



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

BIOFÍSICA APLICADA A SITUACIONES HIPERBÁRICAS: OXIGENOTERAPIA HIPERBÁRICA (OHB)

Autor: Manuel Alberto Pardo Fernández

Tutora: Concepción Arias García

Convocatoria: Febrero 2018

RESUMEN

En este trabajo nos hemos puesto en la piel de un submarinista, hemos visto qué parámetros físicos cambian, (los gases que respiramos, la presión a la que nos vemos sometidos, la flotabilidad que se opone a la inmersión en el agua, cómo vemos y oímos debajo de ella) trasladándonos desde nuestro ambiente aéreo normal a un ambiente subacuático distópico al que no estamos adaptados. También hemos estudiado las principales leyes termodinámicas y fisicoquímicas que rigen la distribución y comportamiento de los gases tanto fuera como dentro de nuestro organismo para dar una explicación de lo que puede suceder en un ambiente hiperbárico.

Hemos revisado cuales son las patologías derivadas de la exposición al ambiente subacuático hiperbárico desde un punto de vista fisicoquímico, junto con su etiopatología y fisiopatología. Además hemos identificado cual es la principal complicación derivada de este ejercicio, la *enfermedad descompresiva*, y cómo tratarla mediante la medicina hiperbárica. A lo largo de este trabajo también hemos intentado ofrecer una visión global de lo que es la medicina hiperbárica y la *oxigenoterapia hiperbárica* (OHB). Hemos evaluado tanto sus utilidades ya demostradas en trastornos respiratorios, cardiovasculares, bactericida en infecciones, como sus posibles usos en situaciones motivadas por entornos en los que la presión ambiental se encuentra alterada (como en condiciones subacuáticas); y los posibles riesgos y efectos adversos que puede tener.

OBJETIVOS

Estudio de las bases físicas y fisicoquímicas que rigen el ambiente hiperbárico en cuestión: *el entorno subacuático*. Profundizar en dicho entorno, en el que muchos de los parámetros físicos y fisicoquímicos cambian drásticamente, lo cual puede dañar seriamente nuestro organismo.

Identificar las principales complicaciones y patologías asociadas al entorno subacuático y como tratarlas. Revisión de la principal complicación por exposición al medio subacuático: la *enfermedad descompresiva*; y su principal terapia: la *OXÍGENOTERAPIA HIPERBÁRICA (OHB)*. Relación entre la OHB y el entorno subacuático.

Revisión bibliográfica de las bases científicas y fisicoquímicas en las que se apoya la medicina hiperbárica. Mención a los otros posibles usos de esta práctica clínica en trastornos clínicos variados.

METODOLOGÍA

Todo este trabajo consiste en una revisión bibliográfica de los materiales y publicaciones disponibles gracias a la comunidad científica en materia de biofísica subacuática, manuales de medicina subacuática, fisiología subacuática, manuales de medicina hiperbárica y oxígeno terapia.

Recopilación de información en las páginas web de los principales organismos de referencia en la materia y consulta de libros disponibles físicamente y en las bases de datos de la biblioteca de la Universidad Complutense de Madrid (<http://biblioteca.ucm.es/> y BUCea)

INTRODUCCIÓN: El entorno hiperbárico subacuático

Nosotros, como seres humanos, estamos adaptados a las condiciones físicas y ambientales del medio terrestre. Cuando nos sumergimos bajo el agua dichas condiciones ambientales cambian: aumenta la presión ejercida sobre nuestro cuerpo, los repartos de gases y fluidos contenidos en nuestro organismo se modifican; y la propagación de la luz y del sonido como ondas en este medio son diferentes al medio aéreo, lo cual modifica nuestra percepción sensorial de figuras y sonidos. Veamos que leyes y parámetros rigen estas modificaciones:

1. LA PRESIÓN BAJO EL AGUA:

La **presión** ($P = \frac{F}{S}$) [Ecuación 1] se define como *la fuerza por unidad de área ejercida sobre una superficie*, en el Sistema Internacional la presión se mide en una unidad denominada pascal (Pa), equivalente a una fuerza total de un newton actuando uniformemente sobre un metro cuadrado (N/m^2). Un fluido, en este caso el agua marina,

ejerce una presión homogénea en todo punto de un cuerpo sumergido en él, que depende de la profundidad a la que este se encuentra, siendo los vectores de fuerza siempre perpendiculares a la superficie de dicho cuerpo. La presión absoluta a la que se ve sometido nuestro cuerpo en inmersión es la suma de la presión atmosférica (debida al peso de la columna de aire) y la presión hidrostática (debida al peso de la columna de agua). [1] [2]

