

Función pulmonar en pilotos de combate: ¿Cuáles son los efectos crónicos de la exposición?

Pulmonary function of combat pilots: What are the chronic effects of exposure?

Resumen: Los efectos inherentes al trabajo en altitudes elevadas y sobrecarga de la fuerza de aceleración pueden generar mecanismos de compensación fisiológica y eventuales modificaciones de la función pulmonar a corto, mediano y largo plazo. Ante eso, el objetivo de este artículo fue describir las modificaciones crónicas de la función pulmonar en pilotos de combate de la Fuerza Aérea Brasileña (FAB). La muestra estuvo compuesta por 19 pilotos de combate del grupo expuesto y 20 voluntarios del grupo control. Para las medidas de función pulmonar se observó un aumento de los valores medios de Capacidad Vital Forzada (CVF) y Volumen Espiratorio Forzado en el Primer Segundo (VEF_1), disminución del volumen pulmonar, aumento de la resistencia y del trabajo respiratorio. En el grupo expuesto, en comparación con el grupo control, observamos cambios significativos para el Volumen Residual (RV) por Capacidad Pulmonar Total (TLC) en litros (L) y porcentaje (%), es decir, VR/CPT. Comportamientos similares cuando se evalúan según las horas de vuelo, con aumento proporcional a la elevación del tiempo de exposición. Las modificaciones sutiles, según las observadas en esta investigación, pueden ser reflejo de adaptaciones del sistema respiratorio, trayendo una mirada complementaria para los cambios en condiciones crónicas.

Palabras clave: piloto; militar; altitud elevada; fuerza de aceleración; función pulmonar.

Abstract: The effects related to work at high altitudes and acceleration force overload can generate physiological compensation mechanisms and eventual short-, medium- and long-term changes in lung function. Therefore, the aim of this study was to describe the chronic changes in lung function in combat pilots of the Brazilian Air Force. The sample consisted of 19 combat pilots and 20 controls. For pulmonary function measurements, we observed an increase in the mean values of Forced Vital Capacity (FVC) and Forced Expiratory Volume in the First Second (FEV_1), a decrease in lung volume, an increase in resistance and work of breathing, in the exposed group compared to the control, with significant modifications to Residual Volume (RV) by Total Lung Capacity (TLC) in liters (L) and percentage (%). Similar behavior when evaluated according to flight hours, with an increase proportional to the increase in exposure time. Discrete changes, such as those observed in this research, may reflect adaptations of the respiratory system, bringing a complementary view to changes in chronic conditions.

Keywords: pilots; military; high altitude; acceleration force; lung function.

Maritza Fabiana Sepulveda Soares 

Força Aérea Brasileira. Universidade da Força Aérea Brasileira.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
mfsepulveda@hotmail.com

Pedro Lopes de Melo 

Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
plopes@uerj.br

Paula Morisco de Sá 

Força Aérea Brasileira. Universidade da Força Aérea Brasileira.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
paulamorisco@hotmail.com

Recibido: 30 ago. 2023

Aprobado: 14 mar. 2023

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

ISSN on-line 2316-4891 / ISSN print 2316-4833

<http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RMM/index>



Creative Commons
Attribution Licence

1 INTRODUCCIÓN

En el ejercicio de la actividad aérea, el piloto está expuesto a los efectos adversos del trabajo a gran altitud. Las vibraciones extremas, el disbarismo, la hipoxia, la acción de las cargas de aceleración (Fuerza G) y otros factores estresantes ambientales son frecuentes, especialmente en vuelos por encima de los 15 000 pies (GÜL; SALMANOĞLU, 2012). En ese segmento aéreo, el uso de oxígeno suplementario se hace necesario, además, el ambiente de cabina puede ocurrir con presurización controlada y los efectos relativos al trabajo en altitud pueden parecer más evidentes (ALVES *et al.*, 2008; GÜL; SALMANOĞLU, 2012; PETRASSI *et al.*, 2012).

Se describe en la literatura que la reducción de la presión del aire con el aumento de la altitud conduce a la hipoxia, denominada también hipoxia hipobárica (ALVES *et al.*, 2008). La reducción de la presión parcial de oxígeno alveolar reduce la presión arterial. Así, en una respuesta ventilatoria aguda, el organismo trabaja para recuperar la homeostasis de la concentración de oxígeno, provocando hipocapnia y alcalosis respiratoria (PETRASSI *et al.*, 2012). Esta compensación provoca fatiga de los músculos respiratorios (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019; POLLARD *et al.*, 1997), con posible deterioro psicomotor en hipobáricos agudos, que puede afectar el control postural de la tripulación, aumentando así la oscilación postural proporcional a medida que aumenta la altitud (NORDAHL *et al.*, 1998).

Además, la tolerancia a la fuerza de aceleración en el contexto aeroespacial se considera un factor particular y puede tener efectos fisiológicos relacionados con el sistema respiratorio, con la visión (comúnmente llamado *blackout*, pérdida total de la visión) y con el nivel de conciencia (con la pérdida de la conciencia, conocido como *Induced Loss of Consciousness*, G-LOC) (RUSSOMANO; CASTRO, 2012).

Además de estos, con la sobrecarga de la Fuerza G en acción sobre el tórax, puede haber colapso de las vías aéreas del tercio inferior del pulmón, evolucionando hasta el 50% del pulmón, con la progresión de la fuerza de aceleración, generando consecuentes cambios en la distribución del flujo sanguíneo pulmonar (WEST, 2013). Para un intercambio eficiente de gases, los capilares pulmonares deben ser delgados y estar expuestos directamente al espacio alveolar. Por lo tanto, los cambios en la presión ambiental se transmiten a los capilares alveolares, lo que afecta la circulación pulmonar tanto por deformación pulmonar como por cambios en la distribución de la presión hidrostática en el pulmón (PRISK, 2011).

Junto a ello, los factores biopsicológicos individuales pueden ser determinantes para afrontar el combate aéreo. Las tropas de aviación deben ser capaces de hacer frente a estas condiciones, ya sea en situaciones rutinarias o con una gran carga de trabajo (GINDHART, 1999; GÜL; SALMANOĞLU, 2012; SAUVET *et al.*, 2009). En el sujeto aclimatado puede haber menos efectos deletéreos sobre el cuerpo, lo que permite realizar el trabajo diario incluso a muy altas altitudes (4400 a 5500 metros), con una eficiencia cercana a la del sujeto que trabaja a nivel del mar. Sin embargo, se debe considerar la posibilidad de desarrollar enfermedades o adaptaciones como consecuencia de la exposición continua (ARISTIZABAL *et al.*, 2019; DUISHOBAEV *et al.*, 2018).

Las compensaciones externas se pueden utilizar en la aviación militar de alto rendimiento para reducir los efectos nocivos de la exposición al vuelo. Además del entrenamiento personalizado y la aclimatación, la suplementación de oxígeno puede ocurrir entre 70 y 100% para resolver los efectos de la hipoxia,

que puede presentarse a partir de los 15.000 pies de altitud o 4.572 metros (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019). Las Medidas de asistencia mecánica se utilizan para mantener el retorno venoso adecuado. Los trajes anti-G, la presión positiva de respiración y las maniobras anti-g de esfuerzo, tales como *AGSM Anti G Strain Manouwer* (AGSM), se consideran medios fundamentales para tolerar la aceleración (ÖZTÜRK; İLBASMIŞ; AKIN, 2012).

