

TREBALL ORIGINAL

Impacte en humans, a nivell cardiovascular, de l'aire enrarit d'una cova mediterrània

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

^a Medicina de l'Esport, Consell Català de l'Esport, Generalitat de Catalunya, Barcelona, Espanya

^b Servei de Cardiologia, Institut Clínic del Tòrax, Hospital Clínic de Barcelona, Barcelona, Espanya

^c Unitat d'HTA i RCV, Medicina Interna, ICMiD, Hospital Clínic de Barcelona, Barcelona, Espanya

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

Rebut el 2 de novembre de 2015; acceptat el 18 de gener de 2016

PARAULES CLAU

Aire enrarit;
Hipòxia;
CO₂;
Parasimpàtic;
Variabilitat cardíaca;
Arítmia

Resum

Introducció: Estudi de l'adaptació fisiològica de persones que respiren aire enrarit en un avenc.

Objectiu: Investigar la capacitat aritmogènica de l'aire enrarit i les alteracions del sistema nerviós autònom (simpàtic i parasimpàtic). Establir uns nivells de tall més enllà dels quals cal prendre mesures preventives.

Mètode: Vint-i-cinc espeleòlegs, 6 dels quals pertanyien a cossos professionals de rescat, foren sotmesos a controls en repòs a l'exterior, respirant aire de composició normal (AN), i a un control subterrani, també en repòs, respirant aire enrarit d'origen natural (AE) en un espai confinat (O₂: 13,38 ± 1,5% i CO₂: 2,23 ± 0,31%). Monitorats mitjançant control Holter cardíac i pressió arterial.

Resultats: Pols cardíac en repòs (AN: 81,9 ± 15,1 batecs vs. AE: 83,8 ± 17,3 batecs en AE; p ≤ 0,58). Pressió arterial sistòlica (AN: 130,3 ± 17,2 mmHg vs. AE: 140,2 ± 21,3 mmHg; p ≤ 0,0003). Pressió arterial diastòlica (AN: 78,2 ± 11,0 mmHg vs. AE: 85,5 ± 11,2 mmHg; p ≤ 0,0002). Variabilitat cardíaca: RMSSD (AN: 25,9 ± 13,8 ms vs. AE: 36,9 ± 17,8 ms; p ≤ 0,003); NN50 (AN: 49,0 ± 66,2 batecs vs. AE: 111,7 ± 102,8 batecs; p ≤ 0,003); pNN50 (7,5 ± 11,3% en AN vs. 15,9 ± 15,8% en AE; p ≤ 0,0013). Anàlisi de Fourier: TP (AN: 1.759,5 ms² vs. AE: 2.611,5 ms²; p < 0,04); HF (AN: 301,5 ± 329,4 ms² vs. AE: 662,3 ± 762,8 ms²; p ≤ 0,02). Es detecta un increment d'esdeveniments arítmics en comparar l'hora que inclou la prova 1 (H_{AN}) amb aire de proporcions normals versus l'hora que inclou la prova 2 (H_{AE}) amb aire enrarit. Hi ha clara correlació estadística d'esdeveniments arítmics en ambdues situacions: (batecs ectòpics en AE) = 2,9859 × (batecs ectòpics en AN) + 1,5622; n = 24; r = 0,814; p < 0,0001.

* Autor per a correspondència.

Correu electrònic: 14521iym@comb.cat (I. de Yzaguirre i Maura).

Conclusions: L'exposició a l'aire enrarit en repòs de només 10 min provoca una resposta pressora de la pressió arterial sistòlica i diastòlica, comparada amb l'aire normal. La variabilitat cardíaca, en situació de repòs estandarditzada, mostra una resposta de tipus parasimpàtic, amb augment dels paràmetres rMSSD i HF quan els subjectes estan sotmesos a una atmosfera d'aire enrarit. En aquest cas, compost per un 13% d'O₂ i un 2,5% de CO₂. En l'aire enrarit, com en el de l'avenc estudiat, els subjectes presentaven el triple de fenòmens arítmics que quan feien una tasca amb una càrrega similar en aire estàndard.

© 2016 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicat per Elsevier España, S.L.U. Tots els drets reservats.

