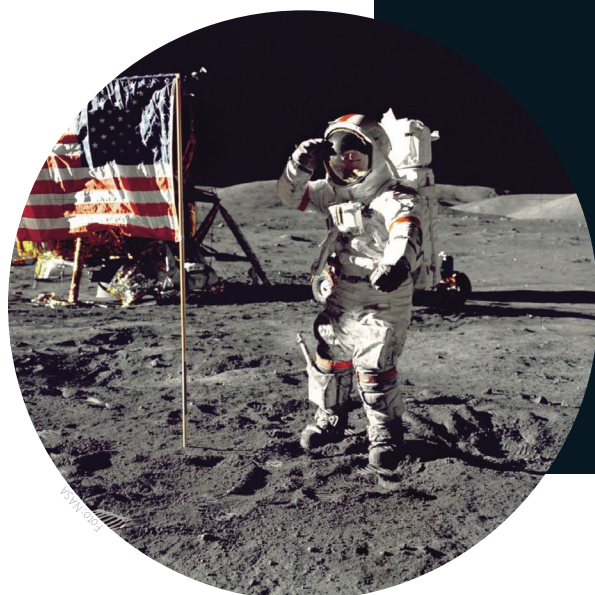




# Fisiología del ambiente extremo: explorando las bases biofísicas de los disbarismos y la hipoxia

Ricardo Jesús Martínez-Tapia<sup>a,b,§</sup>, Francisco Estrada-Rojo<sup>a,Δ</sup>, Francisco Estrada-Bernal<sup>‡</sup>, Alejandro Hernández-Chávez<sup>a,b,d,§,\*</sup>

## Resumen

A lo largo de la historia, los humanos han estado fascinados con la idea de volar, desde los mitos griegos hasta la aviación moderna. Si bien los desarrollos tecnológicos y económicos han hecho del vuelo una práctica cotidiana, este también conlleva importantes desafíos para el cuerpo humano debido a la exposición a ambientes extremos que se alejan de las condiciones ideales para la vida. Dichos entornos pueden generar alteraciones fisiológicas significativas, muchas de las cuales representan riesgos para la salud.

Esta revisión analiza las bases biofísicas subyacentes a los disbarismos y la hipoxia, poniendo énfasis en sus manifestaciones clínicas más comunes y sus implicaciones para la salud humana.

Los disbarismos, definidos como trastornos asociados a los cambios en la presión barométrica, están determinados por el comportamiento de los gases según las leyes de Boyle, Dalton y Henry, así como por los principios de la física atmosférica. Comprender estas leyes y sus efectos sobre el cuerpo humano es fundamental para mitigar riesgos y garantizar la seguridad tanto de los pasajeros como del personal técnico aeronáutico. Finalmente, este conocimiento no solo resulta esencial en el contexto de la aviación, sino que también tiene aplicaciones relevantes en otras áreas, como la exploración espacial y las actividades en ambientes extremos.

**Palabras clave:** Disbarismos; medicina de aviación; leyes de los gases; fisiología del ambiente extremo.

## Physiology of the External Environment Exploring the Physical Basis of Dysbarism and Hypoxia

### Abstract

Throughout history, humans have been fascinated by the idea of flight, from Greek myths to modern aviation. While technological and economic developments have made flying a routine activity, it also poses significant challenges to

<sup>a</sup>Optativa Medicina y Fisiología Aeroespacial. Departamento de Fisiología. Facultad de Medicina. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

<sup>b</sup>Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

<sup>‡</sup>Laboratorio de Neuroendocrinología. Departamento de Fisiología. Facultad de Medicina. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

<sup>Δ</sup>Laboratorio de Ciencias del Aprendizaje. Departamento de Fisiología. Facultad de Medicina. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

ORCID ID:

<sup>§</sup><https://orcid.org/0000-0002-9876-0600>

<sup>Δ</sup><https://orcid.org/0000-0001-8964-6585>

<sup>§</sup><https://orcid.org/0000-0003-3460-7065>

\* Autor para correspondencia: Alejandro Hernández-Chávez.

Correo electrónico: ahchavez@facmed.unam.mx

Recibido: 11-12-2024. Aceptado: 31-05-2025.

the human body due to exposure to extreme environments far removed from the optimal conditions for human life. These environments can induce considerable physiological alterations, many of which present health risks.

This review examines the biophysical foundations underlying decompression disorders (disbarism) and hypoxia, with a focus on their most common clinical manifestations and implications for human health. Decompression disorders, defined as conditions associated with changes in barometric pressure, are governed by the behavior of gases as described by Boyle's, Dalton's, and Henry's laws, as well as by the principles of atmospheric physics. Understanding these laws and their effects on the human body is essential for mitigating risks and ensuring the safety of both passengers and aviation technical personnel. Finally, this knowledge is not only crucial in the context of aviation but also has relevant applications in other fields, such as space exploration and activities conducted in extreme environments.

**Keywords:** *Dysbarisms; aviation medicine; laws of gases; physiology of the extreme environment.*

*“El deseo de volar es una idea que nos transmitieron nuestros antepasados, quienes, en sus penosos viajes por tierras sin caminos en tiempos prehistóricos, miraban con envidia a los pájaros que surcaban libremente el espacio, a toda velocidad, por encima de todos los obstáculos, en la infinita autopista del aire”.*

WILBUR WRIGHT (1867-1912)

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el hombre se ha maravillado con el cielo y ha imaginado las diferentes formas en las que pudiera volar; ejemplos documentados desde la Edad Antigua, en la mitología griega con la historia de Dédalo e Ícaro; en el Renacimiento, con los bocetos del ornitóptero de Leonardo da Vinci; hasta la época contemporánea, con los vehículos aéreos con los que cuenta el ser humano para alcanzar las grandes altitudes e, inclusive, el espacio.

Sin embargo, el costo de hacerlo no solo es técnico, económico o político: también representa un reto del ámbito médico, ya que estos son ambientes alejados de las condiciones ideales donde habitamos como especie, y que se pueden denominar

como “ambientes extremos”, los cuales provocan una gran cantidad de cambios en el cuerpo humano.

El propósito de la presente revisión es ofrecer una perspectiva actualizada sobre las bases físicas y fisiológicas de los disbarismos y la hipoxia en el contexto de los ambientes extremos. Se abordan las manifestaciones más comunes de ambas entidades y se analizan desde la óptica de la fisiología, con el fin de ampliar nuestra comprensión de estos fenómenos y sus implicaciones en la salud humana.

Para resaltar la importancia que tiene entender los efectos de los cambios ambientales —y, por lo tanto, de parámetros físicos que repercuten sobre la fisiología y homeostasis del cuerpo humano— es relevante saber cuántos seres humanos se exponen de forma voluntaria a estos ambientes.

Por ejemplo, recientemente se ha reportado un incremento en la frecuencia de los vuelos comerciales, así como en el volumen de pasajeros, el cual se estima que será de 4.0 billones en 2024<sup>1</sup>. Por otro lado, tenemos que considerar que no solo son los pasajeros quienes se exponen a estos ambientes, sino también el personal que trabaja en estos sectores, como pilotos y sobrecargos —conocidos como personal técnico aeronáutico—, y que, de hecho, lo hacen con mayor frecuencia y de forma más prolongada. En ellos hay que considerar que, al ejercer las funciones de trabajo en el aire, se encuentran en condiciones de alto riesgo laboral, por lo que también son de interés para áreas de estudio que van desde el punto de vista de la atención médica, la prevención, la psicología, la salud pública y hasta la investigación; por lo tanto, esto conlleva una amplia multi y transdisciplinariedad<sup>2</sup>.

