

Efecte d'un programa combinat d'entrenament físic i hipòxia hipobàrica intermitent en la millora del rendiment físic de triatletes d'alt nivell

RODAS G.^(1,2), PARRA J.⁽¹⁾, SITJÀ J.^(1,3), ARTEMAN J.⁽¹⁾ Y VISCOR G.^(1,4)

(1) Excelent Center

(2) Dept. Mèdic

Futbol Club Barcelona

(3) Consell Català de l'Esport

(4) Dept. Fisiologia. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona

CORRESPONDÈNCIA:

Departament de Fisiologia,

Facultat de Biologia,

Universitat de Barcelona.

Av. Diagonal, 645

E-08028 Barcelona

E-mail: gviscor@ub.edu

APUNTS. MEDICINA DE L'ESPORT. 2004; 144: 5-10

RESUM: Aquest article presenta els resultats obtinguts per triatletes d'alt nivell (participants en el Ironman de Lanzarote'03) que van sotmetre's a un entrenament físic específic combinat de tres setmanes de durada amb una exposició intermitent a hipòxia hipobàrica durant la primera i la tercera setmana. El protocol de l'exposició a hipòxia hipobàrica va ser de dos cicles de 6 sessions per setmana, amb una sessió diària de 3 hores de durada des de 4.000 m (462 Torr; 616 hPa) fins a 5.500 m (369 Torr; 492 hPa) d'alçada simulada. Abans i després del protocol estudiat, es van realitzar proves de valoració de rendiment físic sobre cicloergòmetre i els corresponents perfils hematopoiètics. Els resultats mostren una lleugera millora dels paràmetres en la sèrie vermella, així com increments en els indicadors de rendiment físic: durada total de la prova i velocitat màxima assolida (amb increments del 6,5% i del 9% respectivament).

Podem arribar a la conclusió que un total de 36 hores d'exposició juntament amb un increment correctament planificat resulten un estímul suficient per induir canvis en l'eritropoesis en triatletes d'elit i que aquest tipus de protocols breus d'exposició intermitent a hipòxia poden suplementar, juntament a un entrenament cuidadosament supervisat, un programa complet de millora del rendiment físic.

PARAULES CLAU: Triatló, Hipòxia hipobàrica, Cicloergòmetre.

SUMMARY: This article presents the results obtained by tri-athletes of high level (participating in the Ironman of Lanzarote,03) who underwent a combined specific physical training of three weeks of duration with an intermittent exhibition to hypobarical hypoxia during the first and the third week. The protocol of the exposure to hypoxia hypobarical was of two cycles of 6 sessions a week, with a daily session of 3 hours of duration from 4.000 m (462 Torr; 616 hPa) at 5.500 m (369 Torr; 492 hPa) of simulated height. Before and after the studied protocol tests of physical performance appraisal was carried out about cicloergometer and the corresponding hematopoietics profiles. The results show a light improvement of the parameters in the red series as well as increases in the indicators of physical performance: total duration of the test and attained speed limit (with increases of the 6,5% and of the 9% respectively).

We can arrive at the conclusion that a total of 36 hours of exposure together with an increase correctly planned they work out a sufficient stimulus to induce changes in the eritropoesis in tri-athletes of elite and that this type of brief protocols from intermittent exposure to hypoxia they can to replace together in a training carefully supervised, a complete program of improvement of the physical performance.

KEY WORDS: Triathlon, Hypobarical hypoxia, Cicloergometer.

INTRODUCCIO

Tant l'entrenament físic com l'hipòxia són factors ambientals que indueixen respostes profundes, complexes i interrelacionades en l'organisme humà, des d'alteracions fisiològiques transitòries en alguns sistemes perifèrics, fins modulacions en l'expressió genètica que determinen la intensitat i amplitud de la resposta final. Abans, s'ha demostrat l'eficàcia de protocols d'exposició intermitent a la hipòxia hipobàrica (altitud simulada) per induir respostes d'aclimatació a la gran altitud d'alpinistes i per a la millora de la capacitat aeròbica en atletes.^{(4;10)(3)} Aquestes aplicacions es troben recolzades per evidències demostrades que indiquen el següent: viure en hipòxia i entrenar en normòxia és probablement més efectiu que entrenar i viure en hipòxia.^(7;14) És precisament per això que totes les modalitats de programes combinats entre entrenament físic i hipòxia semblen oferir una nova possibilitat de cobrir els estímuls que l'organisme necessita per adaptar-se ràpidament i millorar significativament el seu rendiment.

