

ADAPTACION AL EJERCICIO MUSCULAR EN LA ALTURA

Mario Paz Zamora, Hilde Spielvogel,
Esperanza Caceres.

El ser humano no pasa la vida en condiciones estables, sino se debe adaptar necesariamente a condiciones diferentes, como cambio de temperatura (calor, frío), sequedad, humedad, incremento de la presión barométrica (compresión, p.e. en el buceo), disminución de la presión barométrica (depresión, p.e. en la altura) y sobre todo se debe adaptar al ejercicio y esfuerzo muscular (trabajo físico, deporte).

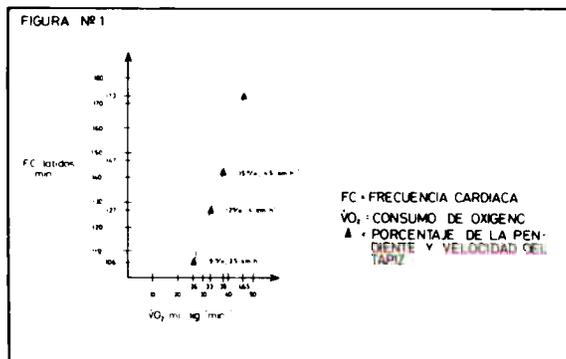
De cierta manera se puede comparar el ascenso a la altura con el ejercicio muscular, puesto que ambos producen un inmediato incremento de la ventilación pulmonar (VE), es decir del aire que se debe respirar y de la frecuencia cardíaca (FC), o sea del número de contracciones del corazón. La altura causa estos efectos por la disminución de la presión parcial de oxígeno en el aire inspirado (PI_{O_2}), es decir por la disminución de la oferta de oxígeno, mientras que el ejercicio muscular produce los mismos efectos por causa del aumento de la demanda de oxígeno necesario para conseguir el incremento del intercambio de oxígeno (O_2) y anhídrido carbónico (CO_2) entre las células musculares y la atmósfera apropiado para las demandas incrementadas del metabolismo.

Cómo entonces, y hasta qué punto se puede adaptar el ser humano en un ambiente hipóxico como es la altura, a un estado de incremento de la demanda de oxígeno, como lo representa el ejercicio muscular?

Esta pregunta fué objeto de numerosos trabajos de investigación en el IBBA.

El oxígeno del aire inspirado no es extraído en su totalidad por el organismo, sino solo una parte es consumida. Esta parte es denominada consumo de oxígeno (VO_2). Su magnitud varía según las demandas del metabolismo, y puede alcanzar en el esfuerzo máximo valores hasta 20 veces mayores que en reposo.

Figura No. 1: Consumo de oxígeno y frecuencia cardíaca a diferentes niveles de esfuerzo de un grupo de 28 hombres de origen aymara en La Paz (3 600 m.) (Edad promedio 26,6 años).



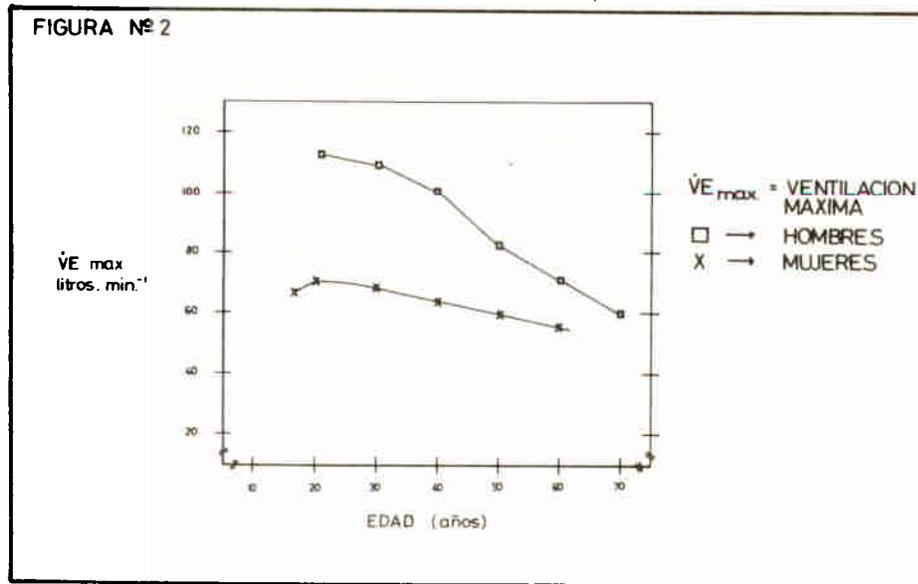
La cantidad máxima de oxígeno que el organismo puede utilizar durante un esfuerzo agotador es denominada consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_2 \text{ max}$) o también capacidad aeróbica. Este parámetro expresa la capacidad funcional de todo el sistema de transporte de oxígeno, es decir, corazón, pulmones, y sangre. Su medición se realiza mediante métodos no invasivos y relativamente sencillos durante pruebas de esfuerzo graduado en el cicloergómetro o tapiz rodante.

