

FISIOLOGIA DEL VUELO

Jorge A. Mercuri

En este trabajo se estudian las variaciones homeostáticas que produce el vuelo sobre el organismo, en relación con el ambiente, el móvil y el movimiento, las alteraciones que sufre el hombre cuando se sobrepasa esta adaptación y también los recursos tecnológicos que tienden a evitar estas alteraciones.

MODIFICACIONES FISIOPATOLOGICAS

En relación con el medio ambiente	Atmósfera (Física)	<ul style="list-style-type: none">PresiónTemperaturaHumedadVentilación
	Hipobaría	<ul style="list-style-type: none">HipoxiaMal de alturaAeroembolismoDescompresión explosiva
En relación con la máquina		<ul style="list-style-type: none">Falsas sensaciones en vueloVuelo a ciegas y vuelo a instrumentalMicroclima de cabinasRuidosVibraciones
En relación con el movimiento		<ul style="list-style-type: none">Mal de vueloAceleracionesParacaidismo

El hombre nacido y desarrollado sobre la superficie terrestre se encuentra perfectamente adaptado al medio atmosférico que lo rodea, pero sufre rápidas

modificaciones al elevarse en este medio que varía radicalmente en sus condiciones físicas y químicas al ascender en la altura.

Numerosos problemas médico-biológicos deberán resolverse antes de que el hombre pueda seguir viajando en el espacio sin peligros, con protección y seguridad. Las condiciones que crean estos problemas no se encuentran en el espacio fuera del límite de la atmósfera, sino que aparecen a diversas alturas, dentro de la atmósfera, a partir de la superficie terrestre. Presentaremos en este trabajo algunos de dichos problemas fisiológicos solucionados y en vías de limitarlos, dentro de la atmósfera o fuera de ella.

ACELERACIONES:

En la actividad diaria de la vida, el hombre realiza una adaptación continua de sus funciones internas ante las acciones o exigencias del medio externo en que actúa.

Son numerosos los factores de desajustes en el medio aeronáutico, pero el piloto se adapta también a su ambiente, hecho que después le trae dificultades para readaptarse a su ambiente original, el suelo terrestre.

Es indudable que los factores relacionados con el vuelo son cada día potencialmente perjudiciales; uno de ellos son los efectos de las aceleraciones sobre el piloto y el astronauta.

FUERZAS DE ACELERACIONES IMPUESTAS EN EL ASTRONAUTA:

El problema deriva de la aceleración necesaria para lograr la velocidad de liberación, que es aquella que le permite al vehículo vencer la atracción de la tierra. A diferencia de la velocidad, la aceleración ejerce su acción sobre el organismo humano; la aceleración se define como el régimen del cambio de velocidad. Ocurre con los cambios lineales o los cambios de dirección; normalmente, el hombre está sujeto a la influencia de la gravedad; cuando está sentado, la presión que ejerce contra su asiento, depende de la gravedad, y es igual a su peso. La intensidad de esta fuerza es de 1"G" porque es igual a la gravedad; si la fuerza con la que es comprimido contra su asiento aumenta siete veces su peso normal al salir de la Tierra, la fuerza con la cual es comprimido contra su asiento es de 7"G". Para alcanzar la velocidad de liberación, es necesaria una aceleración de hasta 10"G", durante dos minutos seis segundos. El hombre es capaz de tolerar esa aceleración hallada en vuelo, llamada aceleración transversa, en la posición del astronauta, acostado. (Fig. 1). Lo que vamos a ver son sus efectos, que están en relación con los

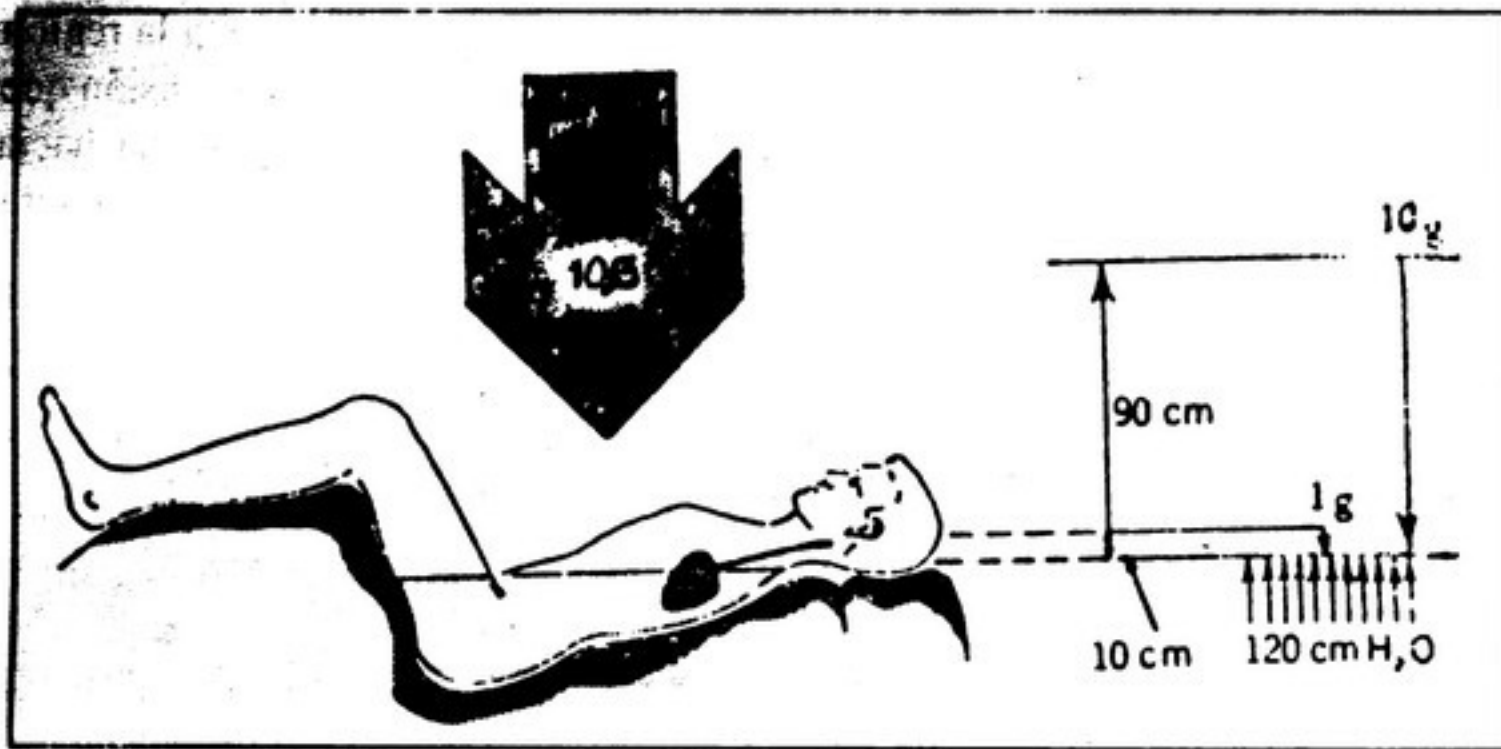


FIGURA N° 1.

desplazamientos que estas fuerzas inerciales imprimen a la sangre. (cuadro N° 1 y 2).

TIPOS BASICOS DE ACELERACIONES			
TIPO	CAMBIO DE VELOCIDAD	CAMBIO DE DIRECCION	EFFECTO SOBRE EL ORGANISMO
Lineal	SI	NO	Columna - Huesos
Radial	NO	SI	A. Cardiovascular
Angular	SI	SI	Oído interno
			Otolitos
			Desorientación Espacial

CUADRO N° 1: Se muestran los tres tipos básicos de aceleraciones y su efecto mayor sobre el organismo.

Nomenclatura	Sentido de Aplicación	Terminología Común
+ Gz	Cabeza - Pie	G. Positiva
- Gz	Pie - Cabeza	G. Negativa
+ Gx	Pecho - Espalda	G. Transversa
- Gx	Espalda - Pecho	
+ Gy	Derecha - Izquierda	
- Gy	Izquierda - Derecha	

CUADRO N° 2. Nomenclatura basada en el sistema de coordenadas Tridimensionales. Se indica el sentido de la fuerza inercial sobre el organismo.

Una de ellas actúa de abajo hacia arriba, desplazando la sangre a la región de la cabeza; conduce a la llamada visión roja y produce una hipertensión que puede llevar a la rotura de vasos (pie-cabeza). Otra actúa de arriba hacia abajo, desplaza la sangre hacia los pies y conduce a la llamada visión negra y a la pérdida de conocimiento (cabeza-pie). (fotos N° 1, 2 y 3).

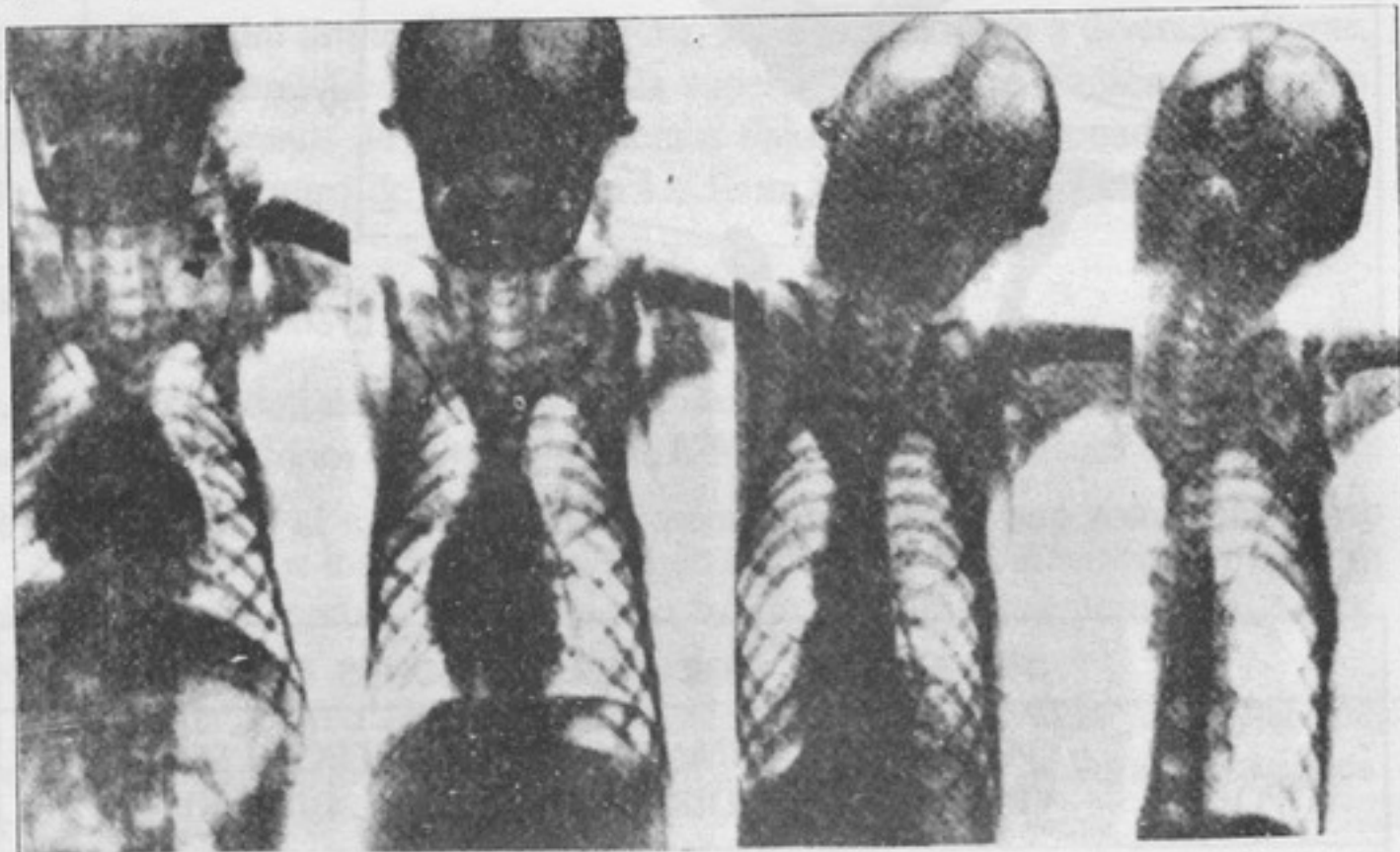


FOTO N° 1: Se muestran los efectos de las aceleraciones cabeza-pie. Obsérvese el desplazamiento de la sangre hacia la región podálica y pérdida de la conciencia.

