



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Validación de una nueva prueba corta de sensibilidad de quimiorreceptores a la hipoxia**

**Hernando Andrei Ortiz Guzman**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Medicina  
Departamento de Medicina Interna  
Especialidad en Medicina del Deporte  
Ciudad Bogotá, Colombia  
2020



# **Validación de una nueva prueba corta de sensibilidad de quimiorreceptores a la hipoxia**

**Hernando Andrei Ortiz Guzman**

Trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Especialista en Medicina del Deporte**

Director (a):

**Mauricio Serrato Roa** (Médico Cirujano, Especialista en Medicina del Deporte, Especialista en Alto rendimiento y Magister en Manejo Ejecutivo de Organizaciones Deportivas)

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Medicina  
Departamento de Medicina Interna  
Especialidad en Medicina del Deporte  
Ciudad Bogotá, Colombia

2020



*(A mis padres y sobre todo a mi madre quien ha dedicado toda su vida por cumplir mis sueños)*



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hernando Andrei Ortiz Guzman', is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a large flourish at the top.

---

Hernando Andrei Ortiz Guzman

Fecha 10/01/2020



## **Agradecimientos**

Destacar la importancia para la realización del trabajo el apoyo de del Centro de ciencias del deporte del ministerio del deporte en cabeza de su director, Mauricio Serrato Roa y a la vez director del trabajo de grado, así como el profesor y par evaluador Camilo Ernesto Povea Combariza profesor de la especialidad de medicina del deporte y médico del equipo de Centro de ciencias del deporte, quienes sin su conocimiento sobre los fenómenos tratados en la investigación y realización de la prueba no hubiese sido posible, pero también a David Alejandro Torres Solano y Jorge Mario Cabrera Médicos y compañeros de último año de la especialidad de Medicina del Deporte por la ejecución y adaptación de los diferentes dispositivos usados en las pruebas previas al análisis de los datos. Por demás al centro de ciencias del deporte del Ministerio del deporte por la disposición de sus datos y equipos usados en las pruebas analizadas.

## Resumen

### Validación de una nueva prueba corta de sensibilidad de quimiorreceptores a la hipoxia

**Introducción:** La hipoxia presente en diversas altitudes afecta el rendimiento deportivo y en ocasiones, la salud tanto en deportistas, como en personas sanas. Dependiendo de la susceptibilidad individual ligada a sensibilidad a la hipoxia se tienen diferentes efectos fisiopatológicos descritos en la literatura. Es sabido que, mediante una prueba de sensibilidad de variables ventilatorias y cardiacas, aumenta el poder predictivo frente a patologías de mal agudo de montaña (MAM); de esta forma se establecieron fuertes asociaciones de parámetros para el rendimiento. Se pretende probar si reduciendo los tiempos de las fases, se obtienen resultados comparables que permitan mantener resultados comparables con el fin de optimizar la misma para ser utilizada en para los deportistas y detectar susceptibilidad frente a la exposición a la hipoxia. **Materiales y métodos:** Estudio comparativo correlacional y de concordancia de 12 sujetos no atletas de una base de datos que efectuaron dos tipos de pruebas realizadas en el Centro de Ciencias del Deporte del Ministerio del Deporte, prueba convencional para predecir MAM con una duración de 16 minutos (PC) y una prueba acortada de 10 minutos (PA). **Resultados:** Las variables que resultan ser más relevantes para el diagnóstico de MAM se seleccionaron para ser comparadas entre los dos pruebas. 1) **Diferencia de Saturación en ejercicio**  $r = 0.7832$  entre PC vs PA (correlación fuerte);  $p = 0,0026$ , 2) **Respuesta ventilatoria en ejercicio**  $r = 0.6849$  (correlación moderada);  $p = 0,0140$ , 3) **Índice de Respuesta cardíaca durante el ejercicio**  $r = 0.6495$  (correlación moderada);  $p = 0,023$ , Adicional a todo ello las variables presentan buen concordancia individual mas no promedio mediante análisis Bland-Altman. **Discusión y conclusiones:** Los resultados obtenidos durante la PA, se correlacionan y presentan concordancia individual mas no promedio con los obtenidos para en la PC, siendo este ultimo de mayor importancia para poder sugerir realizar la prueba corta en atletas, pese a que no fueron controlados algunos parámetros ambientales y del estado físico del sujeto, al realizar la prueba se presenta correlaciones y concordancias individuales que permiten aplicarla controlando esas variables o la potencialidad de realizar un nuevo estudio que las tenga en cuenta y que pueda mejorar estas medidas.

**Palabras clave:** “Hipoxia”, “Altitud”, “Saturación de oxígeno” “Mal respondedor”, “Sensibilidad”, “Ventilación”, “Quimiorreceptores”, “Presión barométrica”

## Abstract

### Validation of a short new test for hypoxia chemoreceptor sensitivity

**Introduction:** The hypoxia present at different altitudes affects sports performance and, on occasions, health in both athletes and healthy people. Depending on the individual susceptibility linked to sensitivity to hypoxia, there are different pathophysiological effects described in the literature. It is known that, by means of a sensitivity test of ventilatory and cardiac variables, the predictive power against acute mountain sickness (AMS) pathologies increases; in this way, strong associations of performance parameters were established. It is intended to test whether by reducing the times of the phases, comparable results are obtained that allow to maintain comparable results to optimize it to be used in athletes and detect susceptibility to exposure to hypoxia. **Materials and methods:** Comparative correlational and concordance study of 12 non-athlete subjects from a database that carried out two types of tests carried out at the Sports Science Center of the Ministry of Sport, a conventional test to predict AMS with a duration of 16 minutes (PC) and a shortened 10-minute test (PA). **Results:** The variables that turn out to be more relevant for the diagnosis of AMS were selected to be compared between the two tests. **1) Difference in Saturation in exercise**  $r= 0.7832$  between PC vs BP (strong correlation);  $p= 0.0026$ , **2) Ventilatory response in exercise**  $r= 0.6849$  (moderate correlation);  $p= 0.0140$ , **3) Cardiac Response Index during exercise**  $r= 0.6495$  (moderate correlation);  $p= 0.023$ , In addition to all this, the variables present good individual agreement but not average by Bland-Altman analysis. **Discussion and conclusions:** The results obtained during the AP are correlated and present individual concordance but not average with those obtained for the CP, the latter being of greater importance to suggest performing the short test in athletes, although they were not controlled some environmental parameters and the physical state of the subject, when performing the test, individual correlations and concordances are presented that allow it to be applied by controlling these variables or the potential to carry out a new study that takes them into account and that can improve these measures.

**Keywords:** ("Hypoxia", "Altitude", "Oxygen Saturation", "Poor responder", "Sensitivity", "Ventilation", " chemoreceptor ", "Barometric pressure").

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>X</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>15</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>166</b>
<b>1. Justificación.....</b>	<b>19</b>
<b>2. Marco Teórico .....</b>	<b>211</b>
<b>3. Objetivos .....</b>	<b>311</b>
3.1 Objetivo General .....	311
3.2 Objetivos específicos .....	311
<b>4. Metodología.....</b>	<b>322</b>
4.1 Población.....	322
4.2 Criterios de Inclusión .....	322
4.3 Criterios de exclusión .....	322
4.4 Descripción metodológica del proyecto .....	322
4.5 Análisis estadístico .....	344
<b>5. Resultados .....</b>	<b>355</b>
5.1 Discusion .....	40
<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>44</b>
6.1 Conclusiones .....	44
6.2 Recomendaciones .....	44
<b>7. Bibliografía.....</b>	<b>455</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 2-1:</b> Cicloergómetro.....	27
<b>Figura 2-2:</b> Hipoxificador GO <sub>2</sub> " Altitude.....	28
<b>Figura 4-1:</b> Relación ventilación vs tiempo de la prueba de uno de los sujetos (Respuesta adecuada esperada) .....	33
<b>Figura 4-1:</b> Relación ventilación vs tiempo de la prueba de uno de los sujetos (Respuesta inadecuada) .....	33
<b>Figura 5-1:</b> Diferencia o delta de saturación en ejercicio.....	36
<b>Figura 5-2:</b> Bland-Altman de la diferencia o delta de saturación de oxígeno en ejercicio...37	37
<b>Figura 5-3:</b> Respuesta ventilatoria en ejercicio relativa a peso (DVE/DSaO <sub>2</sub> /Peso*100)...38	38
<b>Figura 5-4:</b> Bland-Altman de Respuesta ventilatoria en ejercicio relativa a peso.....38	38
<b>Figura 5-5:</b> Índice de respuesta cardiaca durante el ejercicio ( $\Delta Fc/\Delta SaO_2$ en ejercicio) = (HR <sub>rh</sub> -HR <sub>m</sub> ) / $\Delta Sa_e$ (latidos/min/%) .....	39
<b>Figura 5-6:</b> Bland-Altman del Índice de respuesta cardiaca durante el ejercicio.....	40



## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1:</b> Clasificación de diferentes altitudes según Barry.....	21
<b>Tabla 2-2:</b> Clasificación de riesgo de presentar mal de altura de Hackett.....	26
<b>Tabla 5-1:</b> Datos generales de la muestra de 12 individuos.....	35
<b>Tabla 5-2:</b> Resultados de las principales variables en cada uno de los individuos.....	35

## Introducción

Se ha señalado que las diferentes condiciones ambientales que influyen en la fisiología humana tanto en la salud como en el rendimiento deportivo producen cambios de manera aguda como de manera crónica, condiciones tales como la hipoxia a diferentes altitudes puede inducir o no las adaptaciones para poder sobrevivir a dichas condiciones y eso conforme es más poderoso el efecto hipóxico en específico conforme se aumenta la altitud (Lundby, 2012), sus diferentes efectos que en resumen de manera crónica producen aumento en la masa de hemoglobina, aumentando ciertos signos vitales (Lundby, 2012), como la frecuencia cardiaca tanto basal como submáxima elevada, la saturación de oxígeno tanto basal como submáxima y máxima disminuida (submáxima y máxima en el contexto de una prueba de ejercicio desde lo más mínimo a lo máximo de intensidad posible para cada individuo), además de mencionar los efectos en salud que producen en personas aparentemente sanas, en algunas se pueden adaptar de manera aguda y si el estímulo hipóxico o su permanencia en la altura persiste los efectos crónicos, en otras aparecen síntomas leves como cefalea o sensación de cansancio, pasando en otras a producirse verdaderas patologías de altura que pueden poner en peligro la vida del individuo.

