



ORIGINAL

Impacto del aire enrarecido de una cueva mediterránea en humanos, a nivel cardiovascular



Ignasi de Yzaguirre y Maura^{a,*}, Gonzalo Grazioli^b, Monica Domènech Feira-Carot^c, Diego Dulanto Zabala^d, Marta Sitges Carreño^b y Josep Antoni Gutiérrez Rincón^a

^a Medicina Deportiva, Consejo Catalán del Deporte, Gobierno de Cataluña, Barcelona, España

^b Servicio de Cardiología, Instituto del Tórax, Hospital Clínico de Barcelona, Barcelona, España

^c Unidad de HTA y RCV, Medicina Interna, ICMiD, Hospital Clínico de Barcelona, Barcelona, España

^d Servicio de Anestesiología y Reanimación, Hospital Universitario Basurto, Bilbao, España

Recibido el 2 de noviembre de 2015; aceptado el 18 de enero de 2016

Disponible en Internet el 22 de marzo de 2016

PALABRAS CLAVE

Aire enrarecido;
Hipoxia;
CO₂;
Parasimpático;
Variabilidad cardíaca;
Arritmia

Resumen

Introducción: Estudio de la adaptación fisiológica en personas respirando aire enrarecido en una sima.

Objetivo: Investigar la capacidad arritmogénica del aire enrarecido y las alteraciones del sistema nervioso autónomo (simpático y parasimpático). Establecer unos niveles de corte más allá de los cuales hay que tomar medidas preventivas.

Método: Veinticinco espeleólogos, 6 de ellos pertenecientes a cuerpos profesionales de rescate, sometidos a controles en reposo en el exterior, respirando aire de composición normal (NA), y un control subterráneo, también en reposo, respirando aire enrarecido de origen natural (RA) en un espacio confinado (O₂: 13,38 ± 1,5% y CO₂: 2,23 ± 0,31%). Monitorizados mediante control Holter cardíaco y presión arterial.

Resultados: Pulso cardíaco de reposo (NA: 81,9 ± 15,1 latidos vs. RA: 83,8 ± 17,3 latidos en RA; p ≤ 0,58). Presión arterial sistólica (NA: 130,3 ± 17,2 mmHg vs. RA: 140,2 ± 21,3 mmHg; p ≤ 0,0003). Presión arterial diastólica (NA: 78,2 ± 11,0 mmHg vs. RA: 85,5 ± 11,2 mmHg; p ≤ 0,0002). Variabilidad cardíaca: RMSSD (NA: 25,9 ± 13,8 ms vs. RA: 36,9 ± 17,8 ms; p ≤ 0,003); NN50 (NA: 49,0 ± 66,2 latidos vs. RA: 111,7 ± 102,8 latidos; p ≤ 0,003); pNN50 (7,5 ± 11,3% en NA vs. 15,9 ± 15,8% en RA; p ≤ 0,0013). Análisis de Fourier: TP (NA: 1.759,5 ms² vs. RA: 2.611,5 ms²; p < 0,04); HF (NA: 301,5 ± 329,4 ms² vs. RA: 662,3 ± 762,8 ms²; p ≤ 0,02). Se detecta un incremento de los acontecimientos arrítmicos cuando comparamos la hora que incluye la prueba 1 (H_{NA}) con aire de proporciones normales versus la hora que incluye la prueba 2 (H_{RA}) con aire enrarecido. Hay una clara correlación estadística de eventos arrítmicos en ambas situaciones: (latidos ectópicos en RA) = 2,9859 × (latidos ectópicos en NA) + 1,5622; n = 24; r = 0,814; p < 0,0001.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: 14521ym@comb.cat (I. de Yzaguirre y Maura).

Conclusiones: La exposición al aire enrarecido en reposo de tan solo 10 min provoca una respuesta presora de la presión arterial sistólica y diastólica, comparada con aire normal. La variabilidad cardíaca, en situación de reposo estandarizada, muestra una respuesta de tipo parasimpático, con el aumento de los parámetros rMSSD y HF cuando los sujetos están sometidos a una atmósfera de aire enrarecido. En este caso, compuesto por 13% de O₂ y 2,5% de CO₂. En aire enrarecido, como el de la sima estudiada, los sujetos presentaban el triple de fenómenos arrítmicos que cuando realizan una tarea con carga similar en aire estándar.

© 2016 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

KEYWORDS

Rarefied air;
Hypoxia;
CO₂;
Parasympathetic;
Heart rate variability;
Arrhythmia

Effect of rarefied air in a Mediterranean cave at cardiovascular level in humans

Abstract

Introduction: Study of physiological adaptation in people breathing rarefied air in a cave.

Objective: To investigate the arrhythmogenic capacity of rarefied air and changes the autonomic nervous system (sympathetic and parasympathetic). To establish cutoff levels beyond which preventive measures must be taken.

Method: The study included 25 cavers, monitored by ECG Holter and blood pressure measurements in 2 situations at rest, one outside the cave breathing normal air composition (NA), and the other underground, breathing rarefied air of natural origin (RA) in a confined space (O₂: 13.38 ± 1.5% and CO₂: 2.23 ± 0.31%).