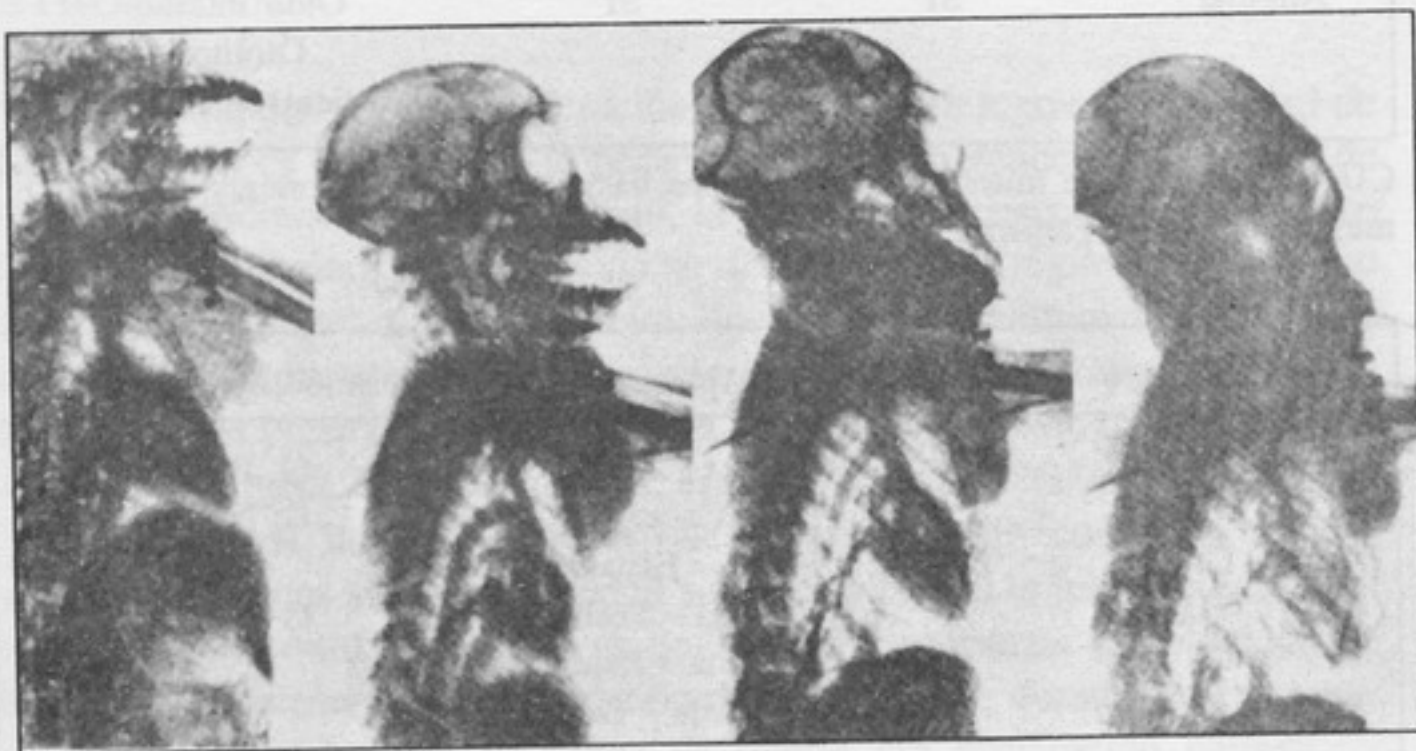


FOTO N° 2: Se muestran los efectos de las aceleraciones pie-cabeza. Obsérvese el desplazamiento de la sangre hacia la región cefálica con posterior pérdida del conocimiento.

La aceleración altera también el equilibrio y causa ilusiones de postura sin movimiento, que a su vez producen desorientación. La posición del tripulante debe ser la de acostado boca arriba, de manera que la aceleración actúe perpendicularmente al eje del cuerpo (pecho-espalda), fig. 1.

FUERZA DE ACELERACION IMPUESTA EN EL PILOTO Y TIPO DE AVION:

La intensidad de las aceleraciones que son capaces de desarrollar aviones como el Mirage 2000, F-14, F-15, F-16, F-18 y Tornado sobrepasan el valor absoluto de "G" en cualquiera de los tres ejes, las cifras conocidas de los aviones actualmente en servicio.

Además puede aplicarse mucho más tiempo y sobre todo establecerse muy bruscamente. (Cuadros N° 1 y 2).

Con un Mirage III, hasta 10.000 metros, sólo pueden ser obtenidos 6,7G durante algunos segundos, mientras que en un Mirage 2000, esta aceleración al igual que las aceleraciones más altas (9.G) pueden realizarse durante una mayor duración a igual altura.

La característica principal de los aviones de la nueva generación en uso es su gran maniobrabilidad con el repetido y brusco pasaje de una intensidad de aceleración a

FOTO N° 3: Efectos de las aceleraciones demostradas experimentalmente en centrífuga. A partir de las 2 "G" obsérvese el aumento progresivo de la ptosis palpebral y distorsión de los músculos faciales. A 4 "G" pérdida parcial de la visión (visión gris) que a cinco "G" se hace total (visión negra). Si esta aceleración se mantiene o aumenta de 6 a 8 "G" se produce inconciencia.



otra. Esto hace que la derivada de la aceleración o jolt (proporción o módulo de cambio de aceleración o desaceleración) incremente todo su valor. Hasta el presente, su importancia sólo ha estado plenamente influida para el estudio de los efectos fisiopatológicos de las aceleraciones de muy corta duración, en particular en el dominio del asiento eyectable y de los impactos.

EFFECTOS FISIOLÓGICOS DE LAS ACELERACIONES CONOCIDAS

Efectos de la fuerza G con sentido cabeza-pie (+Gz).

Las fuerzas G con sentido cabeza-pie actúan sobre cuatro áreas principales:

- 1º. el cuerpo y organismo como un todo;
- 2º. las vísceras;
- 3º. el aparato cardiovascular;
- 4º. cerebro y ojos.

1º. SOBRE EL CUERPO. Durante la maniobras que producen fuerzas +Gz, el peso del cuerpo aumenta en proporción directa a la magnitud de la fuerza. Por ejemplo, un hombre de 80 Kg de peso pasa a pesar 320 Kg durante una maniobra que induzca +4Gz.

Las actividades normales se ven muy alteradas y el piloto es prácticamente incrustado en su asiento. Sus brazos y sus piernas parecen ser de gran peso y resultan difíciles de mover, como así también se dificultan los movimientos del cuerpo. De hecho, 2 a 3G (ya sean en sentido cabeza-pie, pie-cabeza o transversalmente) constituyen el límite para salir en tirabuzón de la cabina de un avión. Esta es una de las razones por las que se adoptan los asientos eyectables.

2º. SOBRE LAS VISCERAS: Durante las maniobras que inducen +Gz la vísceras son rechazadas hacia abajo. El aumento de peso de las vísceras abdominales hace que éstas tiren del diafragma hacia abajo, aumentando el volumen torácico de reposo y alterando la mecánica respiratoria.

3º. SOBRE EL APARATO CARDIOVASCULAR:

a) **Frecuencia cardíaca:** Uno de los efectos más constantes de la aceleración es el cambio en la frecuencia cardíaca. Durante la aplicación de G con

sentido cabeza-pie, aumenta la frecuencia dando taquicardia sinusal de 125 por minuto promedio. El mecanismo de producción de la taquicardia es la estimulación refleja por vía del sistema simpático (Figura N° 2).