En muchos estudios que se han llevado a través de la historia se han descrito las respuestas fisiológicas como adaptaciones a la exposición a diferentes altitudes (P W Barry, 2003), también ellas han documentado el efecto patológico que producen en ciertos individuos, aun mas se ha estudiado sus diferentes efectos en los deporte, abordando por ejemplo los efectos en deportistas de resistencia aeróbica la disminución de su capacidad aeróbica  $VO_2max$ , tan solo con exposiciones agudas y también describiendo sus efectos crónicos (Lundby, 2012), pero volviendo al tópico mismo de la hipoxia como exposición ambiental a diferentes altitudes se han descrito escalas y métodos de evaluación para tratar de predecir quienes posiblemente presentaran tales patologías, así en un estudio prospectivo de larga data llevado a cabo en Francia por el Dr. Jean Paul Richalet se realizó y se diseñó una prueba de exposición hipóxica simulada como parte de la valoración

de la medicina del viajero a aquellos individuos quienes posteriormente iban a exponerse a diferentes altitudes, y tomando de esas pruebas ciertas variables que posterior a seguimiento de esos pacientes se correlacionarían de manera independiente con la aparición de enfermedades graves, la prueba consistía en exponer tanto en reposo como en ejercicio a estos individuos a hipoxia y normoxia previo a mediciones en estado de reposo. Las anteriores variables fueron tomadas como parte del conocimiento mismo de la respuestas fisiológicas a la hipoxia y es bien sabido que la ventilación es la más importante afectando así variables como saturación de oxígeno y frecuencia cardiaca; variables que son directas y que representan el grado de estrés que produce la hipoxia en cada individuo. Finalmente, este estudio determino que estas variables si tenían una buena correlación independiente de las escalas clínicas de valoración para predecir mal de altura, edema agudo de pulmón y edema cerebral asociado a la altura, y combinadas y sumándoles los puntajes de las escalas tenían un poder superior predictivo para la aparición de patologías asociadas a exposición a diferentes altitudes y sobre todo las de mayor gravedad (Jean-Paul Richalet, 2011).

Cabe destacar que todas estas variables y sus respuestas además de determinar una respuesta al estrés hipóxico, se entiende como también la sensibilidad mismas de cada individuo de sus quimiorreceptores a la hipoxia y que dependiendo de la sensibilidad a la hipoxia tendrá diferentes efectos fisiopatológicos descritos en la literatura (Javier Aceña Medina, 2017).

Luego de este estudio prospectivo sus prueba ha servido también para aplicarla al rendimiento deportivo con el objetivo tanto de determinar si ciertos atletas presentaran patologías relacionadas con condiciones ambientales hipóxicas o ambientes de diferentes altitudes, pero aún más para determinar quienes tendrán mayor afectación en su rendimiento al exponerse a estas altitudes (Chapman & Levine, 2013). Está bien documentado el efecto que las diferentes altitudes donde se han llevado a cabo competencias deportivas a producido sobre el tiempo para ejemplificar las pruebas contrarreloj, o las pruebas contra resistencia como las maratones, tanto para disminuir el mismo como para aumentarlo, además se ha

documentado como en deportes acíclicos como el futbol afecta el rendimiento individual y finalmente del equipo los diferentes efectos de la hipoxia en el rendimiento.

En Colombia y Latinoamérica dado sus accidentes geográficos con tres cordilleras producto de la gran cordillera de los andes, permite que muchos asentamientos y poblaciones donde ocurren muchas competencias de diferentes deportes es inherente tener en cuenta este factor ambiental siempre que se compita, con el propósito de determinar los atletas o sujetos que pueden presentar una afectación importante en el rendimiento y posterior a esa identificación, aplicar las diferentes estrategias preventivas para ofrecer al atleta entrenamiento en altura, hipoxia intermitente para que las adaptaciones a la altura o a la hipoxia sean cada vez mejores en quienes lo necesiten (Keren Constantini, 2017).

Se pretende entonces siempre que se pueda realizar pruebas a los atletas para determinar su sensibilidad a la hipoxia y con ello posibles intervenciones para evitar efectos adversos o mejor aún el rendimiento mismo cuando se tenga que competir en lugares donde la hipoxia es un factor importante ambiental para tener en cuenta (Keren Constantini, 2017). Sin embargo la prueba misma presenta una dificultad dado su tiempo necesario para la realización que en total consume 20 minutos, además la tecnología necesaria para realizarla y posterior siempre a una valoración médica previa de cada individuo lo que se pretende es intervenir en la practicidad para poder hacerla, se propuso una nueva prueba con un tiempo más corto y con ello mejorar la capacidad practica al aplicarla, dado que en específico en deportes de conjunto donde por logística que se requiere de bastante tiempo para poder aplicar a todos los sujetos. En el centro de ciencias del deporte del ministerio del deporte colombiano se llevaron a cabo pruebas piloto de esa prueba acortada, y contando con el aval de su director se tomará los datos de las pruebas se hará una base de datos de la prueba acortada y se comparara con la prueba convencional, todo ello para determinar su validez y si es posible que arroje resultados similares. La importancia de este estudio es que la hacerlo más practico se indicaría el poder hacerla tanto en atletas para rendimiento como para su posible aplicación en medicina del viajero para aplicaciones en salud.

## 1. Justificación

Es de conocimiento que la altitud produce en la fisiología humana importantes cambios en sus sistemas como parte del proceso natural de las adaptaciones del cuerpo humano, por tanto al hablar de salud en personas sanas y en rendimiento para atletas el conocimiento de los efectos de la exposición a condiciones de hipoxia (lugares con altitud considerable) es muy importante, tanto para la prevención de patologías en personas sanas como la alteración del rendimiento mismo en competencia para los atletas.

Existen múltiples estudios que desde hace más de 70 años con respecto a los efectos de la hipoxia en el cuerpo humano, sin embargo en los últimos 30 años se han dado luces con relación a la valoración de sus efectos en la salud y rendimiento, entre ellos uno de los autores más importantes Jean Paul Richalet quien con un estudio prospectivo en donde lo importante, dado su tamaño de efecto (número de población estudiada) y las mediciones hechas formulo una prueba para hallar y posiblemente predecir efectos en la salud para personas sanas (también aplicable con efectos en el rendimiento deportivo en atletas) ya sean deletéreo como el mal agudo de montaña, edema cerebral y edema pulmonar de la altura (disminución de rendimiento en deportistas con mal agudo de montaña leve a moderado), presentando con ello diferentes variables que son de importancia a la hora de evaluar posibles efectos en la altura.

Esta prueba dura 16 minutos en total y consiste en evaluación en normoxia e hipoxia tanto en ejercicio como en reposo cada una de 4 minutos, arrojando unas variables que son fuertemente correlacionadas con intolerancia a la hipoxia y posteriores efectos en la salud de los individuos y también siendo aplicable al alto rendimiento.

Por tanto, para efectos de practicidad en deportes de conjunto o por la logística que supone la preparación de atletas para rendir en lugares de altitud considerable y que se someten a hipoxia en competencia se hace imperativo tener esta prueba para la valoración de esta y con ello establecer estrategias para minimizar el riesgo

en atletas. Se ha considerado la manera de acortar o reducir el tiempo de la prueba arrojando similares valores aportados en la valoración de los efectos de la altura. Se hará la valoración de una base de datos de sujetos que se realizaron la prueba habitual de 16 minutos y se comparó posteriormente una prueba similar acortada en tiempo y que fue realizada en el Centro de Ciencias del Deporte de Colombia y con el aval de este y como pilotaje para pruebas en atletas revisando medidas estadísticas para establecer la utilidad de la prueba acortada.

## 2.Marco Teórico

El concepto de hipoxia en ambientes a diferentes altitudes es definida como la disminución de la presión parcial de oxígeno; pero para entender este concepto se debe hablar primero de la presión barométrica que es la presión ejercida por el peso del aire sobre nosotros o un lugar determinado y desde el nivel del mar este peso del aire que es aproximadamente 24 Km de distancia equivalente a 760 mmHg de presión total del aire, esta a su vez condicionada por la temperatura ya que se han registrado diferentes presiones barométricas en diferentes condiciones del clima, además esta distribución de la temperatura distribuida en el planeta ya que diferentes presiones barométricas de la atmosfera se registran en los polos en comparación con la línea ecuatorial y esto sumado a que el porcentaje de la composición del aire en donde las distribuciones porcentuales son O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y N del 20.93%, 0.03% y 79.04% respectivamente (Lundby, 2012).

Por tanto, lo que varía con la altitud es la presión barométrica a una constante distribución porcentual de los gases y este al final teniendo efecto sobre la presión parcial de oxígeno en la respiración humana, no se debe dejar de un lado que esa presión parcial de oxígeno puede variar con la temperatura, los vientos, el porcentaje de humedad y la radiación que afectan, pero mínimamente la misma (Nicholas J. Johnson, 2016).

Se define entonces que en diferentes altitudes o metros sobre el nivel del mar permiten la clasificación de esta de acuerdo con los efectos fisiológicos que pudiesen provocar y son presentados en el siguiente recuadro (P W Barry, 2003).

Tabla 2-1: Clasificación de diferentes altitudes según Barry

Altitud Baja	Altitud Intermedia o Moderada	Gran o Alta altitud	Muy alta altitud	Altitud extrema
< 1500 m	1500-2500 metros	2500-3500 metros	3500-5800 metros	> 5800 metros
Cambios fisiológicos detectables solo en ejercicio	Cambios fisiológicos detectables. Saturación arterial de oxígeno > 90%. Enfermedad de altitud posible pero rara	Enfermedad de altitud común con ascenso rápido	Altitud enfermedad común. Saturación arterial de oxígeno < 90%. Hipoxemia marcada durante el ejercicio	Hipoxemia marcada en reposo. Deterioro progresivo, a pesar de la aclimatación máxima.