Con el propósito de estimar índices de evaluación de la función pulmonar, están disponibles comercialmente algunos instrumentos, entre los cuales, espirometría y pletismografía son los más consagrados (MUNGOGE *et al.*, 2016; SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E TISIOLOGIA, 2009; TRINDADE; SOUSA; ALBUQUERQUE, 2015). Además de estos, la Técnica de Oscilaciones Forzadas (FOT), descrita por DuBois *et al.*, en 1956, se destaca por ser complementaria a los instrumentos tradicionales y también tiene la ventaja de ser un método realizado en ventilación espontánea (OOSTVEEN *et al.*, 2003).

Es posible que un análisis más detallado de la función pulmonar en condiciones de exposición, como se describió anteriormente, pueda contribuir a un mejor afrontamiento y mejora del desempeño humano y la relación hombre-máquina en las fuerzas armadas brasileñas, proporcionando parámetros para la evaluación diagnóstica y para el seguimiento longitudinal de estos sujetos.

Así, los objetivos de este artículo fueron: (1) comparar los cambios en la función pulmonar entre voluntarios del grupo control y pilotos de combate de la Fuerza Aérea Brasileña (FAB); (2) analizar los efectos del período de exposición del vuelo sobre la función pulmonar de los pilotos de combate; (3) analizar los efectos del trabajo a gran altura considerando las particularidades de exposición con baja y alta exposición a la carga G.

2 MATERIAL Y MÉTODOS

El protocolo propuesto fue realizado en el Laboratorio de Instrumentación Biomédica de la Universidad del Estado de Río de Janeiro (UERJ), a partir de la aplicación de un cuestionario sociodemográfico y pruebas de función pulmonar realizadas por técnicos debidamente capacitados. La secuencia en la que se realizaron las pruebas fue la siguiente: FOT en la versión multifrecuencia, espirometría y pletismografía de cuerpo completo.

La muestra fue seleccionada por conveniencia. Para el grupo de sujetos expuestos, fueron incluidos pilotos de caza voluntarios del Primer Grupo de Aviación de Caza (1°GavCa) y pilotos de Transporte de Escuadrones de la Base Aérea de Santa Cruz y de la Base Aérea de Galeão. Todos podían volar según los criterios propuestos por la legislación militar vigente – ICA 160-6/2016 (BRASIL, 2016) y estaban identificados para esta investigación según las siglas: GCaza y GTransporte, respectivamente. Para el grupo control, los sujetos seleccionados fueron: no aeronáuticos, militares o no, no sedentarios y similares al grupo expuesto en edad, peso y talla. Para todos los grupos se sometieron a los siguientes criterios de exclusión: infecciones respiratorias en los últimos 30 días, enfermedades torácicas y tabaquismo.

Las mediciones de los flujos y volúmenes pulmonares se realizaron utilizando el pletismógrafo de cuerpo completo BPd (*nSpire Health, Inc., 1830 Lefthand Circle, Longmont, CO 80501*). Los exámenes siguieron las pautas de las directrices para las pruebas de función pulmonar (GRAHAM, 2019; NEDER *et al.*, 1999; PEREIRA; MOREIRA, 2002; SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E TISIOLOGIA, 2009). La FOT fue descrita previamente

en detalle (MELO; WERNECK; GIANNELLA-NETO, 2000) y sigue los estándares internacionales (NAVAJAS e FARRÉ, 2001; OOSTVEEN *et al.*, 2003; SÁ *et al.*, 2013).

Los resultados se presentaron como media y desviación estándar, mientras que se utilizó un *software* comercial para comparar las diferencias entre los grupos (STATISTICA para Windows, versión 5.0). Para el análisis entre dos grupos se utilizó la prueba t independiente para muestras con distribución normal y para muestras no paramétricas, Mann-Whitney. Para las comparaciones entre los tres grupos se utilizó el Análisis de Varianza (Anova), seguido de la prueba de Tukey cuando la distribución presentaba una característica paramétrica; y de Kruskal Wallis Anova seguido de Mann Whitney cuando la característica no era paramétrica. Los resultados con $p < 0,05$ fueron considerados estadísticamente significativos. Finalmente, los análisis de correlación se determinaron mediante los coeficientes de correlación de Pearson y/o Spearman.

3 RESULTADOS

El estudio se realizó con 37 voluntarios, siendo 18 en el Gcontrol y 19 en el GPilotos (6 por el GTransporte; 13 por el GCaza). El análisis a partir de los parámetros biométricos mostró una distribución homogénea (Tabla 1).

Tabla 1 – Datos antropométricos de los voluntarios analizados – GControl x GTransporte X GCaza

Parámetros	Gcontrol N = 18	GTransporte N = 6	GCaza N = 13	P
Edad (años)	33,27 ± 5,63	30,16 ± 2,31	31,46 ± 1,98	ns*
Peso (kg)	80,22 ± 8,62	82,61 ± 6,19	82,6 ± 8,32	ns*
Altura (cm)	175,16 ± 5,28	178,16 ± 7,67	177,25 ± 5,71	ns*
IMC (kg/m ²)	26,06 ± 2,13	26,60 ± 1,95	26,01 ± 2,14	ns*

Nota: Los resultados se presentan como media ± desviación estándar. *Anova/Test de Tukey, **Kruskal Wallis Anova/y Mann Whitney. $P < 0,05$. Ns = no significativo.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

En la evaluación de la función pulmonar basada en la espirometría, en la comparación entre los grupos GControl, GTransporte y GCaza, observamos valores medios ligeramente superiores para los parámetros de Capacidad Vital Forzada (CVF); volumen espiratorio forzado en un segundo (VEF₁); y Flujo Espiratorio Forzado (FEF_{25-75%}) en los grupos de pilotos de caza en comparación con los demás grupos, sin embargo, sin cambios significativos (Tabla 2).

En la Tabla 3, observamos los resultados de la función pulmonar a partir de los parámetros pletismográficos, donde Volumen Residual (VR); Capacidad Pulmonar Total (CPT) y de la VR/CPT presentaron valores medios más bajos en el grupo de pilotos de caza en comparación con los otros grupos. Con modificaciones significativas para VR y VR/CPT en el análisis entre los grupos de control y caza. La resistencia, ya sea medida mediante pletismografía o FOT (Tabla 4), mostró valores medios progresivamente más altos, con una caída proporcional en la conductancia.

Además, también vimos un aumento en la carga de trabajo ventilatorio medida a través de Z4Hz, aunque sin cambios estadísticamente significativos.