Results: Resting heart rate (NA: 81.9 ± 15.1 beats per minute (bpm) vs. RA: 83.8 ± 17.3 bpm; $P \leq .58$). Systolic blood pressure (NA: 130.3 ± 17.2 mmHg vs. RA: 140.2 ± 21.3 mmHg; $P \leq .0003$). Diastolic blood pressure (NA: 78.2 ± 11.0 mmHg vs. RA: 85.5 ± 11.2 mmHg; $P \leq .0002$). Heart rate variability: RMSSD (NA: 25.9 ± 13.8 ms vs. RA: 36.9 ± 17.8 ms; $P \leq .003$), NN50 (NA: 49.0 ± 66.2 bpm vs. RA: 111.7 ± 102.8 bpm; $P \leq .003$); pNN50 (NA: 11.3% ± 7.5 vs. RA: 15.9 ± 15.8%; $P \leq .0013$). Fourier analysis: TP (NA: 1,759.5 ms² vs. RA: 2,611.5 ms²; $P \leq .04$); HF (NA: 301.5 ± 329.4 ms² vs. RA: 662.3 ± 762.8 ms²; $P \leq .02$). An increase in arrhythmic events is detected when comparing the hour that included test 1 (HNA) in normal air with the hour that included test 2 (HRA) with rarefied air. There is a correlation of arrhythmic events in both situations: (ventricular ectopic beats in RA) = 2.9859 × (ventricular ectopic beats NA) + 1.5622; n = 24; r = 0.814; $P < .0001$.

Conclusions: Exposure to RA at rest for 10 minutes causes a pressor response in systolic and diastolic blood pressure compared to normal air (NA). Heart rate variability in a standardised situation and rest shows a parasympathetic response, with increased rMSSD and HF parameters when subjects are subjected to an atmosphere of RA. In RA, the subjects had three times more arrhythmic events when compared to NA.

© 2016 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Introducción

En junio de 2013, un grupo de espeleólogos descubrieron una nueva cavidad en el macizo del Garraf (Cataluña, España). La exploración fue muy dura, porque se realizó en condiciones de aire empobrecido en oxígeno (hasta el 11,3%) y alto en CO₂ al 2,5% (25.000 ppmv). De este aire solo se conocen, como características, estar sobresaturado de H₂O y tener un pH = 6.

Sin apoyo respiratorio adicional, exploran hasta la profundidad de -193 m con permanencias a una concentración de oxígeno del 15% durante más de 2 h.

Este fenómeno del aire enrarecido, conocido desde hace más de 100 años y localmente denominado *guilla*, se da de forma natural en cuevas de Mallorca, de Cataluña, del Rosellón francés y también de otras partes del mundo¹⁻⁴.

Podemos encontrar una situación similar en accidentes mineros¹, en submarinos y en otros artilugios con atmósferas confinadas o mantenidas artificialmente².

Existen publicadas diferentes investigaciones referentes a la tolerancia humana a las atmósferas enrarecidas⁵⁻¹⁰, pero hay pocas investigaciones que describan la adaptación fisiológica humana, cuando además hay baja altitud y la gravedad es normal.

Tras el descubrimiento de esta cavidad se inició una investigación para determinar diferentes aspectos de la

¹ http://es.wikipedia.org/wiki/Desastre_minero_de_Pasta_de_Conchos

² <http://www.elperiodico.com/es/cartas/entre-todos/miedo-ascensor-del-metro-barcelona/113855.shtml>

adaptación a este ambiente. Previamente a esta investigación publicamos un estudio¹¹ a partir del cual se elaboraron unas primeras recomendaciones para explorar las cuevas del macizo del Garraf¹².

El objetivo de este trabajo es describir la adaptación cardíaca^{13,14}, vascular y del sistema nervioso durante la exposición al aire enrarecido. Debido a la dificultad de disponer de personal con capacidad para valorar el riesgo subterráneo en cada momento, garantizar la correcta ejecución de los protocolos de recogida de datos y circular sin problemas por cuerdas, en una situación tan adversa, se tuvo que renunciar a la recogida de muestras sanguíneas y al análisis de los gases espirados mediante espirometría.

Comité de ética

Este estudio fue aprobado por el comité de ética de la Administración Deportiva de Cataluña y autorizado por la dirección del Parque Natural del Garraf y Olèrdola.

Se elaboró un plan de emergencia con comunicación previa al teléfono 112, al servicio de emergencias médicas de Cataluña, a la policía y a los bomberos del gobierno de Cataluña.

Las medidas preventivas de apoyo respiratorio *in situ* y de evacuación rápida en caso necesario se hallaban contempladas también en el plan de emergencia.

Material y método

Se han incluido 25 sujetos³ en el estudio (4 mujeres), edad: $47,1 \pm 10,1$; peso: $71,9 \pm 10,0$; talla: $173,3 \pm 7,1$; IMC: $24,2 \pm 2,6$. En los datos relativos a la variabilidad cardíaca, $n=24$. Previamente han superado revisión médica que incluye: estudio de antecedentes, examen por órganos y aparatos, espirometría, electrocardiograma en reposo, estudio de la presión arterial según recomendaciones internacionales; ecografía cardíaca; prueba de esfuerzo clínica que incluye electrocardiograma y estudio de idoneidad cardiovascular según el algoritmo de Miyai. La revisión médica se ha realizado en el Centro de Medicina del Deporte dependiente de la Unidad de Medicina del Deporte del Consejo Catalán del Deporte (Generalidad de Cataluña).