FRECUENCIA CARDIACA

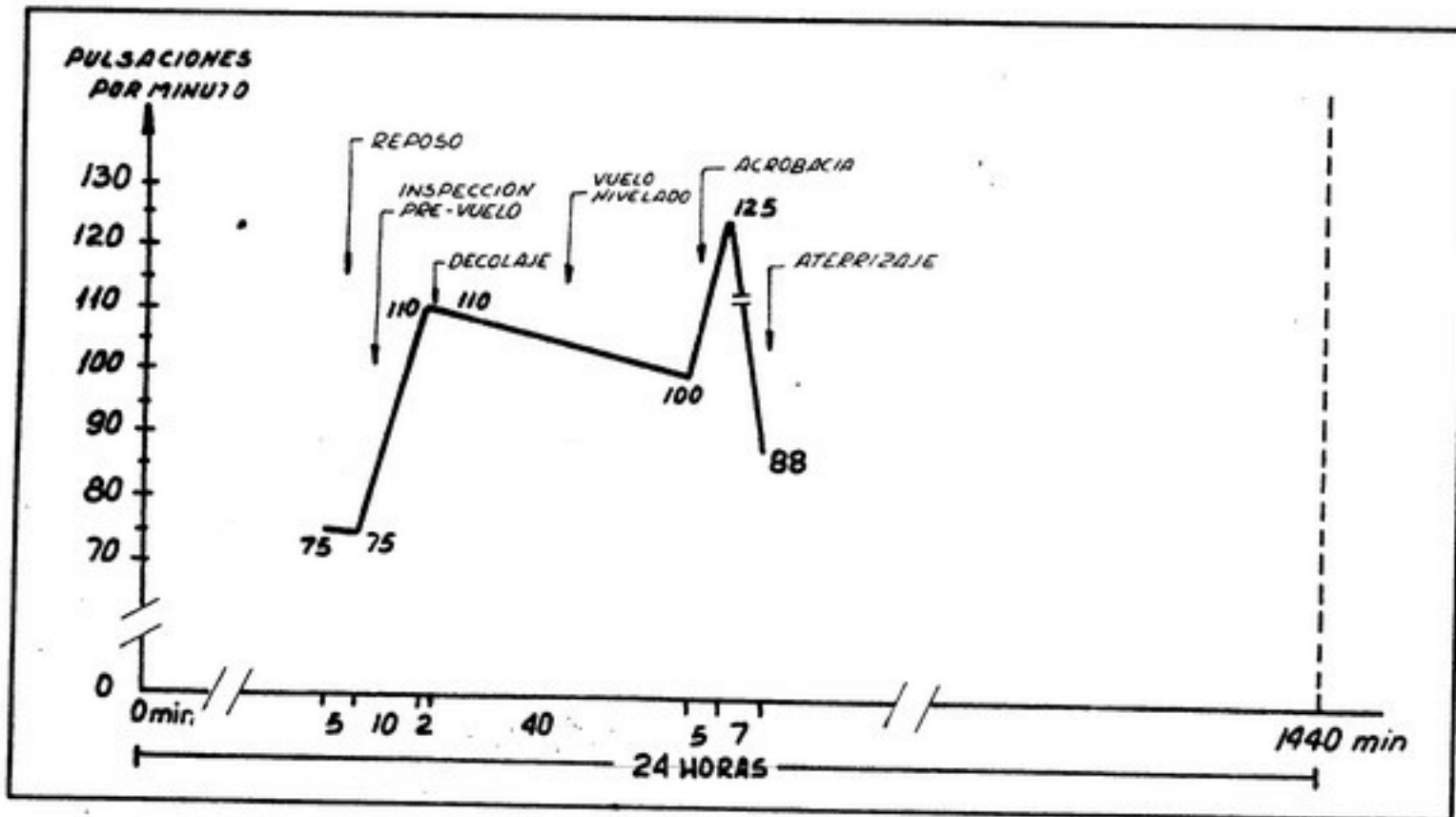


FIGURA N° 2

b) **Presión arterial:** Los efectos de las fuerzas inerciales con sentido cabeza-pie se reflejan principalmente en el desplazamiento de sangre de las porciones superiores a las inferiores del cuerpo. Este pasaje disminuye por arriba y aumenta por debajo del nivel del corazón. La presión en la aorta aumenta, a un promedio de 5 mmHg por cada +Gz. (Fotos N° 1 y 2°).

4° **SOBRE CEREBRO Y OJOS:** El piloto sentado en posición erecta, relajado, nota un oscurecimiento de la visión a los 3 ó 4 G, visión tubular (pérdida de la visión periférica) entre las 3 y 3,5G, visión negra completa entre 4,1 y 5G (estado de alerta) e inconciencia entre 4,5 y 6G. Es de importancia táctica comprender que en las etapas de oscurecimiento, visión tubular y visión negra, la orientación del piloto para tiempo y espacio está conservada y se produce un retorno a la visión normal entre 3 y 5 segundos después de que la fuerza cesa. (Figura N° 3). Fotos N° 1, 2 y 3.

El lapso sin visión, pero con conciencia, puede ser aprovechado por el piloto para corregir las causas de producción de las alteraciones.

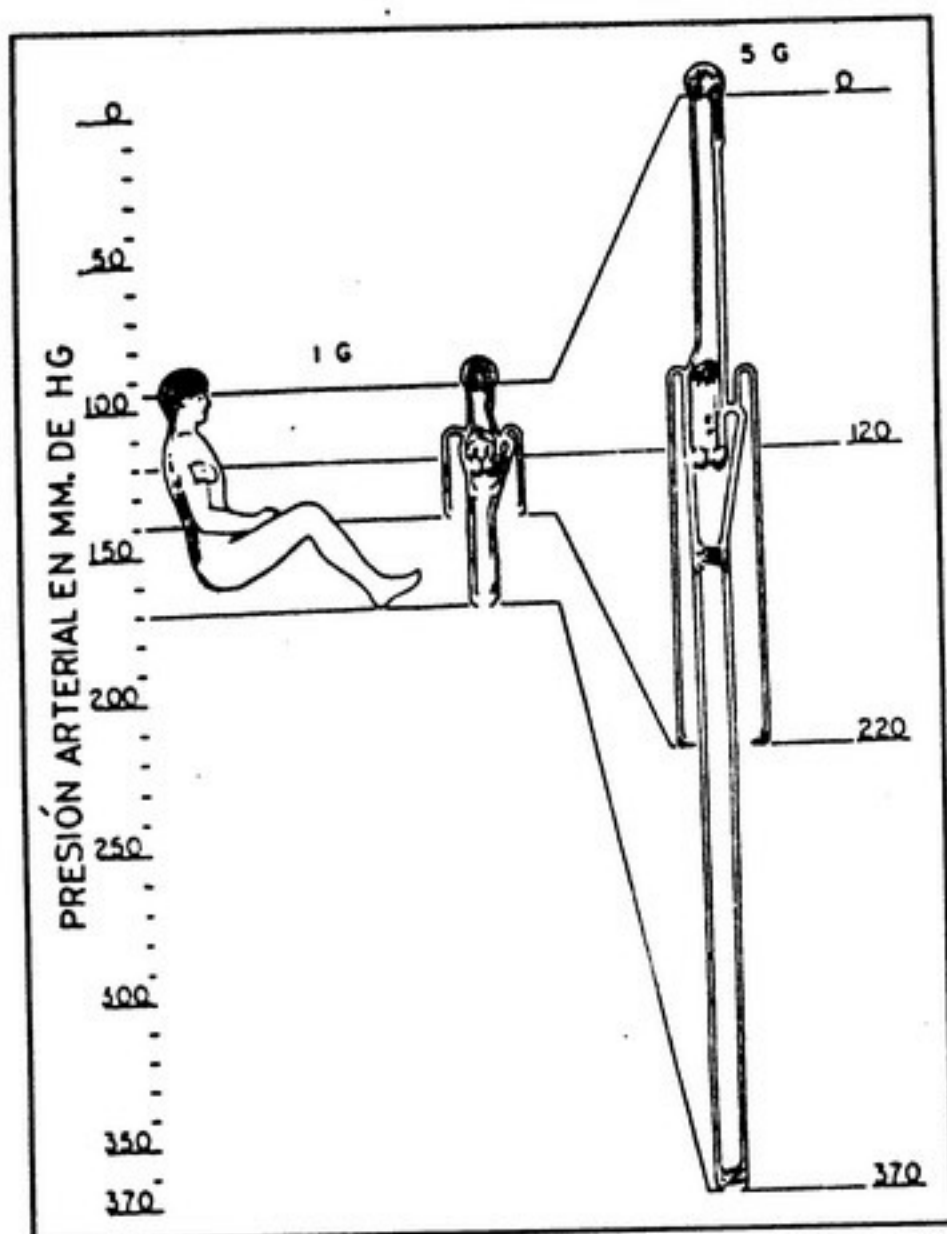


FIGURA Nº 3

EFFECTOS FISIOPATOLOGICOS POCO CONOCIDOS DE LAS FUERZAS INERCIALES

Todavía no existe suficiente cantidad de pilotos que hayan tenido experiencia en una misión en la cual el avión está casi sin interrupción bajo un factor de carga no estabilizado y constante de fuerzas G.

Los efectos directos (mecánicos) de las aceleraciones afectan las funciones motrices, principalmente su coordinación.

Dificultades con el control motriz y con el mantenimiento de una posición determinada del móvil a baja altura han dado origen a difíciles momentos en el conflicto Malvinas.

Nosotros en la década del 70 trabajamos en los laboratorios de investigación del I.N.M.A.E. desarrollando experimentalmente aceleraciones de gran intensidad y descubriendo en animales de experimentación lesiones de características subclínicas que se manifestaban en la anatomía patológica a partir de + 7Gz, tales como las hemorragias cardíacas subendocardíacas, como así también los efectos fisiopatológicos de las aceleraciones de menor intensidad

pero mantenidas durante mayor tiempo, sobre el eje cerebro-corazón-riñón.

Los efectos patológicos sobre el hombre y las aceleraciones mantenidas a gran intensidad son esencialmente trastornos vasculares, o sea petequias (pequeñas hemorragias cutáneas) que aparecen en las zonas donde la ropa anti-G no ejerce presión. Su existencia plantea la posibilidad de hemorragias en órganos internos. Existen también edemas de pies y de tobillos debido a la prolongada elevación de la presión hidrostática en estas extremidades no protegidas por el pantalón anti-G. (Figura Nº 3). Las alteraciones electrocardiográficas son: taquicardia sinusal y extrasístoles aisladas observándose a medida que aumenta el valor de la aceleración hasta 9G alcanzando la frecuencia cardíaca un promedio de 180 por minuto. La importancia de esta taquicardia no debe ser subestimada, porque tiene un valor predictivo en la tolerancia a las aceleraciones y porque existe en el animal de experimentación una correlación entre frecuencia cardíaca y la importancia de las hemorragias subendocárdicas ventriculares.

EQUIPOS Y METODOS DE PROTECCION CONTRA LAS FUERZAS INERCIALES:

La protección contra los efectos de las fuerzas inerciales demanda que las relaciones de la presión hidrostática perturbada vuelvan a ser normales. La presión arterial debe aumentar en las regiones "por encima" del corazón. Al mismo tiempo, los vasos y los espacios tisulares con líquidos que se han distendido deben normalizarse en las zonas "por debajo" del corazón. Las protecciones contra los efectos de las aceleraciones (+Gz) son: (ver cuadros complementarios Nº 3 y Nº 4).

CUADRO Nº 3 FACTORES QUE AUMENTAN LA TOLERANCIA A LAS ACELERACIONES +Gz

1. Puesta en tensión de los músculos.
2. Maniobra de Valsava modificada (maniobra M1 o L1).
3. Masticación o deglución.
4. Individuos bajos, cuello corto, tórax ancho.
5. Excitación, aprensión.
6. Hipertensión arterial.
7. Miedo (aumenta la frecuencia cardíaca y eleva la presión arterial).

CUADRO N° 4
FACTORES QUE DISMINUYEN LA TOLERANCIA A
LAS ACELERACIONES (+Gz)

1. Hemorroides.
2. Venas varicosas.
3. Hipoglucemia.
4. Hipoxia.
5. Cualquier enfermedad astenizante, o convalecencia de la misma.
6. Hernia umbilical o inguinal.
7. Hipotensión arterial crónica.
8. Trastornos oculares (glucoma).

1. Equipos especiales (trajes anti-G)..
2. Aprovechamiento de los factores fisiológicos que aumentan la tolerancia: M1 y L1.
3. Cambio en la posición del cuerpo hacia aquella en que la fuerza sea transversa. (como en el astronauta). Figuras N° 1 y 4.

1º.TRAJE ANTI-G

Los actuales trajes anti-G consisten en 5 bolsas neumáticas interconectadas que ejercen presión sobre el abdomen, muslos y pantorrillas cuando se desarrollan fuerzas + Gz. La presión está regulada por una válvula G y aumenta en relación directa a la + Gz aplicada. De esta forma se ejerce una contrapresión en la parte inferior del cuerpo con los siguientes efectos:

- a) Se reduce el flujo arterial a las extremidades inferiores.
- b) Se reduce el estancamiento de sangre en la parte inferior del cuerpo al reducir el volumen de sangre debajo del corazón y se favorece el retorno venoso.
- c) Se reduce el desplazamiento hacia abajo del diafragma y del corazón.

El traje cumple también un número de funciones aplicadas cuando se lo emplea correctamente:

- 1º) Disminuye materialmente la fatiga que sobreviene después de repetidas maniobras que incluyen aceleraciones altas.
- 2º) Ayuda a mantener al piloto recto en su asiento bajo aceleraciones, permitiendo la visión libre durante giros ajustados.