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 ≤ .58). Systolic blood pressure (NA: 130.3 ± 17.2 mmHg vs. RA: 140.2 ± 21.3 mmHg; P ≤ .0003). Diastolic blood pressure (NA: 78.2 ± 11.0 mmHg vs. RA: 85.5 ± 11.2 mmHg; P ≤ .0002). Heart rate variability: RMSSD (NA: 25.9 ± 13.8 ms vs. RA: 36.9 ± 17.8 ms; P ≤ .003), NN50 (NA: 49.0 ± 66.2 bpm vs. RA: 111.7 ± 102.8 bpm; P ≤ .003); pNN50 (NA: 11.3 ± 7.5% vs. RA: 15.9 ± 15.8%; P ≤ .0013). Fourier analysis: TP (NA: 1,759.5 ms² vs. RA: 2,611.5 ms²; P ≤ .04); HF (NA: 301.5 ± 329.4 ms² vs. RA: 662.3 ± 762.8 ms²; P ≤ .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 standardized 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.

Introducció

El juny de 2013, un grup d'espeleòlegs van descobrir una nova cavitat al massís del Garraf (Catalunya, Espanya). L'exploració fou molt dura, perquè es féu en condicions d'aire empobrit d'oxigen (fins a l'11,3%) i alt en CO₂ al 2,5% (25.000 ppmv), del qual només es coneixen, com a característiques, que està sobresaturat d'H₂O i que té un pH = 6.

Sense cap suport respiratori adicional exploren fins a -193 m de profunditat, amb estades a una concentració d'oxigen del 15% durant més de 2 h.

Aquest fenomen de l'aire enrarit, conegut des de fa més de 100 anys, es denomina localment *quilla* i es dona de forma natural en coves de Mallorca, de Catalunya, del Rosselló francès i també en altres indrets del món¹⁻⁴.

Podem trobar una situació similar en accidents de mineria^a, en submarins i en altres artefactes amb atmosferes confinades o mantingudes artificialment^{2b}.

S'han publicat diverses recerques referents a la tolerància humana a les atmosferes enrarides⁵⁻¹⁰, però hi ha poques recerques que descriguin l'adaptació fisiològica humana, quan a més hi ha altitud baixa i la gravetat és normal.

Després del descobriment d'aquesta cavitat s'inicià una recerca per determinar diferents aspectes de l'adaptació a aquest ambient. Prèviament a aquesta recerca vam publicar un estudi¹¹ a partir del qual s'elaboraren unes primeres

^a http://es.wikipedia.org/wiki/Desastre_minero_de_Pasta_de_Conchos

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

recomanacions per explorar les coves del massís del Garraf¹².

L'objectiu d'aquest treball és descriure l'adaptació cardíaca^{13,14}, vascular i del sistema nerviós durant l'exposició a l'aire enrarit. Degut a la dificultat de disposar de personal amb capacitat per valorar el risc subterrani en cada moment, garantir l'execució correcta dels protocols de recollida de dades i circular sense cap problema per les cordes, en una situació tan adversa, calgué renunciar a la recollida de mostres de sang i anàlisi de gasos espirats mitjançant espirometria.

Comitè d'ètica

Aquest estudi fou aprovat pel Comitè d'ètica d'investigacions clíniques de l'Administració esportiva de Catalunya i autoritzat per la direcció dels parcs naturals del Garraf i d'Olèrdola.

S'elaborà un pla d'emergència amb comunicació prèvia al telèfon 112, al servei d'emergències mèdiques de Catalunya, a la policia i als bombers de la Generalitat de Catalunya.

Les mesures preventives de suport respiratori *in situ* i d'evacuació ràpida en cas de necessitat també estaven contemplades en el pla d'emergència.

Material i mètode

S'inclogueren a l'estudi 25 subjectes^c (4 dones), edat: $47,1 \pm 10,1$; pes: $71,9 \pm 10,0$; talla: $173,3 \pm 7,1$; IMC: $24,2 \pm 2,6$. En les dades relatives a la variabilitat cardíaca, $n = 24$. Prèviament havien superat una revisió mèdica que incloïa: estudi d'antecedents, examen per òrgans i aparells, espirometria, electrocardiograma en repòs, estudi de la pressió arterial segons les recomanacions internacionals; ecografia cardíaca; prova d'esforç clínica que inclou electrocardiograma i estudi d'idoneïtat cardiovascular segons l'algoritme de Miyai. La revisió mèdica es realitzà al Centre de Medicina de l'Esport dependent de la Unitat de Medicina de l'Esport del Consell Català de l'Esport de la Generalitat de Catalunya.