Aparatos usados en el trabajo de campo

- Holter HT 103. Sistema de registro Holter de 3 canales, Eccosur®, Argentina.
- Tensiómetro automático modelo M3 OMRON.
- Pulsioxímetro modelo Oxypalm KTMED Inc., Medical Systems®, Corea.
- Analizador de gases para oxígeno y CO₂, cedido por la secretaria general del deporte: Multiple Gas detector (MultiRAE-IR. Rae Systems Inc., San Jose, California, EE. UU.).

³ Hacen la revisión previa 42 sujetos, pero por problemas diversos, las pruebas de campo las hacen solo 28 sujetos, 3 de los cuales no proporcionan datos analizables.

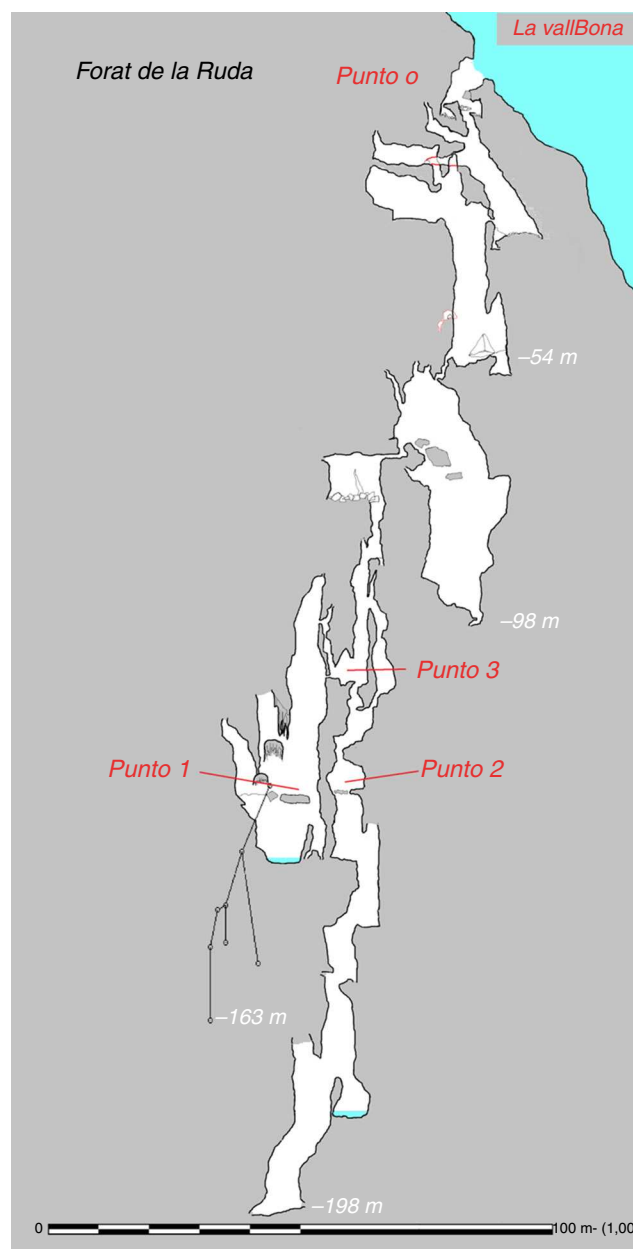


Figura 1 Topografía de la sima *Forat de la Ruda*. Punto 1: Sala Palermo-Buenos Aires (-124 m). Punto 2: Sala Aconcagua (-125 m); Punto 3: La Banyera (-107 m). Topografía: Ignasi de Yzaguirre i Maura.

Características del terreno donde se realiza el estudio

El estudio se realiza en una sima del macizo de Garraf (*Forat de la Ruda*) de cerca de 200 m de profundidad (fig. 1) en la que hay aire enrarecido (llega a 11,3% de oxígeno y 25.000 ppmv de CO₂). Se realiza en diferentes entradas a la cavidad en sucesivos viernes. El grupo de voluntarios es de 2 sujetos cada vez como máximo.

- *Prueba 1* (punto 0, fig. 1), aire de composición normal (NA). A la entrada de la sima *Forat de la Ruda*, con temperatura de $24,6 \pm 5,3$ °C y humedad del

Tabla 1 Permanencia de los sujetos en aire enrarecido

Tiempo debajo del 18% de oxígeno		Tiempo debajo del 15% de oxígeno	
Media	DE	Media	DE
2 h 31 min	45 min	57 min	36 min

DE: desviación estándar.

$52,07 \pm 17,1\%$. Oxígeno atmosférico: $20,9\%$; CO_2 atmosférico: $0,065 \pm 0,007\%$. Está a una altitud de 345 m sobre el nivel del mar (msnm).