3º) Previene las reacciones demoñadas y la confusión mental resultantes de la exposición prolongada a fuerzas bajas de aceleración.

4º) Eleva el umbral de la visión gris, negra y la pérdida del conocimiento.

5º) Sirve de útil advertencia de que se estén desarrollando fuerzas inerciales.

6º) Actúa como un mecanismo accesorio de flotación en la picada cuando es inflado por la válvula de seguridad.

7º) Confiere 2 unidades G aproximadamente, (en el piloto y en el astronauta).

2ª MANIOBRA M1 Y L1

En el aprovechamiento de los factores fisiológicos se debe considerar:

Maniobra M1 o L1 aumenta aproximadamente la tolerancia en 2,5 unidades G.

La maniobra M1 (Maniobra de Valsalva modificada) consiste en realizar una inspiración profunda, seguida inmediatamente después de una espiración con fuerza, manteniendo la glotis parcialmente cerrada (grito) durante 3 a 5 segundos, inmediatamente, 5 segundos después, se repetirá la inspiración brusca, para mantener la circulación y oxigenación cerebral. Simultáneamente se pondrán en tensión (contracción isométrica) los músculos de los brazos, piernas y abdomen, para desviar la sangre fundamentalmente hacia el cerebro y los ojos.

La maniobra L1 es igual a la anterior, con la diferencia de que la glotis permanece totalmente cerrada en el curso de las espiraciones forzadas, con lo que se evita el fuerte gemido o grito producido en el curso de la maniobra M1 que suele interferir las comunicaciones.

3ª CAMBIO DE POSICION DEL CUERPO

La protección mediante la postura reside en aumentar la tolerancia a las fuerzas inerciales determinadas por las posiciones relativas del corazón con respecto a los ojos y el mantenimiento de la visión sobre los controles, incluyendo además comodidad y tamaño de la cabina. Estos últimos rasgos son obtenidos más fácilmente por la posición convencional, sentada en forma erecta sobre el asiento. (Figura Nº 4).

La necesidad de colocar el cuerpo en posición horizontal, transversa a la aceleración, a fin de obtener la protección máxima, crea actualmente serios problemas de diseño de la cabina y de uso ya experimental en algunos jets.

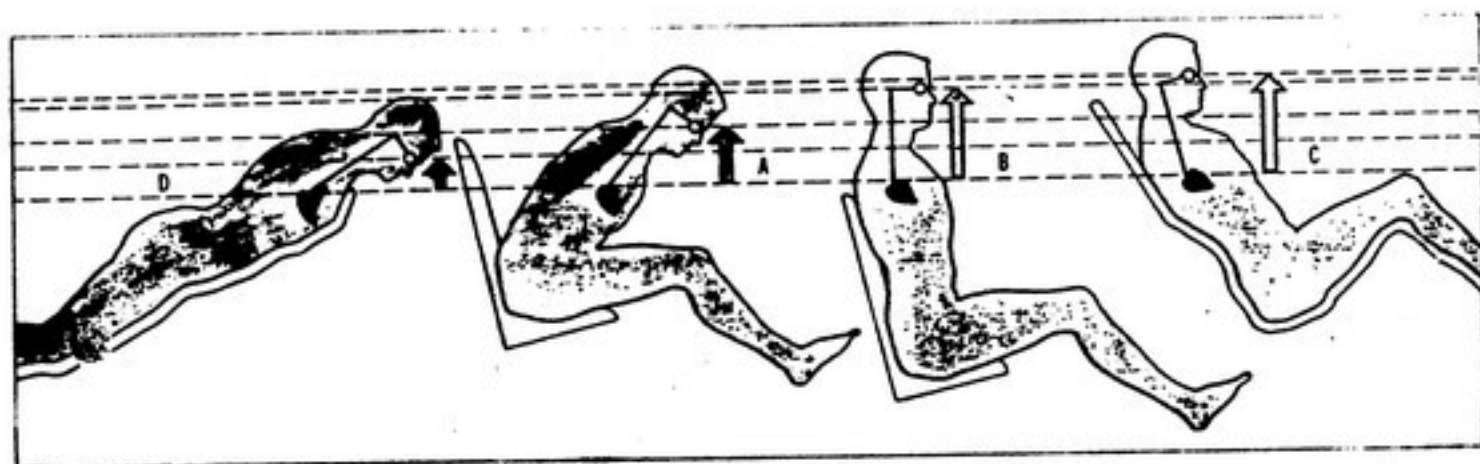


FIGURA Nº 4

Creemos que **la posición en cuclillas** es la técnica más simple por ahora y posee el gran mérito de dejar al piloto en su posición normal de sentado durante la mayor parte del tiempo en que vuela a gran altura cuando no existe variación de velocidad.

Esta técnica consiste en doblarse hacia adelante sobre la pelvis (semi-encorvado) a unos 30° o 40° aproximadamente realizándose conjuntamente con la maniobra M1. (Figura Nº 4).

ENTRENAMIENTO FISICO

1º) Condición física y tolerancia a las aceleraciones:

Debe recordarse que un hombre que está en perfectas condiciones físicas y con alto estado atlético tiene una presión sanguínea baja con bradicardia y que cuando está relajado en su asiento puede tener reflejos protectores muy pobres. En consecuencia, tiene una tolerancia muy baja a las fuerzas inerciales actuantes en la dirección cabeza-pie y presentará visión negra a 2,5 o 3,5 G. Es decir que un buen estado físico, mediante ejercicios aeróbicos, **no determina por sí una tolerancia alta a la aceleración.**

2º) Ejercicios físicos

Las técnicas activas (maniobras M1 o L1) tienen máxima importancia por aumentar la resistencia del piloto a las aceleraciones. La forma más adecuada para favorecer dichas técnicas son los ejercicios donde se desarrollan en forma intermitente contracciones isométricas (varía la tensión de la fibra muscular sin que se produzca acortamiento).

Los ejercicios más perfectos para realizar son mediante pesas (Ejercicios Anaeróbicos) para poder lograr el nivel de tensión muscular absoluto descado con máxima fuerza prolongada. De esta práctica se adquiere resistencia para vencer la fatiga muscular rápida o el agotamiento en vuelo.

HIPOBARIA

Se entiende por hipobaría la disminución de la presión atmosférica total. La acción de la hipobaría sobre el organismo da origen a las "enfermedades por descompresión".

Las enfermedades por descompresión puede producirse por dos fenómenos fundamentales:

1. Variación del volumen de los gases que ocupan las cavidades naturales y órganos huecos.
2. Formación de burbujas gaseosas en los líquidos orgánicos.

DILATACION DE LOS GASES DEL ORGANISMO

De acuerdo a la ley de Boyle, el volumen de los gases que ocupan las cavidades orgánicas varía inversamente con la presión.

Durante el ascenso debido a la disminución de la presión de 760 mm Hg. el volumen será el doble del que existía a 380 mm. Hg. de presión, ya que:

$$1 \times 760 = 2 \times 380$$

OIDO MEDIO - AEROOTITIS

Sabemos que la caja timpánica es una cavidad ósea tapizada por un endotelio, con una pared depresible, la membrana del tímpano, y una comunicación con el aire exterior por medio de la trompa de Eustaquio.

Si la comunicación con el aire exterior fuera permanente, es decir que la trompa de Eustaquio se encontrara permanentemente abierta, la presión de los gases del interior de la caja estaría siempre equilibrada con la presión exterior y la membrana del tímpano no sufriría deformación alguna, pero el segmento interno de la trompa de Eustaquio forma una cavidad virtual y sus paredes están adosadas normalmente, salvo en los casos que por acción de los músculos de la región esta cavidad se hace real por movimientos mandibulares, bostezo o bien por acción de la deglución. (figuras 5, A, B y C).

Por este motivo, durante el ascenso, si el individuo no realiza movimientos mandibulares activos, la trompa de Eustaquio permanece cerrada y la presión de la caja resultará superior a la presión atmosférica descendida. La membrana timpánica se deforma hacia afuera (Figuras 6 y 5).

OIDO MEDIO AERO-OTITIS

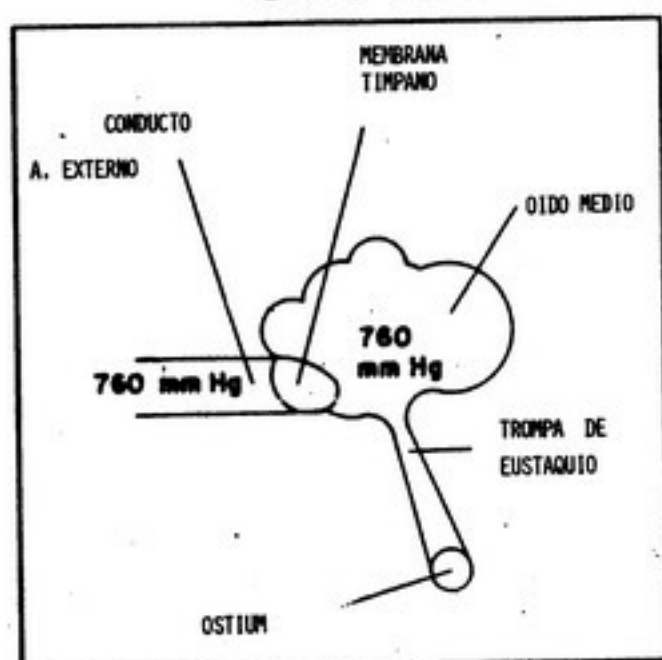


FIGURA Nº 5 "A"

OIDO MEDIO AERO-OTITIS

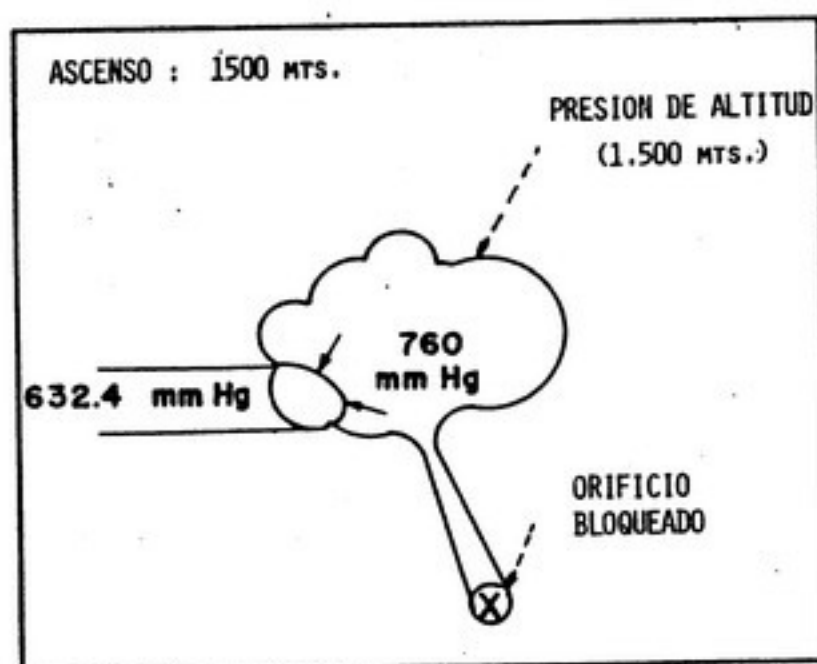


FIGURA Nº 5 "B"