Tabla 2 – Medidas espirométricas de los grupos estudiados – GControl x GTransporte x GCaza

Parámetros	Gcontrol	GTransporte	GCaza	p
CVF L	4,97 ± 0,22	5,11 ± 0,34	5,47 ± 0,61	ns*
CVF %	98,39 ± 7,24	96,46 ± 7,35	102,52 ± 7,44	ns*
VEF ₁ L	3,97 ± 0,49	4,36 ± 0,47	4,32 ± 0,55	ns*
VEF ₁ %	95,59 ± 10,70	98,76 ± 8,10	97,91 ± 9,55	ns*
VEF ₁ /CVF L	80,8 ± 5,87	85,48 ± 8,72	79,11 ± 5,39	ns*
VEF ₁ /CVF%	96,95 ± 7,37	102,46 ± 10,70	95,23 ± 6,70	ns*
FEF ₂₅₋₇₅ % L	4,02 ± 1,20	4,69 ± 25,47	4,1 ± 0,97	ns*
FEF ₂₅₋₇₅ %	86,84 ± 23,99	95,07 ± 25,47	85,96 ± 20,25	ns*
FEF ₂₅₋₇₅ /CVF L	0,82 ± 0,24	0,92 ± 0,27	0,75 ± 0,17	ns*
FEF ₂₅₋₇₅ /CVF %	88,27 ± 23,58	99,85 ± 31,30	84,17 ± 20,94	ns*

Leyenda: CVF – Capacidad Vital Forzada; VEF₁ – Volumen Espiratorio Forzado en el Primer Segundo; FEF – Flujo Espiratorio Forzado. Resultados presentados como media ± desviación estándar. *Anova/test de Tukey, **Kruskal Wallis Anova/y Mann Whitney. P < 0,05. Ns = no significativo.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

Tabla 3 – Medidas de pletismografía de los grupos estudiados – GControl x GTransporte x GCaza

Parámetros	GControl (0)	GTransporte (1)	GCaza (2)	p
VR L	2,63 ± 0,98	1,91 ± 1,05	1,79 ± 0,82	ns*
VR %	147,3 ± 53,36	105,46 ± 61,81	100,16 ± 46,101	0-2*
CPT L	7,49 ± 1,29	6,65 ± 0,88	7,23 ± 0,99	ns*
CPT %	110,25 ± 15,79	93,46 ± 13,65	100,71 ± 12,55	ns**
VR/CPT L	33,96 ± 9,28	27,57 ± 11,42	24,2 ± 9,05	0-2*
VR/CPT %	130,2 ± 37,08	108,56 ± 46,75	93,96 ± 35,64	0-2*
Raw L	2,54 ± 1,25	2,61 ± 1,93	3,08 ± 1,27	ns*
Raw %	186,7 ± 94,28	190,4 ± 132,30	229,63 ± 93,70	ns*
Sgaw L	0,15 ± 0,08	0,14 ± 0,05	0,1 ± 0,03	ns**
Sgaw %	68,33 ± 39,30	64,05 ± 26,98	46,89 ± 14,81	ns**

Leyenda: VR – Volumen Residual; CPT – Capacidad Pulmonar Total; Raw, Resistencia del sistema respiratorio; Sgaw, Conductancia del sistema respiratorio. Resultados presentados como media ± desviación estándar. *Anova/test de Tukey. **Kruskal Wallis Anova/y Mann Whitney. P < 0,05. Ns = no significativo.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

Tabla 3 – Medidas de FOT de los grupos estudiados – GControl x GTransporte x GCaza

Parámetros	GControl (0)	GTransporte (1)	GCaza (2)	p
fr	12,80 ± 3,62	10,69 ± 2,91	11,13 ± 3,43	ns**
Xm	0,38 ± 0,33	0,53 ± 0,31	0,54 ± 0,36	ns*
R0	2,86 ± 0,74	2,33 ± 0,75	3,08 ± 0,82	ns*
S	2,83 ± 16,73	3,23 ± 18,41	10,44 ± 16,59	ns**
Rm	2,89 ± 0,77	2,37 ± 0,64	3,18 ± 0,81	ns*
Cdyn	0,02 ± 0,00549	0,025 ± 0,009	0,02 ± 0,005	ns*
Z4Hz	3,57 ± 0,99	2,93 ± 1,10	3,72 ± 0,98	ns*

Leyenda: fr, Frecuencia de Resonancia; Xm, Reactancia Media; R0, Resistencia Total del Sistema Respiratorio; S, Coeficiente de Pendiente de la Curva de Resistencia; Rm, Resistencia media; Cdyn, Cumplimiento Dinámico del Sistema Respiratorio; Z4Hz, Módulo de Impedancia del Sistema Respiratorio. Resultados presentados como media ± desviación estándar. *Anova/test de Tukey, **Kruskal Wallis Anova/y Mann Whitney. P < 0,05. Ns = no significativo.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

Buscando aclarar si las modificaciones encontradas tendrían relación con la exposición a la carga G sola o con el tiempo de exposición a la altitud, analizamos a los sujetos a partir de subgrupos de horas de vuelo. Para tal caracterización, la muestra perdió homogeneidad para los parámetros antropométricos, con una modificación significativa para la edad (Tabla 5). Además, identificamos una correlación inversa significativa en la comparación entre las horas de vuelo y los parámetros espirométricos VEF₁/ CVF y FEF_{25-75%} en sus valores absolutos (Tabla 6). Para las correlaciones entre los parámetros de pletismografía y FOT no hubo modificaciones significativas.

Tabla 5 - Datos antropométricos de caracterización por horas de vuelo

Parámetros	Gcontrol (N = 18) (0)	GPilotos			P
		Hasta 1000 h (N = 4) (1)	1000 a 1500 h (N = 10) (2)	> de 1500 h (N = 5) (3)	
Edad (años)	33,27 ± 5,63	28,75 ± 0,5	30,77 ± 1,56	33 ± 1,78	1-2, 1-3, 2-3**
Peso (kg)	80,22 ± 8,62	80 ± 5,58	85,96 ± 7,10	79,31 ± 8,14	ns*
Altura (cm)	175,16 ± 5,28	178 ± 9,20	178,36 ± 5,46	176 ± 5,93	ns*
IMC (kg/m ²)	26,06 ± 2,13	25,94 ± 2,13	26,98 ± 1,40	25,2 ± 2,62	ns*

Nota: Los resultados se presentan como media ± desviación estándar. *Anova/Test de Tukey.

**Kruskal Wallis Anova/y Mann Whitney. P < 0,05. Ns = no significativo.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

En las tablas 7, 8 y 9, observamos el comportamiento de la función pulmonar con la progresión del tiempo de exposición a la actividad aérea frente a los resultados de los parámetros espirométricos, pletismográficos y FOT, respectivamente.

En general, observamos un ligero aumento de los valores medios de FVC en litros (L) y en porcentaje (%) y VEF_1 (L y %) con la progresión de las horas de vuelo. Aumento de los valores medios de VEF_1/CVF (L y %), $FEF_{25-75\%}$ (L y %), FEF/CVF (L y %) en la comparación entre el GControl y sujetos con hasta 1000 horas de vuelo, con un posterior descenso en sujetos con 1000 a 1500 así como en aquellos con más de 1500 horas de vuelo. Sin embargo, manteniendo valores dentro de los límites de normalidad. Los parámetros pletismográficos VR, CPT y VR/CPT (L y %) mostraron una disminución al comparar GControl con GPilotos, según la progresión de la exposición en horas de vuelo. La resistencia aumentó progresivamente en comparación con GControl, observándose una ligera disminución de la conductancia solo en grupos con más de 1000 horas de vuelo. El aumento del trabajo respiratorio se observó en la comparación entre GControl y Pilotos, con un aumento de los valores medios según la progresión de la exposición en horas de vuelo.

Tabla 6 - Correlación entre horas de vuelo y parámetros espirométricos

Horas de vuelo	CVF L	VEF_1	VEF/CVF	$FEF_{25-75\%}$	FEF/CVF
R	,042	-,318	-,498	-,468	-,476
p	,865*	,184*	,030*	,044*	,039*

Nota: Resultados presentados en correlación. $P < 0,05$ fue considerado significativo.