- **Prueba 2** (punto 1, fig. 1), aire enrarecido de origen natural (RA). Sala Palermo-Buenos Aires, a 124 m de profundidad respecto a la boca; con temperatura de $16,1 \pm 0,87^\circ\text{C}$ y humedad del 100% y pH del H_2O del aire confinado = 6⁴. Oxígeno atmosférico: $13,38 \pm 1,5\%$; CO_2 : $2,23 \pm 0,31\%$, y otros gases.

Características técnicas de los sujetos

Grupo compuesto por espeleólogos, policías especialistas en subsuelo y alta montaña y bomberos especialistas en rescate de montaña.

Dificultades a superar para acceder al escenario de la RA: hay que descender por cuerda mediante la técnica de rápel 9 pozos de profundidades comprendidas entre 4 y 31 m. Además hay que superar 3 pasos estrechos y un meandro estrecho de 6 m de longitud. Se tarda una hora y 30 min en superar estas dificultades de bajada y 3 o 4 h de regreso a la superficie.

Horario

A las 09.00 se instalan los aparatos Holter-ECG a 2 voluntarios (en el aparcamiento de los vehículos). A las 10.30 se realiza prueba NA. Entre 12.30 y 13.30 se realiza la prueba RA.

Las pruebas NA y RA consisten en estar 10 min en reposo físico y mental, sentados cómodamente, oyendo un mantra cantado (*Vijaya Devi Mantra*)⁵ en actitud de meditación respiratoria⁶.

El registro Holter continúa grabando. Al finalizar los 10 min, se controla la presión arterial y se controla la SaO_2Hb .

Los individuos permanecen por término medio 2 h 31 min \pm 45 min por debajo del 18% de oxígeno y 57 ± 36 min por debajo del 15% de oxígeno (tabla 1).

⁴ Podría ser que hubiera sobrehumedad y que el agua formara parte de los gases atmosféricos respirados.

⁵ De Sarva-Antah (Google Play .eMusic) <http://www.youtube.com/watch?v=ghlStlQXqgw>

⁶ La técnica de meditación respiratoria tiene un efecto parasimpático. Su uso en este caso tiene el objetivo de estandarizar la prueba de forma estricta y poder comparar. Como se verá en los resultados, el impacto del aire enrarecido tiene también un efecto parasimpático. No confundir el recurso y la consecuencia.

Estadísticas

Se han realizado medias y desviaciones estándar de los parámetros obtenidos. Se han evidenciado las diferencias mediante la prueba t de Student para datos apareados. Se ha utilizado el coeficiente de correlación de Pearson para valorar el grado de dependencia de algunas variables en relación con las modificaciones atmosféricas. Para valorar las variaciones de la presión arterial, se expresan sus modificaciones en puntuaciones estándar (SS) y también en modificaciones de los centiles que ocupan en el algoritmo propuesto por Miyai¹⁵ para valorar la presión arterial en función del porcentaje de HRR, con el fin de considerar las variaciones de la frecuencia cardíaca (HR) a pesar de que no muestren diferencias significativas en las 2 situaciones estudiadas.

Referente a la variabilidad de la frecuencia cardíaca, los parámetros estudiados son: a) referente a las medidas de tendencia central derivadas de la desviación estándar: SDNN; SDANN; SDNNindex; RMSSD; NN50; pNN50; b) referentes del análisis de la integrada rápida de Fourier sobre las secuencias de periodos r-r: TP, VLF, LF, HF y LF1/HF1. Hay que decir que se comparan 2 periodos de Holter ECG de 10 min. Para la valoración de los fenómenos arrítmicos se comparan 2 periodos Holter de 60 min que incluyen respectivamente las pruebas NA y RA.

Resultados

Frecuencia cardíaca

No se constatan diferencias estadísticas de la frecuencia cardíaca (HR), evaluada por el registro cardíaco (Holter) de 24 h, entre la prueba NA y la prueba RA durante los 10 min estandarizados de reposo (NA: $81,9 \pm 15,1$ lpm vs. RA: $83,8 \pm 17,3$ lpm; $p \leq 0,43$; NS). La prueba NA va precedida de 45 min de caminata con todo el equipo en la mochila, y la prueba RA acumula el trabajo anterior más el trabajo de descenso tranquilo de la cavidad (9 tramos de descenso por cuerda y una escalada y superar 4 estrecheces).

Presión arterial

La presión arterial de los sujetos se adapta a la situación de la atmósfera enrarecida, con un aumento estadísticamente significativo de la presión arterial sistólica (NA: $130,3 \pm 17,2$ vs. RA: $140,2 \pm 21,3$ mmHg; $p \leq 0,0003$) y de la presión arterial diastólica (NA: $78,2 \pm 11,0$ vs. RA: $85,5 \pm 11,2$; $p \leq 0,0002$).

La presión de pulso (PAS-PAD) no muestra diferencias estadísticamente significativas en las 2 situaciones estudiadas (NA: $52,4 \pm 12,9$ vs. RA: $55,5 \pm 14,2$, sin significación estadística).