Existen varios factores que tienen influencia sobre la magnitud de la capacidad aeróbica:

El sexo.- El $\text{VO}_2 \text{ max}$ de la mujer es alrededor de 25-30% menor que el del hombre.

La edad.- La capacidad aeróbica se incrementa durante el desarrollo para alcanzar su valor máximo a los 19-20 años en el hombre y a los 14-16 años en la mujer. Durante la vida disminuye, y por lo general a los 60 años el hombre ha perdido la tercera hasta la cuarta parte de su capacidad aeróbica anterior, y la mujer la cuarta hasta la quinta parte.

Figura No. 2: Ventilación máxima al nivel del consumo máximo de oxígeno en el curso de la vida (según Hollmann, 1980).



Estado de nutrición.- Es bien conocida la disminución de la capacidad aeróbica en la anemia ferripriva y deficiencia de hierro, y en la malnutrición, además en cualquier enfermedad aguda o crónica.

Entrenamiento físico.- Mediante un entrenamiento físico adecuado la capacidad aeróbica puede ser incrementada hasta por un 30%.

Factores genéticos.- Hay personas que tienen una capacidad aeróbica relativamente baja desde su nacimiento y que por ningún entrenamiento pueden llegar a los valores necesarios para ganar eventos deportivos de esfuerzo sostenido.

Método de medición.- Por lo general la capacidad aeróbica medida en cicloergómetro es alrededor de 5% menor que la obtenida en prueba de esfuerzo máximo en tapiz rodante.

Desde los primeros trabajos realizados en el IBBA por Lefrançois y col. en la década de los años 60, sabemos que las personas recién llegadas a la altura presentan una disminución significativa de su VO₂ max, y sin embargo, la población autóctona parece ser relativamente poco afectada sugiriendo una buena adaptación a su ambiente hipóxico. El hallazgo descrito por algunos autores que el VO₂ max es igual en la población de tierras bajas y de altura, si ambas son estudiadas en su ambiente acostumbrado, no pudimos comprobar en todos los grupos de población: p.e. en niños del mismo grupo etareo y de un estado físico similar, nativos y residentes de la altura y estudiados mediante el mismo método que un grupo de niños de nivel del mar, se encontraron VO₂ max en 15% menor y frecuencia cardíaca máxima (FC max) por 11 latidos menos que en los niños del nivel del mar.

La obtención de valores confiables de VO₂ max no es fácil. Fuera de un equipo adecuado se requieren sujetos altamente motivados. Por tal razón es más fácil trabajar con niños y atletas que con personas adultas sedentarias. Los atletas son ciertamente los más estudiados dentro del grupo de sujetos recién llegados a la altura. En los estudios realizados por Mario Paz Zamora y col. se comprobó que la disminución del V O₂ max en la altura se presenta tanto en recién llegados como en nativos y es más importante en atletas que en sedentarios y todavía más grande si se trata de atletas de una especialidad deportiva que requiere intenso trabajo aeróbico. Estos hallazgos son sumamente importantes para eventos deportivos.