Tomado de P W Barry, A. J. (2003). *Altitude illness*. *British Medical Journal*.

Cuando el cuerpo humano se encuentra en condiciones de hipoxia aguda se inicia una respuesta para mantener la homeostasis del oxígeno mediante una serie de

ajustes metabólicos, cardiopulmonares y de sistema nervioso central que se serán explicadas paso a paso y que de manera crónica algunas pueden mantenerse constantes y otras desaparecen con ajustes individuales de diferentes indoles.

Todas las células nucleadas del cuerpo perciben el oxígeno y su disponibilidad y al estar reducido el suministro de oxígeno se inicia la producción de factor de transcripción 1 inducido por hipoxia (HIF-1) el cual tiene la reacción de más de 200 genes en los diferentes tejidos involucrados en la homeostasis del oxígeno, se ha dicho que personas que nacen y viven en la altitud tales estímulos constantes hacen que se presenten modificaciones en la fisiología pulmonar y por ende sus respuestas sean diferentes comparadas en personas no nacidas en la altitud (Javier Aceña Medina, 2017). Las primeras células que responden al estímulo hipóxico son los quimiorreceptores periféricos denominados cuerpos carotideos y el estímulo principal al cual responden son la disminución de la presión parcial de oxígeno ( $PaO_2$ ), mas no al contenido de oxígeno arterial ( $CaO_2$ ) como pudiera pensarse, la respuesta de esta baja de la  $PaO_2$  es simpaticoadrenal y liberación de la noradrenalina circulante, esto observado ya en diferentes estudios de sujetos expuestos a altitud mediante la medición de la noradrenalina circulante (Lundby, 2012). Esta a su vez se mantiene en el tiempo lo cual hace que la respuesta del sistema nervioso autónomo aumente por la respuesta simpática lo cual hace que la frecuencia cardiaca en reposo, basal y sub-maximales al esfuerzo se eleven con respecto a altitudes más bajas en un mismo individuo (Lundby, 2012).

Las respuestas hematológicas al estímulo del HIF-1 es iniciado mediante la producción de eritropoyetina (EPO) que estimula la producción de glóbulos rojos en la medula ósea, sin embargo este aumento es mantenido como respuesta aguda en los primero 5 días y el aumento de los glóbulos rojos ocurrirá paulatinamente llegando a su máximo entre 14 a 30 días, después de ello la EPO caerá y la masa eritrocitaria permanecerá constante mientras se mantenga el estímulo, por otro lado como respuesta aguda es la disminución del volumen plasmático sin embargo se ha sugerido que este cambio es en realidad el traslado de ese volumen de nivel extracelular a intracelular sin pérdida neta de líquidos, también se conoce que el HIF-1 estimula la producción de péptido natriurético atrial lo cual en algunos casos de manera a exposición aguda a la hipoxia el volumen plasmático se aumenta por las pérdidas insensibles sumadas a la perdidas mínimas renales lo cual está en controversia. Otras alteraciones a nivel sanguíneo es que por medio de los metabolitos que se liberan, la curva de disociación de la hemoglobina se desplaza a la derecha aumentando la entrega de oxígeno a los tejidos, posteriormente con el proceso de aclimatización este retorna o incluso en algunos individuos se sitúa

a la izquierda para aumentar la captación pulmonar del oxígeno mediante el aumento de su afinidad al oxígeno (Lundby, 2012).

La primera respuesta a la hipoxia que se presenta de manera inmediata es el aumento de la ventilación en reposo y durante ejercicio para evitar disminución en la presión parcial de oxígeno pulmonar  $PaO_2$ , disminución de la concentración de oxígeno arterial  $CaO_2$ , y esta es estimulada por los quimiorreceptores periféricos principalmente los carotídeos, posteriormente en minutos y horas esta ventilación disminuye pero no hasta valores de normoxia, para luego aumentar de manera constante hasta llegar a una meseta como producto de la aclimatización. Con respecto al ejercicio se sabe que también aumenta la ventilación al estímulo hipóxico, pero por aumento de la sensibilidad de quimiorreceptores. Se sabe además que el gradiente de presiones de oxígeno en el alveolo pulmonar depende de una mayor presión de oxígeno al nivel alveolar que capilar arterial permitiendo la difusión hacia la sangre, de forma aguda y como estímulo a la altitud esto es logrado por la presión de  $O_2$  pulmonar y venosa se reducen manteniendo así la difusión normal, esto ocurre con nativos de tierras bajas en comparación con los nativos quienes si mejoran estos parámetros (Lundby, 2012). En cuanto a la saturación de oxígeno ( $SaO_2$ ) está en reposo es disminuida de manera no dramática y esto va en medida de acuerdo con la altitud y por ende presión barométrica, sin embargo, en ejercicio puede ocurrir desaturaciones considerables tanto en personas sanas como en deportistas y esto con el potencial de producción de síntomas y en otros casos enfermedad relacionada con el estímulo hipóxico de la altitud. Por último, el estímulo hipóxico hace que se estimule la circulación pulmonar con vasoconstricción arterial cambiando así las áreas mal perfundidas bien ventiladas en posibles espacios de compensación dado por la relación de ventilación perfusión pulmonar  $V/Q$  y esto puede ocurrir a altitudes intermedias de 2500 msnm, todo lo anterior producido por el estímulo hipóxico sobre la presión parcial de oxígeno, la posterior desaturación y por último la vasoconstricción pulmonar, en resumen.

El gasto cardiaco con la exposición aguda cuando se reduce tanto la presión parcial de oxígeno  $PaO_2$  y la concentración arterial de oxígeno  $CaO_2$  es a mantenerse dado por el aumento del mismo a nivel basal y a nivel de esfuerzo submáximo dado por el aumento de la frecuencia cardiaca anteriormente dicha por la respuesta catecolaminérgica, dando como resultado el flujo sanguíneo similar al nivel del mar, pero a niveles máximos de esfuerzo físico esto no sucede así dado que se ha visto que como respuesta contrarreguladora el sistema parasimpático puede activarse mayormente impidiendo que se obtenga la frecuencia cardiaca máxima y por ende el gasto cardiaco potencial del individuo no sea desarrollado, este mecanismo

podría servir para disminución de la velocidad y aumento del tiempo que pasa los glóbulos rojos por los capilares pulmonares permitiendo mayor oxigenación de los mismos. Finalmente, en el proceso de aclimatización el volumen sistólico es aumentado en compensación lo que finalmente hace que se restaure el gasto cardiaco en reposo, pero no de la misma forma en esfuerzo o ejercicio de intensidad máxima (Lundby, 2012).

El consumo de oxígeno máximo o  $VO_2max$ , es la capacidad máxima de absorción por los tejidos de oxígeno en un esfuerzo máximo y este el producto de la ecuación de Fick, y es el producto del oxígeno total transportado en la sangre al tejido por el corazón (gasto cardiaco) y la diferencia de la diferencia sistémica de  $O_2$  arterial y venoso, sin embargo para medir esta última sería necesario un catéter venoso que llegue hasta la aurícula derecha y cuantificar el contenido venoso ya que el arterial se puede desde cualquier arteria, para ello se mide de manera indirecta cuantificando el volumen de  $O_2$  inspirado y el  $CO_2$  expirado por medio de un ergoespirómetro, este principalmente mide la ventilación por minuto dando frecuencia y volumen de aire inspirado y expirado por medio de una turbina. El  $VO_2$  es mantenido en reposo gracias al aumento de la ventilación como respuesta respiratoria, sin embargo en esfuerzos máximos no es posible mantenerlo el  $VO_2max$  por la disminución del gasto cardiaco como variable dependiente dicha previamente, por lo tanto cabe anotar que el gasto cardiaco se disminuye pero la absorción de oxígeno por los tejidos se mantiene se observa entonces disminución de la saturación de oxígeno con el ejercicio comparado con el nivel del mar, además de ello se suma la redistribución durante el ejercicio del flujo sanguíneo (West, 2013). La disminución cuantificada del  $VO_2max$  es de aproximadamente 1% por cada 100 msnm de altitud ganada después de los 1500 metros, midiéndose en montañistas que ascendieron al monte Everest este se ha llegado a cuantificar en una pérdida total del 80% en donde prácticamente al caminar se necesitan esfuerzos supramáximos. Hay detalles de la aclimatización y de la fisiología de los nativos que no es del todo compresible ya que se ha ascendido a la cima sin complicaciones en donde sería imposible mantenerse con vida (Lundby, 2012).

En los atletas se ha visto que el consumo máximo de oxígeno puede llegar a ser superior que en personas sedentarias o no activas y este fenómeno tiene hipótesis en la captación aumentada de oxígeno por los tejidos que tienen los atletas (Lundby, Exercise, 2014).

Otro punto a tener en cuenta es que el rendimiento submáximo no es afectado con la altura ya que a intensidades de ejercicio el gasto cardiaco, la ventilación y la diferencia arteriovenosa puede ser sostenida por tanto no es afectada como efecto agudo, como efecto más tardío la aclimatización a alturas intermedias ocurre un

aumento del volumen sistólico, sumado a los efectos hematológicos y de ventilación, el  $\text{VO}_2$  submáximo puede ser aumentado cuando se vuelve a la altura y a partir de estos hallazgos se introduce las diferentes variables probadas para entrenamiento de altura, el efecto anterior es explicado por que al parecer hay desplazamiento hacia la derecha de la curva del consumo de oxígeno, el umbral del lactato o umbral ventilatorio como efecto de la aclimatización, sin embargo estos efectos de la hipoxia desaparecen en pocos días posterior a quitar el estímulo o al volver al nivel del mar (Lundby, 2012).