Tabla 1. Presiones en relación a la profundidad [3]

Profundidad	P hidrostática	P atmosférica	P absoluta
5 m	0,5 atm	1 atm	1,5 atm
10 m	1 atm	1 atm	2 atm
15 m	1,5 atm	1 atm	2,5 atm
20 m	2 atm	1 atm	3 atm
30 m	3 atm	1 atm	4 atm
100 m	10 atm	1 atm	11 atm

La presión atmosférica normal a nivel del mar es de 1 atmósfera que es la presión que ejerce el aire sobre la superficie terrestre (aproximadamente 1kg/cm^2). La presión ejercida por una columna de 10 m de agua de mar equivale aproximadamente a 1 atmósfera de presión. Como podemos ver en la tabla 1, los cambios de presión en profundidad son bastante notables y tan sólo a 10 m. la presión registrada dobla a la de la superficie. Finalmente, el **principio de Pascal** determina que la presión ejercida sobre un fluido, en este caso la atmosférica, se transmite uniformemente por todo el fluido, de manera que la presión atmosférica se transmite, y se suma en cada plano a una misma profundidad, a la presión hidrostática. De igual forma, en cada tejido blando del organismo sumergido se transmite la presión total, haciendo que la presión interna de las cavidades sea igual a la externa.

2. EL EFECTO DE LA PRESIÓN SOBRE LOS GASES:

El comportamiento de los gases cambia en función de la presión, del volumen y de la temperatura, entre otros parámetros. Como ya hemos visto, a medida que aumenta la profundidad se incrementa la presión y esto afectará los gases presentes en los pulmones, en las cavidades craneales y los disueltos en la sangre, entre otros. El comportamiento de estos viene explicado por las leyes de los gases: ley de Boyle-Mariotte, Henry y Dalton.

- **La compresibilidad de los gases (ley de Boyle-Mariotte)[4]($P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$) [Ec. 2]**

A temperatura constante, el volumen que ocupa una masa de gas es inversamente proporcional a la presión a la que se encuentra sometida esta masa [4]. Es decir que a medida que aumenta la presión el volumen disminuye proporcionalmente.

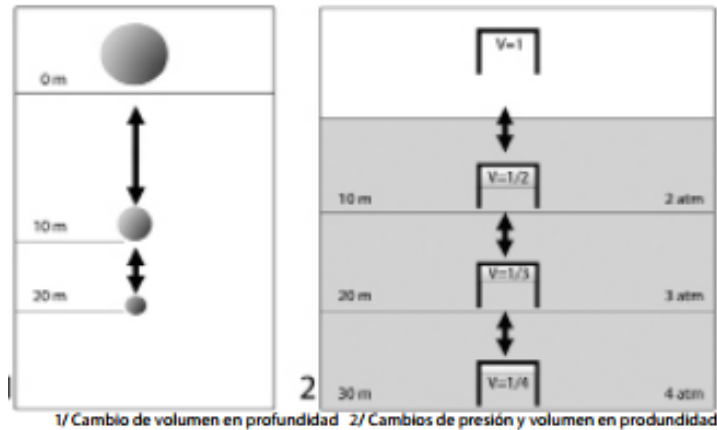


Figura 1. Compresibilidad de gases [3]

Como podemos ver en la figura 1, la presión modifica el volumen que ocupan los gases y fluidos. Algunas cavidades del cuerpo humano como los oídos, los senos nasales, las vías respiratorias, el estómago y el intestino contienen aire y se pueden ver afectados por cambios de presión. La flexibilidad del tejido del sistema respiratorio y del digestivo facilita la adaptación de estos órganos a estos cambios.