Aparells usats en el treball de camp

- Holter HT 103. Sistema de registre Holter de 3 canals, Eccosur®, Argentina.
- Tensiòmetre automàtic model M3 OMRON.
- Pulsioxímetre model Oxypalm KT MED Inc., Medical Systems®, Corea.
- Analitzador de gasos d'oxigen i CO₂, cedit per la Secretaria General de l'Esport: Multiple Gas detector (MultiRAE-IR. Rae Systems Inc., San José, Califòrnia, EUA).

Característiques del terreny de l'estudi

L'estudi es realitza en un avenc del massís del Garraf (Forat de la Ruda) de prop de 200 m de profunditat (fig. 1) en què

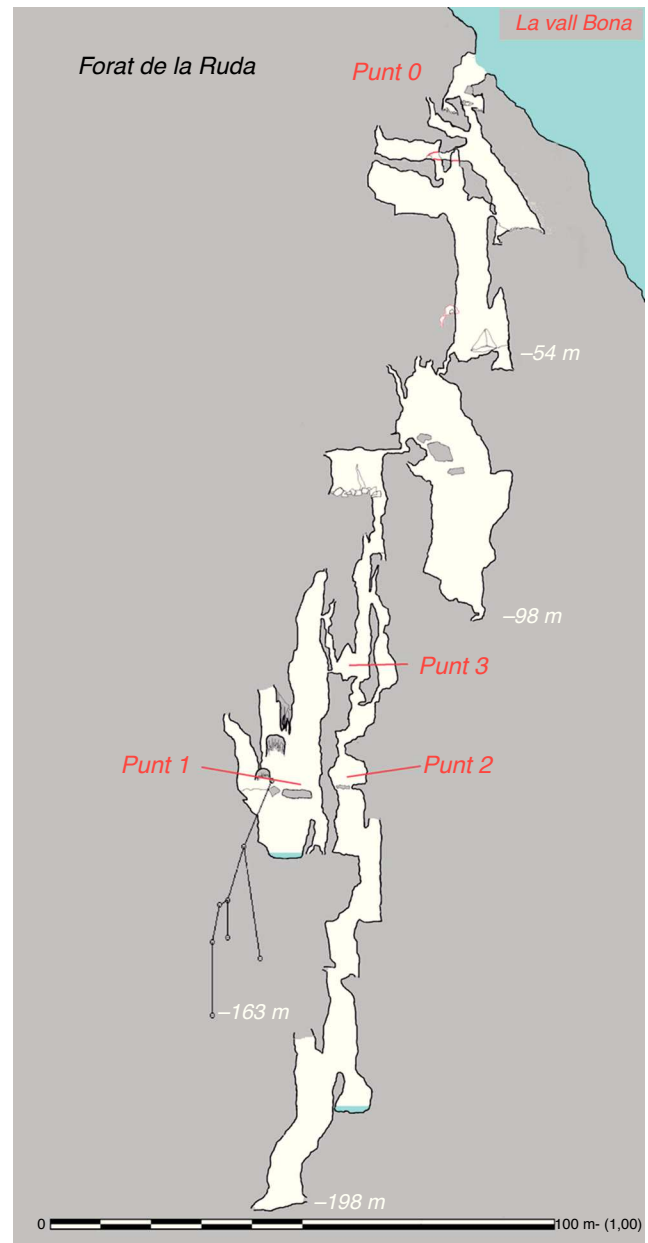


Figura 1 Topografia de l'avenc «Forat de la Ruda». Punt 1: Sala Palermo-Buenos Aires (−124 m). Punt 2: Sala Aconcagua (−125 m); Punt 3: La Banyera (−107 m). Topografia: Ignasi de Yzaguirre i Maura.

hi ha aire enrarit (arriba a l'11,3% d'oxigen i 25.000 ppmv de CO₂). Es realitza amb diferents entrades a la cavitat en divendres successius. El grup de voluntaris fou de 2 subjectes cada vegada com a màxim.