La presión arterial media es de NA: $94,4 \pm 11,8$ mmHg vs. RA: $101,6 \pm 12,7$ mmHg; $p < 0,00008$.

Variabilidad cardíaca

- Referente a las medidas de tendencia central derivadas de la desviación estándar de los periodos r-r observamos los datos que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Comparación de la variabilidad cardíaca entre las 2 situaciones estudiadas. (1)

	Prueba 1 (NA)	Prueba 2 (RA)	P
SDNN	51,6 ± 15,7	62,0 ± 23,8	< 0,03
SDANN	19,6 ± 14,5	31,2 ± 20,0	< 0,04
SDNNindex	47,4 ± 17,9	56,4 ± 22,5	< 0,03
rMSSD	25,9 ± 13,8	36,9 ± 17,8	< 0,002
NN50	49,0 ± 66,2	111,7 ± 102,8	< 0,003
pNN50	7,5 ± 11,3%	15,9 ± 15,8%	< 0,01

Los parámetros SDNN, SDANN, SDNNindex y rMSSD están expresados en milisegundos. NN50 se expresa en número de latidos. NN50: número de intervalos con diferencia superior a 50 ms; rMSSD: *the root mean square differences of successive R-R intervals*; SDANN: *standard deviation of the averages of NN (normal sinus to normal sinus) intervals in all 5-minute segments*; SDNN: *standard deviation of normal to normal R-R intervals*; SDN-Index: *the mean of the 5-minute standard deviations of NN intervals*.

b) Referente al análisis de la integrada rápida de Fourier sobre las secuencias de periodos r-r, véase la [tabla 3](#).

Arritmias

En reposo, cuando comparamos el comportamiento rítmico del corazón en condiciones normales (NA) versus aire enrarecido (RA) y analizando el conjunto de sujetos, apreciamos un ligero aumento de los eventos arrítmicos en la situación de aire enrarecido.

También analizamos y comparamos el comportamiento de los 60 min que incluyen NA (H_{NA}) versus los 60 minutos en aire enrarecido que incluyen RA (H_{RA}), y las diferencias son significativas cuando analizamos el conjunto de eventos arrítmicos ([tabla 4](#)).

- Latidos ectópicos (BEC) de tipo ventricular, comparación en las 2 situaciones estudiadas: $H_{NA} = 4,6 \pm 11,7$ vs. $H_{RA} = 13,7 \pm 31,6$; $n = 24$; $p < 0,06$; NS.
- Latidos ectópicos (BEC) totales (ventriculares + supraventriculares), comparación en las 2 situaciones estudiadas: $H_{NA} = 7,4 \pm 12,9$ vs. $H_{RA} = 23,6 \pm 47,4$; $n = 24$; $p < 0,046$.

Se detecta un incremento de los acontecimientos arrítmicos cuando comparamos la hora que incluye la prueba 1

Tabla 3 Comparación de la variabilidad cardíaca entre las 2 situaciones estudiadas

Fourier	Prueba 1 (NA)	Prueba 2 (RA)	p
TP	1.755,9 ± 1.324,5	2.611,5 ± 1.926,9	< 0,04
VLF	781,1 ± 513,6	1.124,8 ± 882,0	NS
LF	757,3 ± 600,0	832,8 ± 819,4	NS
HF	301,5 ± 329,4	662,3 ± 762,8	0,02
LF/HF	5,1 ± 7,3	2,3 ± 1,9	NS

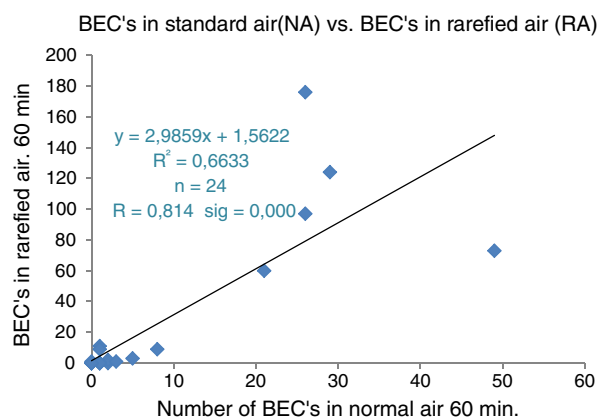
Unidades en milisegundos al cuadrado.

HF: high frequency from 0,15 to 0,4 Hz; LF: low frequency from 0,04 to 0,15 Hz; TP: potencia total; VLF: the very low frequency from 0,0033 to 0,04 Hz.

Tabla 4 Número de fenómenos arrítmicos al comparar la respuesta cardíaca de los sujetos cuando están en aire enrarecido vs aire normal

10 min en reposo estricto			
	n casos RA	n casos NA	p <
Extrasístoles ventriculares	30	33	NS
Extrasístoles supraventriculares	20	2	NS
Total extrasístoles	50	35	NS
FC	81,5 ± 16,1	82,9 ± 16,3	NS
60 min de actividad que incluyen los 10 min de reposo estricto			
	n casos 60 _{RA}	n casos 60 _{NA}	p <
Extrasístoles ventriculares	328	110	0,06
Extrasístoles supraventriculares	238	67	NS
Total extrasístoles	566	177	0,046
FC	92,0 ± 14,7	93,6 ± 17,6	NS

FC: frecuencia cardíaca; NA: aire normal; RA: aire enrarecido. 60_{NA}: 60 min de actividad que incluyen el período NA. 60_{RA}: 60 min de actividad que incluyen el período RA.