- **La solubilidad de los gases (ley de Henry) [4] ($P = k_H \cdot C$) [Ec. 3]**

k_H : Cte de Henry C : Concentración del gas

Cuando un gas entra en contacto con un líquido, las moléculas de gas, van a penetrar la interfase gas-líquido y difundirse en su interior. A este fenómeno se le conoce con el nombre de *disolución de los gases*. La *ley de Henry* explica que *a una temperatura dada y en condición de saturación, la cantidad de gas disuelto en un líquido, es directamente proporcional a la presión ejercida por el gas sobre la superficie del líquido*. Esto quiere decir que la cantidad de aire que se disuelve en los tejidos del cuerpo en inmersión es proporcional a la presión parcial de los gases que forman el aire. A medida que aumenta la profundidad también incrementa la cantidad de gases disueltos en la sangre, hasta llegar al punto que la concentración de gases disueltos en la sangre es más grande que la del medio, en este caso hablamos de sobresaturación. Si el

ascenso se produce de forma más o menos lenta se facilita la liberación de este gas al corriente sanguíneo formando micro burbujas que no afectan el organismo. Si la velocidad de ascenso es muy elevada o se supera el punto crítico de sobresaturación, se pueden formar burbujas más grandes que pueden causar problemas de descompresión que estudiaremos más adelante en el apartado de resultados y discusión.

- **Presiones parciales (ley de Dalton) [4] $P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = P_{total}$ [Ec. 4]**

El aire no es un gas puro, sino una mezcla de gases. La *ley de Dalton* explica que la *presión total de una mezcla de gases es la suma de las presiones que ejercería cada uno de los gases componentes ocupando él solo el volumen total*. Esta ley también se conoce como la *ley de las presiones parciales*, pues implica que la presión parcial de un gas, en una mezcla de gases, sometida a una presión P, es directamente proporcional a la proporción en que ese gas está presente en la mezcla. [2] [5]

El aire que respiramos está formado por una mezcla de gases: N₂ (78,08%), O₂ (20,94%), CO₂ (0,03%) y otros gases (0,95%). De este modo a una misma profundidad no todos los gases están sometidos a la misma presión parcial. Por ejemplo, a 30 m, donde la presión es de 4 atm, la presión parcial del nitrógeno es de 3,12 atm, mientras que la del oxígeno es de 0,84 atm. El oxígeno es tóxico a presiones parciales superiores a los 1,6 atm, esto se produce cerca de los 66 m. Esta es otra de las complicaciones estudiadas en la sección de discusión y resultados, pero en el submarinismo existen combinaciones que juegan con el reparto y proporciones de gases (ej: Nitrox) para subsanar problemas relacionados con esta propiedad física.[2][5] Otras leyes termodinámicas:

Leyes que describen el reparto de gases en función de la temperatura:

- **Ley de Charles [4] $(P * \frac{V}{T} = Pa * \frac{V}{T})$ [Ec. 5]**

Una masa de aire al calentarse incrementa su presión o su volumen. Los submarinistas utilizan botellas de aire comprimido.

- **Ley de los gases perfectos de Gay-Lussac [4] $(P_1 \cdot T_2 = P_2 \cdot T_1)$ [Ec. 6]**

La presión es directamente proporcional a la temperatura [6] En el proceso de carga de las botellas hay un sobrecalentamiento de éstas, ya que al aumentar la presión también aumenta la temperatura.

Leyes termodinámicas que describen la difusión de gases:

- **Ley de difusión de Graham**

La velocidad de difusión de dos gases, en condiciones iguales de temperatura y presión, es inversamente proporcional a la raíz de sus masas molares. Dicho en otros términos, a igual temperatura y presión, la velocidad de difusión de un gas de moléculas «ligeras» se difunde más rápido que uno de moléculas «pesadas».

- **Ley de difusión de Fick:**

Describe la tasa de transferencia de un gas a través de una membrana (o capa de tejido). Ésta es proporcional a superficie expuesta así como a la diferencia entre las presiones de sus dos fases e inversamente proporcional al espesor de la membrana/tejido. Además la velocidad de difusión es proporcional a la constante de difusión (que depende del tipo de tejido y del gas que interviene).

3. EL CONTROL DE LA FLOTABILIDAD (EL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES) [2]

Cualquier cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza vertical y hacia arriba, el empuje, igual al peso del fluido que desaloja. Equipado con un vestido de neopreno, la flotabilidad del submarinista se convierte en positiva, ya que el peso sigue siendo aproximadamente el mismo pero el volumen es superior, de tal modo que la fuerza de empuje es más grande y es más difícil sumergirse. Para contrarrestar esta fuerza hace falta aumentar el peso del submarinista, por este motivo se usan cinturones con plomos a modo de lastres. El buen control de la flotabilidad y conseguir que sea neutra es necesario para evitar problemas de sobre esfuerzo y un sobre consumo de aire.