Tanto en personas entrenadas como no entrenadas físicamente las implicaciones de la exposición a la altura han sido importantemente estudiadas, como interés en la medicina de altura conocer factores predictivos implica anticipar posibles complicaciones por eso existe factores de riesgo y escalas para conocer el riesgo clínico de presenta estas patologías (Heikki M. Karinen, 2010) y (Andrew M. Luks, 2016). En un estudio prospectivo durante un período de 17 años, de 1992 a 2008, 3,994 residentes en donde la cohorte final fue de 1326 sujetos en donde se intentó conocer variables que pudieran predecir probables eventos de enfermedades relacionadas con la altitud como el Mal Agudo de Montaña, Edema cerebral y Edema cerebral asociado a la altura en conjunto enfermedad grave de gran altitud, se realizó un prueba en donde se midieron los efectos de la hipoxia en reposo y durante el ejercicio por medio de un protocolo que posterior a un evaluación médica por medicina de altura se midió  $\text{VO}_2\text{max}$  para establecer las intensidades de ejercicios finales para este protocolo en donde consistió tomar variables de ventilación, saturación, frecuencia cardiaca, durante el reposo en normoxia, reposo en hipoxia, ejercicio en hipoxia y ejercicio en normoxia (cabe resaltar que la hipoxia fue normobárica con aire hipoxificado por una máquina que disminuía la  $\text{FIO}_2$  a 0.15-0.16 simulando altitudes altas o mayores a 4000 msnm), además todas estas variables se relacionaron entre sí y entre etapa definiendo así las siguientes variables (Jean-Paul Richalet, 2011).

**Desaturación en reposo:**  $\Delta\text{Sa}_r = \text{Sa}_{rn} - \text{Sa}_{rh}$  (%)

**Desaturación en el ejercicio:**  $\Delta\text{Sa}_e = \text{Sa}_{rn} - \text{Sa}_{rh}$  (%)

**Respuesta ventilatoria en reposo:**  $\text{HVR}_r = (\text{VE}_{rh} - \text{VE}_{rn}) / \Delta\text{Sa}_r / \text{BW} \times 100$  (L/min/kg)

**Respuesta ventilatoria en el ejercicio:**  $\text{HVR}_e = (\text{VE}_{rh} - \text{VE}_{rn}) / \Delta\text{Sa}_e / \text{BW} \times 100$  (L/min/kg)

**Respuesta cardíaca en reposo:**  $\text{HCR}_r = (\text{HR}_{rh} - \text{HR}_{rn}) / \Delta\text{Sa}_r$  (latidos/min/%)

**Respuesta cardíaca durante el ejercicio:**  $HCR_e = (HR_{rh} - HR_{rn}) / \Delta Sa_e$  (latidos/min/%).

Donde los índices **rh** (reacción hipóxica), **rn** (reacción normóxica), **e** (ejercicio), **r** (reposo), **Sa** saturación, **BW** masa corporal en kilos, **HR** (Heart rate o frecuencia cardíaca).

Luego de hallar las anteriores variables estas mismas se correlacionaron con factores de riesgos reconocidos en la altitud que son el sexo femenino, personas entrenadas, síntomas de migraña o historial de patologías de altura previamente, la falta de exposición a la altitud y adicionales en el siguiente cuadro (Luks, Auerbach, Freer, Zafren, & Hackett, 2019).

Tabla 2-2: Clasificación de riesgo de presentar mal de altura de Hackett

CATEGORÍA DE RIESGO	DESCRIPCIÓN
<b>Bajo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personas sin antecedentes de enfermedad de altitud y que ascienden a menos de 2,750 m</li> <li>Personas que tardan <math>\geq 2</math> días en llegar a 2,500–3,000 m, con aumentos posteriores en la elevación del sueño, menos de 500 m por día, y un día adicional para aclimatarse cada 1,000 m.</li> </ul>
<b>Moderado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personas con antecedentes de AMS y ascendentes a 2.500–2.800 m o más en 1 día.</li> <li>Sin antecedentes de AMS y ascendiendo a más de 2.800 m en 1 día.</li> <li>Todas las personas que ascienden más de 500 m por día (aumento de la elevación del sueño) en altitudes superiores a 3.000 m, pero con un día adicional para aclimatarse cada 1.000 m.</li> </ul>
<b>Alto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Historia de AMS y ascenso a más de 2.800 m en 1 día.</li> <li>Todas las personas con antecedentes de HAPE o HACE</li> <li>Todas las personas que ascienden a más de 3.500 m en 1 día</li> <li>Todas las personas que ascienden más de 500 m por día (aumento en la elevación del sueño) por encima de 3.000 m, sin días adicionales para aclimatación</li> <li>Ascensos muy rápidos (como ascensos de menos de 7 días del monte Kilimanjaro)</li> </ul>
<b>Abreviaturas: AMS, enfermedad aguda de las montañas; HACE, edema cerebral a gran altitud; HAPE, edema pulmonar a gran altitud.</b>	

Tomado de Peter H. Hackett, D. R. (2019). Travel at high altitude and altitude sickness. En C. F. CDC, YELLOW BOOK. Atlanta: Oxford University Press.

Entonces al seguimiento por encuesta concluyeron, en una gran población sometida a consulta ambulatoria de medicina de altitud con pruebas de ejercicio

hipóxico, valores altos de  $\Delta Sa_e$  ( $\geq 22\%$ ) y valores bajos de  $HCR_e$  ( $< 0.84$  latidos/min/%) y  $HVR_e$  ( $< 0.78$  L/min/kg) fueron predictores independientes de enfermedad grave de gran altitud, además de edad joven, sexo femenino, actividad física regular, ascenso rápido ( $> 400$  m/día), historia de enfermedad grave de gran altitud, historia de migraña y ubicación geográfica.

Otras escalas actualizadas disponibles y que han aclarado dudas sobre ciertos síntomas que no permiten valorar mejor el riesgo verdadero y que ha generado controversia es el factor de la alteración del sueño el cual fue estudiado por (James Moore, 2020), el cual concluye en estudio reciente que la reciente eliminación de la calidad del sueño del escala de Lake Louis (LLS) fue adecuada, sino que también demostraron que la fatiga tenía un papel igual en el diagnóstico erróneo de mal agudo de montaña AMS. Los datos resaltaron la escasa especificidad del LLS y sugieren que la medición de la enfermedad en altitud se debe someter a una revisión adicional.

Las medidas fueron tomadas por Hipoxificador el cual mide la saturación y la frecuencia cardíaca por medio saturador infrarrojo, y el aire Hipoxificador por medio de la  $FIO_2$ , el ejercicio se realizó en cicloergómetro en donde fue medida la ventilación por medio de máscaras y turbina previamente discutida.

Figura 2-1: Cicloergómetro



Figura 2-2: Hipoxificador GO<sub>2</sub>” Altitude

Todas las pruebas anteriores sirven sin embargo en personas no atletas para predecir enfermedades graves, pero además juntos con las escalas clínicas de predicción o de mayor riesgo de presentar patologías de montaña aumenta la efectividad de la valoración clínica (Meier, Collet, Locatelli, Cornuz, & Kayser, 2017), sin embargo sus datos arrojan datos de quienes tienen mala respuesta adaptativa aguda, en donde se demuestran pobres respuestas ventilatorias agudas al ejercicio, en ocasiones manteniéndolas iguales o respuestas contrarias de reducción de la ventilación y con ello repercutiendo en la saturación y aumentar la probabilidad de disminución del rendimiento en deportes que implican resistencia a la fatiga (Chapman & Levine, 2013).

En cuanto a deporte de alto rendimiento una práctica común entre los atletas de resistencia profesionales de élite y novatos es incorporar los campamentos de entrenamiento de altitud dentro del programa de entrenamiento antes de las competiciones importantes a nivel del mar. Existe múltiples revisiones en donde se ha estudiado los efectos del entrenamiento bajo condiciones de hipoxia para mejora del rendimiento mismo, expandiéndose a otros deportes incluso los acíclicos, y actualmente se ha trabajado en diferentes tipos de entrenamiento de altura denominados de acuerdo en donde se entrena y en donde se duerme o vive, sumando también el llamado entrenamiento de hipoxia intermitente (Keren Constantini, 2017).

Para aumentar el conocimiento sobre estrategias de entrenamiento a la hipoxia se considera que hay múltiples opciones de entrenamiento, uno de ellos se denomina Vivir alto y entrenar bajo con sus siglas en inglés LHTL (Live High/Train Low) la evidencia disponible dice que parece que la masa de Hemoglobina (Hb) aumenta

si (a) la altitud supera los 2100 m; (b) la duración de la exposición es de aproximadamente 3 semanas; y (c) el tiempo diario en hipoxia excede las 14 horas. Los factores parecen depender unos de otros (es decir, inducir una hipoxia más severa) (por ejemplo, 3000 m) no permite una reducción concomitante en el tiempo de exposición diario. También debe recordarse que aproximadamente 3 semanas después de la terminación del estímulo hipóxico, la masa de Hb generalmente se reduce en un 50%, y el tiempo desde el entrenamiento de altura hasta la competencia no debe exceder este período. También debe mencionarse LHTL aumenta el rendimiento al nivel del mar al aumentar la economía del ejercicio en lugar de aumentar el  $VO_2$ máx. El mecanismo subyacente podría estar asociado con cambios en la capacidad de amortiguación muscular. Lundby y col analizaron los resultados de tres estudios independientes y no encontraron cambios en la economía del ejercicio después de la aclimatación a altitud moderada o alta. A la luz de la abrumadora cantidad de estudios de LHTL que no informaron cambios en la economía, parece dudoso que esta sea una variable importante que contribuya a mejorar el rendimiento del nivel del mar (Lundby, 2012).

Los demás entrenamientos como Vivir bajo y entrenar alto con sus siglas en inglés LLTH (Live low/train High), Vivir alto y entrenar alto LHTH (Live High/Train High), sumado a la hipoxia intermitente no parece tener una evidencia sólida para su entrenamiento (Lundby, 2012).