Si bien se puede realizar cualquier actividad deportiva en la altura con fines recreativos, cuando se trata de superar marcas, muchos deportistas de disciplinas de esfuerzo sostenido que requieren un metabolismo aeróbico sufren frustraciones y desilusiones inclusive después de un tiempo adecuado de adaptación. Aparentemente no solo influye la capacidad aeróbica sino también el tiempo durante el cual un atleta es más capaz de realizar esfuerzo a su capacidad máxima. Especialmente en el ciclismo, donde el deportista tiene que utilizar la mayor parte de su capacidad física para superar la resistencia del aire, y para lo cual la altura de La Paz (entre 3500 y 4000 m), donde la presión barométrica, y por lo tanto la densidad del aire, está disminuida en un 30% , es calculada de ser ideal para superar marcas de velocidad (Di Prampero, 1985), todavía no fué posible superar el record mundial de la velocidad por hora ni de distancias largas a pesar del equipo más sofisticado. Sin embargo, se establecieron records mundiales en especialidades de distancias cortas pero de un esfuerzo intenso y de duración breve, donde interviene sobre todo el metabolismo **anaeróbico**.

Un lugar especial ocupan los atletas nativos de altura que en nuestra opinión con entrenamiento, alimentación e intervalos de descanso adecuados deberían mejorar sus marcas.

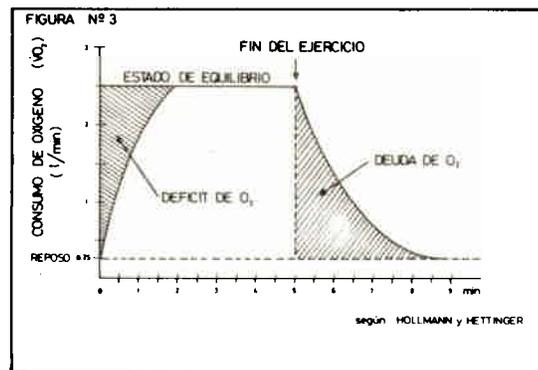
Respecto a otros parámetros que se determinan durante las pruebas de esfuerzo graduado, debemos mencionar varios hallazgos que demuestran diferencias entre la población de altura y del nivel del mar. La frecuencia cardíaca tanto en reposo como durante el ejercicio se encuentra disminuída en atletas bien entrenados a nivel del mar. Esta disminución se debe al incremento del volúmen sistólico, puesto que el entrenamiento físico causa una función cardíaca más racionada. Dicha disminución de la frecuencia cardíaca, especialmente de la FCmax, está más pronunciado en la altura, tanto en atletas como en personas sedentarias. Por esta razón debe ser utilizada con mucha cautela como criterio para definir si un sujeto está desarrollando su capacidad máxima o no.

Otro parámetro que muestra valores diferentes en la altura en comparación con el nivel del mar, es el cociente respiratorio durante el esfuerzo máximo. El cociente respiratorio indica la relación entre eliminación de anhídrido carbónico y consumo de oxígeno ($R = VC_{O_2} / V_{O_2}$). A nivel del mar se indica un R de 1.15 o más como un criterio de esfuerzo máximo. Aquí encontramos valores de 1.2 hasta en casos raros 1.5, puesto que el sujeto de la altura es "hipóxico" e "hipercápnico", como lo describió Lefrançois al referirse a la composición del aire alveolar. La ventilación pulmonar del nativo de la altura es disminuída en el esfuerzo máximo, si se hace la comparación con la ventilación del sujeto recién llegado. Eso tiene como consecuencia valores disminuídos del equivalente respiratorio ($ER = VE/V_{O_2}$) en el nativo de altura.

La presión arterial de oxígeno (Pa_{O_2}) en la altura aumenta durante el ejercicio submáximo para recién disminuir durante el esfuerzo agotador.