Respecto a nuestro país, y de acuerdo con datos de la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC) y de la Secretaría de Turismo del Gobierno de México, durante el año 2023 se transportaron un total de 118 millones 863 mil pasajeros en vuelos comerciales, de estos, el 66.5% en vuelos nacionales<sup>3</sup>; pasajeros que volaron en promedio a 30,000 pies sobre el nivel del mar —aproximadamente a 10 kilómetros de altura— con una velocidad cercana a los 1000 km/h, dentro de una cabina presurizada a una presión equivalente a 2000 metros de altura, y con una

duración variable desde 35 minutos (México-Acapulco) hasta 15 horas 30 minutos (Europa y Asia).

Con el fin de analizar los principales cambios que presenta el cuerpo del ser humano en estos ambientes extremos y su relación con los aspectos físicos, nos enfocaremos en los cambios que suceden particularmente en las grandes altitudes y en la aviación.

En este sentido, y para el estudio de estos factores, podemos dividir un viaje en avión a partir de las diferentes fases de vuelo, que son: rodaje, despegue, ascenso, crucero, descenso, aproximación, aterrizaje y nuevamente rodaje hasta la posición de desembarco en el edificio terminal<sup>4</sup>. Estas fases de vuelo son relevantes porque, en cada una de ellas, se pueden presentar problemas médicos derivados de, entre otras causas, cambios en la presión parcial de oxígeno ( $pO_2$ ) en la atmósfera, cambios de presión barométrica, disminución de la temperatura ambiental, aceleración lineal y vertical, alergia alimentaria o claustrofobia, entre otras.

## BASES FÍSICAS

### Atmósfera y física de los gases

Como todos los fenómenos suceden dentro de la atmósfera, comenzaremos por definirla y comprender cómo se conforma. La atmósfera (del griego *ἀτμός* [*atmós*] = vapor y *σφαῖρα* [*sphaîra*] = esfera)<sup>5</sup>, se define como una mezcla de gases que rodean a un cuerpo celeste; en el caso particular de la Tierra, es esencialmente constante. En cuanto a la fracción molar, está compuesta por un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y  $\approx 1\%$  de otros gases (argón 0.93%, dióxido de carbono [ $CO_2$ ] 0.03%, y neón, helio, kriptón, hidrógeno, xenón y ozono en cantidades cada vez más pequeñas)<sup>6</sup>.

La atmósfera hace posible la vida al proporcionar oxígeno para la respiración pulmonar, concede protección contra la radiación —particularmente, la radiación ultravioleta (UV) proveniente del Sol—, ya que algunos de los gases de la atmósfera, como el  $CO_2$  y el ozono ( $O_3$ ), son especialmente buenos para absorber y atrapar esa radiación. También atrapan el calor, por lo que calientan al planeta y mantienen una temperatura superficial planetaria promedio de unos 15 °C. Finalmente, previene diferencias

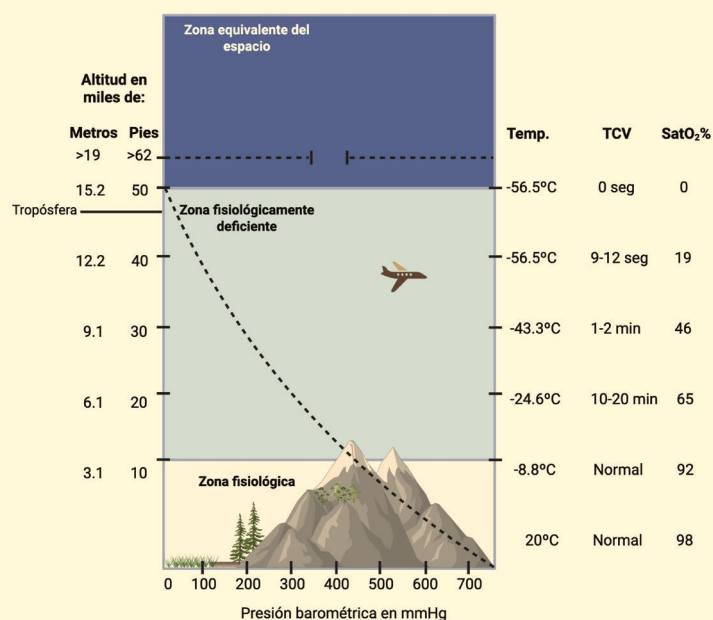
La atmósfera hace posible la vida al proporcionar oxígeno para la respiración pulmonar, concede protección contra la radiación —particularmente, la radiación ultravioleta (UV) proveniente del Sol—, ya que algunos de los gases de la atmósfera, como el  $CO_2$  y el ozono ( $O_3$ ), son especialmente buenos para absorber y atrapar esa radiación. También atrapan el calor, por lo que calientan al planeta y mantienen una temperatura superficial planetaria promedio de unos 15 °C. Finalmente, previene diferencias extremas de temperatura entre el día y la noche; de lo contrario, las temperaturas estarían muy por debajo del punto de congelación en todas partes de la superficie terrestre.

extremas de temperatura entre el día y la noche; de lo contrario, las temperaturas estarían muy por debajo del punto de congelación en todas partes de la superficie terrestre<sup>6</sup>.

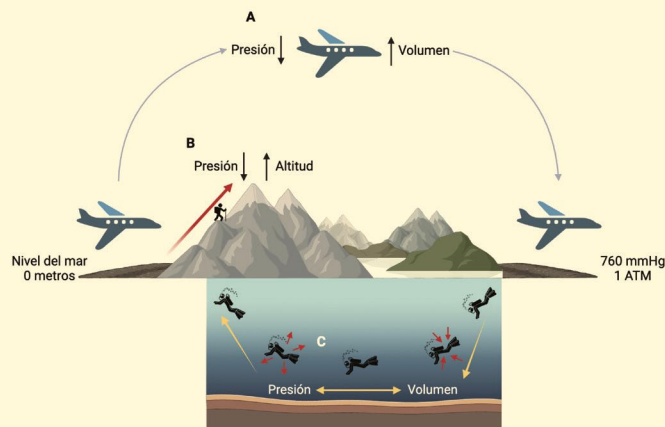
La atmósfera terrestre presenta propiedades físicas universales que resultan fundamentales en el estudio de cómo los gases contenidos en ella afectan al cuerpo humano. En primer lugar, al tratarse de un fluido, la dinámica de los gases responde a tres variables principales:

1. El volumen (V) que ocupan en un espacio determinado.
2. La presión (P) que ejercen dentro de dicho volumen.
3. La temperatura (T), que influye en la velocidad de las moléculas.

Es importante considerar que la atracción gravitacional de la Tierra contribuye significativamente a la composición y comportamiento de la atmósfera. Esto da lugar a lo que conocemos como presión atmosférica, que representa el peso combinado de todos los gases atmosféricos en un punto específico. Convencionalmente, la presión atmosférica se mide

**Figura 1.** Física de la atmósfera y variación de sus determinantes a grandes altitudes

Temp.: temperatura; TCV: tiempo de conciencia vital; SatO<sub>2</sub>: saturación de oxígeno en %<sup>7</sup>

**Figura 2.** Ilustración representativa de las leyes de los gases y sus efectos sobre el cuerpo humano, así como de los escenarios donde se manifiestan en ambientes extremos<sup>9</sup>

y establece a nivel del mar, y puede expresarse de diversas formas; la más conocida es en 760 milímetros de mercurio (mm/Hg) (**figura 1**)<sup>6</sup>.