En Colombia es importante el conocimiento de la altitud y sus efectos sobre el rendimiento ya que es un país de montañas gracias a la cordillera de los Andes que con sus ramificaciones, significando así que muchos lugares de la geografía se encuentran poblaciones que sirven y que son su rutina diaria el ambiente hipóxico, pero además esos lugares ocurren competencias deportivas de diversa índole (Ministerio de Ambiente, 2015).

Hay que tener cuidado además de los diferentes deportes ya que cada uno presenta características logísticas, fisiológicas, nutricionales para competir y de allí se debe partir para realizar los diferentes tipos de entrenamiento, porque en una revisión de Peter Bartsch y col, no recomienda el entrenamiento de Vivir alto y entrenar bajo cuando se va a jugar al nivel del mar en fútbol, si bien se ha observado una mejora del rendimiento aeróbico al nivel del mar después de la exposición a una altitud moderada de al menos 12-14 h/día durante un mínimo de 3 semanas, no está claro si esto se traduce en un mejor rendimiento del fútbol y además también hay dudas sobre la hipoxia intermitente (Peter Bartsch, 2008). Pero si hay que decir que en un estudio realizado George P. Nassis sobre datos en la copa del mundo de fútbol en Suráfrica 2010 tuvo como hallazgos principal que el

rendimiento de resistencia de los equipos, determinado por la distancia total cubierta durante el juego, fue 3.1% menor en los partidos jugados a altitudes superiores a los 1,200 m en comparación con los valores del nivel del mar (NASSIS, 2013). Gore y colaboradores, analizaron documentación acerca de resultados de partidos y del rendimiento disponibles a nivel del fútbol suramericano en donde halló ciertos resultados que le permitieron hacer diferentes recomendaciones para juegos o competencias de altitud moderada y alta entre 2000-3600 msnm, entrenando en similares altitudes entre 1 a 2 semanas previo al partido o la competencia, si se sobrepasa esa altitud es mejor no llegar a exponerse dado que es mayor el riesgo de efectos a grandes altitudes, la estrategia Vivir en alto y entrenar bajo es recomendado como preparación para partidos en altitudes moderadas y altas ya que permite de manera adecuada el proceso de aclimatización, si no hay la posibilidad de lo anterior se aconseja realizar procesos de hipoxia simulada para ayudar al proceso de aclimatización previo a una a dos semanas (Gore, McSharry, Hewitt, & Saunders, 2008).

Por todo lo anterior retoma la validez de la prueba de quienes pudieran ser objetivo de mayor sensibilidad a la hipoxia y entrenar su adaptación previa para disponer de jugadores importantes en deporte de equipo, pero en deportes individuales para ayuda en el mantenimiento de su rendimiento y disponer de una prueba practica más corto que el sugerido por Richalet, pero con su mismo poder predictivo, es necesario por tal motivo hacer el análisis de los resultados disponibles en base de datos.

## **3. Objetivos**

### **a. OBJETIVO GENERAL**

1. Establecer si hay o no validez de la prueba de intolerancia a la hipoxia acortada vs la convencional Richalet.

### **b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Revisar la metodología propuesta para la prueba acortada vs la convencional.
2. Comparar las medidas de predicción sugeridas en la prueba de intolerancia a la hipoxia de la prueba convencional con la acortada sugerida

## **4. Metodología**

### **4.1 Población.**

Miembros del equipo de trabajo del Centro de Ciencias del deporte de Coldeportes (12), mayores de edad, sin contraindicaciones absolutas para la realización de ejercicio físico de cualquier tipo.

### **4.2 Criterios de Inclusión**

- Hombre o mujer que trabajan o realizan prácticas en el Centro de Ciencias del deporte de Coldeportes.
- Estado de Salud adecuado para pruebas a realizar
- Mayores de 18 años

### **4.3 Criterios de exclusión**

- Sufrir de afecciones de salud previas y/o detectadas durante la investigación
- Lesiones osteomusculares agudas que clasifiquen en estado de no aptitud.
- Cirugías recientes agudas
- Consumo de drogas psicoactivas
- Presencia de infecciones o estados febriles que imposibilitarán la asistencia

### **4.4 Descripción metodológica del proyecto**

El presente es un estudio correlacional comparativo que realizara la evaluación de una base de datos, de sujetos sometidos a una prueba a sensibilidad a la hipoxia convencional con un tiempo de duración de 16 minutos lo cuales corresponden a la medición de la ventilación, frecuencia cardiaca y saturación de oxígeno, mientras cada sujeto está en reposo en normoxia (aire ambiente Bogotá), reposo en hipoxia normobárica (FiO<sub>2</sub> 0.16) altitud simulada de aproximadamente 400 msnm, ejercicio en normoxia (Cicloergómetro) y luego ejercicio en hipoxia (Cicloergómetro) cada etapa de 4 minutos para un total de 16 minutos, luego se hizo la misma medición en el mismo orden así 1 minuto en reposo normoxia, 2 minutos de reposo en hipoxia, 3 minutos de ejercicio en normoxia y 4 minutos de ejercicio en hipoxia para un total de 10 minutos. Se pone un ejemplo del resultado de uno de los sujetos de

una fotografía dada por la medición en tiempo real de la misma en la figura 4-1. En donde se ve una respuesta adicionalmente normal y adecuada, también se coloca la figura 4-2 en donde se evidencia una respuesta inadecuada obtenida en uno de los sujetos.

Figura 4-1: Relación ventilación vs tiempo de la prueba de uno de los sujetos (Respuesta adecuada esperada)

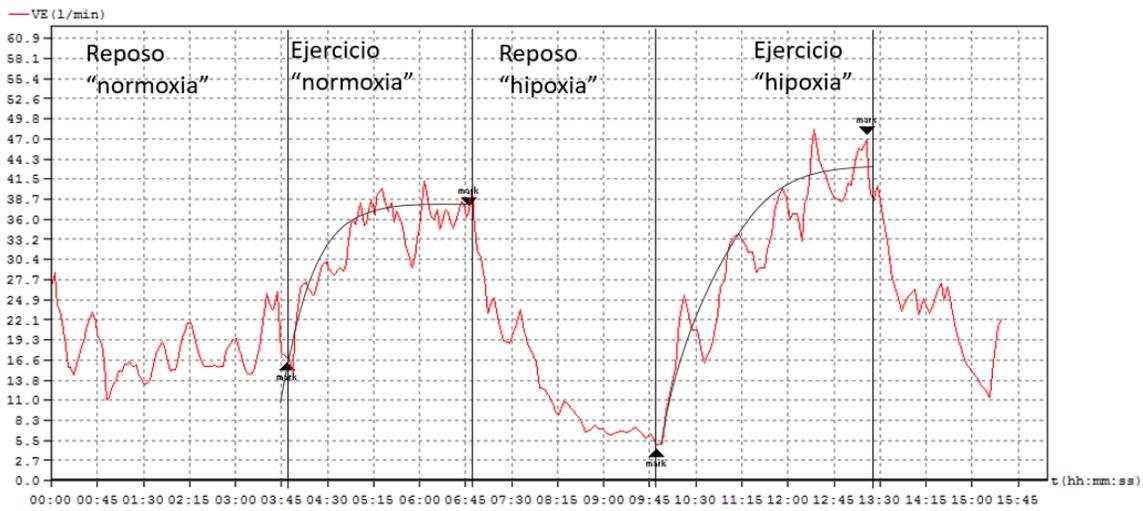


Figura 4-1: Relación ventilación vs tiempo de la prueba de uno de los sujetos (Respuesta inadecuada)



## 4.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se hará en varias fases de interpretación teniendo en cuenta las variables que se elijan para ser evaluadas en la base de datos seleccionada.

Todos los resultados serán sometidos a un análisis estadístico comparativo por medio de softwares que faciliten el procesamiento de los datos y su adecuada interpretación. El proyecto será apoyado por un experto en epidemiología y metodología de la investigación.

Las variables escogidas para aplicar coeficiente de correlación junto análisis de Bland-Altman, **Diferencia de Saturación en ejercicio** ( $\Delta\text{SatO}_2 \text{ ex} = \text{Sa}_{\text{m}} - \text{Sa}_{\text{rh}} (\%)$ ), **Respuesta ventilatoria en ejercicio** calculado con delta de ventilación ( $\Delta\text{VE}$ ) sobre Delta de Saturación ( $\Delta\text{SaO}_2$ ) relativo (sobre el peso corporal)  $\text{DVE}/\text{DSaO}_2/\text{Peso} \cdot 100$  en ejercicio y **Índice de Respuesta cardíaca durante el ejercicio** ( $\Delta\text{Fc}/\Delta\text{SaO}_2$  en ejercicio) =  $(\text{HR}_{\text{rh}} - \text{HR}_{\text{m}}) / \Delta\text{Sa}_{\text{e}}$  (latidos/min/%). Las anteriores son seleccionadas por ser las variables más importantes para predecir mal agudo de montaña descrita en los estudios de Richalet y se considera las variables más importantes para la validación de la prueba.

## 5. Resultados

Las datos de la población son presentados en la tabla 5-1, en donde no hay mayor dato que acotar solo un individuo mayor de 50 años, y dos mujeres incluidas en el grupo.

Tabla 5-1: Datos generales de la muestra de 12 individuos

• Sujetos= 12
• Mujeres= 2 Hombres= 10
• Edad promedio: 31.3 años (21.6-8.3).
• Peso promedio: 75.6 Kg (33.3-26.6).
• Índice de masa corporal promedio: 25.61 (7.47-6.95)

Además, se presentan los resultados de las principales variables a comparar de cada uno de los 12 individuos y son presentados en la tabla 5-2.