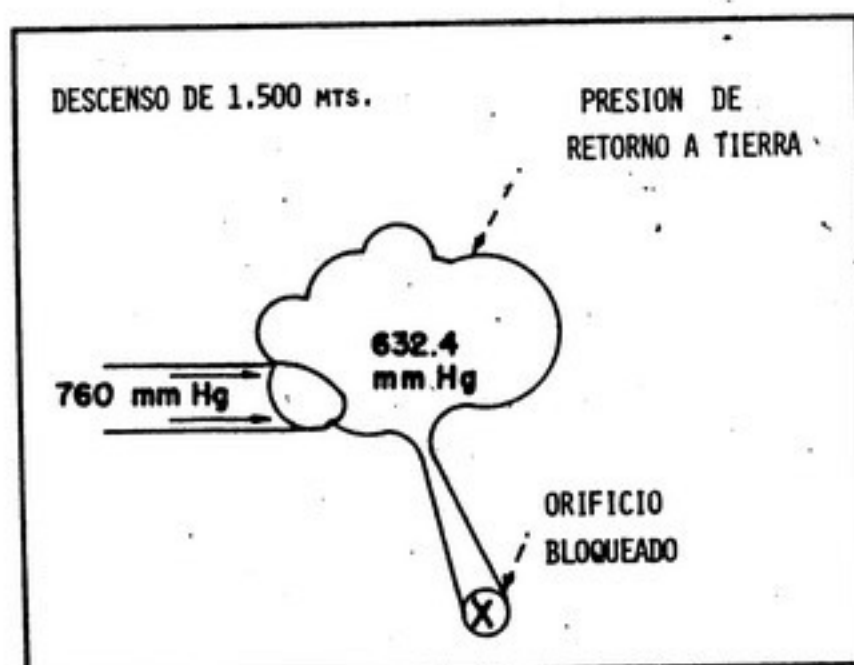


FIGURA Nº 5 "C"

OIDO MEDIO AERO-OTITIS

Comparación de la diferencia de la membrana en el ascenso y descenso.

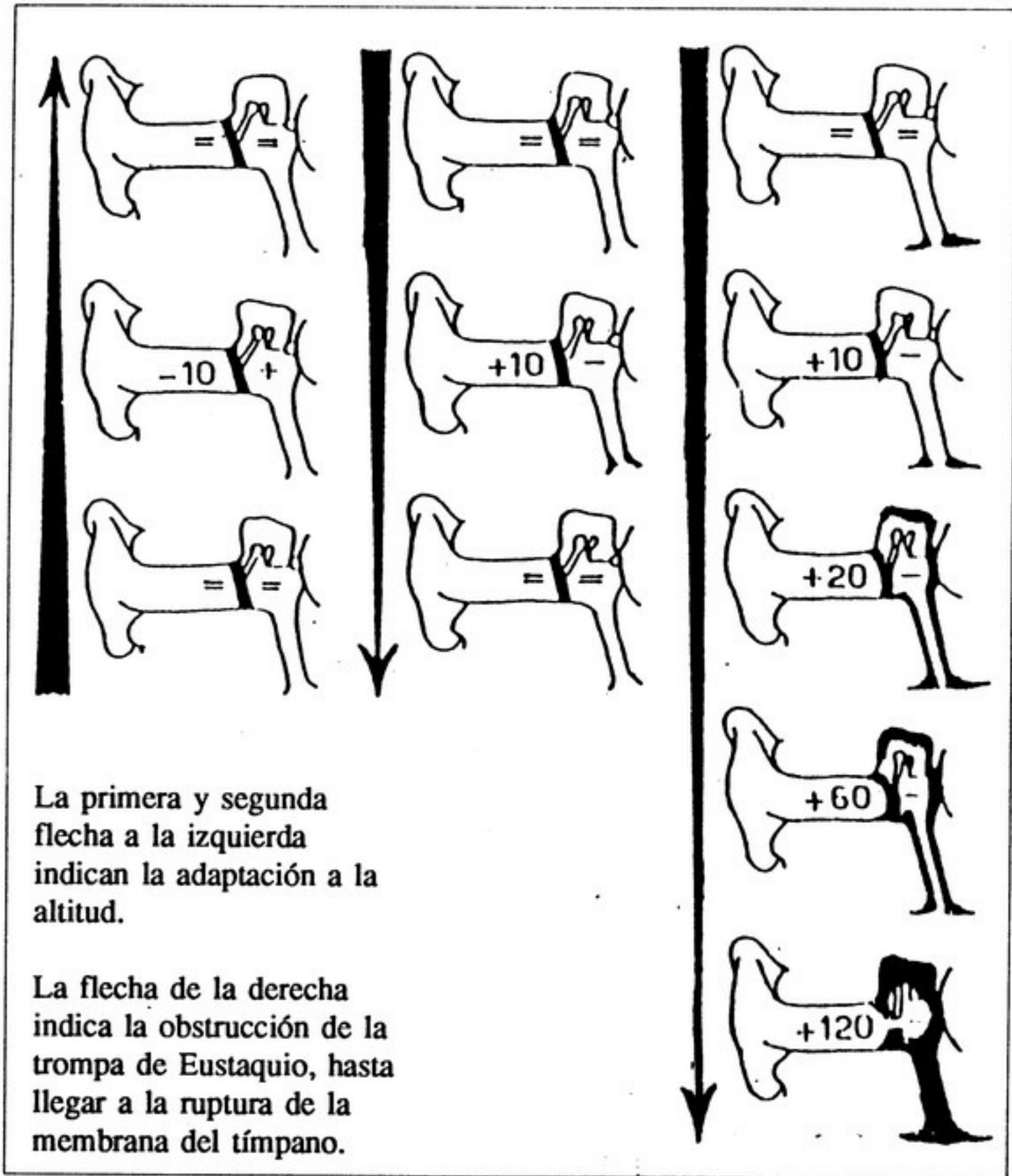


FIGURA Nº 6

Cuando la diferencia de presión entre la caja timpánica y el aire alcanza un valor de 3 a 5 mm. Hg. se aprecia el fenómeno con una sensación equivalente a la de tener un tapón de algodón en el conducto auditivo externo.

Esta sensación aumenta hasta alcanzar una diferencia de presión de 15 mmHg. En este momento la presión de la caja fuerza la trompa de Eustaquio y el aire sale al exterior aun sin realizar maniobra alguna.

La salida del aire nivela parcialmente las presiones y la membrana timpánica vuelve a su posición normal con un ruido de "clic" característico.

Si el ascenso continúa, este mismo proceso se repite cada 11,4 mmHg de diferencia, lo que significa que se necesitan 15mmHg. para forzar la trompa, pero ésta se vuelve a cerrar cuando todavía existe una diferencia de 3,6 mmHg.

Presión inicial - Presión final: Las molestias se producen cuando esta relación pasa de 2,5.

FORMACION DE BURBUJAS GASEOSAS EN LOS LIQUIDOS ORGANICOS

AEROEMBOLISMO:

Si se tiene un líquido, en el seno del cual se halla un gas disuelto, este gas puede abandonar el líquido en dos formas:

1. Imperceptiblemente, pasando al exterior a través de la superficie gas-líquido, como ocurre con un vaso de soda al que se deja durante varias horas destapado y en reposo.
2. De manera más ostensible formando burbujas de gas dentro del líquido, que tienden a subir a la superficie y estallar.

Para que un gas disuelto en un líquido tienda a abandonarlo deben actuar circunstancias que modifiquen el estado de solución. Recordando la ley de Henry, sabemos que el volumen de un gas disuelto en un líquido depende del coeficiente de solubilidad, de la presión del gas y de la temperatura.

La temperatura en el cuerpo humano es constante y el coeficiente de solubilidad es invariable para cada gas, de modo que el factor variable es la presión del gas.

El nitrógeno, gas inerte disuelto en los líquidos orgánicos, siguiendo la ley

de Henry tendrá tendencia a abandonarlos cuando se produzca una disminución de la presión atmosférica total, ya que la formación de burbujas en el seno de los líquidos responde a otros factores que, simplificados al máximo, pueden sintetizarse en la siguiente forma: la formación de burbujas se produce cuando la presión del gas disuelto (Pd) es mayor a la suma de la presión parcial del gas libre (Pg) más la presión hidrostática del líquido (H.).

Hay que recordar que en los vasos existe una presión hidrostática dinámica que es numéricamente igual a la presión sanguínea en dicho lugar; por lo tanto, si consideramos una arteria con una presión de 125 mmHg. y el nitrógeno con una presión parcial a 0 metro equivalente al 78%, ésta será de 590 mmHg, o sea que el gas disuelto con una presión de 590 mmHg no tendrá tendencia a formar burbujas, por cuanto:

$$590 \text{ (Pd)} \quad 590 \text{ (Pg)} \quad + \quad 125 \text{ (H)}$$

Pero si bruscamente colocamos al mismo individuo a una presión total de media atmósfera los valores cambiarán en la siguiente forma:

$$590 \text{ (Pd)} \quad 295 \text{ (Pg)} \quad + \quad 125 \text{ (H)}$$

donde la presión parcial del gas disuelto (Pd) es mayor que la suma de la presión parcial del gas libre (Pg) más la presión hidrostática, dando motivo a la formación de burbujas.

Como puede verse por el ejemplo citado, en la sangre arterial, para que se formen burbujas debe descender considerablemente la presión atmosférica ya que la presión hidrostática es de 125 mmHg (término medio).

Durante el descenso el fenómeno es inverso, el aire exterior aumenta progresivamente su presión y la membrana timpánica se desplaza hacia el interior de la caja, (figuras 5 y 6). En este caso, si el individuo no realiza movimientos activos que abran la trompa, ésta permanece cerrada aun con diferencia de 470 mmHg.

Cuando la diferencia es de 90 mmHg resulta imposible abrir la trompa con movimientos activos y la única solución es volver a ascender. Como se ha visto en situaciones normales, durante el ascenso se establece una corriente de aire desde el oído medio hacia el exterior y, durante el descenso, desde el exterior al oído medio.

SENOS OSEOS PARANASALES - AEROSINUSITIS

Los senos óseos paranasales son cavidades similares a la caja del tímpano

pero sin membrana y con una comunicación al exterior, que en condiciones normales, está siempre abierta.

La inflamación de las fosas nasales puede transformarlas en cavidades cerradas donde la hiperpresión interior durante el ascenso lesione el endotelio.

DIENTES - AERODONTALGIA

Son menos frecuentes los trastornos de la hipobaria sobre los dientes. La hipobaria no actúa sobre el tejido normal. Es necesaria la existencia de un absceso apical, cuya cámara de gas se modifique con la diferencia de presión, que exista gas en una pieza obturada, o bien pérdida del esmalte exponiendo los vasos de la pulpa a la acción de los cambios de presión.

APARATO GASTROINTESTINAL - METEORISMO

El aparato gastrointestinal contiene normalmente gas.

Siguiendo la ley general este gas sufre durante el ascenso una dilatación, o bien un aumento de presión. Lo normal es que se produzca una eliminación por los orificios naturales y en esta forma se restablezca el equilibrio.