El comportamiento de estos gases se ha estudiado a lo largo del tiempo y este conocimiento

se encuentra descrito en las leyes de los gases, el conocerlas es necesario para comprender cómo la presión, el volumen y la temperatura interactúan entre ellas y afectan el cuerpo humano y su fisiología<sup>8</sup> (**figura 2**).

### Ley de Boyle

Esta ley describe que, a una temperatura constante, el volumen es inversamente proporcional a la presión<sup>10-12</sup>. Si tenemos una cantidad de gas aislado y a temperatura constante, el producto de la presión de este gas por su volumen es constante:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

$P$  es la presión,  $V$  es el volumen

En la **figura 2a**, por ejemplo, en un viaje en avión, los efectos de la ley de Boyle en el cuerpo humano están directamente relacionados con los órganos y cavidades donde se encuentra aire atrapado. Dado que la temperatura corporal se mantiene constante, estos efectos son más pronunciados durante las fases de ascenso y descenso del vuelo, donde los cambios de presión son más rápidos y marcados. Estos efectos reciben el nombre de *disbarismos* y serán abordados más adelante.

### Ley de Dalton

En una mezcla de gases (donde ninguno de estos reacciona entre sí), la presión total es igual a la suma de las presiones parciales de cada gas.

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^n P_i$$

En ese sentido, en la atmósfera encontramos esa mezcla de gases. A nivel del mar, donde la presión barométrica correspondiente a una atmósfera es de 760 mm Hg, la presión parcial del O<sub>2</sub> —al considerar que se encuentra en un 21%—, sería de 160 mmHg<sup>8,10</sup>.

Un alpinista de alta montaña realiza ascensos de manera gradual a medida que se acerca a la cima. En este caso, la presión parcial de oxígeno disminuye conforme aumenta la altitud, a pesar de que en la mezcla de gases el O<sub>2</sub> se mantiene en el 21%. Como se muestra en la **figura 2b**, esta disminución puede provocar hipoxia, lo que hace necesario el uso de oxígeno suplementario para mantener adecuadamente las funciones cognitivas superiores, así como los procesos biológicos dependientes de oxígeno.

### Ley de Henry

Esta ley establece que la cantidad de gas disuelto en una solución, no químicamente combinado, varía directamente con la presión de ese gas sobre la solución.

$$P_1 A_2 = P_2 A_1$$

$A$  es la cantidad inicial de gas en la solución

En otras palabras, cuando la presión de un gas sobre un líquido determinado disminuye, la cantidad de ese gas disuelto en el líquido también disminuye, y viceversa. Esto significa que, una vez alcanzado el equilibrio, la tensión del gas disuelto será igual a la presión parcial del gas en la atmósfera a la que está expuesta la solución.

Este principio es fundamental en fisiología humana, particularmente en la membrana alvéolo-capilar, donde el intercambio de gases como el O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> depende de las diferencias en las presiones parciales entre el aire alveolar y la sangre capilar, fenómeno que sucede a través de la barrera de agua que está presente en el epitelio del alvéolo<sup>13</sup>.

Un ejemplo cotidiano de este fenómeno se observa al abrir una bebida carbonatada. Al romper el sello, el gas previamente sometido a presión escapa, lo que reduce la presión sobre el líquido. Como resultado, el gas disuelto dentro de la bebida comienza a liberarse en forma de burbujas que ascienden a la superficie.

En el cuerpo humano, procesos similares ocurren en los tejidos durante cambios rápidos de presión, como en el buceo o en vuelos, lo que puede llevar a la formación de burbujas de gas en la sangre.

Por ejemplo, un buzo de grandes profundidades puede enfrentarse a un *síndrome de descompresión* en caso de ascender de manera abrupta a la superficie. Bajo la física de la ley de Henry (**figura 2c**), uno de los gases que difunde a través de la membrana respiratoria —el nitrógeno— y que se encuentra disuelto en la sangre sin ir acompañado de algún transportador, como lo es el oxígeno con la hemoglobina, cambia su conformación y puede formar burbujas.

En buzos, se recomienda incluso no realizar viajes en avión hasta 72 horas después de una inmersión a grandes profundidades<sup>13</sup>.



**Tabla 1.** Efecto de los cambios de presión en diferentes órganos y sistemas

| Órgano o sistema     | Efecto del cambio de presión                                               |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Boca (dientes)       | Barodontalgia                                                              |
| Pulmones             | Barotrauma                                                                 |
| Circulatorio         | Formación de burbujas (trombos)                                            |
| Hueso                | Barosinusitis y osteonecrosis disbárica                                    |
| Oído medio e interno | Dolor y barotrauma                                                         |
| Piel                 | Eritema con prurito                                                        |
| Sistema inmune       | Infecciones, reactivación de virus, infecciones y enfermedades autoinmunes |
| Sistema respiratorio | Hipoxia                                                                    |

## FISIOLOGÍA EN AMBIENTES EXTREMOS

### Disbarismos

Se define como *disbarismo* al término que engloba a los signos y síntomas que se presentan debido a los efectos físicos y fisiológicos de la dinámica de un gas en los tejidos, órganos y sistemas, que se derivan de un aumento o disminución de la presión atmosférica, y que se produce a un ritmo o con una duración superior a la capacidad del organismo para adaptarse con seguridad<sup>14</sup>.

Para su estudio, se puede dividir en dos secciones: los efectos sobre los gases encerrados en cavidades orgánicas y los efectos sobre los gases disueltos en los tejidos y líquidos orgánicos<sup>4,15</sup>. De esta forma, esta clasificación incluye a los *barotraumas*, que son un daño tisular de tipo mecánico que son resultado directo de un cambio de presión ambiental. En muchas situaciones, estos no se pueden considerar como entidades separadas, sino interrelacionadas, ya que tienen como causa común, la modificación en el volumen de una burbuja de gas.

Además de estos, pueden producirse también afecciones como la *enfermedad por descompresión* o la *embolia arterial gaseosa*<sup>16</sup> (tabla 1).

Si bien existen diversos efectos derivados de los cambios de presión ante un ambiente extremo, describiremos los más frecuentes.

### Barotitis media

La *barotitis media* es el problema médico más prevalente asociado con los viajes en avión y ha sido un factor causal en accidentes de aviación<sup>14</sup>. La primera descripción de la condición se dio en 1783 por Jacques Charles, un físico francés, quien, después de convertirse en el primer hombre en hacer un ascenso

libre en un globo de hidrógeno, se quejó de un fuerte dolor en su oído derecho durante el descenso<sup>18</sup>.

La barotitis se define como una inflamación traumática aguda causada por cambios de presión ambiental<sup>18</sup>, y se caracteriza por dolor y pérdida de la audición en el oído afectado, y ocasionalmente por vértigo<sup>19</sup>.

