile, better quality of life, less depression and less psychological stress. *Int J Gen Med.* 2022;15:545-554. doi: 10.2147/IJGM.S338496.
112. Schwarck S, Busse N, Ziegler G, Glanz W, Becke A, Düzel E. Heart rate variability during physical exercise is associated with improved cognitive performance in alzheimer's dementia patients-a longitudinal feasibility study. *Front Sports Act Living.* 2021;3:684089. doi: 10.3389/fspor.2021.684089.
113. Scott BR, Slattery KM, Sculley DV, Dascombe BJ. Hypoxia and resistance exercise: a comparison of localized and systemic methods. *Sports Med.* 2014;44(8):1037-1054. doi: 10.1007/s40279-014-0177-7.

114. Shaw DM, Cabre G, Gant N. Hypoxic hypoxia and brain function in military aviation: basic physiology and applied perspectives. *Front Physiol.* 2021;12:665821. doi: 10.3389/fphys.2021.665821.
115. Smedley T, Grocott MP. Acute high-altitude illness: a clinically orientated review. *Br J Pain.* 2013;7(2):85-94. doi: 10.1177/2049463713489539.
116. Sondermeijer HP, van Marle AG, Kamen P, Krum H. Acute effects of caffeine on heart rate variability. *Am J Cardiol.* 2002;90(8):906-907. doi: 10.1016/s0002-9149(02)02725-x.
117. Sousa AC, Millet GP, Viana J, Milheiro J, Reis V. Effects of normobaric hypoxia on matched-severe exercise and power-duration relationship. *Int J Sports Med.* 2021;42(8):708-715. doi: 10.1055/a-1236-3953.
118. Souza HCD, Philbois SV, Veiga AC, Aguilar BA. Heart rate variability and cardiovascular fitness: what we know so far. *Vasc Health Risk Manag.* 2021;17:701-711. doi: 10.2147/VHRM.S279322.
119. Stocker H, Leo P. Predicting military specific performance from common fitness tests. *JPES.* 2020;20(5): 2454-2459. doi: 10.7752/jpes.2020.05336
120. Swearingen JT, Weiss LW, Smith WA, Stephenson MD, Schilling BK. Potential utility of a loaded treadmill protocol for tactical athletes. *J Strength Cond Res.* 2018;32(3):610-616. doi: 10.1519/JSC.0000000000002217.
121. Tarvainen MPJ, Lipponen JP, Niskanen PO. Kubios HRV Standard Kubios HRV Premium [Internet]. Kubios.com. 2021 [citado el 20 de diciembre de 2021]. Disponible en: https://www.kubios.com/downloads/Kubios_HRV_Users_Guide.pdf
122. Timmers HJ, Wieling W, Karemaker JM, Lenders JW. Denervation of carotid baro- and chemoreceptors in humans. *J Physiol.* 2003;553(Pt 1):3-11. doi: 10.1113/jphysiol.2003.052415.

123. Uryumtsev DY, Gulyaeva VV, Zinchenko MI, Baranov VI, Melnikov VN, Balioz NV, et al. Effect of acute hypoxia on cardiorespiratory coherence in male runners. *Front Physiol.* 2020;11:630. doi: 10.3389/fphys.2020.00630.
124. Vallier JM, Chateau P, Guezennec CY. Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;73(5):471-478. doi: 10.1007/BF00334426.
125. Varis N, Parkkola KI, Leino TK. Hypoxia hangover and flight performance after normobaric hypoxia exposure in a hawk simulator. *Aerosp Med Hum Perform.* 2019;90(8):720-724. doi: 10.3357/AMHP.5289.2019.
126. Veloza L, Jiménez C, Quiñones D, Polanía F, Pachón-Valero LC, Rodríguez-Triviño CY. Variabilidad de la frecuencia cardiaca como factor predictor de las enfermedades cardiovasculares. *Rev Colomb Cardiol.* 2019;26(4):205-210. doi: 10.1016/j.rccar.2019.01.006
127. Vogt M, Hoppeler H. Is hypoxia training good for muscles and exercise performance? *Prog Cardiovasc Dis.* 2010;52(6):525-533. doi: 10.1016/j.pcad.2010.02.013.
128. Wang JZ, Zhang YH, Du WT, Liu G, Zhang XY, Cheng SZ, et al. A post-surgical adjunctive hypoxic therapy for myocardial infarction: Initiate endogenous cardiomyocyte proliferation in adults. *Med Hypotheses.* 2019;125:16-20. doi: 10.1016/j.mehy.2019.02.033.
129. Wasserman K. Breathing during exercise. *N Engl J Med.* 1978;298(14):780-785. doi: 10.1056/NEJM197804062981408.
130. West JB. Tolerance to hypoxia. *High Alt Med Biol.* 2009 Fall;10(3):203. doi: 10.1089/ham.2009.10301.
131. Wilber RL, Stray-Gundersen J, Levine BD. Effect of hypoxic "dose" on physiological responses and sea-level performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(9):1590-1599. doi: 10.1249/mss.0b013e3180de49bd.

132. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. JAMA. 2013;310(20):2191-2194. doi: 10.1001/jama.2013.281053.
133. Yamamoto Y, Hoshikawa Y, Miyashita M. Effects of acute exposure to simulated altitude on heart rate variability during exercise. J Appl Physiol.1996; 81:1223-1229. doi: 10.1152/jappl.1996.81.3.1223.
134. Zhang D, She J, Zhang Z, Yu M. Effects of acute hypoxia on heart rate variability, sample entropy and cardiorespiratory phase synchronization. Biomed Eng Online. 2014;13:73. doi: 10.1186/1475-925X-13-73.

VII. ANEXOS

VII. ANEXOS

ANEXO I. Informe de la Comisión de Ética de Investigación

UNIVERSIDAD DE
MURCIA

Vicerrectorado de Investigación
e Internacionalización

CEI Comisión de
Ética de
Investigación

CAMPUS MARE NOSTRUM

INFORME DE LA COMISIÓN DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE MURCIA

Jaime Peris Riera, Catedrático de Universidad y Secretario de la Comisión de Ética de Investigación de la Universidad de Murcia,

CERTIFICA:

Que D.^a Inés Albertus Cámara ha presentado la memoria de trabajo de la Tesis Doctoral titulada "*Aportaciones al estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca y de la hipoxia normobárica. Aplicadas al paracaidismo*", dirigida por D. Ignacio Martínez González-Moro y D. Vicente Ferrer López a la Comisión de Ética de Investigación de la Universidad de Murcia.

Que dicha Comisión analizó toda la documentación presentada, y de conformidad con lo acordado el día catorce de diciembre de dos mil veintiuno, por unanimidad, se emite INFORME FAVORABLE, desde el punto de vista ético de la investigación.

Y para que conste y tenga los efectos que correspondan firmo esta certificación con el visto bueno de la Presidenta de la Comisión.

Vº Bº
LA PRESIDENTA DE LA COMISIÓN
DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA
UNIVERSIDAD DE MURCIA

Fdo.: María Senena Corbalán García

ID: 3657/2021



Código seguro de verificación: RUxFMjfx-pVxmKcwe-XTQtVu8M-yXIejHWE

COPIA ELECTRÓNICA - Página 1 de 1

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento administrativo electrónico archivado por la Universidad de Murcia, según el artículo 27.3 c) de la Ley 39/2015, de 1 de octubre. Su autenticidad puede ser contrastada a través de la siguiente dirección: <https://sede.um.es/validador/>