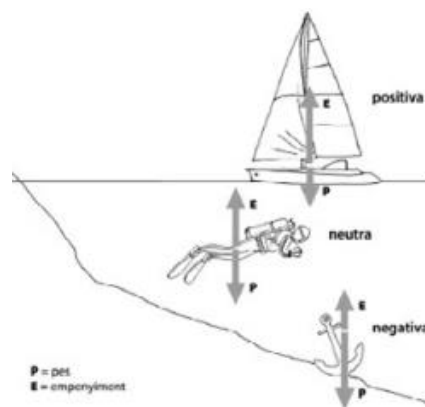


Figura 2. Principio de Arquímedes y flotabilidad [3]

4. LA PROPAGACIÓN DE ONDAS BAJO EL AGUA: LUZ Y SONIDO

La luz Las ondas de luz no se propagan igual en un medio líquido y en un medio gaseoso a causa de la distinta densidad del agua y del aire. Al penetrar en el agua la luz experimenta un cambio en su índice de refracción (n), (como podemos observar en la figura 3), produciéndose un cambio en su trayectoria y produciendo una impresión errónea en tamaño y posición del ojo.

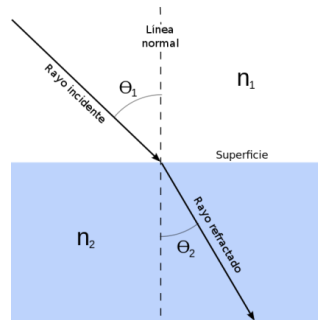


Figura 3. Cambio en el índice de refracción entre el medio aéreo y el acuático

Bajo el agua esta refracción es muy baja ya que hay muy poca diferencia entre la densidad del medio acuático y la del interior del ojo, de tal modo que la imagen se forma detrás de la retina y vemos el objeto borroso y se produce un efecto de hipermetropía. La máscara de buceo crea una cámara de aire entre el ojo y el objeto, de tal modo que corregimos esta refracción, pero los objetos se ven un 33% más grande y más cercano de como los veríamos fuera del agua [5].

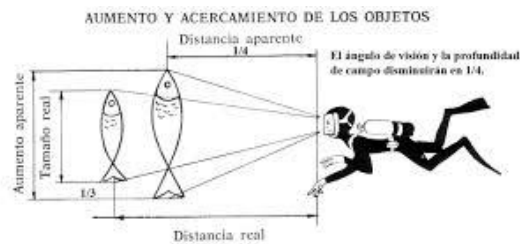


Figura 4. Visión bajo el agua [3]

Otra diferencia es la absorción de la luz, los rayos de luz en función de su longitud de onda son absorbidos por el agua a medida que aumenta la profundidad, por este motivo los colores dejan de verse a determinada profundidad. La absorción de la luz depende de la densidad del agua, de la temperatura o de las partículas que flotan, entre otros factores.

El sonido

El sonido es una onda mecánica que se transmite por vibración desde un foco emisor a un receptor en un medio transmisor, en este caso el agua marina. La propagación del sonido es más rápida bajo el agua que en el medio aéreo, ya que el agua es más densa, además de otros factores como reverberaciones, condiciones térmicas discontinuas. Mientras que en el aire viaja a una velocidad de unos 330 m/s, bajo el agua se puede propagar a unos 1.500 m/s, casi cinco veces más rápido. Bajo el agua los sonidos se oyen más fuertes y cercanos, y es más difícil determinar su origen. Cabe destacar que posteriormente hablaremos de los barotraumatismos óticos que suceden por la presión a la que se ve sometida nuestro aparato auditivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

PATOLOGÍAS Y COMPLICACIONES DERIVADAS DE SITUACIONES HIPERBÁRICAS (MEDIO SUBACUÁTICO)

El submarinismo como práctica de ocio ha aumentado en los últimos años, debido al mayor acceso de la población y los recursos cada vez más amplios de los que disponemos para este tipo de actividades “límite”, que antes estaban prácticamente reservadas a un entorno militar o meramente profesional. Aunque no debemos temer a la práctica de actividades deportivas como ésta, hay estudios que hablan de que el buceo recreativo es (por hora de actividad), 96 veces más peligroso que conducir un automóvil, así que debemos ser conscientes de sus riesgos y que requieren de conocimientos previos (siempre adquirir los títulos correspondientes para la práctica del submarinismo), y conocer y entrenar los protocolos a seguir en caso de complicación.