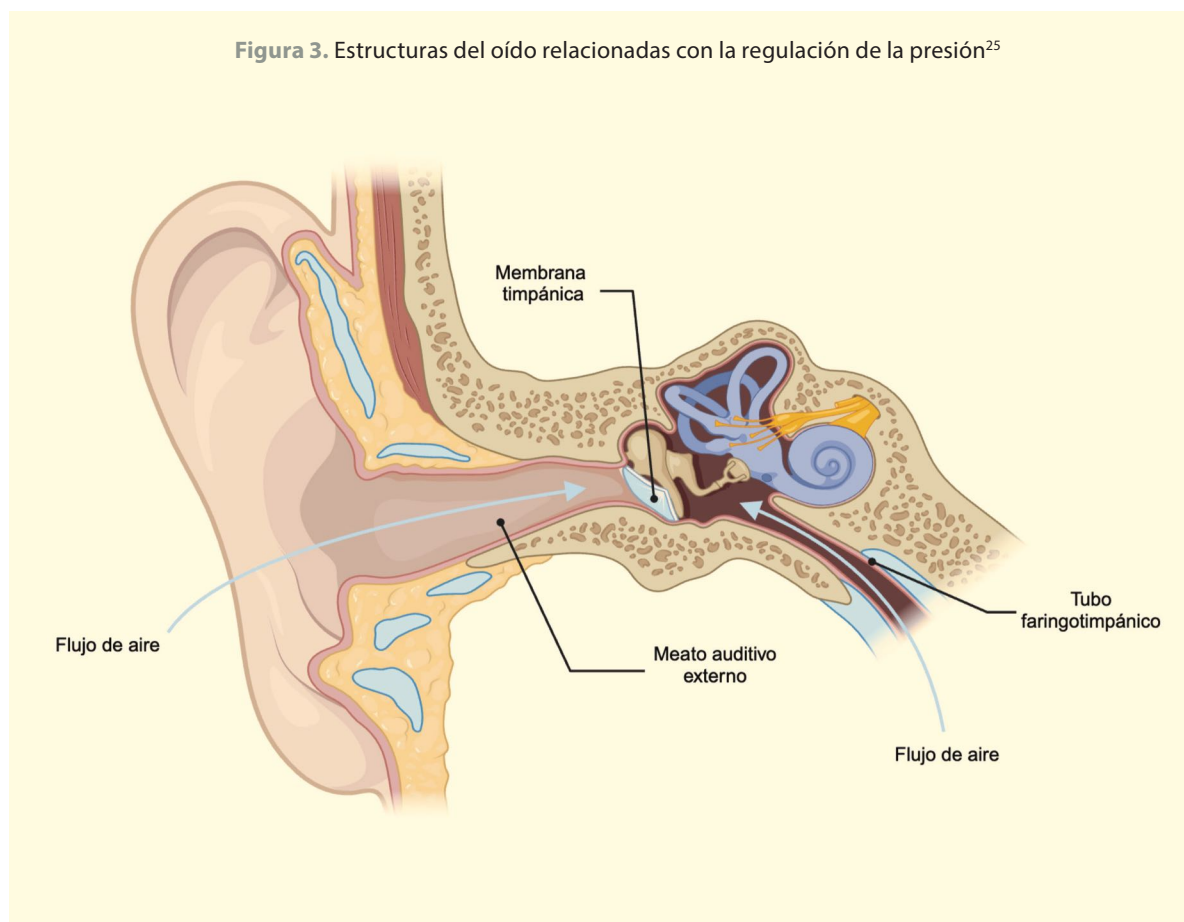
A medida que un avión asciende, la presión atmosférica disminuye y el gas del oído medio se expande, según la ley de Boyle (figura 3). Si el tubo faringotimpánico no se abre —por ejemplo, al tragar—, entonces el gas del oído medio, con una presión relativamente positiva, continuará expandiéndose hasta que la membrana timpánica sea empujada lateralmente hasta su límite, un efecto que puede observarse con un otoscopio durante el vuelo<sup>20</sup>.

A una presión diferencial de 15 mmHg, el tubo faringotimpánico (si funciona correctamente) se abre pasivamente y expulsa el aire de presión positiva, y así iguala las presiones<sup>21</sup>. Durante la fase de ascenso, pueden producirse molestias y dolor de oído si existe una disfunción del tubo faringotimpánico.

Es frecuente observar que se presente principalmente durante el descenso en un avión de pasajeros<sup>22</sup>, debido a que, a medida que el avión desciende, la presión atmosférica vuelve a ser “normal” y, por tanto, el gas del oído medio se contrae, de acuerdo con la ley de Boyle.

Ahora bien, el tubo faringotimpánico se comporta de manera diferente en el descenso en comparación con el ascenso, ya que el aire no entra en el oído medio de forma pasiva: la actividad muscular debe abrir la tuba auditiva, y esto suele conseguirse fácilmente al tragar o bostezar<sup>23</sup>. La tuba también

**Figura 3.** Estructuras del oído relacionadas con la regulación de la presión<sup>25</sup>



puede abrirse mediante cierto grado de sobrepresión aplicada en el extremo nasal, como en la maniobra de Valsalva.

A una presión diferencial de 60 mmHg (es decir, cuando la presión ambiente es 60 mmHg mayor que la presión del oído medio), el oído medio se llena y los pasajeros experimentan molestias. Una diferencia de presión de alrededor de 80 mmHg cierra el extremo nasofaríngeo blando de la trompa con una fuerza superior a la que pueden generar los músculos encargados de abrirla; en este caso, la trompa permanecerá “bloqueada” y cualquier intento de igualar la presión será inútil<sup>24</sup>.

Una de las complicaciones es la *rotura de la membrana timpánica* si la diferencia de presión alcanza entre 100 y 500 mmHg, lo que suele aliviar el dolor, pero puede causar secuelas graves como sordera, vértigo y vómitos<sup>23</sup>.

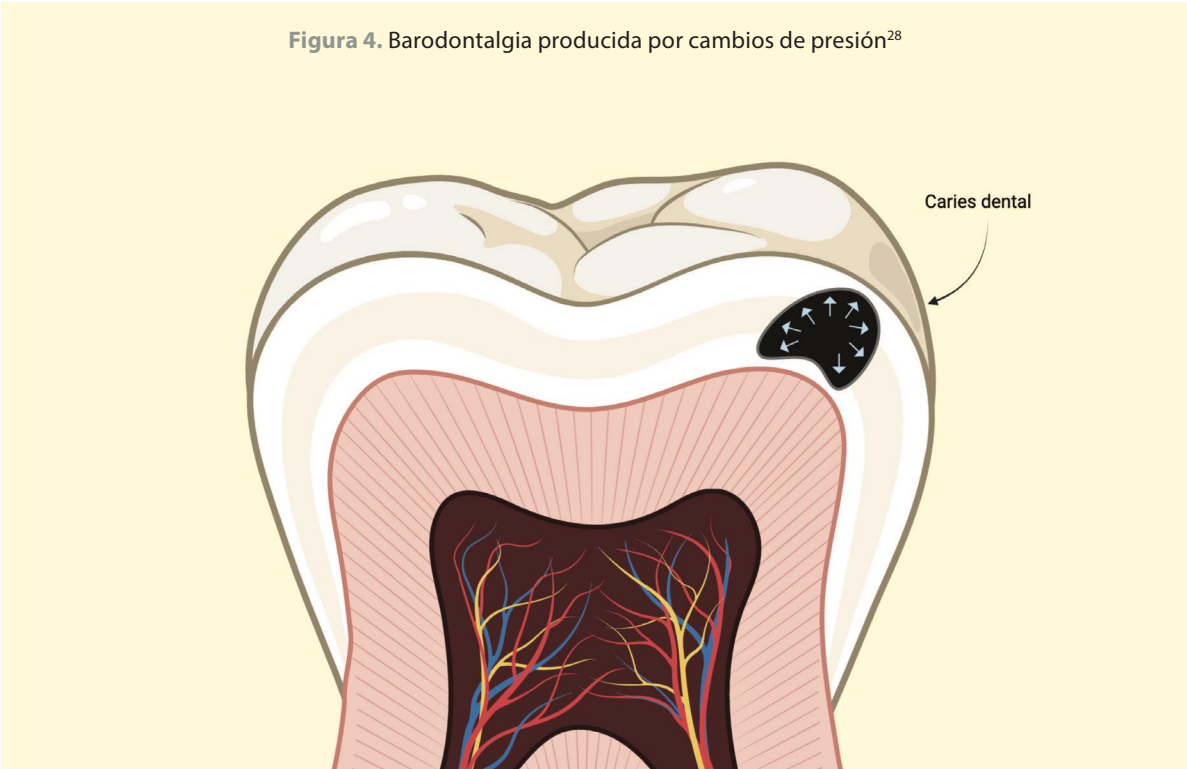
La forma más sencilla de prevenir la barotitis media es evitar los viajes en avión cuando se presentan síntomas de una infección de vías respiratorias superiores. En caso de volar, se debe enseñar a la tripulación en formación la técnica de inflar la oreja (Valsalva). El tratamiento gira en torno al alivio del dolor y la ventilación del oído medio<sup>24</sup>.