*Correlación de Pearson, ** correlación de Sperman.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

Tabla 7 - Resultados espirométricos frente a la caracterización por horas de vuelo

Parámetros	G Control	GPilotos			P
	(N = 18) (0)	Hasta 1000 h (N = 4) (1)	1000 a 1500 h (N = 10) (2)	> de 1500 h (N = 5) (3)	
CVF L	4,97 ± 0,22	5,08 ± 0,21	5,46 ± 0,62	5,37 ± 0,62	ns*
CVF %	98,39 ± 7,24	95,95 ± 8,58	102,08 ± 8,25	101,4 ± 5,91	ns*
VEF_1 L	3,97 ± 0,49	4,53 ± 0,47	4,32 ± 0,57	4,21 ± 0,49	ns*
VEF_1 %	95,59 ± 10,70	102,07 ± 7,85	97,47 ± 9,93	96,5 ± 8,28	ns*
VEF_1/CVF L	80,8 ± 5,87	89,20 ± 8,17	79,12 ± 5,22	78,67 ± 5,45	ns*
VEF_1/CVF %	96,95 ± 7,37	106,45 ± 11,17	95,25 ± 6,63	94,9 ± 6,17	ns*
FEF_{25-75} % L	4,02 ± 1,20	5,275 ± 1,34	4,095 ± 0,97	3,89 ± 0,92	ns*
FEF_{25-75} %	86,84 ± 23,99	104,25 ± 27,24	84,78 ± 19,99	84,64 ± 19,21	ns*
FEF_{25-75}/CVF L	0,82 ± 0,24	1,03 ± 0,25	0,75 ± 0,16	0,73 ± 0,18	ns*
FEF_{25-75}/CVF %	88,27 ± 23,58	110,32 ± 34,26	83,36 ± 20,78	83,7 ± 19,29	ns*

Leyenda: CVF, Capacidad Vital Forzada; VEF_1 , Volumen Espiratorio Forzado en el Primer Segundo; FEF, Flujo Espiratorio Forzado. Resultados presentados como media ± desviación estándar. *Anova/test de Tukey, **Kruskal Wallis Anova/y Mann Whitney. $P < 0,05$. Ns = no significativo.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

Tabla 8 - Resultados pletismográficos frente a la caracterización por horas de vuelo

Parámetros	G Control	GPilotos			P
	(N = 18) (0)	Hasta 1000 h (N = 4) (1)	1000 a 1500 h (N = 10) (2)	> de 1500 h (N = 5) (3)	
VR L	2,63 ± 0,98	2,23 ± 1,19	1,76 ± 0,67	1,6 ± 1,07	ns*
VR %	147,39 ± 53,36	124,77 ± 69, 20	97,94 ± 33,82	91,3 ± 65,66	ns*
CPT L	7,49 ± 1,29	6,85 ± 1, 06	7,2 ± 0,98	6,91 ± 1,07	ns*
CPT %	110,25 ± 15,79	96,75 ± 16,31	99,71 ± 10,17	97,2 ± 17,84	ns**
VR/CPT L	33,96 ± 9,28	31,26 ± 12, 54	24,22 ± 7,13	22,57 ± 11,84	0-2, 0-3**
VR/CPT %	130,22 ± 37,08	124,47 ± 50, 38	93,88 ± 28,04	87,24 ± 46,95	0-2, 0-3**
Raw L	2,54 ± 1,25	2,60 ± 2, 32	3,01 ± 1,31	3,06 ± 1,32	ns*
Raw %	186,78 ± 94,28	183,65 ± 151, 24	223,92 ± 93,06	230,76 ± 108,12	ns*
Sgaw L	0,15 ± 0,08	0,15 ± 0,06	0,10 ± 0,03	0,10 ± 0,03	ns**
Sgaw %	68,33 ± 39,30	70,12 ± 31,34	46,86 ± 14,38	48,96 ± 16,08	ns**

Leyenda: VR – Volumen Residual; CPT – Capacidad Pulmonar Total; Raw, Resistencia del sistema respiratorio; Sgaw, Conductancia del sistema respiratorio. Resultados presentados como media ± desviación estándar. *Anova/ test de Tukey. **Kruskal Wallis Anova/y Mann Whitney. P < 0,05. Ns = no significativo.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

Tabla 9 - Resultados de FOT frente a la caracterización por horas de vuelo

Parámetros	G Control (0)	Hasta 1000 h (1)	1000 a 1500 h (2)	> de 1500 h (3)	P
fr	12,80 ± 3, 62	10,32 ± 2,48	11,45 ± 3, 96	10,74 ± 2,70	ns**
Xm	0,38 ± 0,33	0,56 ± 0,24	0,45 ± 0,36	0,65 ± 0,37	ns*
R0	2,86 ± 0,74	2,18 ± 0,92	2,98 ± 0, 76	2,96 ± 0,68	ns*
S	2,83 ± 16,73	0,97 ± 22, 70	11,57 ± 17,57	7,84 ± 13,29	ns**
Rm	2,89 ± 0,77	2,19 ± 0,75	3,09 ± 0,75	3,05 ± 0,61	ns*
Cdyn	0,02 ± 0,00549	0,029 ± 0,009	0,02 ± 0,003	0,01 ± 0007	ns*
Z4Hz	3,57 ± 0,99	2,75 ± 1, 12	3,62 ± 0,87	3,73 ± 1,23	ns*

Leyenda: fr, Frecuencia de Resonancia; Xm, Reactancia Media; R0, Resistencia Total del Sistema Respiratorio; S, Coeficiente de Pendiente de la Curva de Resistencia; Rm, Resistencia media; Cdyn, Cumplimiento Dinámico del Sistema Respiratorio; Z4Hz, Módulo de Impedancia del Sistema Respiratorio. Resultados presentados como media ± desviación estándar. *Anova/test de Tukey, **Kruskal Wallis Anova/y Mann Whitney. P < 0,05. Ns = no significativo.

Fuente: Elaborado por los autores, Soares *et al.* (2022).

4 DISCUSIÓN

Comenzaremos la discusión considerando el primer y segundo objetivo de este artículo, en el que buscamos comparar los cambios en la función pulmonar entre voluntarios de GControl y GPilotos y analizar la exposición a volar en sus diferentes ámbitos, siendo el piloto de transporte, con baja exposición a la carga G, y el piloto de caza con alta exposición.

Inicialmente, creíamos que la exposición del sistema respiratorio a todos los efectos indeseables de la aviación podía desencadenar algún proceso de daño pulmonar. Sin embargo, esto no se identificó en este estudio.

A pesar de los resultados no significativos, es necesario considerar que todos los sujetos analizados son sanos y practicantes de actividad regular, con aptitud física para volar regulada por la ICA 54-1 (BRASIL, 2011) e inherente a la preparación militar. Con estas características, nuestros resultados mostraron parámetros con un límite predicho para un comportamiento de función pulmonar dentro de los límites de normalidad como se describe en la literatura (GRAHAM, 2002; NEDER *et al.*, 1999; SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E TISIOLOGIA, 2009).

En la muestra estudiada no se controló la especificidad del entrenamiento físico. La aptitud para el trabajo se basó en las normas previamente dispuestas para el servicio militar (BRASIL, 2011). Sin embargo, Bateman *et al.* (2006) informan en un artículo de revisión que los efectos del entrenamiento de la fuerza muscular, la aptitud aeróbica y la resistencia a la fatiga sobre la tolerancia a la fuerza G siguen siendo un tema complejo para discutir y sin resultados evidentes. Los análisis previos describen que ni el entrenamiento aeróbico puede considerarse siempre dañino, ni el entrenamiento de fuerza puede considerarse universalmente efectivo para mejorar la tolerancia a la fuerza G (BULBULIAN, 1986). Para el sistema respiratorio, hay una mejora en la capacidad pulmonar y las tasas de consumo de oxígeno a través del aumento de la red vascular pulmonar con la práctica de actividad física regular (MCKENZIE, 2012).