Las reglas físicas anteriormente explicadas a lo largo de la introducción tienen una influencia certera en el cuerpo de una persona en inmersión y conllevan una serie de efectos mecánicos y bioquímicos a considerar. Estas complicaciones generalmente son de origen disbárico, es decir, se deben a la diferencia de presión a la que nuestro organismo se ve sometido. Hay un sinnúmero de accidentes que pueden suceder en condiciones subacuáticas y existe toda una rama de la medicina que se dedica al estudio de las mismas: por ejemplo, problemas clínicos relacionados con la **hipotermia**, ya que el agua es un medio más denso que el aire como ya mencionamos en la introducción

(propagación de la luz como onda en el medio acuático) debido a mecanismos de conducción y convección propicia enormemente la pérdida de calor en el organismo humano. Además el aire se vuelve más denso y aumenta la conductividad térmica en el aparato respiratorio. Problemas en la visión también debidos al **cambio de índice de refracción** (propagación de la luz como onda), al igual que problemas en la audición.

Alteraciones en el aparato renal, ya que se produce un aumento de presión que produce una vasoconstricción periférica, aumentando la **resistencia en vasos periféricos**, lo cual deriva en un aumento la presión en la cápsula de Bowman del glomérulo de la nefrona que produce una elevada hemoconcentración sanguínea. También se observan alteraciones a nivel cardiovascular, ya que al sumergirnos se produce un reflejo de inmersión desde terminaciones faciales que estimulan el nervio vago y producen una bradicardia y el consecuente aumento del gasto cardíaco para compensar la presión sobre vasos periféricos ya que el corazón debe latir con más fuerza.

A nivel respiratorio se produce un **aumento del trabajo respiratorio** ya que el aire se vuelve más denso por el efecto de la presión y los pulmones deben trabajar con más fuerza para compensar esta situación.

Estas son algunas de las complicaciones que pueden surgir, a continuación pasaremos a enumerar y explicar brevemente las patologías derivadas de estas y otras complicaciones. Aunque son muchas y muy variadas, hemos resumido y seleccionado las principales y, por su origen y características, las hemos dividido en 4 grupos: Barotraumatismos, patologías en la esfera pulmonar, patologías bioquímicas y por último patologías biofísicas.

BAROTRAUMATISMOS:

Los gases se caracterizan por su expansibilidad, es decir, por la tendencia a ocupar el mayor espacio posible. La cohesión de las moléculas gaseosas entre sí es mínima, lo que explica la variabilidad en volumen y la pequeña densidad de los gases. En el descenso subacuático, la presión aumenta y disminuye el volumen que ocupan los gases, y ocurre lo contrario al ascender a superficie. Estas variaciones en el volumen del gas presente en interior del organismo, pueden causar lesiones tisulares, estos son los llamados barotraumatismos. [7] En la aparición de los barotraumatismos, ocurren las 4 siguientes condiciones:

El cuerpo humano se comporta como un compartimento con un fluido no compresible, pero hay regiones con presencia de gas o aire en su interior (senos y oído medio) que pueden ser el objetivo de lesiones por variaciones en el volumen. En segundo lugar, ya que las paredes que delimitan este compartimento son fundamentalmente rígidas, como ocurre en la envuelta y estructura ósea del oído no puede haber una compresión o expansión elástica compensatoria como puede suceder en vísceras como el intestino para amortiguar todos estos cambios y diferencias de presiones. En tercer lugar, al ser espacios estancos que no permiten la transitableidad del aire, ni su comunicación a otros compartimentos exteriores o interiores es más difícil la compensación de las presiones. Por último resaltar el papel de la ley de Boyle-Mariotte (ecuación 2), que nos habla de la proporcionalidad entre la presión y el volumen, dándonos una idea de la gravedad que puedan alcanzar las lesiones en proporción a la presión a la que se vea sometido el sujeto.