### Barodontalgia

La *barodontalgia* o *aerodontalgia* es una afección oral que se manifiesta como dolor; la principal causa es un cambio de presión barométrica que afecta a un órgano asintomático, en este caso, la boca. Fue reportada por primera vez en los años cuarenta del siglo XX. Sin embargo, con el crecimiento del número de personas que practican buceo, este síntoma también apareció en esa actividad, por lo que se decidió usar el prefijo *baro*. Una primera clasificación

| Tabla 2. Clasificación de la barodontalgia |                       |                                                  |
|--------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| Tipo                                       | Patología             | Características                                  |
| I                                          | Pulpitis irreversible | Dolor agudo transitorio en ascenso               |
| II                                         | Pulpitis reversible   | Dolor sordo y punzante al ascenso                |
| III                                        | Pulpa necrótica       | Dolor sordo y punzante al descenso               |
| IV                                         | Patología periapical  | Dolor severo persistente (en ascenso o descenso) |

Figura 4. Barodontalgia producida por cambios de presión<sup>28</sup>



incluía procesos como sinusitis, otitis media y erupción de dientes; actualmente, la clasificación abarca cuatro clases (tabla 2), y todas son con base en problemas dentales y el tipo de dolor que causan<sup>26</sup>. Esta afección también es conocida como “apretón de dientes” (*tooth squeeze*)<sup>27</sup> (figura 4).

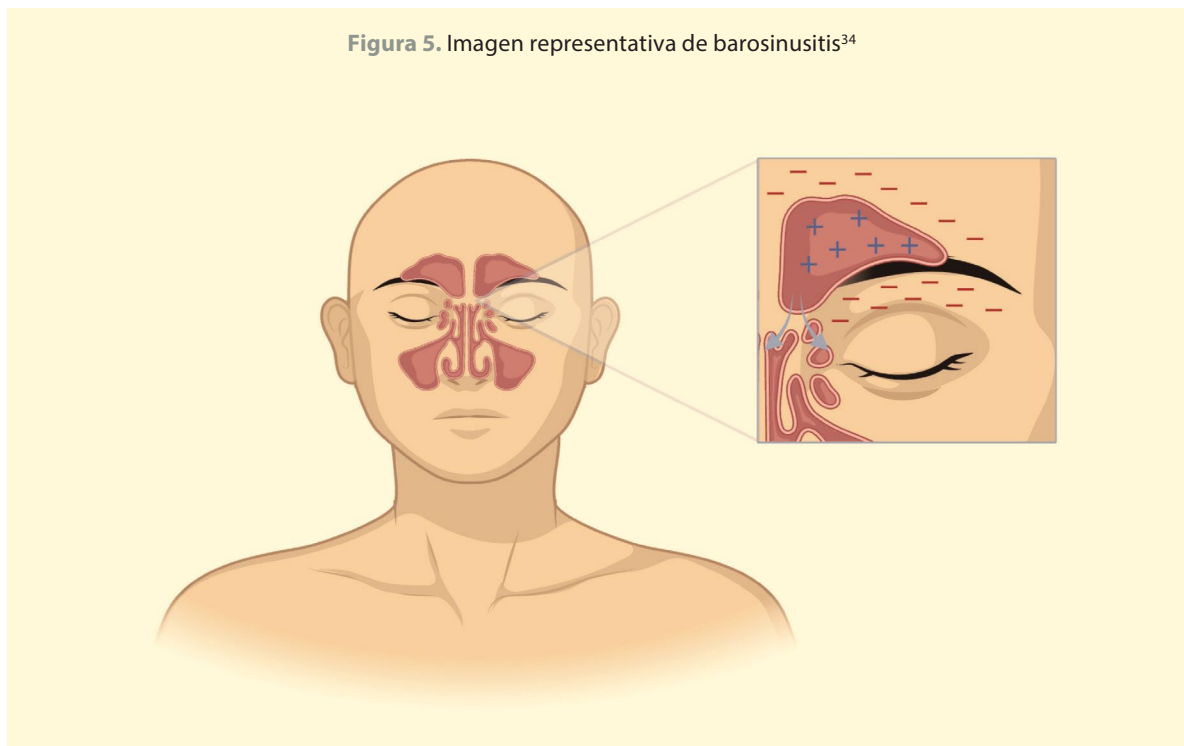
En muchos casos, el personal de vuelo con caries dentales o con oclusiones dentarias deficientemente realizadas puede acumular aire en dichas caries o en los espacios existentes entre una obturación dental y la propia pieza dentaria. Este aire acumulado se expande con la altitud, provocando la irritación de la raíz nerviosa de la pieza o piezas dentarias afectadas. Esto ocasiona un dolor que, en ocasiones, es sumamente intenso e incapacitante, y puede

causar vértigo —aunque es poco frecuente—, lo cual puede llevar a una incapacitación repentina en miembros de la tripulación<sup>4,23</sup>, lo que puede afectar o comprometer la seguridad del vuelo.

Habitualmente, esta condición se reporta durante el vuelo, en altitudes que van de los 3,000 a los 25,000 pies. El dolor, en algunos casos, puede disminuir al llegar al nivel de inicio aproximado o en tierra, o mantenerse hasta tres días después del aterrizaje<sup>29</sup>.

El dolor indirecto está relacionado con un *absceso dentario*, dado que produce una acumulación de gas y puede ocasionar igualmente esta sintomatología durante la exposición a la altitud en un vuelo<sup>4</sup>. Tanto los órganos dentarios superiores como los



**Figura 5.** Imagen representativa de barosinusitis<sup>34</sup>

inferiores se ven afectados de manera similar, siendo el primer molar superior (30.8%) y el primer molar inferior (30.8%) los dientes más frecuentemente implicados<sup>30</sup>.

La clave para la prevención de la barodontalgia es una adecuada salud bucal<sup>31</sup>. Durante la revisión periódica se deberá prestar especial atención a defectos como fracturas, reconstrucciones y lesiones por caries. Las radiografías panorámicas o periapicales de los incisivos superiores e inferiores pueden ser de valor diagnóstico para revelar patologías dentales ocultas adicionales<sup>32</sup>.