Sutiles modificaciones como las observadas en esta investigación, con un ligero aumento progresivo de la función pulmonar en la comparación entre GControl, GTransporte y GCaza, expresado con la ayuda de parámetros espirométricos, pueden ser reflejo de adaptaciones del sistema respiratorio a la exposición en pequeñas dosis y durante muchos años de trabajo y, por lo, tanto deben ser consideradas. La reducción de VR para las mismas comparaciones puede estar asociada con un aumento de la CVF, optimizando el volumen de aire disponible para los cambios de ventilación. A pesar de esto, los valores promedio de CPT también se redujeron, siendo un contrapunto a esta analogía.

Contrariamente a nuestros resultados, otros autores analizaron la función pulmonar en atletas de diferentes modalidades y observaron volúmenes pulmonares estáticos más grandes y una mayor capacidad de difusión pulmonar en nadadores de élite, en comparación con los atletas corredores. Estos autores atribuyeron sus hallazgos a posibles diferencias de edad entre los controles combinados además de las características genéticas, lo que sugiere más estudios para aclaraciones (CORDAIN; STAGER, 1988).

Las similitudes entre la actividad aérea y la práctica de natación coinciden con la combinación de los gestos laborales, ya que el nadador combina períodos de inmersión en agua, ejercicios y apnea, con evidencia de cambios sutiles en la permeabilidad de los pulmones (DROBNIC *et al.*, 2018). Para estos atletas de natación de alto rendimiento, el entrenamiento físico a gran altura se

utiliza a menudo como una forma de aumentar las adaptaciones fisiológicas y, en consecuencia, mejorar el rendimiento de la actividad (LUNDBY; ROBACH, 2016; RODRIGUEZ *et al.*, 2015). Estas reflexiones, en el límite, arrojan luz sobre la comprensión de que la exposición a grandes alturas puede actuar como un factor modificador del rendimiento pulmonar incluso en presencia de un adecuado acondicionamiento físico, o sea, análisis alineados con los resultados presentados en nuestro estudio, ya que el GControl y los GPilotos se diferencian únicamente en el criterio de exposición al vuelo, siendo común a ambos la condición física.

No hay informes en la literatura sobre las adaptaciones tardías del sistema respiratorio en la exposición a altitudes elevadas y sobrecarga a la fuerza G en pilotos de combate. Ya en atletas de alto rendimiento, las adaptaciones previamente documentadas consideran que la respuesta pulmonar al ejercicio es mucho mayor que el sistema cardiovascular o muscular periférico (WARBURTON, SHEEL; MCKENZIE, 2008). Es posible que en condiciones de aclimatación al trabajo a gran altitud y sobrecarga G el resultado sea similar.

En estudios con atletas de elite, la ventilación por minuto puede aumentar unas 20 veces en comparación con los valores de reposo, lo que demuestra que el pulmón tiene la capacidad de manejar las demandas del trabajo pesado (WARBURTON; SHEEL; MCKENZIE, 2008), aunque sufra las consecuencias relacionadas con tal hecho.

Sin embargo, en el ambiente de trabajo aéreo no coexisten connotaciones de gloria, se ve en la literatura que volar en ambientes de alta carga G impone un fuerte desgaste cardiometabólico al cuerpo (TESCH, HJORT; BALLDIN, 1983).

Bustamante-Sánchez; Delgado-Terán; Clemente-Suárez (2019) realizó un estudio con 23 hombres aviadores en cámara hipobárica, incluyendo mediciones pre y post exposición, quedando la muestra compuesta por: siete tripulantes de aviación de transporte, tres pilotos de transporte, diez pilotos de helicóptero y tres pilotos de caza F-18, todos de la Fuerza Aérea Española. Los autores informan que la exposición a la hipoxia produjo un aumento en la percepción de estrés y esfuerzo, así como una disminución en la función de los músculos respiratorios independientemente del grupo de la tripulación, siendo más afectada negativamente en pilotos de transporte que en pilotos de helicóptero y tripulación aérea de transporte (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019). Una vez que el piloto de caza es llevado a experimentar momentos de bajo oxígeno, como actividad aérea rutinaria, posiblemente, se establecen condiciones de aclimatación, lo que provoca una mejor respuesta fisiológica cuando el piloto se expone nuevamente a él.

En ese mismo estudio de Bustamante-Sánchez; Delgado-Terán; Clemente-Suárez (2018), el VEF_1 y el PFE se mostraron reducidos en la población estudiada, y esta caída fue significativa para los pilotos de helicópteros en el PFE y para los tripulantes de transporte en el PFE y el VEF_1 , lo que sugiere que estos pueden estar asociados con un síntoma de fatiga de los músculos respiratorios después de la exposición hipóxica (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019; POLLARD *et al.*, 1997). Comparando los grupos, los pilotos de transporte mostraron valores de VEF significativamente más bajos, en las pruebas posteriores. Para el grupo de pilotos de caza, la CVF aumentó y el VEF_1 y el PEF disminuyeron, pero sin cambios significativos para el pre y post test. Los autores asocian el resultado al diferente perfil de entrenamiento físico y preparación técnica de estas poblaciones (BUSTAMANTE-SÁNCHEZ; DELGADO-TERÁN; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019).

En línea con estos autores, Beer *et al.* (2017) observaron una reducción significativa en los valores medios de flujos y capacidades pulmonares medidos con la ayuda de la espirometría en diez pilotos de combate de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos en condiciones de confinamiento y altas cargas de suplemento de oxígeno. Las mediciones se realizaron antes del vuelo y después de la prueba con 12 horas de finalización del vuelo.

Hormeño-Holgado; Clemente-Suárez (2019) evaluó la respuesta psicofisiológica en 29 pilotos de caza de la Fuerza Aérea Española en condiciones de ejercicios de combate y defensa aérea con una duración aproximada de 30 minutos cada uno. Las maniobras de combate se realizaron a altitudes entre 8.000 y 18.000 pies (con suplemento de oxígeno) y con fuerza G entre 0,5 y 5,9. Las mediciones de espirometría se realizaron dos horas antes y 30 minutos después de los vuelos. Los resultados presentados por los autores mostraron una ligera reducción de la CVF y un aumento del VEF₁ y del PFE, sin cambios significativos, en la condición de ejercicio de ataque. Un resultado similar se vio para el ejercicio de defensa, pero con una modificación importante para la CVF (HORMEÑO-HOLGADO; CLEMENTE-SUÁREZ, 2019).

La reducción de los flujos y volúmenes pulmonares en situaciones agudas como las narradas por los estudios anteriormente citados, en condiciones de evaluación inmediatas post vuelo, son plausibles a las condiciones de fatiga de los músculos respiratorios. Öztürk; Ilbasmiş; Akin (2012) describen que las evidencias de fatiga de los músculos respiratorios pueden estar asociadas a las maniobras musculares vigorosas realizadas durante todo el vuelo, con la intención de proveer asistencia mecánica para minimizar el efecto de distorsión torácica, así como, mantener el retorno venoso adecuado (ÖZTÜRK; İLBASMIŞ; AKIN, 2012). Sin embargo, en situaciones crónicas, como las evaluadas en esta investigación, la exposición prolongada a dosis bajas parece desencadenar un aumento en el rendimiento respiratorio.