- *Prova 1* (punt 0, fig. 1), aire de composició normal (AN). A l'entrada de l'avenc *Forat de la Ruda*, a una temperatura de $24,6 \pm 25,3$ °C i humitat del $52,07 \pm 17,1\%$. Oxigen atmosfèric: 20,9%; CO₂ atmosfèric: $0,065 \pm 0,007\%$. Es troba a una altitud de 345 m sobre el nivell del mar (msnm).

^c Fan la revisió prèvia 42 subjectes, però per problemes diversos, les proves de camp només les fan 28 subjectes, 3 dels quals no proporcionen dades analitzables.

Taula 1 Permanència dels subjectes en aire enrarit

Temps per sota del 18% d'oxigen		Temps per sota del 15% d'oxigen	
Mitjana	DE	Mitjana	DE
2 h 31 min	45 min	57 min	36 min

DE: desviació estàndard.

- **Prova 2** (punt 1, fig. 1), aire enrarit d'origen natural (AE). Sala Palermo-Buenos Aires, a 124 m de profunditat respecte a la boca; a una temperatura de $16,1 \pm 0,87$ °C i humitat del 100% i pH de l'H₂O de l'aire confinat = 6^d. Oxigen atmosfèric: $13,38 \pm 1,5\%$; CO₂: $2,23 \pm 0,31\%$, i altres gasos.

Característiques tècniques dels subjectes

Grup compost per espeleòlegs, policies especialistes en subsòl i alta muntanya, i bombers especialistes en rescat de muntanya.

Dificultats a superar per accedir a l'escenari de l'AE: cal baixar amb corda amb la tècnica de ràpel 9 pous de profunditats compreses entre 4 i 31 m. A més, cal superar 3 passos estrets i un meandre estret de 6 m de longitud. Es triga 1 h 30 min en superar aquestes dificultats de baixada i 3 o 4 h per retornar a la superfície.

Horari

A les 9.00 del matí s'instal·len els aparells Holter-ECG a 2 voluntaris (a l'aparcament dels vehicles). A les 10.30 es fa la prova AN. Entre les 12.30-13.30 es realitza la prova AE.

Les proves AN i AE consisteixen en estar 10 min en repòs físic i mental, asseguts còmodament, escoltant un mantra cantat (*Vijaya Devi Mantra*)^e en actitud de meditació respiratòria^f.

El registre Holter continua gravant. En finalitzar els 10 min, es controla la pressió arterial i es controla la SaO₂Hb.

Els individus romanen una mitjana de 2 h 31 min \pm 45 min per sota del 18% d'oxigen i 57 ± 36 min per sota del 15% d'oxigen (taula 1).

Estadístiques

S'han realitzat mitjanes i desviacions estàndard dels paràmetres obtinguts. S'han evidenciat les diferències mitjançant la prova *t* d'Student per a dades aparellades. S'ha utilitzat el coeficient de correlació de Pearson per valorar el grau de dependència d'algunes variables en relació a les

^d Podria ser que hi hagués sobrehumitat i que l'aigua formés part dels gasos atmosfèrics respirats.

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

^f La tècnica de meditació respiratòria té un efecte parasimpàtic. El seu ús en aquest cas té l'objectiu de normalitzar la prova de forma estricta i poder comparar. Tal com es veurà als resultats, l'impacte de l'aire enrarit també té un efecte parasimpàtic. Cal no confondre el recurs amb la conseqüència.

modificacions atmosfèriques. Per valorar les variacions de la pressió arterial, s'expressen les modificacions en puntuacions estàndard (SS) i també en modificacions dels centils que ocupen en l'algoritme proposat per Miyai¹⁵ per valorar la pressió arterial en funció del percentatge d'FCR, amb la finalitat de considerar les variacions de la freqüència cardíaca (FC) malgrat que no es mostrin diferències significatives en les 2 situacions estudiades.

Referent a la variabilitat de la freqüència cardíaca, els paràmetres estudiats són: a) referent a les mesures de tendència central derivades de la desviació estàndard: SDNN; SDANN; SDNN index; RMSSD; NN50; pNN50; b) referents a l'anàlisi de la integrada ràpida de Fourier sobre les seqüències de períodes *r-r*: TP, VLF, LF, HF i LF1/HF1. Cal dir que es comparen 2 períodes de Holter ECG de 10 min. Per valorar els fenòmens arítmics es comparen 2 períodes de Holter de 60 min que inclouen, respectivament, les proves AN i AE.