**Figura 2** Correlación entre los latidos ectópicos en aire normal y los latidos que aparecen en aire enrarecido. Comparación entre períodos de 60 min.

(H_{NA}) con aire de proporciones normales versus la hora que incluye la prueba 2 (H_{RA}) con aire enrarecido. Hay una clara correlación estadística entre ambas situaciones: $y = 2,9859x + 1,5622$; $n = 24$; $R = 0,814$; $p < 0,0001$ ([fig. 2](#)).

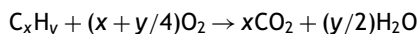
Discusión

1. Los resultados de nuestro estudio muestran que el aire enrarecido en el ambiente confinado de las simas es un marco diferente desde el punto de vista fisiológico, si lo comparamos a la exposición aguda a grandes alturas (alta montaña)¹⁶⁻¹⁸, pues la frecuencia cardíaca en

situación de reposo no tiende a subir en nuestro caso y la variabilidad cardíaca muestra un predominio parasimpático. Lo mismo parece cuando lo comparamos con el ambiente aire enrarecido en microgravedad que se da en las aeronaves espaciales¹⁹. Y también es diferente al ambiente conseguido en las populares tiendas de campaña de entrenamiento, pues los niveles de CO₂ de origen respiratorio son menos extremados que en las simas.

2. Diferencias y similitudes con estudios previos: no se conocen estudios previos en ambiente confinado de origen natural, como son muchas simas del entorno mediterráneo. Hay que mencionar nuestro propio estudio, con voluntarios en ambiente reconstruido en tienda de entrenamiento¹¹. También el estudio en medio laboral con maniquí en cámara de simulación²⁰.
3. Por todo lo anterior, los datos del presente estudio son aportaciones nuevas que vienen a completar observaciones realizadas en nuestros estudios anteriores, como las relativas al incremento del uso de los recursos del metabolismo anaeróbico en ejercicios en aire moderadamente enrarecido en normobaría²¹ o la sintomatología clínica recreada en laboratorio en un ambiente confinado con aire enrarecido. Nuestro estudio ha confirmado las observaciones en terreno real referentes a presión arterial y fenómenos arrítmicos que se apuntaron en el estudio de laboratorio¹¹.
4. Implicaciones clínicas: nuestro estudio precisa de manera más ajustada los riesgos de los sujetos cuando se adentran en espacios confinados y también proporciona orientaciones sobre cómo afrontar la exposición a dicho ambiente. Estar en reposo será, entre otros, un recurso útil en personas sometidas involuntariamente a atmósfera enrarecida y que no puedan abandonar momentáneamente esta situación.
5. Limitaciones: debido a la naturaleza del estudio, y al riesgo inherente a tan extrema atmósfera, hubo que limitar el número de voluntarios.

La exposición a aire enrarecido no es habitual en la especie humana. Lo normal es una composición de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, más algunos gases raros, en ínfimas partes. El dióxido de carbono, con un 0,06% del total de volumen, forma parte de este último grupo, a pesar de estar aumentando notablemente su presencia atmosférica, ligado al uso de los combustibles fósiles:⁷



El coeficiente de correlación es bajo cuando comparamos las modificaciones en la presión arterial diastólica con el CO₂ ambiental ($r = -0,21$; $p < 0,04$) y más elevada con el oxígeno ($r = 0,62$; $p < 0,001$). El análisis de coeficientes para oxígeno y CO₂ muestra una significación del 0,018 para el oxígeno y de $p < 0,132$ de CO₂, por lo que cabe atribuir la respuesta hipertensiva a la disminución de oxígeno ambiental.

Por otra parte, los cambios de la variabilidad de la frecuencia cardíaca pueden deberse a la variación del

volumen tidal que se da en aire enrarecido (respuesta hiperventilatoria) y su influencia en el estiramiento del nodo sinusal-aurícula derecha²², aunque este tema está insuficientemente esclarecido. No hay cambios de la media de la frecuencia cardíaca (no son significativas) en las 2 situaciones estudiadas, pero sí que hay diferencias en los parámetros derivados del desvío estándar.

La frecuencia cardíaca de reposo²³ —un parámetro históricamente muy valorado para evaluar la fatiga y la correcta asimilación del entrenamiento— es el dato sobre la que se basan todos los estudios de variabilidad cardíaca en las diferentes modalidades. Su aumento es característico de la respuesta simpática. En el caso que nos ocupa no hay aumento significativo de la frecuencia cardíaca a pesar de la dramática modificación de los parámetros gaseosos atmosféricos. Todo ello concordaría con un predominio parasimpático en la respuesta adaptativa. Atendiendo que ninguno de los voluntarios realiza técnica de meditación respiratoria habitualmente, no cabe esperar interferencia del reposo inducido en la respuesta parasimpática que se da en aire enrarecido en comparación con aire normal²⁴.