Un grup de triatletes d'Excelent Center, durant la preparació de l'Ironman de Lanzarote'03 van completar el seu entrenament específic de 20 setmanes de durada, amb un programa de sessions intermitents d'hipòxia en cambra hipobàrica que es va realitzar entre les setmanes 14 i 16, amb un seguiment específic tant fisiològic com de rendiment esportiu.

Originàriament no es va plantejar aquesta experiència com un estudi, per tant, no hi havia un grup de control. Ara bé, donat que es van realitzar controls previs i posteriors a l'entrenament de cada esportista, és acceptable que les variacions detectades estiguin relacionades amb l'acció combinada d'hipòxia i entrenament.

Per altra part, els resultats obtinguts poden ser interessants en contribuir indubtablement a la progressió de l'estudi en aquest camp, donat que poden complementar-se amb altres treballs ja realitzats que combinaven entrenament i hipòxia tant en triatló com en altres disciplines esportives.

Per tant, l'objectiu del present estudi es va centrar en comprovar l'eficàcia d'un protocol combinat d'entrenament físic amb exposició intermitent a hipòxia hipobàrica en la millora del rendiment físic.

MATERIALS I METODES

Subjectes

Un grup de quatre voluntaris (triatletes) amb una mitja d'edat de 32 ± 6 anys que van donar la seva conformitat per

a l'estudi. El grup va presentar els següents valors mitjos de pes ($74,5 \pm 3,4$ kg) i de talla (176 ± 3 cm).

Els seus nivells d'entrenament eren força alts, incloent-hi un corredor de categoria internacional, un altre de categoria nacional i dos de nivell autonòmic.

Entrenament

Durant les setmanes que va durar l'entrenament, els voluntaris van seguir un programa d'entrenament regular, diari, amb un volum setmanal d'entre 12 i 18 hores. L'entrenament durant aquestes tres setmanes coincidia amb una fase de ritmes per a la millora de la resistència aeròbica, a velocitats entre la del llindar de lactat i el llindar anaeròbic (4 mmol/l) en les tres disciplines: natació, ciclisme i cursa (veure Taula I), complementant amb el treball de força resistència especial en el gimnàs, així com una rutina d'estirament musculars generals.

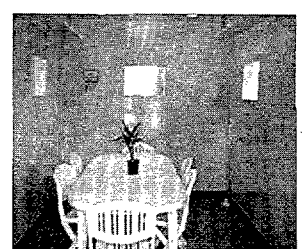
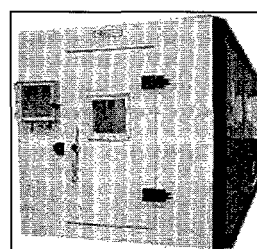
Taula I

	Natació	Ciclisme	Cursa
Setmana 14	4 sessions	4 sessions	4 sessions
Setmana 15	6 sessions	3 sessions	3 sessions
Setmana 16	3 sessions	6 sessions	3 sessions

Exposició intermitent a hipòxia hipobàrica (EIHH)

Els participants van ser sotmesos a un programa d'exposició a hipòxia en cambra hipobàrica en dues fases, amb una setmana de durada en cadascuna d'elles (6 sessions de diàlluns a dissabte) amb un període de descans enmig de la setmana. Així doncs, els subjectes van ser sotmesos a un total de 12 sessions de 3 hores de durada (36 hores d'exposició acumulada).

Figura I i II



La cambra hipobàrica (Model CH-1, Terrassa, Espanya) té capacitat per a unes 8 persones, disposa de sistema computeritzat de control de les variables ambientals (pressió baromètrica, humitat, temperatura i nivells de CO₂) i disposa de diversos dispositius de seguretat per tal que els canvis siguin graduals i segueixen amb absoluta precisió els programes fixats d'antuvi (Fig. 1 i 2). L'altitud simulada en la cambra hipobàrica va augmentar gradualment al llarg dels primers dies. Així, la primera sessió es va realitzar a 4.000 m (616 hPa), la segona a 4.500 (577 hPa) i la tercera i successives a 5.500 m (492 hPa).