Es un hecho que la fuerza y la resistencia de los músculos respiratorios mejoran con el entrenamiento de forma similar al músculo esquelético periférico, sin embargo las alteraciones celulares en humanos (SHEEL; MCKENZIE, 2008) –o aún el impacto de esa respuesta en la función pulmonar de pilotos de caza– aún no está documentado.

Es admisible que la exposición continua a deformaciones torácicas, alteraciones vasculares pulmonares, cierres de vías aéreas, además de otras repercusiones peculiares al ambiente de la aviación de combate, lleve a la reproducción de adaptaciones de tejido, vía aérea y parénquima pulmonar. Estos hechos se observaron en esta investigación a través del aumento de los valores medios de resistencia del sistema respiratorio medidos con la ayuda de la pletismografía, así como por la FOT, ya sea para la comparación entre GControl y GPilotos, o por el aumento medio progresivo en los grupos Control, Transporte y Caza, conforme proporcional disminución de la conductancia, proporcionando una medida de transferencia de gas pulmonar.

Adicionalmente, la X_m medida por medio de la FOT refleja los cambios de homogeneidad pulmonar a partir de las características elásticas del sistema (MELO; WERNECK; GIANNELLA-NETO, 2000; OOSTVEEN *et al.*, 2003), y se observaron valores medios más positivos en esta investigación tanto en el análisis entre los grupos Control y Piloto, como en la comparación Gcontrol, GTransporte y GCazaa. A pesar del aumento de la resistencia y caída de la conductancia, una posible mejora de la elasticidad pulmonar puede ser asociada a la ganancia muscular a largo plazo, con mejor variación de presión y así mejor aprovechamiento ventilatorio.

Aunque los efectos descritos en estudios previos con pilotos de caza se observaron en condiciones agudas y con un número reducido de sujetos, es posible inferir que la singularidad de cada perfil de aviación puede crear diferentes patrones de respuestas fisiológicas.

Además de esto, nuestro estudio destaca las modificaciones tardías de la exposición a los efectos nocivos de la aviación, lo que brinda una mirada complementaria al comportamiento del sistema respiratorio en condiciones crónicas. Teniendo en cuenta que es parte de la rutina del cazador utilizar maniobras de protección anti-G y contra los efectos de G-LOC, lo largo de la jornada ocupacional de vuelo (ÖZTÜRK; İLBASMIŞ; AKIN, 2012), sería relevante asociar la mejora de la función pulmonar observada por nuestro estudio en GCaza en comparación con los otros grupos a esta especificidad.

Se observa que los individuos sanos que viven en estas regiones de gran altitud tienen una función pulmonar ligeramente mejor que los sujetos que viven en altitudes más bajas o al nivel del mar (ARISTIZABAL *et al.*, 2019; DUISHOBAEV *et al.*, 2018).

Buscando aclarar si los cambios encontrados estarían relacionados con el tiempo de exposición a la altura o sólo con la exposición a la carga G, analizamos a los sujetos a partir de subgrupos de horas de vuelo, que es nuestro tercer objetivo.

El cambio en la homogeneidad de la muestra en función de los parámetros antropométricos, con una diferencia significativa en la edad de los subgrupos analizados, se esperaba, ya que los sujetos de reciente incorporación a la FAB aún no han tenido la oportunidad de experimentar mayores momentos de exposición al vuelo. Sin embargo, el grupo con mayor tiempo de vuelo presenta media de edad equivalente a la del grupo control.

La correlación inversa entre las horas de vuelo y los parámetros VEF_1/CVF y $FEF_{25-75\%}$ puede aclarar la posible aparición de disfunción de las vías respiratorias pequeñas con una mayor exposición al vuelo. Estos resultados pueden reflejar áreas de atrapamiento y limitación del flujo espiratorio (AZEVEDO; SANTOS, 2018), y pueden estar asociados con cambios en la red vascular pulmonar. Resultados alineados con el comportamiento de valores medios más altos de resistencia y disminución de la conductancia del sistema respiratorio, también observados en este documento. Sin embargo, parámetros como VR/CPT (L y %) presentaron valores decrecientes, contradiciendo estos hallazgos (AZEVEDO; SANTOS, 2018). De esta forma, es plausible que estemos ante cambios iniciales y que no todos los marcadores de disfunción estén alterados.

Para esta muestra, la exposición al trabajo en altitudes elevadas, con base en la caracterización de las horas de vuelo acumuladas, parece traer más efectos nocivos para el sistema respiratorio en los pilotos de caza analizados. Es independiente de la presencia de sobrecarga G.

La literatura carece de artículos que describan cambios en la función pulmonar en poblaciones similares a la analizada en este estudio. Existen reportes previos en poblaciones que residen en ambientes de altura, considerando los efectos temporales o de aclimatación a largo plazo (TALAMINOS-BARROSO *et al.*, 2020). La adaptación cumple con los cambios en los mecanismos de control respiratorio (GARRUTUS; CHIN, 2016), adaptaciones genéticas que se transfieren por generaciones, como el desarrollo de mayores volúmenes pulmonares; cambios en los gradientes arterio-alveolares de oxígeno; y aumento del flujo sanguíneo de la arteria uterina durante el embarazo, lo que sugiere una mejor eficiencia en el transporte y consumo de oxígeno (TALAMINOS-BARROSO *et al.*, 2020). El aumento en el VR también se reporta y justifica por la mejoría en el área alveolar y un aumento moderado en el número de glóbulos

rojos (FRISANCHO, 2013). Sin embargo, en este estudio observamos una reducción de los valores medios de VR con la progresión de la exposición al vuelo.

Los cambios que ocurren en el sistema respiratorio de los sujetos que viven en regiones de gran altitud tienen como objetivo mejorar la eficiencia del consumo y transporte de oxígeno, pero estos parecen seguir diferentes vías de adaptación entre los pueblos (EICHSTAEDT *et al.*, 2014; LORENZO *et al.*, 2014).

Por lo tanto, es posible inferir que hay una suma de acciones que influyen en las adaptaciones del sistema respiratorio de los pilotos de caza frente a las actividades aéreas que ellos ejercen, desde factores particulares, como la exposición a altitudes elevadas, hasta las demandas pertinentes a la sobrecarga de fuerza G.

Ciertamente, se necesitan más estudios para aclarar las modificaciones crónicas de la función pulmonar en la población de pilotos de caza, así como si estas modificaciones permanecen desde el final de la exposición.

5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Durante el período de recolección de datos, los voluntarios que postularon para este estudio fueron reubicados en otras bases de Brasil, en vista de la renovación de la pista de aterrizaje en la Base Aérea de Santa Cruz, en Río de Janeiro, donde se encuentran la mayoría de los pilotos de esta muestra. Posteriormente, en el proceso de retomar el flujo de cobranza, se dio el inicio del *lockdown* por la pandemia del covid-19, manteniéndose así por casi dos años. Estos hechos comprometieron la recopilación de datos con estos individuos, lo que llevó a un número reducido de sujetos por grupo.

Complementariamente, es necesario señalar la complejidad de programación y escala de recolección para ese grupo de profesionales, una vez que ellos pertenecen a un grupo de élite de aviadores entre los demás militares de la FAB y, por lo tanto, tienen una agenda sobrecargada de compromisos y misiones inherentes a esa función.