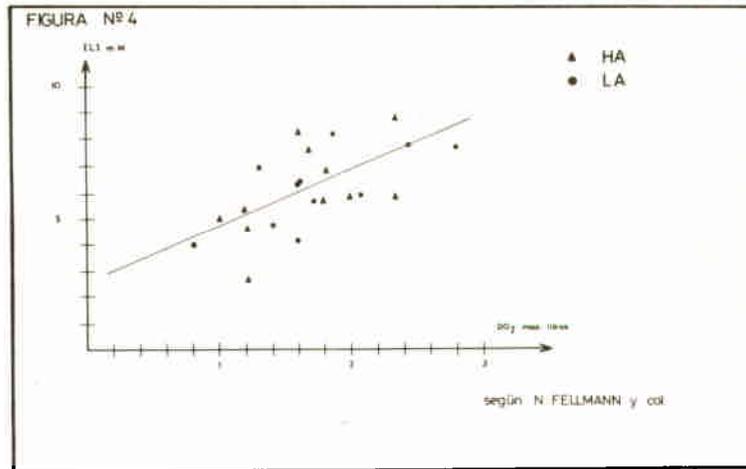
Al comenzar el ejercicio físico el organismo incurre en un déficit de oxígeno hasta alcanzar el consumo de oxígeno requerido para el trabajo determinado. Esta deuda de oxígeno tiene que pagarse después de haber terminado el ejercicio.

Figura No. 3: Deuda y deficit de oxigeno.



En un trabajo realizado por Nicole Fellmann y col. en niños del mismo grupo étnico y con un estado físico similar, a nivel del mar (Clermont-Ferrand, Francia) y en la altura (IBBA, La Paz), que determinó la deuda de oxígeno en el trabajo submáximo máximo y supramáximo, se encontró que a una carga de trabajo determinada, la deuda de oxígeno fué mayor en la altura que a nivel del mar y las pendientes de las curvas de correlación entre la deuda de O₂ y el consumo de O₂ fueron significativamente más altas en la altura. Cuando se comparan las deudas de O₂ con el porcentaje de V_{O₂ max}, entonces son similares en la altura y a nivel del mar. Para 115% de la capacidad aeróbica máxima, la deuda máxima de O₂ y la concentración de lactato (L) no fueron significativamente diferentes. Las correlaciones lineares entre la deuda máxima de O₂ y (L) fueron iguales a nivel del mar y en la altura, sugiriendo que la altura no modifica la capacidad anaeróbica en los niños

Figura No. 4: Concentración de lactato en relación con la deuda de O₂ respectiva a nivel de esfuerzo supramaximo de cada niño estudiado.



Si evaluamos la capacidad funcional mediante los cálculos que se indican en la literatura, utilizando el MET que corresponde a 3, 5 ml de O₂ por kg de peso corporal por minuto, entonces veremos que no hay coincidencia con el número de METS indicado para un trabajo determinado.

La capacidad funcional es definida como el consumo máximo de oxígeno alcanzado durante la prueba de esfuerzo graduado, dividido entre el consumo de oxígeno en reposo medido antes del inicio de la prueba estando el sujeto en decúbito dorsal. En tal caso el consumo de oxígeno debe ser expresado en mililitros por kilogramo de peso por minuto.

$$\text{Capacidad funcional} = \frac{\text{V}O_2 \text{ esfuerzo ml.kg-1. min-1}}{\text{V}O_2 \text{ reposo ml.kg-1. min-1}}$$