Resultats

Freqüència cardíaca

No es constaten diferències estadístiques de la freqüència cardíaca (FC), avaluada pel registre cardíac (Holter) de 24 h, entre la prova AN i la prova AE durant els 10 min estandarditzats de repòs (AN: $81,9 \pm 15,1$ bpm vs. AE: $83,8 \pm 17,3$ bpm; $p \leq 0,43$; NS). La prova AN va precedida de 45 min de caminada amb tot l'equip a la motxilla, i la prova AE acumula el treball anterior i el treball de descens tranquil de la cavitat (9 trams de descens amb corda i una escalada, i superar 4 estretors).

Pressió arterial

La pressió arterial dels subjectes s'adapta a la situació de l'atmosfera enrarida, amb un augment estadísticament significatiu de la pressió arterial sistòlica (AN: $130,3 \pm 17,2$ vs. AE: $140,2 \pm 21,3$ mmHg; $p \leq 0,0003$) i de la pressió arterial diastòlica (AN: $78,2 \pm 11,0$ vs. AE: $85,5 \pm 11,2$; $p \leq 0,0002$).

La pressió del pols (PAS-PAD) no mostra diferències estadísticament significatives en les 2 situacions estudiades (AN: $52,4 \pm 12,9$ vs. AE: $55,5 \pm 14,2$, sense significació estadística).

La pressió arterial mitjana és d'AN: $94,4 \pm 11,8$ mmHg vs. AE: $101,6 \pm 12,7$ mmHg; $p < 0,00008$.

Variabilitat cardíaca

1. Referent a les mesures de tendència central derivades de la desviació estàndard dels períodes *r-r* observem les dades que es mostren a la taula 2.
2. Referent a l'anàlisi de la integrada ràpida de Fourier sobre les seqüències de períodes *r-r*, vegeu la taula 3.

Arítmies

En repòs, en comparar el comportament rítmic del cor en condicions normals (AN) vs aire enrarit (AE) i analitzant el conjunt de subjectes, observem un augment lleuger dels esdeveniments arítmics en la situació d'aire enrarit.

Taula 2 Comparació de la variabilitat cardíaca entre les 2 situacions estudiades (1)

	Prova 1 (AN)	Prova 2 (AE)	p
SDNN	51,6 ± 15,7	62,0 ± 23,8	< 0,03
SDANN	19,6 ± 14,5	31,2 ± 20,0	< 0,04
SDNN index	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

Els paràmetres SDNN, SDANN, SDNN index i rMSSD estan expressats en mil·lisegons. NN50 s'expressa en nombre de batecs. NN50: nombre d'interval amb diferència superior a 50 ms; rMSSD: mitjana quadràtica de les diferències entre intervals R-R adjacents; SDANN: desviació estàndard de la mitjana dels segments de 5 min del registre; SDNN: desviació estàndard de tots els intervals NN; SDNN index: mitjana de les desviacions estàndard de tots els intervals compresos en cada un dels 5 min en què pot dividir-se el registre complet.

També analitzem i comparem el comportament dels 60 min que inclouen AN (H_{AN}) vs els 60 min en aire enrarit que inclouen AE (H_{AE}), i les diferències són significatives quan analitzem el conjunt d'esdeveniments arítmics (taula 4).

1. Batecs ectòpics (BEC) de tipus ventricular, comparació en les 2 situacions estudiades: $H_{AN} = 4,6 \pm 11,7$ vs. $H_{AE} = 13,7 \pm 31,6$; $n = 24$; $p < 0,06$; NS.
2. Batecs ectòpics (BEC) totals (ventriculars + supraventriculars), comparació en les 2 situacions estudiades: $H_{AN} = 7,4 \pm 12,9$ vs. $H_{AE} = 23,6 \pm 47,4$; $n = 24$; $p < 0,046$.