ANEXO II. Consentimiento informado

ANEXO II

DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA MAYORES DE EDAD

D./Dña. _____, de _____ años de edad **manifiesto que:**

- He sido informado sobre los beneficios que podría suponer mi participación para cubrir los objetivos de la tesis doctoral titulada "Aportaciones al estudio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca y de la hipoxia normobárica. Aplicadas al paracaidismo", y cualquier investigación derivada del mismo, dirigido por Ignacio Martínez González-Moro de la Facultad de Medicina de la Universidad de Murcia (contactable en el teléfono +34 868887158 y correo igmartgm@um.es)
- Me han informado que la finalidad general de la tesis doctoral es mejorar la tolerancia a la hipoxia a través de técnicas respiratorias, induciendo así a una mejora en otros parámetros fisiológicos.
- He sido informado de que se trata de una tesis doctoral que cuenta con el visto bueno del Comité de Ética de Investigación de la Universidad de Murcia y que no está financiado por ninguna entidad.
- Una vez que he leído la hoja de información al participante que me ha sido entregada, afirmo haber comprendido los posibles efectos indeseables que podría comportar –en mi bienestar– la participación en este proyecto.
- He sido informado de que mis datos serán sometidos a tratamiento en virtud de mi consentimiento con fines de investigación científica y desde la Universidad de Murcia. El plazo de conservación de los datos será de 5 años meses (mínimo indispensable para asegurar la realización del estudio o proyecto). No obstante, y con objeto de garantizar condiciones óptimas de privacidad, mis datos identificativos serán sometidos a anonimización total o parcial cuando el procedimiento del estudio así lo permita. En todo caso, la información identificativa que se pudiese recabar será eliminada cuando no sea necesaria.
- También he sido informado de que para cualquier consulta relativa al tratamiento de mis datos personales en este estudio o para solicitar el acceso, rectificación, supresión, limitación u oposición al tratamiento, podré dirigirme a la dirección protecciondedatos@um.es.
- He sido informado de mi derecho a presentar una reclamación ante la Agencia Española de Protección de Datos.
- He sido informado de que puedo revocar mi consentimiento y abandonar en cualquier momento la participación en el estudio sin dar explicaciones y sin que ello suponga perjuicio alguno (en tal caso, todos los datos cedidos podrían ser borrados si así lo expreso).
- Me ha sido entregada una hoja de información al participante, así como una copia de la declaración de consentimiento informado (que también he firmado).
- Me han explicado las características y el objetivo del estudio, sus riesgos y beneficios potenciales.

Y en virtud de todas las manifestaciones anteriores, confirmo que **otorgo mi consentimiento** a que esta recogida de datos tenga lugar y sea utilizada para cubrir los objetivos especificados en la tesis doctoral.

En _____, a _____ de _____ de _____

Fdo. D./Dña. _____
(Participante)

Fdo. D./Dña. _____
(Firma del investigador/estudiante responsable que devuelve firmada la hoja de consentimiento informado)

ANEXO III: Producción científica para la Tesis Doctoral

Comunicaciones en congresos

1. Relación entre masa muscular y fuerza prensil con la tolerancia a la hipoxia en paracaidistas. Albertus-Cámara I, Martínez-González-Moro I, Paredes-Ruiz MJ, Jódar-Reverte M, Lomas-Albaladejo JL, Ferrer-López V. X Jornadas Nacionales de Medicina del Deporte. Badajoz, en noviembre de 2022.
2. Análisis de la frecuencia cardiaca en saltos de precisión en dos equipos paracaidistas profesionales. Albertus-Cámara I, Paredes-Ruiz MJ, Jódar-Reverte M, Lomas-Albaladejo JL, Martínez-González-Moro I. XL Congreso Nacional de Estudiantes de Medicina. Alicante, en octubre de 2022.
3. Optimising hypoxia tolerance with ventilatory mechanics techniques in professional parachutists. Albertus-Cámara I, Pedreño-Barón R, Lomas-Albaladejo JL, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. II Congreso Internacional de Investigación Biosanitaria para Jóvenes Investigadores. Murcia, en septiembre de 2022.
4. Effect of controlled slow respirations on the normobaric hypoxia tolerance test. Pedreño-Barón R, Albertus-Cámara I, Martínez-González-Moro I. II Congreso Internacional de Investigación Biosanitaria para Jóvenes Investigadores. Murcia, en septiembre de 2022.
5. Influencia del COVID-19 en la tolerancia a la hipoxia normobárica. Albertus-Cámara I, Rochel-Vera C, Lomas-Albaladejo JL, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. VII Jornadas Doctorales de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Murcia. Murcia, en julio de 2022.