VO2 max EN DIFERENTES GRUPOS DE POBLACION EN LA PAZ (3.600 m.) (I.B.B.A. 1980 - 1987)								
	Autores	Año	Nº de sujetos	Edad (años)	Equipo Utilizado	VO2 max [ml/kg/min]	F.C. Max lat./min	
NIÑOS Y ADOLESCENTES	J. D. Haas, L. P. Greksa y col.	1980	34 Hab.	10.9	Tapiz Rodante	39.60	187.9	
	J. D. Haas, L. P. Greksa y col.	1980	33 Lab	10.4	Tapiz Rodante	40.20	190.3	
	J. Coudert, N. Fellman y col.	1983	11 Hab	11.0	Cicloergometro	41.80	193.0	
	L. P. Greksa, H. Spielvogel y c.	1983	13 Hab Aym.	11.6	Tapiz Rodante	45.90	192.8	
	L. P. Greksa, H. Spielvogel y c.	1983	14 Hab Eur.	11.9	Tapiz Rodante	42.50	194.1	
	L. P. Greksa, H. Spielvogel y c.	1983	10 Hab Aym.	17.9	Tapiz Rodante	50.90	193.3	
	L. P. Greksa, H. Spielvogel y c.	1983	10 Hab Eur.	18.3	Tapiz Rodante	47.00	197.5	
	J. Coudert, N. Fellman y col.	1985	26 Hab	12.1	Cicloergometro	40.05	187.0	
	J. Coudert, N. Fellman y col.	1987	19 Hab	11.1	Cicloergometro	40.40	190.2	
	J. Coudert, N. Fellman y col.	1987	16 Hab	13.9	Cicloergometro	40.38	189.9	
	ADULTOS NO ENTRENADOS	J. D. Haas, J. Beard y col.	1980	23	26.0	Cicloergometro	35.70	170.0
		J. D. Haas, L. P. Greksa y col.	1980	28 cargadores	26.4	Tapiz Rodante	46.50	172.7
L. Cudkiewicz, H. Spielvogel y c.		1983	21	23.8	Cicloergometro	36.04	164.6	
	O. Aparicio, H. Spielvogel y c.	1983	29	33.0	Cicloergometro	31.09	160.0	
ATLETAS	J. D. Haas, L. P. Greksa y col.	1980	15 nadadores Ha	14.1	Tapiz Rodante	46.90	189.0	
	J. D. Haas, L. P. Greksa y col.	1980	19 nadadoras Ha	12.2	Tapiz Rodante	39.90	192.0	
	M. Paz - Zamora y col.	1981	4 fondistas Ha	-	-	60.50	-	
	M. Paz - Zamora y col.	1981	9 ciclistas La	-	-	1ª día 48.10; 10ª día 48.50	-	
	M. Paz - Zamora y col.	1981	8 ciclistas Ha	-	-	3ª día 37.00; 9ª día 36.70	-	
	M. Paz - Zamora y col.	1981	18 futbolistas sudam	-	-	1ª día 48.40	-	
	M. Paz - Zamora y col.	1981	17 futbolistas Ha	-	-	1ª día 43.80	-	
	M. Paz - Zamora y col.	1981	12 futbolistas Europ.	-	-	1ª día 34.50; 12ª día 39.90	-	
	M. Paz - Zamora y col.	1981	8 boxeadores La	-	-	52.50	-	
	M. Paz - Zamora y col.	1981	4 Boxeadores Ha	-	-	3ª día 56.10	174.0	
	H. Spielvogel, L. Parédes y col.	1982	9 nadadores La	18.1	Tapiz Rodante	3ª día 43.80	173.0	
	H. Spielvogel, L. Parédes y col.	1982	9 nadadoras La	16.5	Tapiz Rodante	3ª día 43.80	173.0	
	L. P. Greksa, H. Spielvogel y col.	1983	12 fondistas Ha	25.8	Tapiz Rodante	56.50	186.1	

Hab = niños nativos de altura; Lab = niños nacidos en lugar bajo con diferente tiempo de residencia en altura
Aym. = aymaras; Eur. y Europ. = europeos; Ha = nativos en altura; La = provenientes de lugar bajo.

Hemos observado que en la altura el consumo de oxígeno en reposo se encuentra entre 4 y 5 ml.kg⁻¹.min⁻¹, y que por lo tanto la capacidad funcional medida siempre se encuentra por debajo de la capacidad funcional calculada para un trabajo determinado.

Este tema será el objeto de futuras investigaciones en el IBBA al igual que la determinación de la frecuencia cardíaca máxima para diferentes grupos etareos.