Es detecta un increment dels esdeveniments arítmics quan comparem l'hora que inclou la prova 1 (H_{AN}) amb aire de proporcions normals versus l'hora que inclou la prova 2 (H_{AE}) amb aire enrarit. Hi ha una correlació estadística clara entre ambdues situacions: $y = 2,9859x + 1,5622$; $n = 24$; $R = 0,814$; $p < 0,0001$ (fig. 2).

Taula 3 Comparació de la variabilitat cardíaca entre les 2 situacions estudiades

Fourier	Prova 1 (AN)	Prova 2 (AE)	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

Unitats en mil·lisegons al quadrat.

HF: alta freqüència de 0,15 a 0,4 Hz; LF: baixa freqüència de 0,04 a 0,15 Hz; TP: potència total; VLF: molt baixa freqüència de 0,0033 a 0,04 Hz.

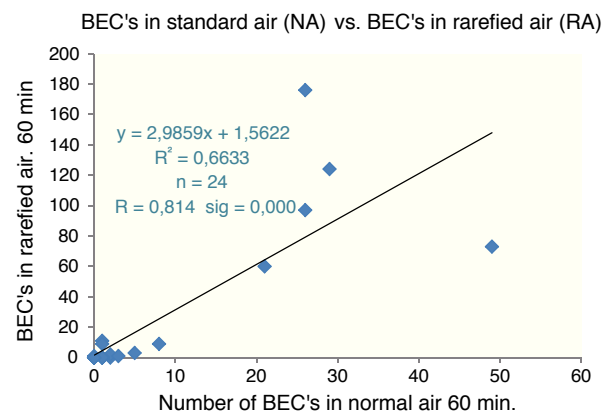
Taula 4 Nombre de fenòmens arítmics en comparar la resposta cardíaca dels subjectes quan estan en aire enrarit vs aire normal

10 min en repòs estricte			
	n casos AE	n casos AN	p <
Extrasístoles ventriculars	30	33	NS
Extrasístoles supraventriculars	20	2	NS
Total extrasístoles	50	35	NS
FC	81,5 ± 16,1	82,9 ± 16,3	NS
60 min d'activitat que inclouen els 10 min de repòs estricte			
	n casos 60 _{AE}	n casos 60 _{AN}	p <
Extrasístoles ventriculars	328	110	0,06
Extrasístoles supraventriculars	238	67	NS
Total extrasístoles	566	177	0,046
FC	92,0 ± 14,7	93,6 ± 17,6	NS

FC: freqüència cardíaca; AN: aire normal; AE: aire enrarit.

60_{AN}: 60 min d'activitat que inclouen el període AN.

60_{AE}: 60 min d'activitat que inclouen el període AE.

**Figura 2** Correlació entre els batecs ectòpics en aire normal i els batecs que apareixen en aire enrarit. Comparació entre períodes de 60 min.

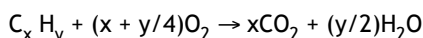
Discussió

1. Els resultats del nostre estudi mostren que l'aire enrarit en l'ambient confinat dels avencs és un marc diferent des del punt de vista fisiològic, si el comparem amb l'exposició aguda a grans altituds (alta muntanya)¹⁶⁻¹⁸, donat que en el nostre cas la freqüència cardíaca en situació de repòs no tendeix a pujar i la variabilitat cardíaca mostra un predomini parasimpàtic. Sembla que és el mateix quan el comparem amb l'ambient amb aire enrarit en microgravetat que es dona a les aeronaus espacials¹⁹.

També és diferent de l'ambient aconseguït a les populars tendes de campanya d'entrenament, donat que el nivell de CO₂ d'origen respiratori és menys extrem que en els avencs.