Per avaluar l'efecte de la hipòxia i l'entrenament, es van efectuar a l'inici (pre) i al final (post) del programa d'exposició diferents valoracions que van intentar identificar la intensitat de les adaptacions. Els paràmetres avaluats inclouen, entre altres, la freqüència cardíaca, proves hematològiques i proves de rendiment.

Hematologia

Es va analitzar la sèrie vermella dels subjectes abans d'iniciar el programa d'exposició intermitent a hipòxia, repetint-se tots en finalitzar. Les anàlisi es van realitzar en un laboratori de referència i van incloure les següents determinacions: a) recompte d'eritròcits; b) concentració d'hemoglobina; c) hematòcrit.

La determinació es va realitzar mitjançant un comptador Coulter Act-diff basat en el fenomen de la impedància.

Suplementació farmacològica

En el decurs de l'estudi es va realitzar un consell especial als participants respecte als suplementes que havien de prendre. Es va pautar el següent tractament mèdic que es va iniciar la setmana 12 d'entrenament, és a dir, dues setmanes prèvies a l'exposició a l'altitud.

- lactat ferrós, a dosis de 100 mg.d⁻¹ en una ingesta diària
- àcid ascòrbic (vitamina C), 1.000 mg.d⁻¹ en una ingesta diària
- acetat de dl- α -tocoferol (vitamina E), 400 mg.d⁻¹ en una ingesta diària

Valoració del rendiment físic

Així mateix, abans i després de les tres setmanes del període d'estudi, es va realitzar un doble assaig amb l'objectiu d'avaluar la variació en el rendiment físic. La prova control es va efectuar en un cicloergòmetre Cardiogirus i va consistir en la determinació del temps invertit en recórrer 5,4 km

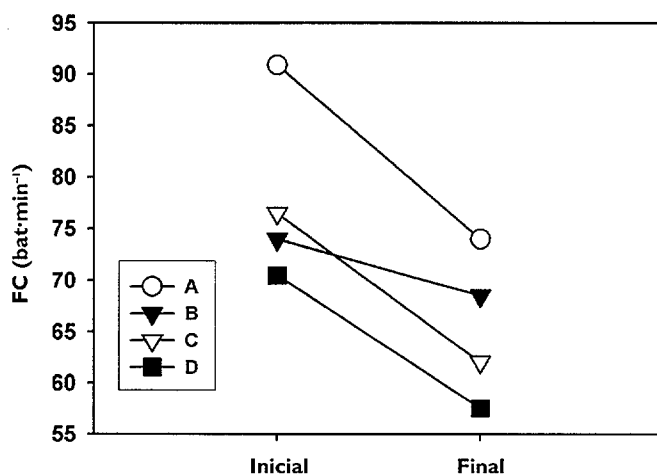
(equivalent a una etapa pròleg del Tour de França). La prova escollida va ser el Pròleg de Dublín, així com la velocitat mitja de pedalejada durant aquest període.

RESULTATS

Tot i que la combinació de diferents protocols sobre un mateix individu pot arribar a generar sobreentrenament i sensacions d'excessiva fatiga, en el nostre organisme no es va presentar cap individu amb aquesta simptomatologia.

La resposta a l'entrenament combinat amb hipòxia va ser progressiva i es va poder quantificar per la reducció de la freqüència cardíaca en hipòxia en repòs com a signe d'aclimatació a l'alçada (fig. 3).