Entre los otros parámetros que se usan para el estudio de la variabilidad cardíaca hay que considerar que: en altitud tiende a decrecer el *total spectral power* (TP), a diferencia de lo que ocurre en nuestro ambiente confinado, en el que crece dicho parámetro ($1.755,9 \pm 1.324,5$ vs. $2.611,5 \pm 1.926,9$; $p < 0,04$)¹⁶. LF: se debe al 50% a cambios simpáticos y sus modificaciones son difíciles de interpretar. HF: el 90% se debe a cambios parasimpáticos y el 10% a cambios simpáticos, por lo que su variación es mucho más fácil de interpretar²⁵. Como se ve en nuestro estudio, existen diferencias estadísticas en la gama de la alta frecuencia (HF: $301,5$ vs. $662,3$ ms²; $p \leq 0,02$), y esto es indicativo en este caso de predominio parasimpático.

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) aumenta, y aumentan los valores de los parámetros relacionados con la actividad del sistema parasimpático (RMSSD y HF), que son indicativos de adaptabilidad psicofísica a la situación estudiada²⁶.

El predominio parasimpático se puede interpretar como la adopción de los sistemas más rentables (automáticos) de gestión de la economía en situación de crisis por aire enrarecido en el espacio confinado. En el tema del impacto del aire enrarecido observamos lo siguiente: que aumentan todos los parámetros SD en situación RA, sin que aumente la media de los espacios r-r. Si lo sometemos al análisis clásico de Tjivinski y Aullik²⁷, tiene una clara significación de predominio parasimpático.

A tenor de los resultados vemos que la respuesta fisiológica en ambiente confinado es diferente que en altitud²⁸. En el caso del ambiente confinado, hipóxico y normobárico, la adaptación cardíaca se caracteriza por no incrementar la frecuencia cardíaca y aumentar significativamente la presión arterial sistólica y diastólica y también la presión arterial media.

Coincidimos con DiPasquale et al.²⁹, que en un reciente estudio sugieren que en hipobaría la hipoxia ejerce su propio efecto en la frecuencia cardíaca de recuperación. Así la hipoxia normobárica y la hipoxia hipobárica pueden no ser entornos intercambiables.

⁷ <http://ca.wikipedia.org/wiki/Combustion>

Fenómenos arritmogénicos

El análisis del riesgo relativo (odds-ratio [OD]) de padecer eventos arritmicos cuando sometemos a un sujeto en aire enrarecido en las proporciones de nuestro estudio (O_2 : $13,38 \pm 1,5\%$ y CO_2 : $2,23 \pm 0,31\%$ y otros gases) es 3,2 veces superior (OR: 3,2630; IC 95%: 2,7557 a 3,8637; estadístico z: 13,719; nivel de significación: $p < 0,0001$).

Presión arterial

Los resultados relativos a la presión arterial en NA y RA son comparables y valorables. No hay diferencias entre la media de pulso cardíaco en los 10 min estudiados (NA: $81,9 \pm 15,1$ lpm vs. RA: $83,6 \pm 17,3$ lpm; $p = NS$), por lo que podemos afirmar que en la adaptación al aire enrarecido se produce un incremento de la presión arterial sin que aumente la frecuencia cardíaca.

Conclusiones

1. Tras los 10 min de reposo estandarizados en aire enrarecido (RA), hay un aumento de la presión arterial sistólica, diastólica y arterial media.
2. El estudio de la variabilidad cardíaca, en situación de reposo estandarizado, muestra una respuesta de tipo parasimpático, con aumento de los parámetros RMSSD y HF cuando los sujetos están sometidos a una atmósfera de aire enrarecido (RA), compuesto por 13% de oxígeno con 2,5% de CO_2 .
3. En aire enrarecido como el de la sima estudiada, los sujetos presentaron el triple de fenómenos arritmicos que cuando realizaron las mismas tareas en áreas no hipóxicas y con cargas de trabajo similares.