2. Diferències i similituds amb estudis previs: no es coneixen estudis previs en ambient confinat d'origen natural, com ara molts avencs de l'entorn mediterrani. Cal esmentar el nostre propi estudi, amb voluntaris en ambient reconstruït en tenda d'entrenament¹¹. També a l'estudi en medi laboral amb maniquí en cambra de simulació²⁰.
3. Per tot el que s'ha esmentat fins ara, les dades d'aquest estudi són aportacions noves que completen les observacions fetes en els nostres estudis anteriors, com les relatives a l'increment de l'ús dels recursos del metabolisme anaeròbic en exercicis en aire moderadament enrarit en normobaria²¹ o la simptomatologia clínica recreada al laboratori en un ambient confinat amb aire enrarit. El nostre estudi en el terreny real ha confirmat les observacions referents a la pressió arterial i als fenòmens arítmics que se suggeriren a l'estudi de laboratori¹¹.
4. Implicacions clíniques: el nostre estudi precisa de manera més ajustada els riscos dels subjectes quan s'endinsen en espais confinats i també proporciona orientacions sobre la manera de fer front a l'exposició a l'ambient esmentat. Restar en repòs és, entre altres, un recurs útil a les persones sotmeses involuntàriament a una atmosfera enrarida i que no poden abandonar momentàniament dita situació.
5. Limitacions: degut a la naturalesa de l'estudi, i al risc inherent a una atmosfera tan extrema, calgué limitar el nombre de voluntaris.

L'exposició a l'aire enrarit no és habitual a l'espècie humana. El normal és una composició d'un 21% d'oxigen i un 79% de nitrogen, més alguns gasos rars, en parts ínfimes. El diòxid de carboni, amb un 0,06% del total de volum, forma part d'aquest darrer grup, malgrat que n'està augmentant notablement la presència atmosfèrica, a causa de l'ús de combustibles fòssils⁹:



El coeficient de correlació és baix quan es comparen les modificacions de la pressió arterial diastòlica amb el CO₂ ambiental ($r = -0,21$; $p < 0,04$) i més elevada amb l'oxigen ($r = 0,62$; $p < 0,001$). L'anàlisi de coeficients de l'oxigen i el CO₂ mostra una significació del 0,018 en l'oxigen i de $p < 0,132$ en el CO₂, per la qual cosa es pot atribuir la resposta hipertensiva a la disminució de l'oxigen ambiental.

D'altra banda, els canvis de variabilitat de la freqüència cardíaca poden ser deguts a la variació del volum tidal que té lloc en l'aire enrarit (resposta hiperventilatòria) i la seva influència en l'estirament del node sinusal-aurícula dreta²², malgrat que aquest tema no està del tot esclarit. No hi ha canvis en la mitjana de la freqüència cardíaca (no són significatius) a les 2 situacions estudiades, però sí que hi ha diferència en els paràmetres derivats de la desviació estàndard.

La freqüència cardíaca de repòs²³ —un paràmetre històricament molt valorat per avaluar la fatiga i l'assimila-

ció correcta de l'entrenament— és la dada a l'entorn de la qual es basen tots els estudis de variabilitat cardíaca en les diferents modalitats. El seu augment és característic de la resposta simpàtica. En el cas que ens ocupa no hi ha un augment significatiu de la freqüència cardíaca malgrat la dramàtica modificació dels paràmetres gasosos atmosfèrics. Això concordaria amb un predomini parasimpàtic en la resposta adaptativa. Tenint en compte que cap dels voluntaris realitza habitualment tècnica de meditació respiratòria, no és probable que hi hagi interferències del repòs induït en la resposta parasimpàtica que té lloc en l'aire enrarit, en comparació amb l'aire normal²⁴.

Entre els altres paràmetres que s'usen per estudiar la variabilitat cardíaca cal tenir en compte que: en altitud tendeix a decreixer la potència espectral total (*total spectral power* [TP]), contràriament al que succeeix en el nostre ambient confinat, en què creix aquest paràmetre ($1.755,9 \pm 1.324,5$ vs. $2.611,5 \pm 1.926,9$; $p < 0,04$)¹⁶. LF: és degut el 50% a canvis simpàtics i les seves modificacions són difícils d'interpretar. HF: el 90% és degut a canvis parasimpàtics i el 10% a canvis simpàtics, per la qual cosa la seva variació és molt més fàcil d'interpretar²⁵. Tal com s'observa al nostre estudi, hi ha diferències estadístiques en la gamma d'alta freqüència (HF: $301,5$ vs. $662,3$ ms²; $p \leq 0,02$), i això, en aquest cas, és indicatiu de canvis de predomini parasimpàtic.

La variabilitat de la freqüència cardíaca (VFC) augmenta, i augmenten els valors dels paràmetres relacionats amb l'activitat del sistema parasimpàtic (RMSSD i HF), que són indicatius d'adaptabilitat psicofísica a la situació estudiada²⁶.