Figura III Reducció del FC en repòs a 5.500 m durant el programa

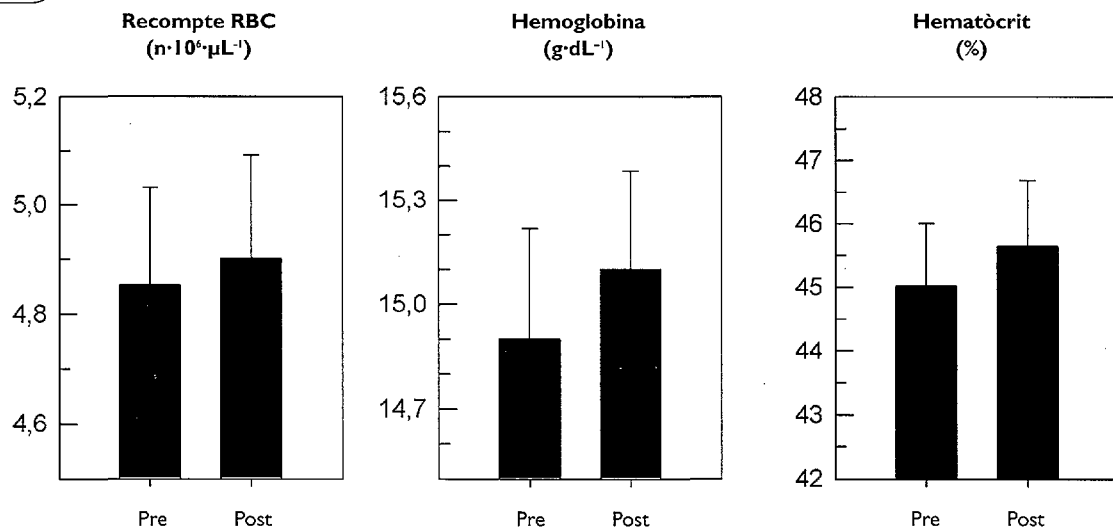


El descens de la freqüència cardíaca va mostrar una variació significativa amb un descens mig de batecs per minut durant el repòs en hipòxia (corresponent a 5.500 m d'alçada equivalent) de $12,5 \pm 3,7$. Aquest descens equival a una reducció en el valor basal de pulsacions en aquestes condicions d'aproximadament un 16% de promig.

Conjuntament amb el descens en les pulsacions, es va produir un increment significatiu en determinats paràmetres relacionats amb la sèrie vermella que ens indica l'inici dels processos d'eritropoesis (Fig. 4).

En tots els voluntaris es va observar un augment en els paràmetres relacionats amb el transport d'oxigen en sang, tot i que les variacions dels valors no van mostrar diferències estadísticament significatives degut al reduït nombre de voluntaris. Per altra part, les alteracions són considerables te-

Figura IV



nint en compte el curt període de temps estudiat, doncs corresponen a increments de l'1% en el valor del nombre de hematíes (RBC), de quantitat d'hemoglobina i d'hematòcrit.

Per determinar l'eficàcia del protocol combinat de tres setmanes de durada, es van comparar els resultats en les dues proves de rendiment físic (Marques en el Pròleg de Dublín, Taula 2). Els quatre esportistes van mostrar importants millores en el resultat del seu rendiment, tot i que les freqüències de pedalejada no van patir modificacions significatives.

Taula II

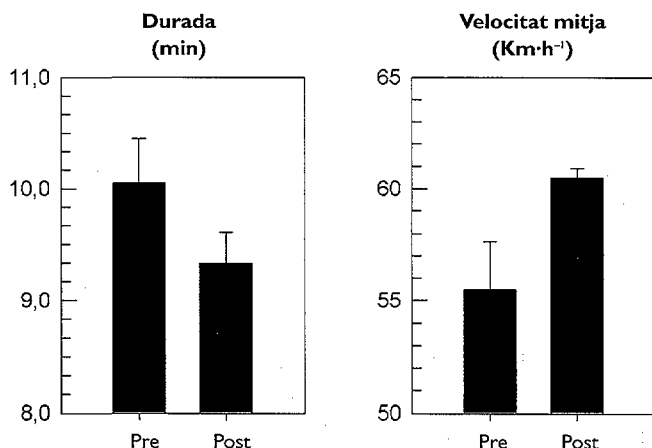
	Abans	Després
Subjecte 1	10:36	9:40
Subjecte 2	10:03	9:48
Subjecte 3	9:55	9:03
Subjecte 4	10:24	9:58

Resultats expressats en min:seg.

Els resultats s'expressen en forma gràfica en la figura 5.