Aunque el tratamiento de restauración dental de rutina no requiere puesta en tierra del personal técnico aeronáutico (PTA), al ser una de las principales causas de barodontalgia, se recomienda de 24 a 72 horas de puesta en tierra como un medio efectivo para prevenir la barodontalgia postoperatoria.

### Barosinusitis

Entre los disbarismos, es importante destacar la *barosinusitis*, la cual se describe como la consecuencia de una lesión e inflamación de los senos paranasales,

debido a un rápido cambio de presión que no se compensó. Las consecuencias incluyen daño en la mucosa, lo que provoca dolor facial, cefalea, dolor dental y epistaxis en casos muy graves (**figura 5**).

Por la anatomía de los senos paranasales, la zona más frecuentemente lesionada son los senos frontales, seguidos de los maxilares, y en menor frecuencia los esfenoidales y etmoidales. Esta anomalía está comúnmente asociada con pilotos y buzos, quienes normalmente están expuestos a cambios de presión, y para su atención se requiere de un equipo multidisciplinario<sup>33</sup>.

Estadísticamente, se reporta el doble de casos de barotrauma sinusal asociados con descompresión por descenso y aumento de la gravedad, en comparación con el ascenso, donde ocurre la contracción inversa y la compresión<sup>35</sup>.

Existen al menos cuatro etiologías asociadas con el barotrauma sinusal, tanto en vuelos como en buceo<sup>36</sup>:

1. Poliposis nasal.
2. Estenosis de los orificios sinusales.

3. Obstrucción con mucosidad o bola de hongos.
4. Sinusitis.

Es importante destacar que este disbarismo puede ser la segunda causa más frecuente durante viajes en avión. También puede producirse durante viajes en automóvil, por el uso de algunos anestésicos gaseosos, e incluso por exposición prolongada en grandes altitudes, al viento, al sonarse la nariz con fuerza, durante una maniobra de valsava vigorosa o con el uso de oxigenoterapia hiperbárica. En promedio, el 25% de los casos ocurre en pilotos<sup>36</sup>.

Vaezaafshar y colaboradores, en 2017<sup>33</sup>, establecieron una clasificación<sup>35</sup>:

1. Barosinusitis aguda, un único episodio que dura horas o días después de la exposición.
2. Barosinusitis aguda recurrente.
3. Barosinusitis crónica.

### Síndrome de descompresión

Entre los disbarismos se encuentra un padecimiento que recibe varios nombres: *síndrome de descompresión*, *enfermedad de descompresión*, *síndrome de Caisson* y *enfermedad del buzo*, aunque también se presenta en trabajadores de la aviación, pilotos y astronautas<sup>37</sup>.

En general, este padecimiento se debe a la formación de burbujas en el torrente sanguíneo y otros órganos. Esto sucede cuando el cuerpo se expone a alta presión y luego se descomprime *rápidamente*; el agente causante de las burbujas es principalmente el nitrógeno disuelto en sangre, aunque otros gases como el oxígeno y el CO<sub>2</sub> también pueden participar<sup>38,39</sup>.

Existen dos tipos de patologías abarcadas por el término *enfermedad por descompresión*:

1. *Embolia arterial por gas*, en la cual un émbolo de gas (burbuja), ya sea alveolar o venoso, se introduce en la circulación, a través de un cortocircuito cardíaco o por vasos pulmonares.
2. *Enfermedad por descompresión propiamente dicha*, en la cual se genera burbujas *in situ* a partir del gas inerte disuelto.

Recordemos que el aire es una mezcla de gases, donde los componentes principales son nitrógeno y oxígeno. Como se explicó anteriormente en este trabajo, los gases se comportan de acuerdo con variaciones de temperatura, volumen y presión (leyes de los gases). Cuando el aire se somete a alta presión, se comprime. Si tomamos como ejemplo a un buzo, en cada inspiración realizada en profundidad, se introducen más moléculas que en superficie. Como el oxígeno pasa en su mayoría a la hemoglobina, ya no se comporta como gas (solo el 2-3% se disuelve en plasma), por lo que no se acumula. Pero el nitrógeno, que es el componente mayoritario y no se utiliza metabólicamente, sí puede acumularse en sangre y tejidos.

Pero cuando la presión cambia bruscamente tras un ascenso, o si hay una salida repentina de una cabina con aire comprimido, los pulmones no tienen capacidad para eliminar el exceso de nitrógeno acumulado, lo que provoca la formación de burbujas tanto en sangre como en tejidos. Estas burbujas causan lesiones tisulares, obstrucción de vasos sanguíneos, formación de coágulos o incluso su ruptura<sup>37-41</sup>.

La enfermedad por descompresión se clasifica de la siguiente manera:

- *Tipo I*. Es leve y afecta, articulaciones, la piel y los vasos linfáticos.
- *Tipo II*. Es grave e incluso puede llevar a la muerte. Afecta a sistemas de órganos vitales, como cerebro, médula espinal, sistema ventilatorio y sistema circulatorio.

Los síntomas suelen presentarse entre las primeras 24 horas y los 6 días. En algunos casos hay dolor y síntomas similares a los de un accidente cerebrovascular, o se manifiestan como una gripe. También puede haber inflamación, tumefacción y dolor muscular, articular y tendinoso.

Aunando más en los síntomas, en el tipo I, el dolor aparece en articulaciones de brazos, piernas, espalda y músculos, lo que dificulta localizar el daño específico. El dolor es intermitente al inicio, luego se vuelve intenso, punzante y profundo, como si "taladrara el hueso", e incapacita el movimiento.

A nivel cutáneo puede haber prurito, erupciones, inflamación en diversas zonas y fatiga<sup>39,40</sup>.

En el tipo II, hay síntomas neurológicos, que involucran al cerebro y la médula espinal. Hay entumecimiento, parálisis, hormigueo, debilidad e incluso pérdida del control de esfínteres. La médula espinal es especialmente vulnerable<sup>40</sup>.

Los síntomas que indican la afectación de la médula espinal pueden incluir entumecimiento, hormigueo, debilidad o una combinación de ellos, que puede afectar brazos, piernas o las cuatro extremidades. La debilidad leve o el hormigueo pueden progresar en cuestión de horas hasta una parálisis irreversible. También puede presentarse incapacidad para orinar o defecar. Es frecuente el dolor abdominal y en la espalda<sup>41,42</sup>.

Si jerarquizamos los síntomas por frecuencia e intensidad, se presentan en el siguiente orden<sup>40-42</sup>:

- Dolor de cabeza (cefalea)
- Parestesias
- Confusión
- Vértigo
- Debilidad motora (el dolor aumenta con el movimiento)
- Cutáneos: erupciones y edema
- Dolor muscular
- Efectos pulmonares: tos, dolor torácico, asfixia
- Efectos en la coordinación
- Efectos en la conciencia
- Efectos auditivos, cuando hay afectación de los nervios ópticos se produce zumbido y vértigo
- Efectos linfáticos
- Efectos cardiovasculares
- Efectos en la vejiga e intestino

Incluso pueden observarse efectos *óseos*, conocidos como osteonecrosis disbárica, especialmente en trabajadores expuestos a ambientes de aire comprimido. No existe un síntoma específico inicial que permita identificar con certeza la presencia de la enfermedad.