Los principales órganos objeto de estos traumatismos son los senos paranasales y el oído (barotraumatismos óticos). También pueden ocurrir en el aparato dental, vísceras y pulmones, y generalmente son debidos a un mal seguimiento de los protocolos y ascensos demasiado apresurados, disminuyendo la profundidad de inmersión sin aclimatar ni respetar los periodos de descompresión. [8]

ESFERA PULMONAR: SÍNDROME DE SOBREENFANSIÓN TORÁCICA:

Es un cuadro clínico agudo característico del buceo, y se suele producir al realizar una maniobra de escape precipitada durante una inmersión. Consiste en una sobreexpansión de la caja torácica por un aumento súbito del volumen debido al alivio de la presión sobre el aire repartido en la cavidad intrapulmonar. El aire sobreexpandido genera una hiperpresión intratorácica con insuflación alveolar que busca salida y puede ocasionar ruptura o desgarro del parénquima pulmonar [7]. La infiltración del aire al espacio virtual intrapleural puede causar un neumotórax lo que puede desembocar en un enfisema pulmonar. Este disbarismo puede ser embolígeno al crear burbujas aéreas vertidas al torrente sanguíneo, y puede causar incluso cuadros neurológicos y arteriocerebrales. [8]

PATOLOGÍAS BIOQUÍMICAS: [7]

El efecto biológico de un gas está relacionado con la presión parcial a la que es respirado. Durante la inmersión el sujeto se expone a un ambiente cuya presión se

incrementa a razón de 1 atm por cada 10 m de profundidad [tabla 1]. De la ley de Dalton [Ec 4], se deduce que la presión parcial de los gases en la mezcla que respiramos aumentará proporcionalmente por el aumento de la presión ambiental, por esta razón vamos a respirar algunos gases a una mayor presión de la normal a la que serían inocuos, convirtiéndose así en tóxicos para el organismo bajo estas nuevas condiciones. Se pueden producir intoxicaciones por cualquiera de los gases incluidos en la mezcla de aire que respiremos en profundidad: intoxicación por oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono (la cual estudiaremos más adelante), o incluso por gases nobles también incluidos aunque en menor proporción.[8]

PATOLOGÍAS BIOFÍSICAS: LA ENFERMEDAD DESCOMPRESIVA (E.D.)

Dado el tema que ocupa este trabajo, van a ser las más estudiadas, y aunque son muchas las alteraciones biofísicas que podrían producirse, básicamente conforman un cuadro clínico que puede resumirse en una sola patología estrella: *LA ENFERMEDAD DESCOMPRESIVA*

Se puede definir la E.D. como “la patología que sigue a una reducción de la presión ambiente suficiente como para provocar la formación de burbujas a partir de los gases inertes disueltos en los tejidos”. Es una enfermedad que aparece principalmente en buceadores, aunque también puede afectar a pilotos y trabajadores que lo hagan en ambientes a presión mayor que la atmosférica como los constructores de pilares de puentes y túneles submarinos. [7]

El origen de la E.D. es la formación de burbujas de gas inerte, que en el caso del aire comprimido es el nitrógeno (N_2) el cual ni se metaboliza ni combina con ningún sistema biológico y permanece disuelto aunque inactivo en la sangre y en el organismo durante la descompresión, debido a un fenómeno de saturación de gas. Mientras el buceador está en inmersión (fase de compresión), se produce un incremento de las presiones parciales de los gases inertes en alveolo, sangre, tejidos y células que van a originar la absorción y disolución (fase de saturación) de los mismos en el organismo. El N_2 es más liposoluble que hidrosoluble por lo que su difusión es mayor hacia los tejidos ricos en grasa. La menor tasa de perfusión de estos hace que tarden más tiempo en alcanzar el estado de saturación obedeciendo a mecanismos de difusión simple.

Según la ley de Henry [Ec. 3] la cantidad de gas absorbida es proporcional a la presión parcial del gas. En esta absorción también influyen el tiempo de exposición, el

coeficiente de solubilidad, la temperatura, el riego sanguíneo y la perfusión tisular. Cuando el buceador asciende a la superficie (fase de descompresión) ocurre el fenómeno inverso: los gases se liberan desde los tejidos al invertirse el gradiente de presión y salen hacia la sangre y los pulmones (fase de desaturación). Por tanto el buceador debe liberar el gas inerte sobrante durante las etapas finales de la emersión; la cantidad de este gas estará en función de la profundidad y duración de la inmersión.