La posible caracterización de la práctica de actividad física realizada de forma rutinaria por cada sujeto de la muestra podría aportar mayor esclarecimiento sobre los resultados, sin embargo, no fue objeto de estudio de esta investigación.

Estudios futuros deben tener en cuenta esas cuestiones y también la posibilidad de reevaluar esos grupos en situaciones de inicio, medio y final de carrera militar, tal cual, pilotos de caza, con la posibilidad de traer información adicional para el análisis.

6 CONCLUSIÓN

Observamos un ligero aumento en la función pulmonar en los pilotos de transporte y caza en comparación con el grupo de control. Para este análisis no se observaron cambios indicativos de anomalías o trastornos obstructivos y restrictivos.

Con respecto al período de exposición en vuelo, notamos un ligero aumento en la función pulmonar a medida que avanzaba la exposición, con posible daño inicial en las vías respiratorias pequeñas. Sin embargo, manteniendo los parámetros dentro de los límites de normalidad.

La exposición al trabajo en altitudes elevadas a largo plazo parece traer más efectos dañinos al sistema respiratorio que la presencia de sobrecarga G.

Este estudio destaca la necesidad de comprender mejor las modificaciones pulmonares crónicas en pilotos de caza, ya que no existen relatos en la literatura sobre tales aspectos. De hecho, una mejor aclaración de las lagunas en el conocimiento respectivo puede proporcionar estrategias para mejorar el desempeño humano y la relación hombre-máquina.

Como perspectiva de futuro, presentamos la propuesta de investigación sobre la exposición al vuelo, analizando al aviador desde la escuela hasta los niveles más avanzados de formación. Esta estrategia podría proporcionar datos relevantes para la comprensión del comportamiento pulmonar a largo plazo y complementar los resultados descritos en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de los pilotos voluntarios, así como de sus comandantes, quienes no escatimaron esfuerzos para el buen desarrollo de esta investigación.

AUTORÍA Y COLABORACIONES

Todos los autores participaron por igual en la elaboración del artículo.

REFERENCIAS

ALVES, L. F. A. *et al.* Avaliação dos efeitos da altitude sobre a visão. **Revista Brasileira de Oftalmologia**, Rio de Janeiro, v. 67, n. 5, p. 250–254, 2008. Disponível: <https://www.scielo.br/j/rbof/a/HdF64FQdndd3WSBH9SBkmGn/?lang=pt&format=pdf>. Acesso en: 22 mar. 2023.

ARISTIZABAL-DUQUE, R. *et al.* Reference values for spirometric parameters in healthy children living in a Colombian city located at 2640 m altitude. **Pediatric Pulmonology**, Bethesda, v. 54, n. 6, p. 886–893, 2019. Disponível: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30957980/>. Acesso en: 22 mar. 2023.

AZEVEDO, K. R. S.; SANTOS, M. I. V. Medidas dos volumes pulmonares e estratégias de interpretação. **Pulmão RJ**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 33-38, 2018. Disponível: http://www.sopterj.com.br/wp-content/themes/_sopterj_redesign_2017/_revista/2018/n_01/6-medidas-dos-volumes-pulmonares-e-estrategias-de-interpretacao.pdf. Acesso en: 22 mar. 2023.

BATEMAN, A.W.; JACOBS, I.; BUICK, F. Physical conditioning to enhance +Gz force tolerance: issues and current understanding. **Aviat Space Environ Med**, v. 77, n. 6, p. 573-580, Jun 2006. Disponível: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16780233>. Acesso en: 04 abr. 2023.

BEER, J. *et al.* Pulmonary Effects from a Simulated Long-Duration Mission in a Confined Cockpit. **Aerospace Medicine and Human Performance**, Bethesda, v. 88, n. 10, p. 952–957, 2017. Disponível: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28923145/>. Acesso en: 22 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Aeronáutica. **Portaria DEPENS nº 29/DE-6, de 19 de janeiro de 2011**. Aprova a reedição da Instrução do Comando da Aeronáutica “Teste de Avaliação do Condicionamento Físico no Comando da Aeronáutica (ICA 54-1)”. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2011. Disponível: https://www2.fab.mil.br/ccise/images/ICA_54-1_TACF.pdf. Acesso en: 22 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Aeronáutica. **Portaria DIRSA Nº 8/SECSDTEC, de 27 de janeiro de 2016**. Aprova a Reedição da Instrução que trata das Inspeções de Saúde na Aeronáutica. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2016. Disponível: https://www.fab.mil.br/icas/ICA_160-6_REED_NOV_2016.pdf. Acesso en: 22 mar. 2023.

BULBULIAN, R. Physical training and +Gz tolerance reevaluated. **Aviat Space Environ Med**, v. 57, n. 7, p. 709-711, Jul, 1986. Disponível: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3741295>. Acesso en: 04 abr. 2023

BUSTAMANTE-SÁNCHEZ, A.; DELGADO-TERÁN, M.; CLEMENTE-SUÁREZ, V. J. Psychophysiological response of different aircrew in normobaric hypoxia training. **Ergonomics**, London, v. 62, n. 2, p. 277–285, 2019. Disponible: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00140139.2018.1510541>. Acceso en: 22 mar. 2023.

CORDAIN, L.; STAGER, J. Pulmonary structure and function in swimmers. **Sports Med**, 6, n. 5, p. 271-278, 1988. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3064235>. Acceso en: 04 abr. 2023.

DROBNIC, F.; GARCÍA-ALDAY, I.; BANQUELLS, M.; BELLVER, M. Interstitial Pulmonary Edema and Acetazolamide in High-Performance Sport: A Case Report. **Arch. Bronconeumol**, v.54, n.11, p. 584-585, Nov, 2018. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29602623>. Acceso en: 04 abr, 2023.

DUBOIS, A.B.; BRODY, A.W.; LEWIS, D.H., BURGESS Jr, B. F. Oscillation mechanics of lungs and chest in mam. **J Apply Physiol.**; v. 8, n. 6, p. 587–94, 1956. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13331841/> Acceso en: 04 abr. 2023.

DUISHOBAEV, M. *et al.* FEV1 and FVC changes at high altitude residents in Kyrgyzstan. **European Respiratory Journal**, Sheffield, v. 52, n. 62, p. 1404, 2018. Disponible: <https://www.ers-education.org/lr/show-details/?idP=209579>. Acceso en: 22 mar. 2023.

EICHSTAEDT, C. A. *et al.* The Andean adaptive toolkit to counteract high altitude maladaptation: Genome-wide and phenotypic analysis of the collas. **PloS One**, San Francisco, v. 9, n. 3, p. 1–12, 2014. Disponible: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0093314>. Acceso en: 20 ago. 2022.

FRISANCHO, A. R. Developmental functional adaptation to high altitude: review. **American Journal of Human Biology**, Bethesda, v. 25, n. 2, p. 151-168, 2013. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24065360/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

GRAHAM, B. *et al.* Standardization of Spirometry 2019 Update. An Official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, Bethesda, v. 200, n. 8, p. 70-88, 2015. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31613151/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

GINDHART, R.T. The air force physical fitness program is it adequate? Command and Staff College. Air University, United States Air Force. Alabama, p.14-15, April, 1999.