Tabla 5-2: Resultados de las principales variables en cada uno de los individuos

Convencional	Acortada	Convencional	Acortada	Convencional	Acortada
△SatO <sub>2</sub> ex (%)	△SatO <sub>2</sub> ex (%)	Dfc/DSaO <sub>2</sub> en ejercicio (lat/min/%)	Dfc/DSaO <sub>2</sub> en ejercicio (lat/min/%)	DVE/DSaO <sub>2</sub> /Peso*100 en ejercicio (ml/min/kg/%)	DVE/DSaO <sub>2</sub> /Peso*100 en ejercicio (ml/min/kg/%)
17	19	0,82	0,37	-0,30	1,21
13	13	1,38	2,08	0,67	2,58
8	11	3,00	1,64	-0,28	0,31
13	11	1,08	1,27	0,04	0,95
20	17	1,10	1,53	-0,13	1,16
15	10	0,87	1,10	-0,97	-1,27
14	15	-0,14	0,33	-0,73	-0,17
14	13	1,57	1,62	1,16	3,38
14	11	1,50	2,00	-0,13	0,62
12	12	2,00	2,33	1,12	0,35
9	11	1,22	1,09	2,58	2,19
22	19	1,00	1,79	0,15	0,21

Las variables que resultan ser más relevantes para el diagnóstico de Mal Agudo de Montaña se seleccionaron para ser comparadas entre los dos pruebas.1) Diferencia de Saturación en ejercicio ( $\Delta\text{SatO}_2 \text{ ex} = \text{Sa}_{\text{m}} - \text{Sa}_{\text{rh}}$  (%)).  $r = 0.7832$  entre Prueba Convencional vs Prueba Acortada (correlación fuerte);  $p = 0,0026$ , Valor  $t = 3.983$  y significancia con  $T_{\text{student}}(0.005, 10) = 3.169$ ,  $3.983 > 3.169$  por lo cual esta variable es probada como significativa e hipótesis en cuanto está sola variable aceptada (Grafica 5-1), Además se observa la gráfica bland-altman con una concordancia de las diferencias individuales adecuada así como las promedios de las pruebas (Grafica 5-2) con un riesgo de sesgo del 0.75 y desviación estándar para el sesgo de 2.491 y límite acordado del 95%, desde -4.132 hasta 5.632.

Figura 5-1: Diferencia o delta de saturación en ejercicio

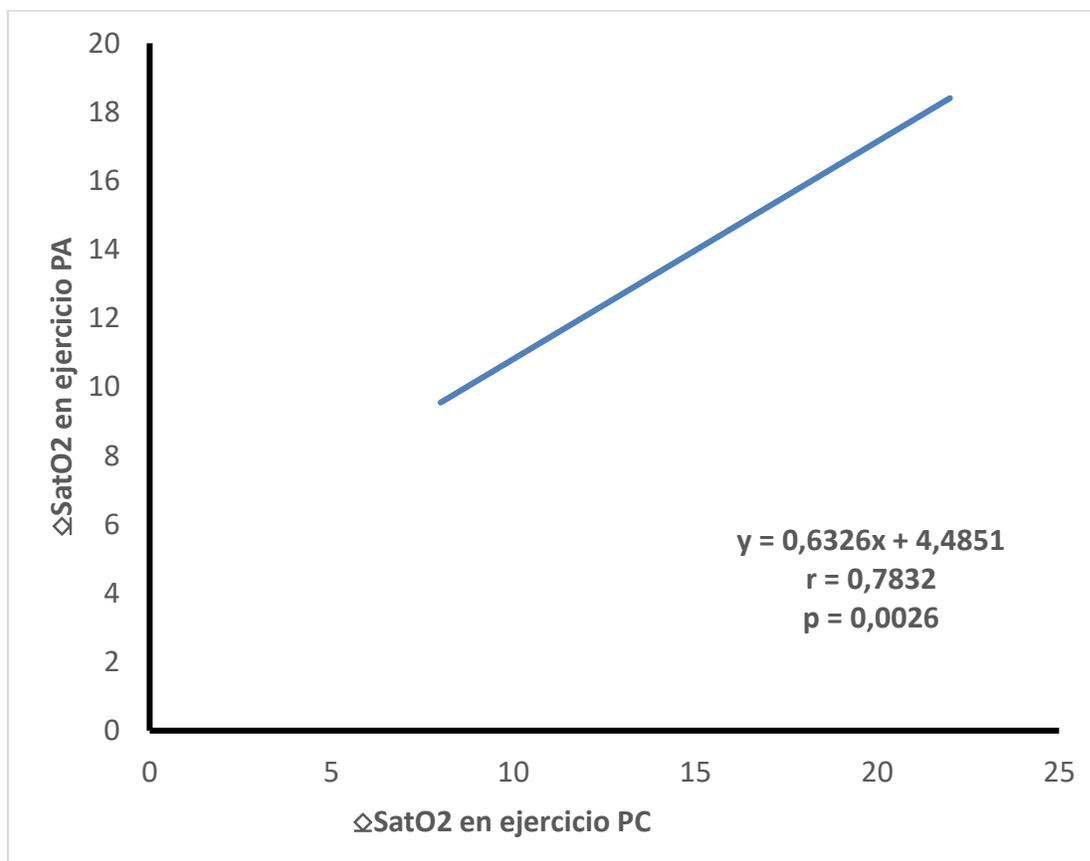
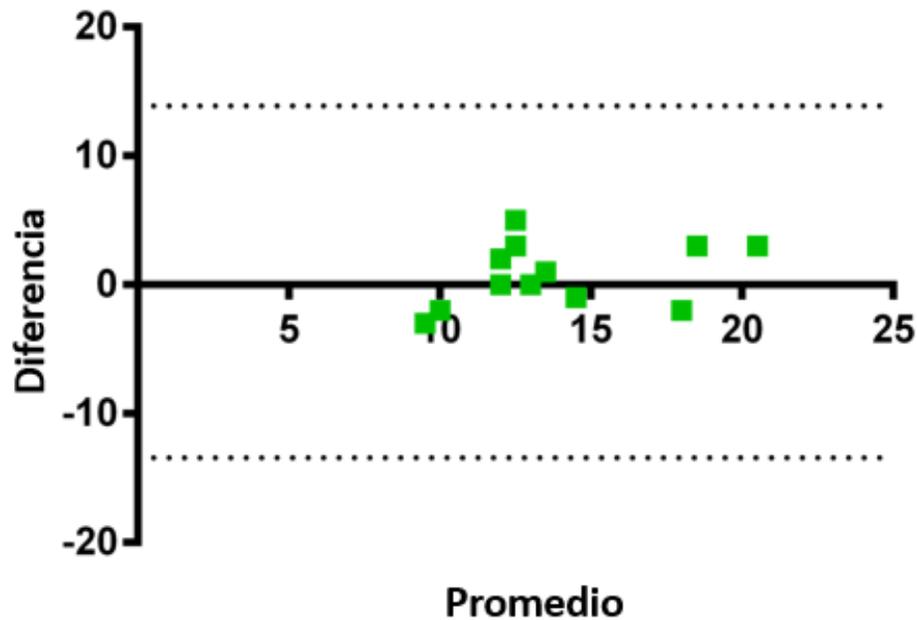


Figura 5-2: Bland-Altman de la diferencia o delta de saturación de oxígeno en ejercicio



2) Respuesta ventilatoria en ejercicio calculado con delta de ventilación ( $\Delta VE$ ) sobre Delta de Saturación ( $\Delta SaO_2$ ) relativo (sobre el peso corporal)  $DVE/DSaO_2/Peso \cdot 100$  en ejercicio;  $r = 0.6849$  (correlación moderada);  $p = 0,0140$ , Valor  $t = 2.0583$  y significancia con  $T_{student(0.05,10)} = 1.812$ ,  $2.0583 > 1.812$  por lo cual esta variable es probada como significativa e hipótesis en cuanto está sola variable aceptada, (Grafica 5-3), Además se observa la gráfica bland-altman con una concordancia de las diferencias individuales adecuada, no así ocurre en los promedios de las pruebas (Grafica 5-4) con un riesgo de sesgo del 0.75 y desviación estándar para el sesgo de 0,9326 y limite acordado del 95%, desde -2,523 hasta 1,132.

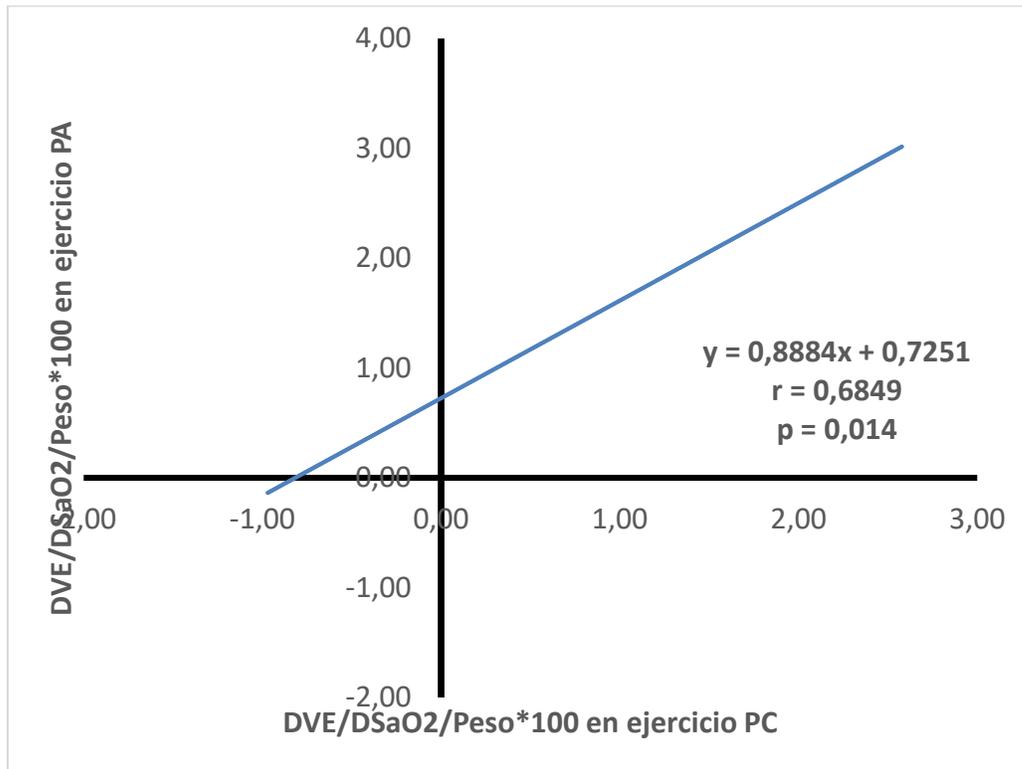
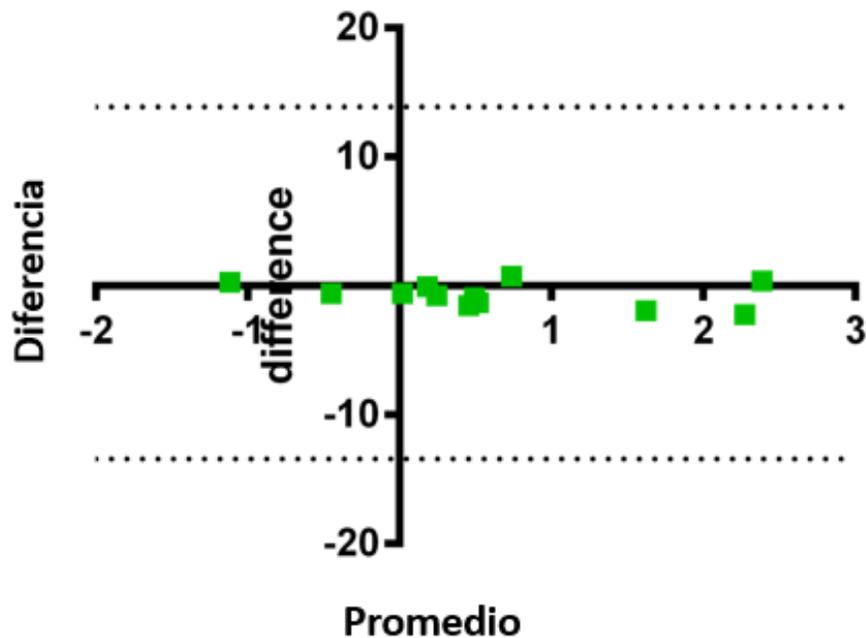
Figura 5-3: Respuesta ventilatoria en ejercicio relativa a peso ( $DVE/DSaO_2/Peso*100$ )