La enfermedad por descompresión es poco frecuente en inmersiones de trabajo de varios días, con una descompresión prolongada, también en trabajadores de medicina hiperbárica con un porcentaje

Lo principal y más recomendable es administrar oxígeno al 100% durante varias horas, incluso si los síntomas ya se revirtieron. El oxígeno puro “lava” el gas inerte, ya que se establece un gradiente de presión parcial alto entre el gas alveolar y el inerte, permitiendo una rápida eliminación del gas de tejidos a pulmones por perfusión y de las burbujas formadas al tejido por difusión. Además, el oxígeno reduce la hipoxia tisular que pudo originarse por isquemia, lesión mecánica o por el desencadenamiento de cascadas bioquímicas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que aún existe controversia sobre los efectos del oxígeno en el sistema nervioso.

de 0.02%. En vuelos y entrenamiento en altitud, la tasa de ocurrencia es de 0.1%<sup>40</sup>. Sin embargo, existen reportes en pilotos de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, quienes manifiestan que sus síntomas fueron incluso graves<sup>43,44</sup>.

Existen factores que pueden predisponer a la enfermedad por descompresión, a saber<sup>42-45</sup>:

- Obesidad
- Lesiones previas
- Hipoxia
- Neumopatías o cardiopatías
- Cortocircuitos cardíacos derecha a izquierda
- Deshidratación
- Consumo de alcohol o fármacos
- Crisis de pánico

Lo principal y más recomendable es administrar oxígeno al 100% durante varias horas, incluso si los síntomas ya se revirtieron. El oxígeno puro “lava” el gas inerte, ya que se establece un gradiente de presión parcial alto entre el gas alveolar y el gas inerte, permitiendo una rápida eliminación del gas inerte de tejidos a pulmones por perfusión y de las burbujas formadas al tejido por difusión<sup>46,47</sup>. Además, el oxígeno reduce la hipoxia tisular que



Foto: Pixabay

se pudo originar por isquemia, lesión mecánica o incluso por el desencadenamiento de cascadas bioquímicas<sup>46</sup>. Sin embargo, se debe tener en cuenta que aún existe cierta controversia sobre los efectos del oxígeno en el sistema nervioso<sup>47</sup>.

### Hipoxia

En la atmósfera, a medida que aumenta la altitud, la presión y la temperatura disminuyen, mientras que el porcentaje de gases sigue siendo el mismo hasta aproximadamente 60 millas de altitud. En ese sentido, la presión parcial del oxígeno disminuye, aunque la proporción dentro de la mezcla de gases se mantiene constante en 21%.

Desde un enfoque fisiológico, la atmósfera se delimita desde el nivel del mar hasta los 10,000 pies de altitud (**figura 1**); a partir de ahí, se considera una zona fisiológicamente deficiente hasta los 50,000 pies, donde comienza la zona equivalente del espacio. Esto produce como consecuencia hipoxia, que puede definirse como un estado de deficiencia de oxígeno en sangre, células y tejidos, de tal forma que ocasiona una disminución de la función ventilatoria.

Para ello se ha descrito el tiempo de conciencia vital (TVC), el cual estima, a diferentes altitudes, el tiempo de respuesta de las personas antes de perder el estado de conciencia por déficit de oxígeno<sup>48</sup>. Asimismo, en la **figura 1** se muestra cómo disminuye el porcentaje de saturación de oxígeno en el cuerpo a grandes altitudes. Un avión comercial presuriza a una presión equivalente aproximada de 8,000 pies, lo cual se considera dentro de la zona fisiológica.

La hipoxia hipóxica no es la única que existe. Además de esta, se puede clasificar en<sup>49</sup>:

1. *Hipóxica*. relacionada directamente con la disminución de la presión parcial de oxígeno y la altitud, lo cual reduce la difusión de oxígeno en la membrana respiratoria. Este fenómeno se explica por la ley de Dalton.
2. *Por estancamiento*. Se debe al efecto de la gravedad. Ante fuerzas G aplicadas sobre el cuerpo, la sangre se acumula en los miembros inferiores, disminuyendo la perfusión cerebral.
3. *Histotóxica*. Ocasionada por el aumento en la



afinidad del monóxido de carbono en el eritrocito cuando una persona se expone a humo, frecuentemente en un incendio.

4. *Hipémica*. Debida a la disminución del volumen sanguíneo. En ese sentido, en aviación se recomienda no volar en las siguientes 72 horas posteriores a una donación de sangre.

A grandes altitudes, la hipoxia intensa estimula los quimiorreceptores periféricos, los cuales juegan un papel crucial, provocando dos efectos: estiramiento de los pulmones y aumento del pH del líquido extracelular (LEC) cerebral, lo que inhibe el centro cardioinhibidor<sup>4,49</sup> y provoca, como efecto compensatorio, taquicardia.

El tratamiento contra la hipoxia hipóxica consiste en la administración de oxígeno suplementario y el descenso gradual a la zona fisiológica de la atmósfera, hasta recuperar los niveles óptimos de saturación de oxígeno en sangre, *células y tejidos*. En aeronáutica, se liberan mascarillas en la cabina de pasajeros para evitar la pérdida de la conciencia<sup>49</sup>.

## CONCLUSIONES

Finalmente, es importante destacar que la investigación en esta apasionante área continúa. Los avances logrados, y los que se obtendrán, contribuirán de forma significativa a prevenir y resolver con mayor eficiencia los disbarismos, así como a mantener los sistemas homeostáticos del cuerpo humano cuando este se expone a un ambiente extremo.

Estos avances contribuirán de manera relevante al bienestar de quienes trabajan o viajan en estas condiciones, reforzando la seguridad y eficiencia en la aviación, el alpinismo y el buceo de grandes profundidades.

## AGRADECIMIENTOS

A Hans Yoguinder Segura Alfaro, médico pasante de servicio social de Programas Universitarios en el Departamento de Fisiología; así como a las doctoras Adriana Robles Cabrera y Julieta Garduño Torres, coordinadora de Enseñanza y jefa del Departamento de Fisiología, respectivamente, de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México. ●

## REFERENCIAS

1. IATA Press. International Air Transport Association (IATA). Air Passenger Numbers to Recover in 2024 [Internet]. 2022 [citado 2023 nov 3]. Disponible en: <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>
2. Sánchez LM. Medicina aeroespacial y factores humanos en aviación. La importancia de una aproximación transdisciplinaria a la salud. *Rev Med*. 2008;16(2):249-60.
3. Secretaría de Turismo (SECTUR). Más de 107 millones de pasajeros se transportaron en vuelos nacionales e internacionales en 2022 [Internet]. gob.mx; 2023 [citado 2023 nov 2]. Disponible en: <http://www.gob.mx/sectur/prensa/mas-de-107-millones-de-pasajeros-se-transportaron-en-vuelos-nacionales-e-internacionales-en-2022>
4. Sastre JMP. Medicina Aeronáutica: Conceptos Generales (Libro) [Internet]. Sociedad Española de Medicina Aeroespacial; 2022 [citado 2023 nov 2]. Disponible en: <https://semae.es/medicina-aeronautica-conceptos-generales/>
5. Asale R, Rae. atmósfera | Diccionario de la lengua española. "Diccionario De La Lengua Española" - Edición Del Tricentenario [Internet]. 2024 [citado 2024 dic 9]. Disponible en: <https://dle.rae.es/atm%C3%B3sfera>
6. Clark JB. The Space Environment: An Overview. En: Springer eBooks [Internet]. 2020. p. 1-29. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10152-1\\_127-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10152-1_127-1)
7. Hernandez-Chavez A. Figura 2. Ilustración representativa de las leyes de los gases y sus efectos sobre el cuerpo humano. Figura creada en BioRender [Internet]. 2024. Disponible en: <https://BioRender.com/i52q262>
8. Departamento de Fisiología, FACMED, UNAM. Leyes generales de los gases: su aplicación en Fisiología [Internet]. 2022. Disponible en: <https://fisiologia.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2019/11/3-leyes-de-los-gases.pdf>
9. Hernandez-Chavez A. Figura 1. Física de la atmósfera y la variación de sus determinantes a grandes altitudes. Figura creada en BioRender [Internet]. 2024. Disponible en: <https://BioRender.com/q75h038>
10. Hall JE. Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology. Elsevier Health Sciences; 2015.
11. Boron WF, Boulpaep EL. Fisiología médica. Elsevier Health Sciences; 2017.
12. Kenny BJ, Ponichtera K. Physiology, Boyle's Law. En: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 [citado 2023 nov 5]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538183/>
13. Avishay DM, Tenny KM. Henry's Law. En: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan– [actualizado 2023 ene 29]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544301/>
14. Savioli G, Alfano C, Zanza C, Bavestrello Piccini G, Varesi A, Esposito C, et al. Dysbarism: An Overview of an Unusual Medical Emergency. *Medicina (Kaunas)*. 2022;58(1):104.
15. Calder IM. Dysbarism. A review. *Forensic Sci Int*. 1986; 30(4):237-66.