Si el proceso de liberación del gas es muy rápido, bien porque se omita la fase de descompresión, o se haga de forma inadecuada, se pasa de la fase de solución a la de formación de burbujas (fase de sobresaturación) ya que la sobresaturación de algunos tejidos puede ser excesiva en comparación con otros ya desaturados. Cuando la relación entre estos dos conceptos sobrepasa un valor determinado (razón o cociente de sobresaturación) se alcanza un punto crítico de sobresaturación ("sobresaturación crítica") a partir del cual el gas cambia de estado y forma burbujas. Estas microburbujas pueden permanecer en los tejidos y, dependiendo de su número y volumen, pueden ser asintomáticas o provocar obstrucción de vasos, disrupción de tejidos, compresión nerviosa y lesiones cutaneolinfáticas. La E.D. es una patología de origen disbárico, y existe una terapia estrella capaz de hacer frente a este síndrome y que es de elección en estos casos: la Oxígeno terapia Hiperbárica (OHB)

MEDICINA HIPERBÁRICA

La medicina hiperbárica es una disciplina en la que se usa oxígeno puro al 100% en cámaras aisladas con el fin de restaurar los valores fisiológicos normales. Para conocer mejor la Medicina Hiperbárica, veamos primero una pequeña introducción histórica y las bases fisicoquímicas en las que se sustenta:

RECORRIDO HISTÓRICO

La Medicina Hiperbárica es conocida desde hace más de 300 años. En 1662 el clérigo británico Henshaw (fisiólogo y médico) intuye que el aumento de la presión del aire podía aliviar algunas lesiones agudas. En 1774, Joseph Priestley aísla oxígeno en estado gaseoso a partir del óxido rojo de mercurio. Entre 1837 y 1877 en varias ciudades de Europa se abrieron los llamados "Centros Neumáticos"; entre los que sobresalió el fundado por Bertini en Montpellier. En 1837 el cirujano francés Charles Gabriel Pravaz construye una Cámara Hiperbárica capaz de tratar a 50 pacientes.

En 1921 Orville J. Cunningham, profesor de anestesia en la Universidad de Kansas, construye la llamada “*Hospital de bola de acero*”, ubicada en Cleveland (Ohio), que podía presurizarse hasta 3 ATA.

En cuanto al plano científico, las primeras publicaciones científicas realmente relevantes corren a cargo de Paul Bert (1833-1886) y John Scott Haldane (1860-1936). En 1878, *Paul Bert* publica su obra “*La Pression barométrique: recherches de physiologie*”, donde describe los resultados de someter al organismo a variaciones de la presión atmosférica y de la presión de oxígeno. Se refiere también a la hipoxia y a la hiperoxia. Los experimentos realizados por *Paul Bert*, demuestran que respirar elevadas presiones parciales de oxígeno acaba por provocar convulsiones. Esta toxicidad que sufre el Sistema Nervioso Central se denomina *Efecto Paul Bert*. Por su parte, *John Scott Haldane*, fue el primer científico en aplicar la ciencia para predecir los resultados de la descompresión y sus métodos forman la base de la mayoría de las teorías de la descompresión modernas.

PRINCIPALES ENTIDADES REPRESENTATIVAS Y ORGANISMOS REGULADORES

En 1967, se crea en Estados Unidos la fundación Undersea and Hyperbaric Medical Society (UHMS). En Europa el principal organismo en la materia es La European Underwater and Baromedical Society (EUBS) fundada en 1971 y actualmente trabaja en conjunto con el European Committee for Hyperbaric Medicine (ECHM)

En España hay 2 organizaciones que promueven e informan acerca de estas prácticas, como son la Sociedad Española de Medicina Hiperbárica (SEMH) y el Comité Coordinador de Centros de Medicina Hiperbárica (CCCMH). Cabría también destacar que por su relativamente frecuente uso en rescates y ambientes subacuáticos y otras situaciones extremas por organismos militares como la Armada Española.

FUNDAMENTOS DE LA MEDICINA HIPERBÁRICA

La Medicina Hiperbárica debemos entenderla como una disciplina médica en pleno desarrollo, cuyas capacidades están en continua evolución y desarrollo.