Figura 5-4: Bland-Altman de Respuesta ventilatoria en ejercicio relativa a peso



3) Índice de Respuesta cardíaca durante el ejercicio ( $\Delta Fc/\Delta SaO_2$  en ejercicio) =  $(HR_{rh}-HR_{rn}) / \Delta Sa_e$  (latidos/min/%).  $r = 0.6495$  (correlación moderada);  $p = 0,023$ , Valor  $t = 2.165$  y significancia con  $T_{student(0.05,10)} = 1.812$ ,  $2.165 > 1.812$  por lo cual esta variable es probada como significativa e hipótesis en cuanto está sola variable aceptada. (Grafica 5-5), Además se observa la gráfica bland-altman con una concordancia de las diferencias individuales adecuada, no ocurre así en los promedios de las pruebas (Grafica 5-6) con un riesgo de sesgo del  $-0,1450$  y desviación estándar para el sesgo de  $0,5874$  y limite acordado del 95%, desde  $-1,296$  hasta  $1,006$ .

Figura 5-5: Índice de respuesta cardíaca durante el ejercicio ( $\Delta Fc/\Delta SaO_2$  en ejercicio) =  $(HR_{rh}-HR_{rn}) / \Delta Sa_e$  (latidos/min/%).

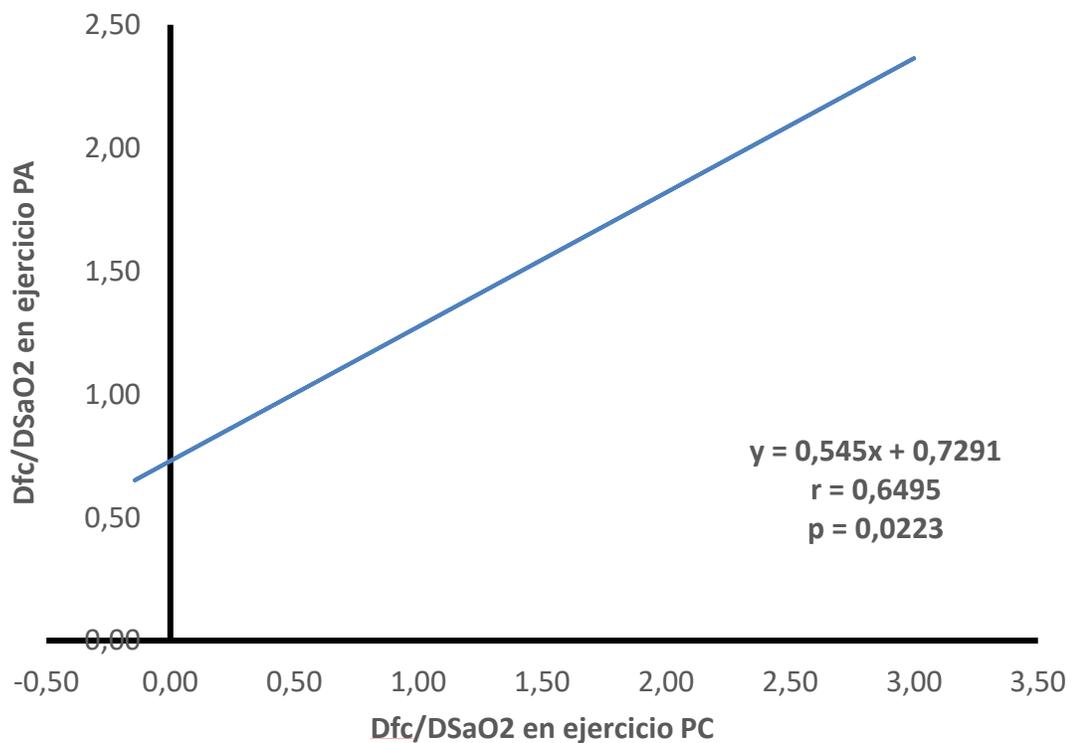
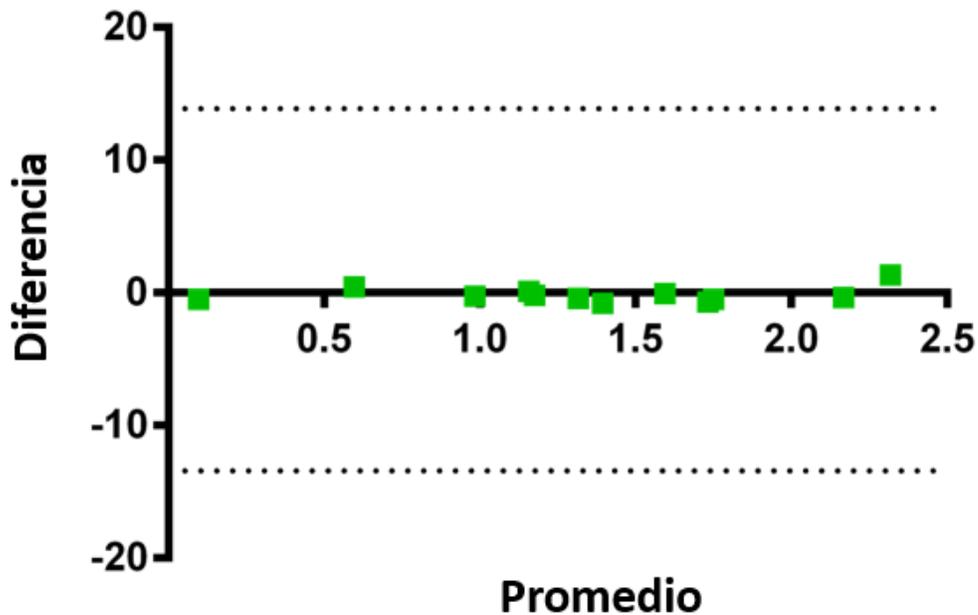


Figura 5-6: Bland-Altman del Índice de respuesta cardiaca durante el ejercicio



## 5.1 Discusión

Se decidió previamente que las tres variables que nos da la prueba son las más importantes para determinar mal agudo de montaña, y que, en la actualidad, se indica a nivel deportivo, también observar como factor determinante en rendimiento para un atleta ser buen respondedor o mal respondedor a la hipoxia o lo que equivale a su sensibilidad a los quimiorreceptores a la hipoxia (Jean-Paul Richalet, 2011). Como primera medida, se aplicó análisis de correlación de una variable a otra; el cual señala el grado de afectación de cada variable, de la prueba acortada a la prueba convencional, y de las tres (Figura 5-1, Figura 5-3, Figura 5-5), siendo la diferencia de saturación de oxígeno en ejercicio la única con correlación fuerte y los índice de respuesta ventilatoria e índice de respuesta cardiaca moderadas, con significancia estadística, siendo la más estable e importante para la valoración tanto

de pacientes como de atletas la saturación de oxígeno en reposo vs ejercicio y de normoxia vs en hipoxia, ya que esta es una variable simple, y fisiológicamente hablando es la constante vital que responde de manera inmediata a las adaptaciones agudas a la hipoxia (Lundby, 2012), lo que daría como resultado a futuro una prometedora proyección para la validación de una nueva prueba corta. El segundo análisis que se realizó fue el análisis Bland-Altman en el cual se pretendía observar su concordancia y con ello determinar que tanto varía de un individuo a otro los resultados de la prueba convencional vs la acortada (Bland & Altman, 1986); este análisis que toma datos tanto a nivel estadístico como de sus gráficos se destacan varios elementos, lo primero y en cuanto al estadístico el riesgo de sesgo es bajo, sin embargo, sus rangos de desviaciones estándar son aceptables, pero el rango mayor de desviaciones estándar permite un amplio rango de error por lo cual no es una buena medida para evaluar su concordancia, y todas ocurren de manera similar en las tres variables. En consecuencia, fue necesario valorar a nivel gráfico dado sus resultados base, y en todas coinciden que la diferencia individual se encuentra agrupadas en las tres variables, por lo tanto, se puede inferir que a nivel de diferencia de saturación de oxígeno en ejercicio, el índice de respuesta ventilatoria y el índice de respuesta cardiaca no variaron mucho a nivel individual y, revisando cada individuo es concordante (Bland & Altman, 1986), no obstante, esto no ocurrió de manera similar al ver los resultados promedios de la prueba en la que la concordancia promedio no produjo resultados agrupados por lo menos en el índice de respuesta cardiaca e índice de respuesta ventilatoria, sin embargo, a nivel de alto rendimiento se valoran precisamente los individuos como únicos en el que sus comparaciones son sobre si mismos, mas no de valores promedios generales, los cuales podrían ser aplicables a las pruebas dado estos resultados (Keren Constantini, 2017).