Financiación

El estudio ha recibido la beca correspondiente al programa de subvenciones para llevar a cabo trabajos de investigación en el campo de las Ciencias del Deporte del Consejo Catalán del deporte para el año 2014 (DOGC 6531, 31 Dic 2013).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Halbert EJM. Evaluation of carbon dioxide and oxygen data in atmospheres using the Gibbs Triangle and Cave Air Index. *Helictite. Journal of Australasian Cave Research*. 1982;20:60–8.
2. Bourges F, Mangin A, d'Hulst D. Radon and CO_2 as markers of cave atmosphere dynamics: Evidence and pitfalls in underground confinement; application to cave conservation. Comunicación al coloquio Climate Changes: The Karst Record III. Montpellier (Francia), 11-14 de marzo de 2003.
3. Bourges F, Mangin A, d'Hulst D. Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques, l'exemple de l'aven d'Orgnac (Ardèche). Note aux C.R. Acad. des Sci. Paris. *Science de la Terre et des Planètes /Earth and Planetary Sciences*. 2001;333:685–92.
4. Bourges F, d'Hulst D, Mangin A. Le CO_2 dans l'atmosphère des grottes, sa place dans la dynamique des systèmes karstiques. Comunicación a la Réunion des Sciences de la Terre de Brest, 31 de marzo-3 de abril de 1998.
5. Sechzer PH, Egbert LD, Linde HW, Cooper DY, Dripps RD, Price HL. Effect of carbon dioxide inhalation on arterial pressure, ECG and plasma catecholamines and 17-OH corticosteroids in normal man. *J Appl Physiol*. 1960;15:454–8.
6. Guillerme R, Radziszewski E. Effects on man of 30-day exposure to a $PiCO_2$ of 14 torr (2%): Application to exposure limits. KE Schaefer editor. *Undersea Biom Res*. 1979;6:91–114.
7. Mixon W. More on bad air in cave. *American Caving Accidents. NSS News*. 2000;April:2.
8. Radziszewski E, Giacomoni L, Guillerme R. Effets physiologiques chez l'homme du confinement de longue durée en atmosphère enrichie en dioxyde de carbone. Proceedings of a colloquium on Space and Sea. Marseille, France, 24-27 novembre de 1987, ESA SP-280 ED. Marseille 1988:19-23.
9. James J, Dyson J. Cave science topics: CO_2 in caves. *Caving International*. 1981;13:54–9.
10. Bounhoure JP, Broustet JP, Cahen P, Lesbre JP, Letac B, Mallion JM, et al. Hypoxia. An invisible enemy. Guidelines for exercise tests, by the working group on exercise tests and rehabilitation of the French Society of Cardiology. *Arch Mal Coeur Vaiss*. 1979;72:30.
11. Yzaguirre i Maura I, Escoda i Mora J, Bosch Cornet J, Gutiérrez Rincón JA, Dulanto Zabala D, Segura Cardona R. Adaptación al aire enrarecido de las simas y cuevas. Estudio de laboratorio. *Apunts Med Esport*. 2008;43:135–41.
12. Yzaguirre I, Cano R, Burgos G, Sanmartí A. Bad air in de cavities of the Garraf Mountain. *EspeleoCat. Federació Catalana d'Espeleologia*. 2007;5:53–5.
13. Ahmed MW, Kadish AH, Parker MA, Goldberger JJ. FACC effect of physiologic and pharmacologic adrenergic stimulation on heart rate variability. *J Am Coll Cardiol*. 1994;24:1082–90.
14. Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Berger AC, Cohen RJ. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science*. 1981;213:220–2.
15. Miyai N, Arita M, Miyashita K, Morioka I, Shiraiishi T, Nishio I. Blood pressure response to heart rate during exercise-test and risk of future hypertension. *Hypertension*. 2002;39:761–6.
16. Hughson RL, Yamamoto Y, McCullough RE, Sutton JR, Reeves JT. Sympathetic and parasympathetic indicators of heart rate control at altitude studied by spectral analysis. *J Appl Physiol*. 1994;77:2537–42.
17. Bernaola M, Ponce JA. Los riesgos de la altitud y su prevención. *Seguridad y Salud en el Trabajo*. 2012;68:9.
18. Best JW. Respiratory and circulatory control at high altitudes. *J Exp Biol*. 1982;100:147–57.
19. Wilmore JH, Costill DL. Fisiología del esfuerzo y del deporte. Barcelona: Paidotribo; 2004.
20. Ojima J. An empirical study on the wake around a squatting worker in a confined space. *J Occup Health*. 2014;56:498–504.
21. Yzaguirre I, Vives J, Gutiérrez JA, Brotons D, Tramullas A. Ergometry and climate change. *Apunts Med Esport*. 2010;45:219–25.
22. Billman GE. Heart rate variability. A historical perspective. *Front Physiol*. 2011;86:5–8.
23. Pichot V, Roche F, Gaspoz JM, Enjolras F, Antoniadis A, Minini P, et al. Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;32:1729–81736.
24. Krygier JR, Heathers JA, Shahrestani S, Abbott M, Gross JJ, Kemp AH. Mindfulness meditation, well-being, and heart rate variability: A preliminary investigation into the impact of intensive Vipassana meditation. *Int J Psychophysiol*. 2013;89:305–13.

25. Billman GE. The LF/HF ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance. *Front Physiol.* 2013;4:26.
26. Rodas G, Yanguas X, Pedret C, Ramos J, Capdevila L. Canvis de la variabilitat de la freqüència cardíaca (VFC) de jugadors d'hoquei durant el Campionat del Món de 2006. *Apunts Med Esport.* 2011;46:117-23.
27. Tijvinski SB, Aullik IV. El sistema de respiración i transporte de oxígeno. *Medicina deportiva infantil.* Moscú: Meditzina; 1991.
28. Manzey D, Lorenz B. Joint NASA-ESA-DARA Study. Part three: Effects of chronically elevated CO₂ on mental performance during 26 days of confinement. *Aviat Space Environ Med.* 1998;69:506-14.
29. DiPasquale DM, Strangman GE, Harris NS, Muza SR. Acute mountain sickness, hypoxia, hypobaria and exercise duration each affect heart rate. *Int J Sports Med.* 2015;36:609-14.