Aquestes variacions van resultar estadísticament significatives ($p < 0.02$ test de Wilcoxon) tant en la durada de la prova com en la velocitat mitja obtinguda (variacions del 6,5% i del 9% respectivament) amb un increment en la sensació subjectiva de potència dels voluntaris.

Figura V



DISCUSSIO

Actualment, no hi ha cap dubte en què l'efecte de l'aclimatació a l'alçada induït mitjançant successives sessions breus d'exposició intermitent a hipòxia és capaç de produir un conjunt de respostes adaptatives que són d'interès per a la millora de la capacitat d'esforç. Aquest és un procés que es denomina de pre-aclimatació a l'alçada^(3;4) i que està modulada per un seguit de complexos factors. Uns intervenen a curt plaça, com la descàrrega adrenèrgica reflexa induïda pels quimiorceptors arterials, que és responsable de ràpids ajustaments però poc efectius a llarg termini com les conegudes respostes d'hiperventilació i les alteracions cardiovasculars. Altres mecanismes proveeixen a l'organisme d'efectes més a

llarg termini, entre els quals destaca, pel seu paper clau, l'expressió del factor induïble per hipòxia (HIF-1 α).

Les adaptacions produïdes no només permeten millorar el rendiment en esports que es realitzen en alçada (esports de muntanya), sinó que les adaptacions tant fisiològiques com bioquímiques desencadenades poden ser d'utilitat en moltes altres situacions esportives.

Tanmateix, l'ús de sessions d'hipòxia intermitent per a la millora de la capacitat aeròbica a nivell del mar segueix essent controvertit. Després d'un primer estudi⁽¹⁵⁾ en el que es van comparar els efectes de l'entrenament en hipòxia intermitent i normòxia, diversos estudis han demostrat l'eficiència de l'exposició a hipòxia intermitent en la millora de la capacitat aeròbica en individus entrenats.^(3,4,10) Tot i això, molts estudis són inconsistents en la metodologia i, especialment, en el disseny dels programes d'exposició a hipòxia (alçada simulada, durada de les sessions i dels programes) i d'aquí la disparitat de les dades obtingudes i la controvèrsia generada.⁽¹¹⁾

Un exemple especialment adient al cas que ens ocupa és la millora que es va detectar en triatletes entrenats en cambra hipobàrica, tot i no apreciar-se canvis en l'eritropoesi.⁽¹⁶⁾

Si a l'efecte de la hipòxia combinem el produït per l'entrenament, la complexitat per entendre la seqüència causa-efecte es complica en gran manera. En aquestes situacions, un mateix entrenament i períodes d'hipòxia combinats de diferent forma, produiran efectes diversos en els individus.

Per altra part, actualment es coneixen bé els mecanismes moleculars induïts per la hipòxia (Fig. 6). El factor de transcripció induïble per la hipòxia (HIF-1 α) és una molècula dimèrica que juga un important paper dintre del programa d'expressió gènica que regula l'homeostasi de l'oxigen.⁽¹²⁾ Aquest factor s'expressa en tots els teixits de forma consecutiva. Mentre la tensió d'oxigen a nivell subcel·lular es manté

en valors normals, HIF-1 resulta degradat per hidroxilació i la seva ulterior unió al complex von Hippen-Lindau (VHL) que, al mateix temps, forma part d'una associació molecular complexa en la qual intervé un enzim capaç de conjuguar la ubiquitina (Ub), que és, en darrer terme, el responsable de convertir a HIF-1 en una molècula degradable. Al contrari, en manca d'oxigen, la prolilhidroxilasa no és capaç d'hydro-litzar la molècula d'HIF-1, fet pel qual, aquesta, en resposta a l'estress hipòxic, s'acumula en el citoplasma, penetra en el nucli i s'uneix específicament a determinats elements de l'ADN cel·lular (HRE: hypoxia-responsive recognition element).⁽⁵⁾