El predomini parasimpàtic es pot interpretar com l'adopció dels sistemes més rendibles (automàtics) de gestió de l'economia en situació de crisi per l'aire enrarit a l'espai confinat. En el tema de l'impacte de l'aire enrarit observem el següent: que augmenten tots els paràmetres DE en situació AE, sense que augmenti la mitjana d'espais *r-r*. Si se sotmet a l'anàlisi clàssica de Tijvinski i Aullik²⁷, té una significació clara de predomini parasimpàtic.

D'acord amb els resultats, veiem que la resposta fisiològica en ambient confinat és diferent que en altitud²⁸.

En el cas de l'ambient confinat, hipòxic i normobàric, l'adaptació cardíaca es caracteritza per no incrementar la freqüència cardíaca i augmentar significativament la pressió arterial sistòlica i diastòlica i també la pressió arterial mitjana.

Coincidim amb DiPasquale et al.²⁹, que en un recent estudi suggereixen que en hipobaria la hipòxia exerceix el seu propi efecte en la freqüència cardíaca de recuperació. Per tant, la hipòxia normobàrica i la hipòxia hipobàrica poden no ser entorns intercanviables.

Fenòmens arítmogènics

L'anàlisi del risc relatiu (*odds-ratio* [OD]) de patir esdeveniments arítmics quan se sotmet un subjecte a aire enrarit en les proporcions del nostre estudi (O₂: $13,38 \pm 1,5\%$ i CO₂: $2,23 \pm 0,31\%$ i altres gasos) és 3,2 vegades superior (OR: 3,2630; IC 95%: 2,7557 a 3,8637; estadístic z: 13,719; nivell de significació: $p < 0,0001$).

⁹ <http://ca.wikipedia.org/wiki/Combust%C3%B3>

Pressió arterial

Els resultats relatius a la pressió arterial en AN i AE són comparables i valorables. No hi ha diferències entre la mitjana del pols cardíac en els 10 min estudiats (AN: $81,9 \pm 15,1$ bpm vs. AE: $83,6 \pm 17,3$ bpm; $p = NS$), per la qual cosa podem afirmar que en l'adaptació a l'aire enrarit es produeix un increment de la pressió arterial sense augmentar la freqüència cardíaca.

Conclusions

1. Després dels 10 min de repòs estandarditzats en aire enrarit, hi ha un augment de la pressió arterial sistòlica, diastòlica i arterial mitjana.
2. L'estudi de la variabilitat cardíaca, en situació de repòs estandarditzat, mostra una resposta de tipus parasimpàtic, amb augment dels paràmetres RMSSD i HF quan els subjectes estan sotmesos a una atmosfera d'aire enrarit, composta per un 13% d'oxigen amb un 2,5% de CO₂.
3. En aire enrarit com el de l'avenç estudiat, els subjectes van presentar el triple de fenòmens arítmics que quan feien les mateixes tasques en àrees no hipòxiques i amb càrregues de treballs similars.

Finançament

Aquest estudi ha rebut un ajut del programa de subvencions per a la realització de treballs d'investigació en l'àmbit de les ciències de l'esport del Consell Català de l'Esport de l'any 2014 (DOGC 6531, 31 Des. 2013).

Conflicte d'interessos

Els autors declaren que no tenen cap conflicte d'interessos.

Bibliografia

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 CO₂ as markers of cave atmosphere dynamics: Evidence and pitfalls in underground confinement; application to cave conservation. Comunicació al col·loqui Climate Changes: The Karst Record III. Montpellier (França), 11-14 de març 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'Ornac (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 CO₂ dans l'atmosphère des grottes, sa place dans la dynamique des systèmes karstiques. Comunicació a la Réunion des Sciences de la Terre de Brest, 31 de març-3 d'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. Guillerm R, Radziszewski E. Effects on man of 30-day exposure to a PiCO₂ 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, Guillerm 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, França, 24-27 novembre de 1987, ESA SP-280 ED. Marseille 1988:19-23.
9. James J, Dyson J. Cave science topics: CO₂ 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 heartrate 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, Shiraishi 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;32:1729-36.
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 y 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, hypobarica and exercise duration each affect heart rate. *Int J Sports Med*. 2015;36:609-14.