Dolor por distensión abdominal no ocurre generalmente por debajo de los 7620 metros con una presión de 281,9 mmHg. Es decir con una relación de:

$$\frac{760}{281,9} = 2,6$$

La distensión abdominal no constituye un problema serio en vuelo, salvo para aquellos sujetos que sufren dolores de abdomen o bien en los casos en los cuales no es posible eliminar el gas ^{(12) (14)}.

Es un hecho demostrado que el dato de valor para apreciar las molestias en vuelo lo establece la relación de dilatación de los gases.

En las venas y en los tejidos el fenómeno tiene más posibilidades, ya que la presión hidrostática es mucho menor e incluso en algunas venas puede llegar a ser negativa.

Debe recordarse sin embargo que no basta que en el resultado final de la D.p. sea positiva para que se produzcan las burbujas, sino que además el descenso de la presión atmosférica se realice en un tiempo tal que no permita a los gases abandonar los líquidos orgánicos pasando lentamente a través de la membrana pulmonar. La foto Nº 4 muestra burbujas en vasos de distintos

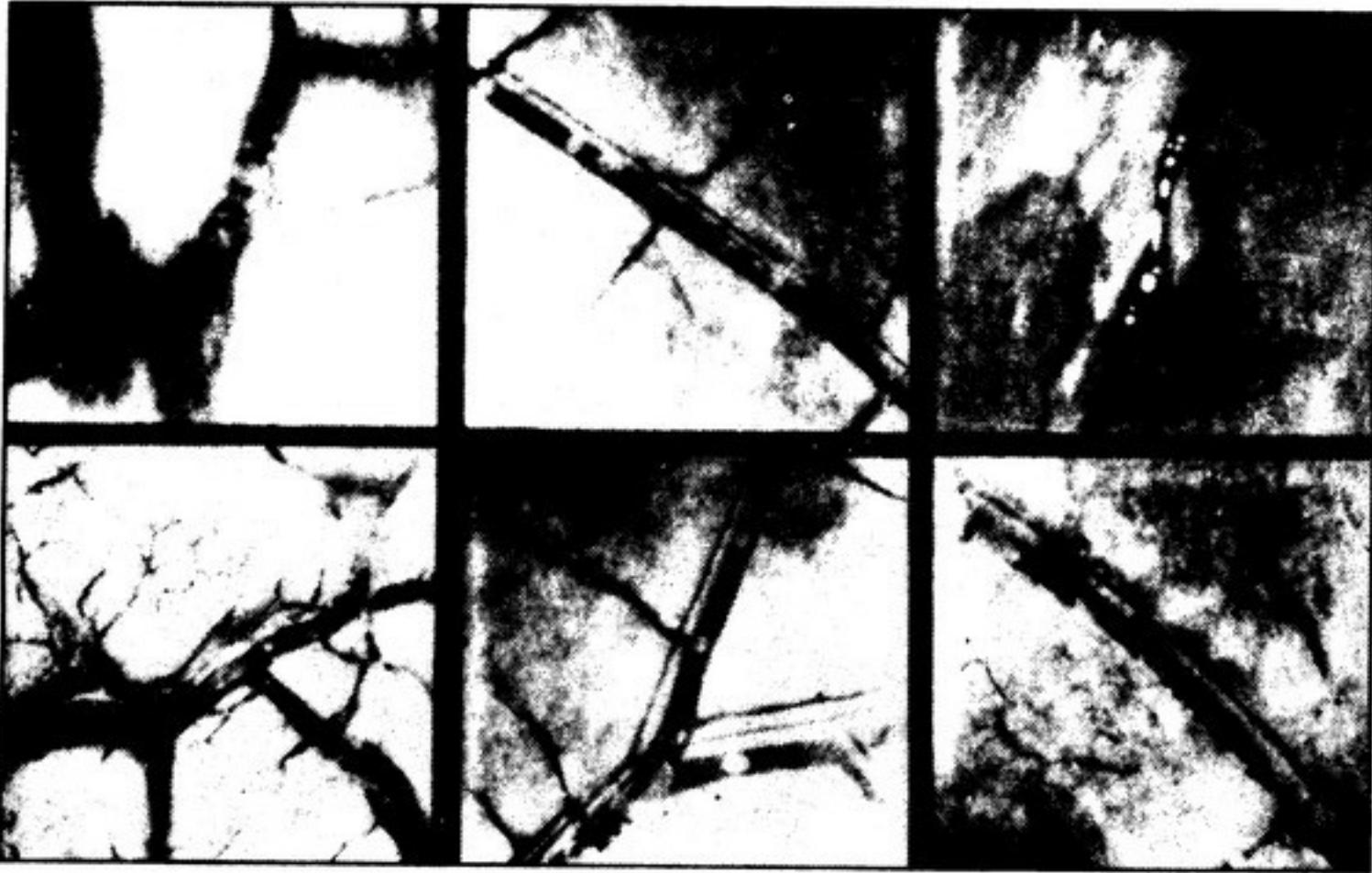


FOTO Nº 4: Burbujas de nitrógeno en las venas de animales de experimentación, producidas por el ascenso brusco a la alta atmósfera o descompresión brusca de la cabina o cápsula sellada del tripulante.

tejidos expuestos a descompresión límite en animales de experimentación. Favorecen la formación de burbujas los siguientes factores:

1. De acuerdo a lo anotado precedentemente, la velocidad de ascenso es de capital importancia. Si el ascenso es más rápido que la eliminación del nitrógeno orgánico, se formarán burbujas.
2. El tiempo de permanencia en la altura.
3. La altura alcanzada. Sobre los 9.000 metros aumenta la frecuencia.
4. Temperatura ambiente. Trabajos realizados en el Laboratorio de Fatiga de la Universidad de Harvard demuestran que la temperatura ideal de la piel para prevenir los síntomas del aeroembolismo es la de 26,5°C.(13)
5. Actividad del cuerpo. La contracción muscular y el movimiento favorecen la formación de burbujas.
6. La edad es factor importante. Los jóvenes sufren menos que las personas de edad.
7. Constitución orgánica. Los individuos delgados tienen menor tendencia que los obesos.

8. Susceptibilidad individual que es necesario probar en las cámaras de baja presión ^{(11) (15)}.

FACTORES IMPORTANTES EN LA DESCOMPRESION EXPLOSIVA

La descompresión rápida ocurre al producirse accidentalmente en la altura una abertura o un orificio de la cabina a presión regulada, causada por alteración en la resistencia del material de la nave o por fallas en el sistema de regulación ambiental. También causada por penetración del fuego de artillería enemigo.

La proporción de la descompresión se determina por los siguientes factores:

1. El volumen de la cabina a presión regulada.
2. El tamaño de la abertura u orificio.
3. Diferencias de presión dentro y fuera de la cabina (presión diferencial).
4. Altura del vuelo en que tiene lugar la descompresión.

Los dos primeros regulan el tiempo de duración de la descompresión y juntamente con los otros dos regulan la expansión de los gases del organismo y condicionan los efectos fisiológicos en el cuerpo humano.

El peligro inmediato de la descompresión es la expansión de los gases, pero con el aumento de la altitud el peligro verdadero es el de la hipoxia subsiguiente a la descompresión. La hipoxia crítica se desarrolla más rápidamente después de una descompresión, ya que la presión del oxígeno en los pulmones disminuye inmediatamente con el descenso de la presión barométrica, sin que importe el factor ventilación. El oxígeno puede pasar de la sangre a los alveolos pulmonares a 12.000 metros, donde el tiempo utilizable del estado conciente o tiempo de conciencia útil es de 15 segundos.

Aun cuando se descienda a una altitud inferior y se tenga un abastecimiento adecuado de oxígeno durante 10 segundos, todavía se tendrá un período de inconciencia de 15 segundos debido a que la circulación de la sangre está desprovista de oxígeno.

El adiestramiento reducirá positivamente los peligros de la descompresión explosiva, como disminuye el factor miedo (foto N° 5).

REGIMEN DE DESCOMPRESION

Como ya hemos dicho, la proporción o régimen de descompresión depen-



FOTO N° 5. El astronauta y el piloto expuestos en cualquier momento a la descompresión brusca de su cápsula. Las burbujas de nitrógeno invadirán su cuerpo. Mediante fórmulas adecuadas se ha calculado el límite humano de seguridad, teniendo en cuenta la expansión relativa de los gases y el tiempo de descomposición. De ahí la práctica en cámara de hipobaría y descompresión. Obsérvese la niebla y las medidas correctoras a implementar para salvarse.

de del volumen en la cabina, tamaño del orificio y presión diferencial. Pero además hay que tener en cuenta la altitud y también que si la cabina es pequeña pierde su presión instantáneamente; por el contrario, si es grande, la descompresión es siempre menos explosiva; es decir, tiene un régimen de descompresión más lento.

LAS CABINAS A PRESION

Un avión capaz de efectuar operaciones en altitudes equivalentes requiere un control confiable del ambiente y del equipo de protección personal. La regulación de la presión de la cabina proporciona un control eficaz de la presión principal del ambiente a altitudes desde 24.000 metros hasta el nivel del mar.

La cabina de un avión se mantiene a una presión mayor que la del ambiente por compresión del aire exterior (Figuras Nº 7, A, B y C).

ESQUEMA DE LA REGULACION DE LA CABINA

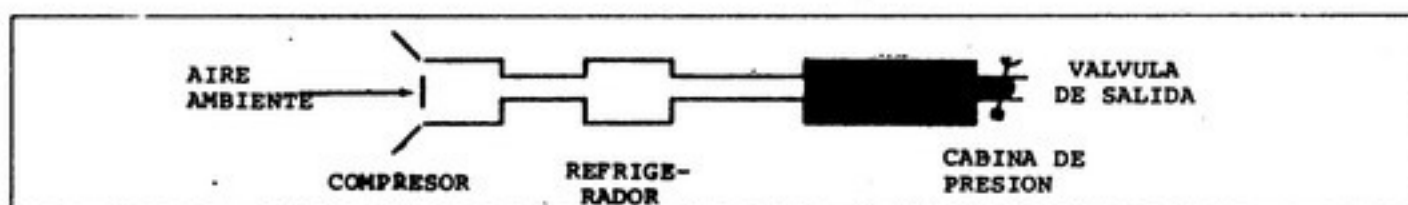


FIGURA Nº 7 "A"