Finalmente la tabla Nº 1 presenta el resumen de los estudios realizados en el IBBA respecto al V02 max. en diferentes grupos de población desde el año 1980 hasta 1987.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- MAXIMAL WORK CAPACITY AND PHYSICAL GROWTH IN PREADOLESCENT BOYS AT HIGH ALTITUDE.-
L P Greksa and J D Haas, Human Biology, 54:677 - 695, 1982.
- 2.- IRON, HEMOGLOBIN, AND WORK CAPACITY IN BOLIVIAN MALES LIVING AT HIGH ALTITUDE.-
D A Tufts; Tesis de Master of Science, Cornell University, Mayo 1982.
- 3.- SUBMAXIMAL WORK PERFORMANCE IN NATIVE AND MIGRANT PREADOLESCENT BOYS AT HIGH ALTITUDE.-
Haas J D, L P Greksa, T L Lestherman, H Spielvogel, I. Paredes, G. Moreno-Black, and M Paz Zamora; Human Biology 55:517 - 527, 1983.
- 4.- CAPACIDAD MAXIMA DE TRABAJO DE NIÑOS EN LA ALTURA.-
Haas J D, L P Greksa, T L Leatherman, G Moreno-Black, L Paredes F, M Paz Zamora y H Spielvogel; Anuario del I.B.B.A. 1983 - 1984, pp 105 - 109.
- 5.- ESFUERZO SUBMAXIMO DE NIÑOS EN LA ALTURA.-
Haas J D, L P Greksa, T L Leatherman, G Moreno-Black, L Paredes F, M Paz Zamora y H Spielvogel; Anuario de I.B.B.A. 1983 - 1984, pp 111 - 114
- 6.- CAPACIDAD AEROBICA MAXIMA DE NADADORES A GRANDES ALTURAS.-
Haas J D, L P Greksa, T L Leatherman, G Moreno-Black, L Paredes F, M Paz Zamora y H Spielvogel; Anuario del I.B.B.A. 1983 - 1984, pp 115 - 118.
- 7.- ANTHROPOMETRIC SURVEY OF HIGH - ALTITUDE BOLIVIAN PORTERS.-
Leatherman T L, R Brooke Thomas, L P Greksa and J D Haas Annals of Human Biology, Vol 11, Nº 3, 253 - 256, 1984.
- 8.- THE PHYSICAL GROWTH OF URBAN CHILDREN AT HIGH ALTITUDE.-

- Greksa L P, H Spielvogel, L Paredes F, M Paz Zamora, and E Caceres; American Journal of Physical Anthropology 65: 315 - 322, 1984.
- 9.- **DISTRIBUCION OF HEMOGLOBIN AND FUNCTIONAL CONSEQUENCES OF ANEMIA IN ADULT MALES AT HIGH ALTITUDE.-**
Tufts D A, J D Haas, J L Beard and H Spielvogel; The American Journal of Clinical Nutrition 42: 1 - 11, 1985.
- 10.- **MAXIMAL EXERCISE CAPACITY IN ADOLESCENT EUROPEAN AND AMERINDIAN HIGH - ALTITUDE NATIVES.-**
Greksa L P, H Spielvogel and L Paredes F; American Journal of Physical Anthropology 67: 209 - 216, 1985.
- 11.- **EFFECT OF ALTITUDE ON THE PHYSICAL GROWTH OF UPPER-CLASS CHILDREN OF EUROPEAN ANCESTRY.-**
Greksa L P, H Spielvogel, and E Caceres; Annals of Human Biology Vol 12, N° 3, 225 - 232, 1985.
- 12.- **OXIGEN DEBT IN SUBMAXIMAL AND SUPRAMAXIMAL EXERCISE IN CHILDREN AT HIGH AND LOW ALTITUDE**
Fellmann N, M Bedu, H Spielvogel, G Falgairette, E Van Praagh and J Coudert; Journal of Applied Physiology 60 (1): 209 - 215, 1986.
- 13.- **GROWTH PATTERNES OF EUROPEAN AND AMERINDIAN HIGH - ALTITUDE NATIVES.-**
Greksa L P; Curren Anthropology Vol 27, N° 1: 72 - 74, Febrero 1986.
- 14.- **THE EFFECTS OF IRON DEFICIENCY AND VARIATION IN HEMOGLOBIN CONCENTRATION ON STEADY - STATE EXERCISE PERFORMANCE IN MALES RESIDENT AT HIGH ALTITUDE (La Paz, BOLIVIA). R. C. Roach; Tesis de Master of Science, Cornell University, Febrero 1986.**
- 15.- **CHEST MORPHOLOGY OF YOUNG BOLIVIAN HIGH - ALTITUDE RESIDENTS OF EUROPEAN ANCESTRY.-**
L P Greksa; Human Biology Vol 58, N° 3, 427 - 443, Junio 1986
- 16.- **DEFINING ANEMIA AND ITS EFFECT ON PHYSICAL WORK CAPACITY AT HIGH ALTITUDES IN THE BOLIVIAN ANDES**
Haas J D, D A Tufts, J L Beard, R C Roach, H Spielvogel; En: "Working Capacity in Tropical Population" Edited by K Collins. Cambridge University Press, Cambridge, en prensa.
- 17.- **EFFECTS DE L'ALTITUDE SUR LES CINETIQUES CARDIORESPIRATOIRES AU COURS DE LA RECUPERATION D'UN EXERCICE SUBMAXIMAL CHEZ L'ENFANT.-**