GÜL, M.; SALMANOĞLU, M. Long-term high +Gz effects on cardiac functions in the pilots. **Anatolian Journal of Cardiology**, Bethesda, v. 12, n. 8, p. 675, 2012. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23018090/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

HORMEÑO-HOLGADO, A. J.; CLEMENTE-SUÁREZ, V. J. Effect of 20ifereente combat jet manoeuvres in the psychophysiological response of professional pilots. **Physiology & Behavior**, Bethesda, v. 208, p. 1-5, 2019. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31128128/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

LORENZO, F. R. *et al.* A genetic mechanism for Tibetan high-altitude adaptation. **Nature Genetics**, Oklahoma, v. 46, n. 9, p. 951-956, 2014. Disponible: <https://www.nature.com/articles/ng.3067>. Acceso en: 22 mar. 2023.

LUNDBY, C.; ROBACH, P. Does ‘altitude training’ increase exercise performance in elite athletes? **Exp Physiol**, v. 101, n. 7, p. 783 - 788, jun, 2016. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27173805>. Acceso en: 04 abr. 2023.

MCKENZIE, D. C. Respiratory physiology: adaptations to high-level exercise. **Br J Sports Med**, v. 46, p. 381–384, 2012. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22267571>. Accesado el: 04 abr. 2023.

MELO, P. L.; WERNECK, M. M.; GIANNELLA-NETO, A. Um novo espectrômetro de impedância para estudos científicos e clínicos do sistema respiratório. **Review of Scientific Instruments**, New York, v. 71, n. 7, p. 2867-2872, 2000. Disponible: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1150705>. Acceso en: 22 mar. 2023.

MUNGOGE, W.; ANJOS, Z.; BARROS, R. Importância dos parâmetros caracterizadores da resistência das vias aéreas na avaliação funcional respiratória. *Revista de Ciências da Saúde da Escola Superior de Saúde da Cruz Vermelha Portuguesa*, v. 8, p.27-36, 2016. Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/305703410/>. Acceso en: 04 abr.2023.

NAVAJAS, D.; FARRÉ, R. Forced oscillation technique: from theory to clinical applications. **Monaldi Archives for Chest Disease**, Bethesda, v. 56, n. 6, p. 555-562, 2001. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11980289/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

NEDER, J. A. *et al.* Reference values for lung function tests. I. Static volumes. **Brazilian Journal Of Medical And Biological Research**, Ribeirão Preto, v. 32, n. 6, p. 719–727, 1999. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/bjmbr/a/dwWd5frtHDq5fkjZQ7BybDv/?format=pdf&lang=em>. Acceso en: 22 mar. 2023.

NORDAHL, S. H. *et al.* Effects of hypobaric hypoxia on postural control. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 69, n. 6, p. 590-595, 1998. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9641406/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

OOSTVEEN, E. *et al.* The forced oscillation technique in clinical practice: methodology, recommendations and future developments. **European Respiratory Journal**, Bethesda, v. 2, n. 6, p. 1026–1041, 2003. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14680096/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

ÖZTÜRK, C.; İLBASMIŞ, M. S.; AKIN, A. Cardiac responses to long duration and high magnitude +Gz exposure in pilots: an observational study. **Anatolian Journal of Cardiology**, Bethesda, v. 12, n. 8, p. 668–674, 2012. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22968302/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

PEREIRA, C. A. C.; MOREIRA, M. A. F. J. Pletismografía – resistência das vias aéreas. **Jornal de Pneumologia**, Brasília, DF, v. 28, n. 3, p. 139–150, 2002. Disponible: https://cdn.publisher.gn1.link/jornaldepneumologia.com.br/pdf/Suple_142_45_66%20Pletismografia.pdf. Acceso en: 22 mar. 2023.

PETRASSI, F. A. *et al.* Hypoxic hypoxia at moderate altitudes: review of the state of the science. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 83, n. 10, p. 975-984, 2012. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23066620/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

POLLARD, A. J. *et al.* Hypoxia, hypocapnia and spirometry at altitude. **Clinical Science**, Bethesda, v. 92, n. 6, p. 593-598, 1997. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9205420/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

PRISK, G. K. Pulmonary circulation in extreme environments. **Comprehensive Physiology**, Bethesda, v. 1 p. 319–338, 2011. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23737175/>. Acceso en: 22 mar. 2023.

RODRÍGUEZ, F.A.; IGLESIAS, X.; FERICHE, B.; CALDERÓN-SOTO, C.; CHAVERRI, D.; WACHSMUTH, N. B.; SCHMIDT, W.; LEVINE, B.D. Altitude Training in Elite Swimmers for Sea Level Performance (Altitude Project). **Med Sci Sports Exerc**, v. 47, p. 1965-1978, 2015. Disponible: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25628173>. Acceso en: 04 abr. 2023.

RUSSOMANO, T.; CASTRO, J. C. **Fisiologia Aeroespacial: conhecimentos Essenciais para voar com segurança**. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2012.

SÁ, P. M. *et al.* Oscillation mechanisc of the respiratory system in never-smoking patients with silicosis: pathophysiological study and evaluation of diagnostic accuracy. **Clinical Science**, São Paulo, v. 68, n. 5, p. 644–651, 2013. Disponible: <https://www.scielo.br/j/clin/a/JXMZsRVfCM7MwdcJf8DYZ7f/?format=pdf&lang=en>. Acceso en: 22 mar. 2023.

SAUVET, F. *et al.* Heart rate variability in novice pilots during and after a multi-leg cross-country flight. **Aviat Space and Environmental Medicine**, Bethesda, v. 80, n. 10, p. 862-869, 2009. Disponível: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19817238/>. Acesso en: 22 mar. 2023.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E TISIOLOGIA. Diretrizes para Testes de Função Pulmonar. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, Brasília, DF, v. 38, n. 2, 2009. Disponível: <https://www.jornaldepneumologia.com.br/details-suppl/45>. Acesso en: 22 mar. 2023.

TALAMINOS-BARROSO, A. *et al.* Effects of genetics and altitude on lung function. **The Clinical Respiratory Journal**, New Jersey, v. 15, n. 3, p. 247-256, 2020. Disponível: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/crj.13300>. Acesso en: 22 mar. 2023.

TESCH, P.A.; HJORT, H.; BALLDIN, U.I. Effects of strength training on G tolerance. **Aviat Space Environ Med**, v. 54, n. 8, p. 691-695, aug, 1983. Disponível: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6626076>. Acesso en: 04 abr. 2023.

TRINDADE, A. M.; SOUSA, T. L. F.; ALBUQUERQUE, A. L. P. A interpretação da espirometria na prática pneumológica: até onde podemos avançar com o uso dos seus parâmetros? **Pulmão RJ**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 3-7, 2015. Disponível: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-764757>. Acesso en: 22 mar. 2023.

WARBURTON, D. E. R.; SHEEL, W. A.; MCKENZIE, D. C. Cardiorespiratory adaptations to training. In: SCHWELLNUS, M. P. (ed.). **Olympic Textbook of Medicine in Sport**. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2008.

WEITZ, C.A.; GARRUTO, R. M.; CHIN, C-T. Larger FVC and FEV1 among Tibetans compared to Han born and raised at high altitude. **American Journal of Physical Anthropology**, Bethesda, v 159, n. 2, p. 255-255, 2016. Disponível: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26407532/>. Acesso en: 22 mar. 2023.

WEST, J. B. A strategy for in-flight measurements of physiology of pilots of high-performance fighter aircraft. **Journal of Applied Physiology**, Bethesda, v. 115, p. 145–149, 2013. Disponível: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23599400/>. Acesso en: 22 mar. 2023.