El factor HIF-1 actua doncs com un factor de transcripció responsable d'un programa genètic coordinat⁽¹²⁾, mitjançant funcions diverses però estretament relacionades com: alteració del patró ventilatori, increment d'eritropoesi, augment de la glucolisi i intensificació de l'angiogenesi. Aquestes respostes fisiològiques es veuen influenciades per proteïnes específiques amb una taxa de transcripció fortament incrementada per la presència d'HIF-1, especialment els gens de la tirosina hidroxilasa⁽⁹⁾, eritropoietina^(1,2), diversos enzims glicolítics^(6,13) i el factor angiogènec VEGF⁽⁸⁾. (Fig. 7)

Tot i que apareixen clarament descrites les vies de modulació i adaptació del sistema de transport d'oxigen, aquests canvis són petits, doncs aquest és un sistema que difícilment pateix alteracions i aquestes requereixen d'un determinat temps per assolir-se i estabilitzar-se.

És interessant destacar que la millora en aquest sistema no només afectarà al rendiment esportiu, sinó que és igualment favorable en els processos de recuperació d'esforços interval·lics o successius, així com l'assimilació d'altres càrregues d'entrenament, afavorint la correcta hipertrofia del múscul.

Respecte al rendiment físic, desafortunadament uns elevats paràmetres corresponents al transport sanguini de l'oxigen no acostuma a ser referència suficient per obtenir uns bons resultats esportius. El rendiment d'un atleta ve representat per una equació multifactorial on tant afecten els elements fisiològics com bioquímics i psicològics entre altres.

En conclusió, la combinació d'entrenament físic (amb càrregues preestablertes) i sessions intermitents d'hipòxia en cambra hipobàrica millora significativament el rendiment de triatletes d'alt nivell. Aquest increment en el seu rendiment és el resultat de la combinació de factors i no és possible diferenciar entre el que aporta l'entrenament i el que correspon a l'hipòxia.

Figura VI Activació d'HIF per la hipòxia

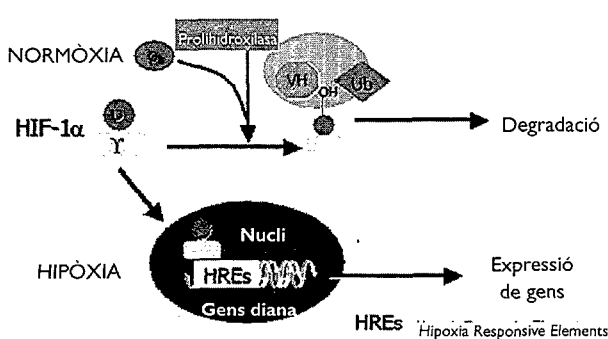
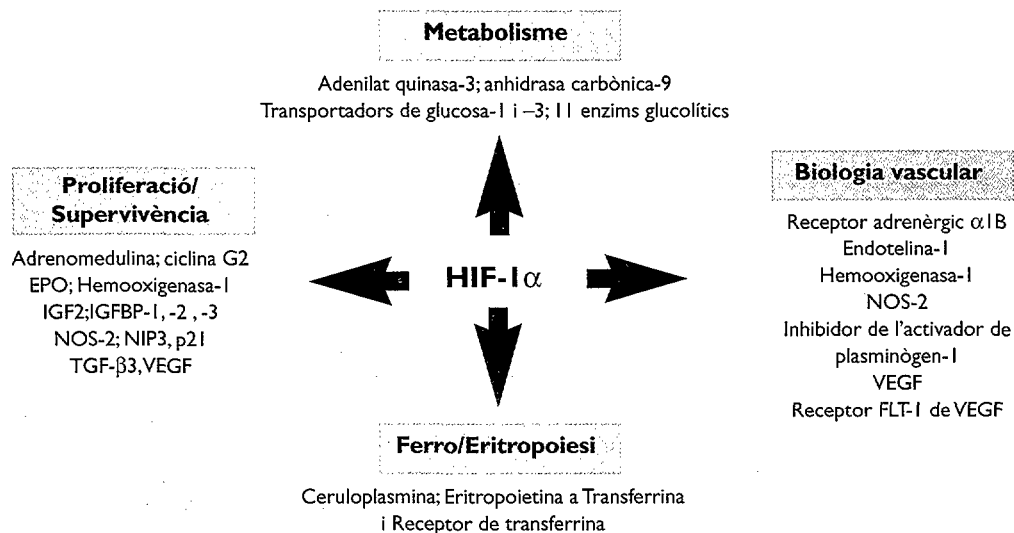


Figura VII Vies activades per l'acció d'HIF

Futurs estudis han de permetre la determinació de l'efecte de cada factor per separat i l'efecte de les diferents combinacions possibles entre ambdós.