- Bedu M, N Fellmann, J Coudert, G Falgairette, E Van Praagh, H Spielvogel; Science et Motricité N° 2, 29 - 34, Paris, 1987.
- 18.- CAPACIDAD AEREOBICA DE ADOLESCENTES EUROPEOS Y AMERICANOS NATIVOS DE ALTURA.-
Spielvogel H, L Paredes - F, E Caceres, L P Greksa Anuario del I.B.B.A. 1986 - 1987, pp 79 - 83, Diciembre 1987
 - 19.- CAPACIDAD DE TRABAJO DE VARONES DE ORIGEN AYMARA EN LA ALTURA.-
Greksa L P, J D Haas, T L Leatherman, R B Thomas, H Spielvogel; Anuario del I.B.B.A. 1986 - 1987, pp 79 - 83, Diciembre 1987
 - 20.- LUNG FUNCTION OF YOUNG AYMARA HIGHLANDERS.-
Greksa L P, H Spielvogel Anuario, E Caceres an L Paredes F Annals of Human Biology Vol 14, N° 6, 533 - 542, 1987.
 - 21.- ANAEROBIC METABOLISM DURING PUBERTAL DEVELOPMENT AT HIGH ALTITUDE.-
Fellman N, M Bedu, H Spielvogel, G Fargairette, E Van Praagh J F Jarrige and J Coudert; Journal of Applied Physiology, 1987, en prensa.
 - 22.- EFFECT OF ALTITUDE ON THE LUNG FUNCTION OF HIGH ALTITUDE RESIDENTS OF EUROPEAN ANCESTRY.-
Greksa L P, H Spielvogel, M Paz Zamora, E Caceres, L Paredes F American Journal of Physical Anthropology, 1987, en prensa.
 - 23.- EFFECT OF ALTITUDE ON THE STATURE, CHEST DEPTH AND FORCED VITAL CAPACITY OF LOW - TO - HIGH ALTITUDE MIGRANT CHILDREN OF EUROPEAN ANCESTRY.
Greksa L P, Human Biology, 1987, en prensa.
 - 24.- EFFECT OF HIGH ALTITUDE CHRONIC HYPOXIA ON LACTATE AND VENTILATORY THRESHOLDS IN HEALTHY YOUNG BOYS.-
Falgairette G, E Van Praagh, N Fellman, M Bedu, H Spielvogel J. Coudert; En: "Child al Exercise", Suecia, 1987, en prensa.
 - 25.- ANAEROBIC METABOLISM IN BOYS. EFFECTS OF HIGH ALTITUDE HYPOXIA.-
Fellman N, G Falgairette, M Bedu, E Van Praagh, H Spielvogel y J Coudert, En: "Child al Exercise", Suecia, 1987, en prensa, y en: "Science and Sports", 1987, en prensa.