6. Influence of physical activity on tolerance to normobaric hypoxia. Albertus-Cámara I, Jódar-Reverte M, Paredes-Ruiz MJ, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. 19th Annual Scientific Conference of Montenegrin Sports Academy and “Sport, Physical Activity and Healthy Contemporary perspectives”. Dubrovnik (Croacia), en abril de 2022.
7. Estudio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca tras la exposición a la hipoxia normobárica. Albertus-Cámara I, Jódar-Reverte M, Paredes-Ruiz MJ, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. XVIII Congreso Internacional de la Sociedad Española de Medicina del Deporte. Murcia, en noviembre de 2021.
8. Valoración de la oxigenación arterial y muscular asociadas a la hipoxia normobárica. Albertus-Cámara I, Jódar-Reverte M, Paredes-Ruiz MJ, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. XVIII Congreso Internacional de la Sociedad Española de Medicina del Deporte. Murcia, en noviembre de 2021.
9. Influencia del sexo y composición corporal en la tolerancia a la hipoxia normobárica. Paredes-Ruiz MJ, Jódar-Reverte M, Albertus-Cámara I, Martínez-González-Moro I, Ferrer-López V. XVIII Congreso Internacional de la Sociedad Española de Medicina del Deporte. Murcia, en noviembre de 2021.
10. Valoración del estrés inducido por un test de tolerancia a la hipoxia normobárica (5050m). Albertus-Cámara I, Jódar-Reverte M, Paredes-Ruiz MJ, Martínez-González-Moro I. III Congreso de Investigación en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Madrid, octubre de 2021.
11. Nivel de estrés que ocasiona una sesión de entrenamiento en hipoxia normobárica evaluado a través de la variabilidad de la frecuencia cardiaca. Albertus-Cámara I, Martínez-González-Moro I. I Congreso de Investigación Biosanitaria para Jóvenes Investigadores. Murcia, junio de 2021.

Ponencias invitadas

1. Avances sobre el estudio de la mecánica ventilatoria y la tolerancia a la hipoxia. Albertus-Cámara I. VIII Curso. El paracaidismo: historia, enseñanza e investigación. Universidad Internacional del Mar. Murcia, en junio de 2022.

Publicaciones en revistas científicas

1. Albertus-Cámara I, Paredes-Ruiz MJ, Jódar-Reverte M, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. Estudio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca tras la exposición a la hipoxia normobárica. Arch Med Deporte. 2022;39(4):132-138. doi: 10.1817/archmeddeporte.00095.
2. Albertus-Cámara I, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. The effect of normobaric hypoxia in middle- and/or long-distance runners: systematic review. Biology (Basel). 2022;11(5):689. doi: 10.3390/biology11050689.

Publicaciones pendientes de aceptación

1. Albertus-Cámara I, Rochel-Vera C, Lomas-Albaladejo JL, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. Effect of controlled breathing on tolerance to normobaric hypoxia in healthy adults. Remitido a la revista "*International Journal of Environmental Research and Public Health*".
2. Albertus-Cámara I, Paredes-Ruiz MJ, Jódar-Reverte M, Ferrer-López V, Martínez-González-Moro I. Level of habitual physical exercise and tolerance to normobaric hypoxia.
3. Albertus-Cámara I, Carrasco-Poyatos M, Martínez-González-Moro I. Relationship between heart rate variability (HRV) and physical exercise in older adults with heart failure or coronary artery bypass grafting: a systematic review.

Becas y estancias en centros de investigación

1. Estancia de investigación en el servicio de rehabilitación cardiaca del Hospital Universitario Torrecárdenas participando en el proyecto de investigación “Entrenamiento basado en el HRV para optimizar los programas de rehabilitación cardiaca”. Almería, del 15 de mayo al 15 de julio de 2022.
2. Participación en el Convenio entre la Universidad de Murcia y el Ministerio de Defensa Español para la colaboración en diversas áreas de interés común dentro del ámbito del paracaidismo militar. BOE 136 de 8 junio de 2022.
3. Becaria en el Grupo de Investigación “E081-03 Ejercicio Físico y Rendimiento Humano” de la Universidad de Murcia -Ayuda de Iniciación a la Investigación por la Universidad de Murcia- desarrollando el proyecto “Variabilidad de la frecuencia cardiaca tras un programa de ejercicio físico en adultos mayores con insuficiencia cardiaca o revascularización coronaria”. Murcia, del 25 de octubre de 2021 al 31 de diciembre de 2021.
4. Becaria de investigación en el Departamento de Fisioterapia de la Universidad de Murcia -Beca de colaboración en departamentos universitarios por el Ministerio de Educación y Formación Profesional Español- realizando el proyecto “Estudio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca asociado a un programa de hipoxia normobárica intermitente”. Murcia, del 5 de noviembre de 2020 al 21 de junio de 2021.

Premios de investigación

1. Premio al mejor panel en el XL Congreso Nacional de Estudiantes de Medicina XVIII International Edition celebrado en el Colegio Oficial de Médicos de Alicante. Paredes-Ruiz MJ, Albertus-Cámara I, Jódar-Reverte M, Lomas-Albaladejo JL, Martínez-González-Moro I. Alicante, del 26 al 28 de octubre de 2022.