AGRAÏMENTS

Els autors desitgen el seu agraïment al grup de voluntaris per l'interès demostrat durant l'estudi.

Bibliografia

- Bunn, H. F., J. Gu, L. E. Huang, J. W. Park, and H. Zhu. Erythropoietin: a model system for studying oxygen-dependent gene regulation. *Journal of Experimental Biology* 201: 1197-1201, 1998.
- Bunn, H. F. and R. O. Poyton. Oxygen sensing and molecular adaptation to hypoxia. *Physiol Rev.* 76: 839-885, 1996.
- Casas, H., M. Casas, A. Ricart, R. Rama, Ibáñez J., L. Palacios, F. A. Rodríguez, J. L. Ventura, G. Viscor, and T. Pagés. Effectiveness of three short intermittent hypobaric hypoxia protocols: hematological responses. *JEPonline* 3: 38-45, 2000.
- Casas, M., H. Casas, T. Pagés, R. Rama, A. Ricart, J. L. Ventura, Ibáñez J., F. A. Rodríguez, and G. Viscor. Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimation and improves the lactate threshold. *Aviat.Space Environ.Med.* 71: 125-130, 2000.
- Harris, A. L. Hypoxia—a key regulatory factor in tumour growth. *Nat.Rev.Cancer* 2: 38-47, 2002.
- Jiang, B. H., E. Rue, G. L. Wang, R. Roe, and G. L. Semenza. Dimerization, DNA binding, and transactivation properties of hypoxia-inducible factor 1.
- Levine, B. D. and G. J. Stray. "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J.Appl.Physiol.* 83: 102-112, 1997.
- Levy, A. P., N. S. Levy, S. Wegner, and M. A. Goldberg. Transcriptional regulation of the rat vascular endothelial growth factor gene by hypoxia. *J.Biol.Chem.* 270: 13333-13340, 1995.
- Millhorn, D. E., R. Raymond, L. Conforti, W. Zhu, D. Beitner-Johnson, T. Filisko, M. B. Genter, S. Kobayashi, and M. Peng. Regulation of gene expression for tyrosine hydroxylase in oxygen sensitive cells by hypoxia. *Kidney Int.* 51: 527-535, 1997.
- Rodríguez, F. A., H. Casas, M. Casas, T. Pages, R. Rama, A. Ricart, J. L. Ventura, Ibáñez J., and G. Viscor. Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Med.Sci.Sports Exerc.* 31: 264-268, 1999.
- Rodríguez, F. A. and J. L. Ventura. Intermittent hypoxia and training: Methods, Strategies and Results. In Viscor, G., A. Ricart, and C. Leal, eds., *Health & Height*. Barcelona, Publicacions UB. 2003, 107-113.
- Semenza, G. L. Transcriptional Regulation by Hypoxia-Inducible Factor 1. Molecular Mechanisms of Oxygen Homeostasis. *Trends in Cardiovascular Medicine* 6: 151-157, 2003.
- Semenza, G. L., B. H. Jiang, S. W. Leung, R. Passantino, J. P. Concorde, P. Maire, and A. Giallongo. Hypoxia response elements in the aldolase A, enolase 1, and lactate dehydrogenase A gene promoters contain essential binding sites for hypoxia-inducible factor 1. *J.Biol.Chem.* 271: 32529-32537, 1996.
- Stray, G. J. and B. D. Levine. "Living high and training low" can improve sea level performance in endurance athletes. *British Journal of Sports Medicine* 33: 150-151, 1999.
- Terrados, N., J. Melichna, C. Sylven, E. Jansson, and L. Kaijser. Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol* 57: 203-209, 1988.
- Vallier, J. M., P. Chateau, and C. Y. Guezennec. Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *Eur.J.Appl.Physiol* 73: 471-478, 1996.