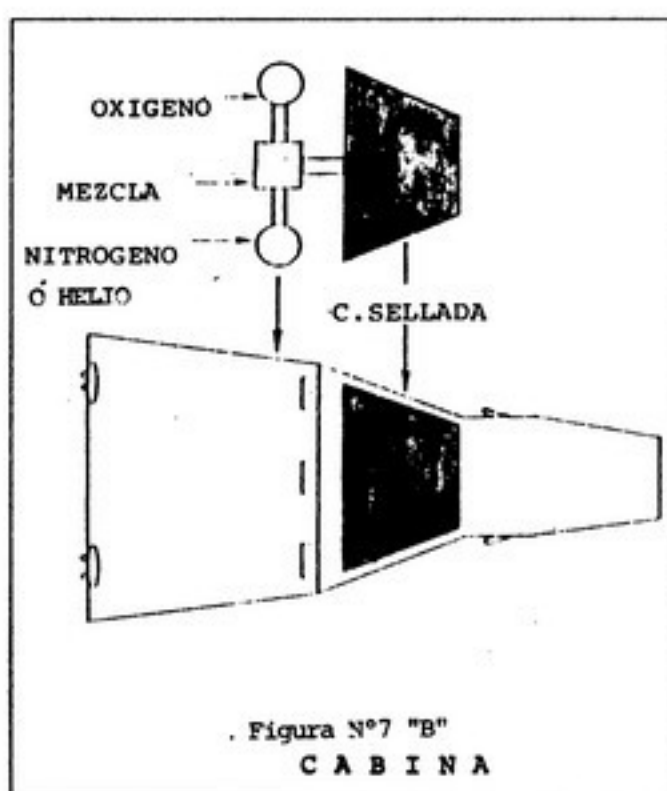
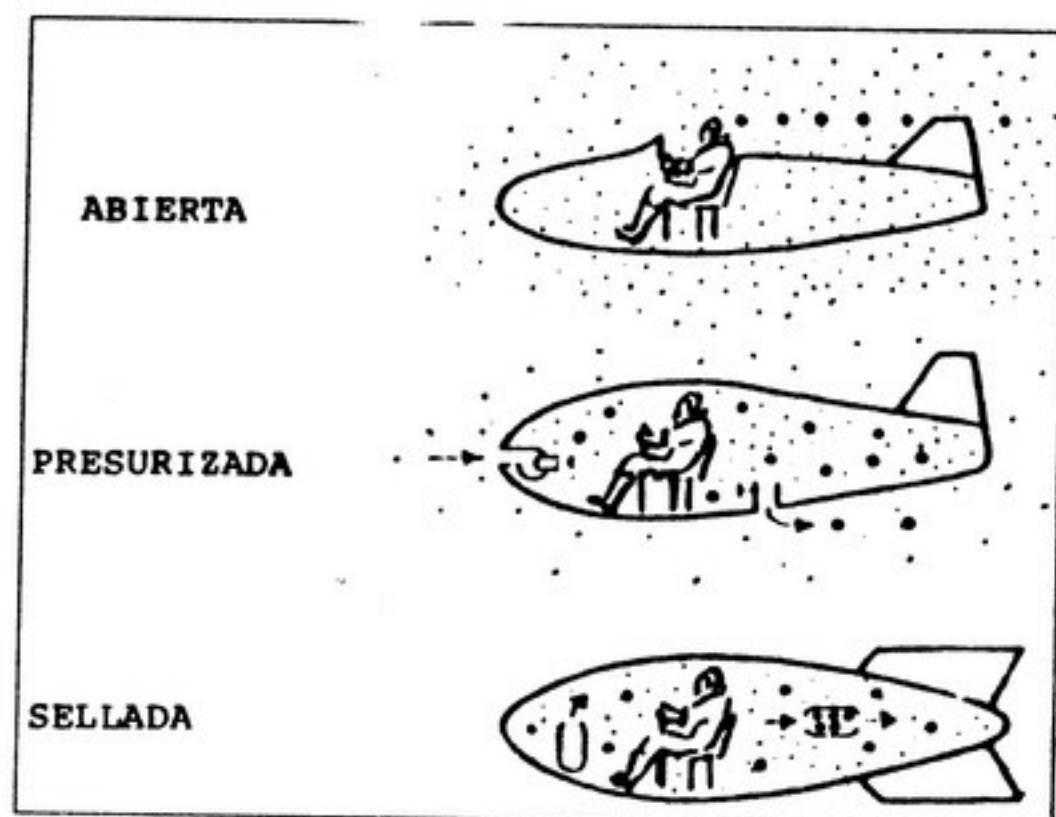


FIGURA Nº 7 "B"



CABINA

FIGURA Nº 7 "C"

La finalidad es proteger a la tripulación del avión y a los pasajeros contra la hipoxia inducida por la altitud y la enfermedad de descompresión.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las ventajas. El mantener la altitud de la cabina más baja que la del ambiente reduce al mínimo la necesidad del equipo de oxígeno y de los trajes a presión.

Evita los disbarismos (en especial los bends y el meteorismo) del gas desprendido; si la altitud es menor de 6000 metros (20.000 pies) reduce al mínimo los síntomas del gas atrapado. Permite el control efectivo de la temperatura de la cabina de la humedad y la ventilación. Mejora la movilidad, la comodidad y el trabajo en cabina. Reduce la fatiga.

Desventajas. Inversamente, el tener un avión una cabina regulada implica modificaciones estructurales, aumenta el peso del avión y la falla del sistema de presión diferencial puede afectar adversamente el funcionamiento de un avión de combate (Ejemplo: caza interceptor). Aumento de los costos de mantenimiento y de operación de mantenimiento, con la presencia de un sistema mecánico adicional.

La posibilidad de una falla de la cabina o del compresor y la exposición consiguiente del personal desprevenido a la altitud del ambiente real exterior es un riesgo que, en la actualidad, es cada día más frecuente en la aviación.

Descompresión rápida. Efecto sobre el organismo: Es la pérdida parcial o total, lenta o rápida de la presurización de una aeronave, con repercusión sobre el organismo de los tripulantes o pasajeros.

En la cabina se producen los siguientes fenómenos físicos, que pueden ser percibidos por el tripulante que se encuentra en su interior:

1. Niebla, por condensación del vapor de agua del ambiente, con una duración variable entre 5 y 15 segundos.
2. Brusca sensación de frío, con una caída real de la temperatura interna de 2º C.
3. Rumor de una intensidad equivalente a 130 decibeles.
4. Corriente aérea en el sentido del ambiente con menor tensión, con velocidad que puede llegar a los 100 kilómetros por hora.

Existe por el factor sorpresa alteración de las reacciones mentales, teniendo en cuenta su capital importancia en el comportamiento del tripulante sometido a esta situación. Aproximadamente en el 30% se presenta una confusión mental muy pasajera, con una duración promedio de 2,5 segundos. El 40% confiesa haber experimentado sensación de temor también fugaz.

Estos datos son de trabajos nuestros en Descompresiones explosivas provocadas en cámaras de hipobaría y Descompresión.

En las operaciones aéreas las descompresiones rápidas se producen cuando existe una relación de presión suficiente, la cual se logra sólo en vuelo de alta cota. En consecuencia, los tripulantes y pasajeros se verán sometidos también a otros factores físicos a saber:

1. Hipoxia aguda.
2. Enfriamiento brusco.
3. Corriente aérea.

En los vuelos de alta cota por encima de 15.000 metros, la anoxia se produce a los 15 segundos indefectiblemente, ya sea que se haya estado respirando previamente aire u oxígeno a presión necesaria para mantener adecuada hematosi, ya que este es el tiempo necesario para consumir el oxígeno circulante en sangre.

Por su parte, quienes hayan estado respirando el aire ambiental de la cabina sufrirán la pérdida del conocimiento en menor tiempo mientras mayor sea la altura del vuelo.

Hasta los 12000 metros se mantiene el tiempo mínimo de 15 segundos; recién a alturas menores aumenta el período de latencia.

Las corrientes aéreas pueden interesar al piloto en los aviones de combate por ruptura o pérdida del techo de la cabina, o a los pasajeros en los aviones de transporte, por la corriente de eliminación.,

Los efectos de la ráfaga de viento que producen la descompresión rápida después de la pérdida de una ventana o de una puerta de un avión a presión van acompañados de un movimiento violento del aire hacia afuera. Los cuerpos que son encontrados en el trayecto de este aire violento pueden ser expulsados del avión. Por lo tanto, las personas que se sientan cerca de las puertas en los aviones pequeños deberán viajar con los cinturones de seguridad puestos y los paracaídas en su lugar durante el vuelo a presión.

PREVENCION

- 1 Presión diferencial de seguridad en la aviación de caza y transporte, (inferior a 2,3 y 6,5 PSI respectivamente).
- 2 Refuerzo de estructura en las aeronaves de transporte, bombarderos y caza.
- 3 Bajo los 12.000 m. O₂ dilución-demanda.
- 4 Hasta 15.000 m. demanda bajo presión.
- 5 Sobre los 15.000 m traje presurizado.

Es indicado el uso de traje a presión a partir de 12.000 m a fin de reducir las necesidades de la respiración bajo presión.

- 6 Suspensión de vuelo a todo piloto y tripulante que haya practicado deportes submarinos como mínimo durante 24 horas.

- 7 Administración de oxígeno puro, 35 minutos antes de volar a alta cota.

La tolerancia depende de:

1. Velocidad de ascenso.
2. Altura alcanzada.
3. Tiempo en la altitud.
4. Actividad.

5. Desnitrogenización previa (tabla práctica: tiempo de inhalación de oxígeno y porcentaje de eliminación de nitrógeno). (Figura N° 8).

TRATAMIENTO

INMEDIATO EN VUELO:

1. 100% O₂ emergencia.
2. Descenso.
3. Chequeo interfónico.

CURVA DE ELIMINACION DE NITROGENO

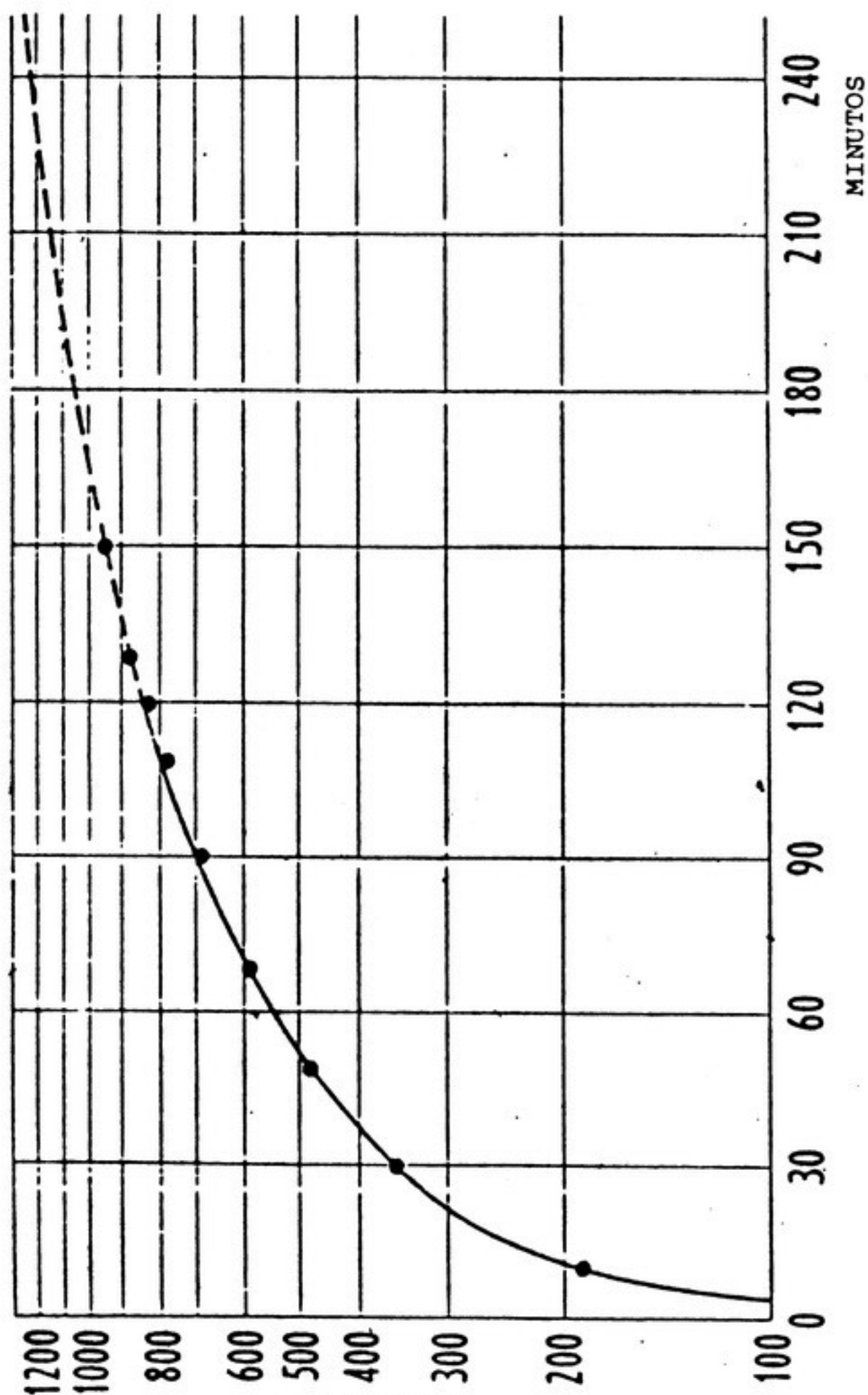


FIGURA Nº 8

EN TIERRA:

- 1 Reposo absoluto durante 24 horas.
- 2 Administración de O₂ puro (control de "BENDS").
- 3 Radiografía pulmonar (teletórax frente).
- 4 15 días suspendido de vuelo, 1 mes en aviones con cabina presurizada, lo mismo como pasajero.
- 5 Control del síndrome de asfixia o "chocke verdadero", tratamiento de urgencia corresponde 4 pasos: 1) posición modificada de TRENDELENBURG; 2) Oxigenoterapia normobárica (ya se estaba realizando); 3) Aporte líquido por boca o intravenoso; 4) quimioterapia; 5) Cámara hiperbárica, tratamiento de recompresión a 28 ATA = 60 FT/30 minutos con 100% O₂, en diez minutos se observa si es favorable o no.

HIPOXIA

Como sabemos, la presión atmosférica a nivel del mar equivale a 760 mm. Hg. (una atmósfera). A medida que ascendemos en ella, se produce una disminución en forma tal que a 5.500 mts. de altura es de media atmósfera, a 8.200 mts. de un tercio y a 12.500 mts. es de un quinto de atmósfera.

¿Cómo es posible que el hombre conserve la vida en el espacio cuando necesita protección ya a altura relativamente pequeña?

Sabemos que los pilotos de buenas condiciones físicas pueden volar en una cabina abierta a una altura no más de 3.500 mts.

La hipoxia es, sin ninguna duda, el más peligroso stress que se produce en la altura desde que el hombre vuela. Hay muy pocas condiciones conocidas en Medicina que produzcan tan profundos cambios en el organismo. Lo extraordinario de la hipoxia es que puede producir la muerte sin crear prácticamente sensaciones pronunciadas; esto es debido a la forma insidiosa en que se instala en el piloto, tripulante o pasaje.

La hipoxia es un estado de deficiencia de oxígeno en la sangre, las células y los tejidos lo suficientemente grande para causar trastornos funcionales. En términos aeroespaciales, la hipoxia se define como una deficiencia de oxígeno que resulta de la reducción en la presión parcial de oxígeno en el aire inspirado a una altitud. La anoxia, que con frecuencia se confunde con hipoxia, se refiere a la ausencia total de oxígeno.

Sintomatología:

Cuando la hipoxia es de comienzo rápido y muy severa la pérdida de la

conciencia puede ocurrir sin ningún síntoma previo (hipoxia fulminante), como ocurre por ejemplo cuando se corta el suministro de oxígeno a un piloto que vuela a gran altura. Si la hipoxia se desarrolla en forma gradual, el intelecto y el sensorio se pierden en forma gradual, sin que la persona se dé cuenta de ello. La sintomatología de la hipoxia severa está dada por: cefalea, depresión, apatía, mareos, excitación, pérdida del autocontrol, sobrevaloración y autocrítica. Se producen trastornos de la conducta. Se altera la memoria y la apreciación del tiempo. En los estados de hipoxia el entendimiento se halla más alterado que las sensaciones, la persona mira sin ver. La sensación dolorosa está atenuada. Aparecen fenómenos vasomotores; sensación de calor en la cara y en el cuerpo, hormigueo. Finalmente se pierden todos los sentidos, primero, la visión, y en último término la audición. Existe gran debilidad muscular y fácil fatiga (Foto N° 6).



FOTO N° 6: Efecto de la hipoxia demostrada en un piloto en cámara hipobárica. Su sintomatología antes de perder la conciencia fue: sensación de calor en la cara, en la nuca, en todo el cuerpo, visión borrosa, hormigueo y visión tubular. Luego tuvo incoordinación y pérdida de la conciencia; conectándole la máscara con oxígeno al 100% en 30" estuvo nuevamente en condición normal.

Factores que alteran la tolerancia:

La aparición y gravedad de los síntomas de hipoxia depende de las siguientes variables:

1. Altura absoluta.
2. La velocidad de ascenso (en lo posible, máxima de 150 mts. por minuto- 2,5 mts. por segundo- a fin de alterar los procesos de adaptación).
3. La duración del vuelo.
4. La frecuencia de las exposiciones (se experimenta fatiga si se efectúan varios ascensos en el mismo día). Se puede lograr la adaptación si se hace un ascenso por día.
5. La temperatura.
6. Actividad física: el ejercicio y movimiento aumentan el consumo de oxígeno.
7. La existencia de otros tipos de hipoxia, como la anemia, alcohol, etc.
8. El temor al dolor.

9. Las variaciones individuales.

10. Las drogas. La aumentan: las simpaticolíticas, las colinérgicas, los estimulantes del SNC. La disminuyen: las adrenérgicas, las anticolinérgicas, las depresoras de la respiración, los estimulantes del metabolismo.

ETAPAS DE LA HIPOXIA

La sintomatología de la hipoxia puede ser dividida en cuatro etapas relacionadas con la altura, la presión parcial de oxígeno y la saturación de la hemoglobina.

Etapas indiferente

Sólo se afecta la visión nocturna. Alcanza hasta los 3.000 mts. Se produce ligera taquicardia y a veces trastornos electrocardiográficos. La persona no nota alteraciones.

Etapas de compensación

Va de los 3.000 a los 4.500 mts. Los mecanismos fisiológicos son suficientes a menos que intervengan factores adversos: ejercicios, fatiga o exposición prolongada. Aumenta la frecuencia y profundidad de la respiración.

Etapas de alteraciones

Se extiende desde los 4.500 a 6.000 mts. En esta etapa, los mecanismos fisiológicos son suficientes para proveer una cantidad adecuada de oxígeno a los tejidos, la deuda de oxígeno se hace patente. Los síntomas subjetivos son: fatiga, laxitud, cefalea, depresión y/o euforia; se incluyen:

- a) Alteraciones en la visión (campo visual periférico primero).
- b) Pérdida de la capacidad de juzgar adecuadamente las situaciones. El pensamiento se hace lento.
- c) Alteraciones de la personalidad.
- d) Incoordinación motriz.
- e) Pérdida del conocimiento.

Etapas críticas

En esta etapa se pierde el conocimiento. Este puede producirse por colapso

circulatorio o falla del sistema nervioso central. El primer caso es más común en la exposición prolongada a la hipoxia. Con cualquiera de los dos tipos puede haber convulsiones eventualmente y falla del centro respiratorio: paro respiratorio y cardíaco.

ETAPAS DE LA HIPOXIA

Etapa	Respirando aire altura en metros	Saturación de O ₂ Arterial %
Indiferente	0 - 3.000	95 a 90
Compensada	3.000 - 4.500	90 a 80
Alteraciones	4.500 - 6.000	80 a 70
Crítica	6.000 - 7.000	70 a 60

FIGURA Nº 9

BIBLIOGRAFIA

- 1 - MERCURI, J.A. "Fisiología aeroespacial", en *Rev. Medicina Integrada*, págs. 15 a 24. 1971.
- 2 - MERCURI, J.A. *Fighter pilots homeostatic and heterostatic variations*, Book 1 A. Scientific Meeting Aerospace Association, USA, 1982.
- 3 - MERCURI, J.A. "Respuesta fisiológica de pilotos de aviones de alta performance", en *Boletín Informativo INMAE*, 1982.
- 4 - MERCURI, J.A. "Entrenamiento a los efectos de las aceleraciones", en *Rev. Argentina Aeroespacio*, mayo/junio, 1988.
- 5 - MERCURI, J.A., MARCHESCHI, R., FERNANDEZ, H. "Response physiologique aux pilotes d'avion Mirage", en *Libro de Acta XXX Congres International de Medicine Aeronautique et spaciiale*, France, pág. 155, 1981
- 6 - MERCURI, J.A. "Eyección en Malvinas", en *XXI Jornadas Científicas del Interior. Soc. Arg. de Sanidad de las F. Armadas*, Córdoba, Septiembre 1988.
- 7 - MERCURI, J.A. "Estudio de las modificaciones Morfológicas y fisiológicas sobre el eje cardiopulmonar, cerebral y renal por efectos de las aceleraciones", en *Boletín Informativo INMAE*, Nº 4, 1975.
- 8 - MERCURI, J.A. "Guía práctica para el Médico Aeronáutico", en *INMAE*, 1968 y 1982., Cap. 5.: Aceleraciones, pág. 47.

- 9 - MERCURI, J.A. **Seguridad y protección en aviones de alta performance.** Presentado en Sociedad Argentina de Medicina Aeroespacial. A.M.A., 3º sesión, agosto, 1987.
- 10 - ARMSTRONG, H.G. **Aviation Medicine.** 1979 Chap. 18 **Airsickness**, págs. 294.
- 11 - MERCURI, J.A. **14 años de Entrenamiento de Cámara Hipobárica.** Presentado en Sociedad Argentina de Medicina Aeroespacial. A.M.A., 5º ed., 1978.
- 12 - MERCURI, J.A. "Guía práctica para el Médico Aeronáutico", en INMAE, Cap. 2. **Hipoxia**. pág. 9., 1982 y 1990.
- 13 - USA. - AIR FORCE PAMPHLET. "Flight surgeon's guide", en AFP 161-18, 1968, Chap. 3. "Effect of decreased barometric pressure-dysbarism", pág. 3.
- 14 - SELLE, S.R., BERRY, C. **Human factors in jet and Space Travel.** (N.Y.) 1982, Chap. "Hypoxia", pág. 62.
- 15 - USA. - AIR FORCE PAMPHLET. "Flight surgeon's guide", en AFP 161-18. 1968, Chap. 3. Effect of decreased barometric pressure-dysbarism, pág. 3.
- 16 - ARMSTRONG, H.G. **Aerospace Medicine.** 2º ed., 1961, Chap. 19. **Decompression sickness**, pág. 304