16. Lewis ST. Barotrauma in United States Air Force accidents-incidents. *Aerosp Med*. 1973;44(9):1059-61.
17. Firth OM. Dysbarism - Symptoms, diagnosis and treatment. *BMJ Best Practice* [Internet]. 2020 [citado 2023 nov 2]. Disponible en: <https://bestpractice.bmj.com/topics/en-us/1005>
18. Heath D, Williams DR, Clarke CA, Harris P. Man at high altitude: the pathophysiology of acclimatization and adaptation. Edinburgh: Churchill Livingstone; 1981.
19. Armstrong HG. The effect of flight on the middle ear. *J Am Med Assoc*. 1937;109(6):417.
20. King PF. Otitic barotrauma. *Proc R Soc Med*. 1966;59(6):543-54.
21. King PF. The Eustachian tube and its significance in flight. *J Laryngol Otol*. 1979;93(7):659-78.
22. Mirza S, Richardson H. Otic barotrauma from air travel. *J Laryngol Otol*. 2005;119(5):366-70.
23. Brown TP. Middle ear symptoms while flying. Ways to prevent a severe outcome. *Postgrad Med*. 1994;96(2):135-7:141-2.
24. Stangerup SE, Klokke M, Vesterhauge S, Jayaraj S, Rea P, Harcourt J. Point Prevalence of Barotitis and Its Prevention and Treatment with Nasal Balloon Inflation: A Prospective, Controlled Study. *Otol Neurotol*. 2004;25(2):89-94.
25. Hernandez-Chavez A. Figura 3. Estructuras del oído relacionadas con la regulación de la presión. Figura creada en BioRender [Internet]. 2024. Disponible en: <https://BioRender.com/u46b460>
26. Zadik Y. Barodontalgia. *J Endod*. 2009;35(4):481-5.
27. Zadik Y. Barodontalgia: what have we learned in the past decade? *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2010;109(4):e65-9.
28. Hernandez-Chavez A. Figura 4. Barodontalgia producida por cambios de presión. Figura creada en BioRender [Internet]. 2024. Disponible en: <https://BioRender.com/b51f062>
29. Zadik Y. Barodontalgia due to odontogenic inflammation in the jawbone. *Aviat Space Environ Med*. 2006;77(8):864-6.
30. Gonzalez Santiago MM, Martinez-Sahuquillo Marquez A, Bullón-Fernández P. Incidence of barodontalgias and their relation to oral/ dental condition in personnel with responsibility in military flight. *Med Oral*. 2004;9(2):98-105, 92-8.
31. Robichaud R, McNally ME. Barodontalgia as a differential diagnosis: symptoms and findings. *J Can Dent Assoc*. 2005;71(1):39-42.
32. Zadik Y. Aviation dentistry: current concepts and practice. *Br Dent J*. 2009;206(1):11-6.
33. Vazezafshar R, Psaltis AJ, Rao VK, Zarabanda D, Patel ZM, Nayak JV. Barosinusitis: Comprehensive review and proposed new classification system. *Allergy Rhinol (Provid RI)*. 2017;8(3):109-17.
34. Hernandez-Chavez A. Figura 5. Imagen representativa de barosinusitis. Figura creada en BioRender [Internet]. 2024. Disponible en: <https://BioRender.com/f85z736>
35. Jamil RT, Reilly A, Cooper JS. Sinus Squeeze. En: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 [citado 2023 nov 2]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK500034/>
36. Battisti AS, Lofgren DH, Lark JD. Barosinusitis. En: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 [citado 2023 nov 2]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470207/>
37. Eckenhoff RG, Olstad CS, Carrod G. Human dose-response relationship for decompression and endogenous bubble formation. *J Appl Physiol*. 1990;69(3):914-8.
38. Benton PJ, Woodfine JD, Westwood PR. Arterial gas embolism following a 1-meter ascent during helicopter escape training: a case report. *Aviat Space Environ Med*. 1996;67(1):63-4.
39. Mancini S, Crotty AM, Cook J. Triage and Treatment of Mass Casualty Decompression Sickness After Depressurization at 6400 m. *Aerosp Med Hum Perform*. 2018;89(12):1085-8.
40. Berghage TE, Durman D. U.S. Navy Air Decompression Schedule Risk Analysis [Internet]. Defense Technical Information Center; 1980 [citado 2023 nov 2]. Report No.: ADA094311. Disponible en: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA094311>
41. Weien RW, Baumgartner N. Altitude decompression sickness: hyperbaric therapy results in 528 cases. *Aviat Space Environ Med*. 1990;61(9):833-6.
42. Mahon RT, Regis DP. Decompression and Decompression Sickness. En: Terjung R, editor. *Comprehensive Physiology* [Internet]. 1a ed. Wiley; 2014 [citado 2023 nov 3]. p. 1157-75. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cphy.c130039>
43. Bason R, Yacavone D. Decompression sickness: U.S. Navy altitude chamber experience 1 October 1981 to 30 September 1988. *Aviat Space Environ Med*. 1991;62(12):1180-4.
44. Jersey SL, Baril RT, McCarty RD, Millhouse CM. Severe Neurological Decompression Sickness in a U-2 Pilot. *Aviat Space Environ Med*. 2010;81(1):64-8.
45. Vann RD, Butler FK, Mitchell SJ, Moon RE. Decompression illness. *Lancet* [Internet]. 2011;377(9760):153-64. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(10\)61085-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(10)61085-9)
46. Longphre JM, Denoble PJ, Moon RE, Vann RD, Freiberg JJ. First aid normobaric oxygen for the treatment of recreational diving injuries. *Undersea Hyperb Med*. 2007;34(1):43-9.
47. Moon RE, Sheffield PJ. Guidelines for treatment of decompression illness. *Aviat Space Environ Med*. 1997;68(3):234-43.
48. Federal Aviation Administration, Aerospace Medical Education Division. Hypoxia [Internet]. [citado 2024 nov 22]. Disponible en: <https://www.faa.gov/pilots/safety/>
49. Federal Aviation Administration. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge [Internet]. [citado 2024 nov 22]. Disponible en: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/faa-h-8083-25c.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/faa-h-8083-25c.pdf)