Adicionalmente, se hace mención que la diferencia de saturación de oxígeno en ejercicio si arroja una concordancia promedio adecuada y aceptable, por lo tanto, a nivel de correlación, pero con mayor nivel de concordancia de esta variable, son

buenas y podría ser por ahora la única variable a considerar para realizar la validación de la prueba acortada se puede ver la Figura 5-1 y 5-2 para corroborar. En tercer lugar, dentro del análisis de la prueba es observar el resultado gráfico del seguimiento de la ventilación del individuo durante toda la prueba, en la metodología (Figura 4-1 y Figura 4-2), se agrega intencionalmente por que a nivel de rendimiento más allá de medidas precisas del análisis de las tres variables: diferencia de saturación de oxígeno en ejercicio, índice de respuesta ventilatoria relativa e índice de respuesta cardiaca, también se observa el comportamiento de la respuesta ventilatoria y es que tanto en reposo como en ejercicio, al aplicar el estímulo hipóxico y por efecto de respuesta de los quimiorreceptores carotídeos y posteriormente a nivel central, la ventilación normalmente en quienes responden de manera adecuada se aumenta, por el contrario, aquellos que no presentan una respuesta puede ocurrir lo siguiente, en primer lugar, la ventilación es mantenida y en segundo lugar, la ventilación se disminuye afectando otras variables como la frecuencia cardiaca, la saturación de oxígeno, el contenido arterial de oxígeno etc. (Lundby, 2012). Lo anterior claramente se observó en la totalidad de los sujetos identificando tanto a los buenos como a los malos respondedores y estos a su vez, susceptibles de entrenamiento con la hipoxia, ya sea con campamentos de altura o hipoxia intermitente con el objetivo de mejorar sus respuesta y por ende la menor afectación del rendimiento deportivo en condiciones de altura, dado que como premisa el rendimiento siempre se verá afectado en los deportes en el que el tiempo es factor vital, pero que lo que se busca es la menor afectación (Keren Constantini, 2017).

Es necesario mencionar a su vez, que el análisis realizado es a partir de una base de datos recogida de pruebas piloto, en la que se evidencia que la metodología de la prueba no presentó una condición estricta de horarios algunas fueron en la tarde otras en la mañana, en algunos sujetos las dos pruebas fueron aplicadas el mismo día y en días diferentes, el control de la carga del ejercicio valorada de acuerdo a percepción subjetiva de lo que cada individuo presentara, falta de control de la ingesta de alimentos como el café que pudiera afectar la respuesta (Lundby, 2012),

adicionalmente el estado físico individual, como la condición o fitness cardiorrespiratorio ya que habían sujetos entrenados y sedentarios.

Por lo tanto, al realizar el análisis de correlación, concordancia y otro más subjetivo de las gráficas de cada sujeto, y estudiando la fisiología de la sensibilidad de los quimiorreceptores a la hipoxia, hubo una buena similaridad de los resultados individuales, los cuales se pueden ver en los gráficos bland-altman, identificación de los buenos y malos respondedores en la respuesta ventilatoria y en ultimas estos resultados de unas pruebas con rigor metodológico descrito, se puede sugerir que la validación de una nueva prueba acortada es factible, dado que no hay antecedentes de tal estudio, viendo por ahora más utilidad de esta prueba en atletas para futuras intervenciones en el rendimiento, con el saldo pendiente de observar la utilidad para la salud.

Se reconoce que las limitaciones del estudio fue la metodología de la prueba ni fue estricta en población heterogénea, con diferentes condiciones ambientales, además del número de sujetos nada comparable con la de la prueba original, sin embargo, se valora ya que hay resultados prometedores aun con todo lo anteriormente mencionado y que a futuro plantea el realizar el estudio con un número mayor de sujetos y corrigiendo para dar mayor validez a la prueba acortada.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### a. Conclusiones

Se encuentra, en cuanto a la correlación de tres variables solo una correlación fuerte y fue la diferencia de saturación de oxígeno en el ejercicio, por lo tanto, se puede aplicar la prueba en alto rendimiento si se quisiera observar solo esta variable, ya que al revisar el análisis Bland-Altman también sus resultados fueron buenos.

No se puede validar aun la prueba acortada dado que la mayoría de sus datos al someterlos a análisis estadísticos no dan resultados adecuados. Además, se tiene como limitación el número de la muestra.

Si bien fueron pilotajes y el análisis estadístico no es bueno para todas las variables en su mayoría, si es por ahora una manera practica de valoración en sujetos para intervenciones en alto rendimiento ya que identifica de manera amplia los que responden adecuado y aquellos que son susceptibles para entrenar la respuestas hipóxica. Queda en deuda dado sus variables importantes para predecir el mal del altura la utilidad de la prueba corta en cuanto a salud.

### b. Recomendaciones

Se encuentra bastas condiciones en la metodología acerca de cómo realizaron las pruebas piloto que no permitió mejora resultados, sin embargo, los resultados obtenidos a nivel individual y para la aplicación en alto rendimiento son prometedores y en miras para valoración en salud para otras personas no atletas, en consecuencia, y con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos de las bases de datos el corregir los problemas metodológicos del pilotaje previo podrían obtener mejores resultados y si el numero de la muestras es mucho mayor y ojala equiparable de la prueba original, podría validarse una prueba corta de sensibilidad a quimiorreceptores a la hipoxia tanto para el alto rendimiento como para la salud de no atletas.

## 7. Bibliografía

1. Andrew M. Luks, E. R. (2016). Acute high-altitude sickness. *European Respiratory Review*.
2. Chapman, R. F., & Levine, A. S. (2013). Timing of Arrival and Pre-acclimatization Strategies for the Endurance Athlete Competing at Moderate to High Altitudes. *HIGH ALTITUDE MEDICINE & BIOLOGY*.
3. Gore, C. J., McSharry, P. E., Hewitt, A. J., & Saunders, P. U. (2008). Preparation for football competition at moderate to high altitude. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sport*.
4. Heikki M. Karinen, J. E. (2010). Prediction of Acute Mountain Sickness by Monitoring Arterial Oxygen Saturation During Ascent. *HIGH ALTITUDE MEDICINE & BIOLOGY*.
5. James Moore, M. J. (2020). The Lake Louise Score: A Critical Assessment of Its Specificity. *HIGH ALTITUDE MEDICINE & BIOLOGY*.
6. Javier Aceña Medina, P. A. (2017). Effects of Hypoxia on Mountaineers Exposed to Extreme Altitudes. *Apuntes. Educación Física y Deportes*.
7. Jean-Paul Richalet, P. L.-P. (2011). Physiological Risk Factors for Severe High-Altitude Illness A Prospective Cohort Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*.
8. Keren Constantini, D. P. (2017). A Clinician Guide to Altitude Training for Optimal Endurance Exercise Performance at Sea Level. *HIGH ALTITUDE MEDICINE & BIOLOGY*.
9. Luks, A. M., Auerbach, P. S., Freer, L., Zafren, K., & Hackett, P. H. (2019). Wilderness Medical Society Clinical Practice Guidelines for the Prevention and Treatment of Acute Altitude Illness: 2019 Update. *WILDERNESS & ENVIRONMENTAL MEDICINE*.
10. Lundby, C. (2012). Physiologic Systems and Their Responses and Conditions of Hypoxia. En M. J. Peter A. Farrell, *ACSM's Advanced Exercise*

- Physiology Second Edition (págs. Cap 24 Pag 603-622). Baltimore: Wolters Kluwer.
11. Lundby, C. (2014). Exercise. En P. B. Erik R. Swenson, High Altitude, Human Adaptation to Hypoxia (págs. 301-324). New York: Springer.
  12. Meier, D., Collet, T.-H., Locatelli, I., Cornuz, J., & Kayser. (2017). Does This Patient Have Acute Mountain Sickness? The Rational Clinical Examination Systematic Review. JAMA | The Rational Clinical Examination.
  13. Milledge, J. S. (2013). Athletes and altitude. En J. S. John B. West, High Altitude Medicine And Physiology Five Edition (págs. Cap 29. 416-425). Boca Raton: Taylor and Francis.
  14. Ministerio de Ambiente. (11 de Diciembre de 2015). Obtenido de Minambiente: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2170-colombia-pais-de-montanas>.
  15. NASSIS, G. P. (2013). EFFECT OF ALTITUDE ON FOOTBALL PERFORMANCE: ANALYSIS OF THE 2010 FIFA WORLD CUP DATA. Journal of Strength and Conditioning Research.
  16. Nicholas J. Johnson, A. M. (2016). High-Altitude Medicine. Medical Clinics of North America.
  17. P W Barry, A. J. (2003). Altitude illness. British Medical Journal.
  18. Peter Bartsch, B. S. (2008). Consensus statement on playing football at different altitude. Scandinavian Journal of Medicine and Science sport.
  19. Peter H. Hackett, D. R. (2019). Travel at high altitude and altitude sickness. En C. F. CDC, YELLOW BOOK. Atlanta: Oxford University Press.
  20. West, J. B. (2013). Exercise. En J. S. John B. West, High Altitude Medicine And Physiology Five Edition (págs. Cap 12- 164-184). Boca Raton: Taylor & Francis.
  21. Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING AGREEMENT BETWEEN TWO METHODS OF CLINICAL MEASUREMENT. The Lancet.