El tratamiento con oxígeno hiperbárico es un tipo de terapia no invasiva, en la que el paciente respira tranquilamente oxígeno al cien por cien mientras permanece en una cámara presurizada a una presión mayor que la presión atmosférica ambiental. Involucra

la administración de oxígeno sistémico a presiones dos o tres veces superiores a la atmosférica.

El mecanismo de la Oxigenación Hiperbárica se basa en la ley de Henry de los gases [Ec 3], de tal forma que según las leyes físicas de estos, los cambios de presión a los que es sometido un organismo dentro de una cámara permite transportar el oxígeno que se haya disuelto en el plasma sanguíneo en una proporción casi directa a la presión parcial del gas, lográndose así, de esta manera, un incremento de diez a quince veces en la concentración de este elemento, produciendo a su vez un aumento cuatro veces mayor de difusión de oxígeno desde los capilares funcionales a las células, independientemente de que el nivel de oxígeno llevado por la hemoglobina de los glóbulos rojos permanezca igual. [9] El aire que respiramos contiene aproximadamente un 21% de oxígeno a nivel del mar, sin embargo obteniendo presiones parciales de oxígeno más elevadas al respirar oxígeno puro en el interior de una cámara hiperbárica (en concreto el ECHM establece que la OHB debe administrarse a una presión mínima de 2 ATA durante un tiempo no inferior 60 minutos), conseguiremos un efecto terapéutico. Se trata pues, de una terapia farmacológica, cuyo margen de aplicación está determinado por la presión máxima alcanzada, la duración y el número total de exposiciones.

La OHB posee la mayor acción anti-hipóxica conocida. Al encontrarse a una presión superior, el oxígeno se disuelve y transporta más fácilmente en la sangre, logrando una hiperoxigenación en todas las células del cuerpo. Los fenómenos fisiológicos que se producen en el organismo respirando oxígeno 100% a 3 ATA, incluyen el aumento del contenido del oxígeno disuelto y transportado por el plasma sanguíneo hasta 6.8 ml por cada 100 ml de sangre (tabla 2), lo que supone una cantidad hasta 23 veces mayor que a presión atmosférica. De igual manera, suponen un aumento de la Presión arterial de O_2 que puede alcanzar los 2.000 mmHg y de la presión venosa cerca de los 400 mmHg.

Tabla 2. Relación concentración de O_2 y presión ambiental [6]

OXÍGENO DISUELTO EN RELACIÓN A SU CONCENTRACIÓN Y PRESIÓN AMBIENTAL				
Presión Ambiental (Atmósferas Absolutas)	1 ATA	1 ATA	2 ATA	3 ATA
Concentración de Oxígeno (Porcentaje)	21 %	100 %	100 %	100 %
Presión Parcial de Oxígeno (Milímetros de Mercurio)	160 mmHg	760 mmHg	1.420 mmHg	2.280 mmHg
Oxígeno Disuelto (cada 100 ml de sangre)	0.3 ml	2.1 ml	4.4 ml	6.8 ml

La oxigenoterapia hiperbárica, genera una hiperoxia que proporciona apoyo inmediato al tejido hipóxico o mal perfundido en áreas de compromiso circulatorio, permitiendo la normalización bioenergética de la cadena respiratoria y la producción de energía a nivel mitocondrial. Un 1% se incorpora en las moléculas durante la oxidación de las aminas biógenas y las hormonas. Aproximadamente un 90% de oxígeno se utiliza en la formación de moléculas de ATP ricas en energía. Un 9% se gasta en remover el nitrógeno en los procesos de oxidación de aminoácidos.

En resumen, en tejidos afectados en los que el aporte de oxígeno se haya visto de reducido de manera absoluta (como por ejemplo patologías respiratorias, envenenamientos, embolismos, faltas de irrigación en tejidos, heridas traumáticas infecciosas gangrenadas etc.), el hecho de aumentar porcentualmente la relación de oxígeno va a tener un efecto positivo para mantener el correcto funcionamiento metabólico en las células, restaurando los valores de perfusión normales que se hayan podido ver comprometidos.

BASES FISICOQUÍMICAS DE LA OHB

En cuanto a la parte fisicoquímica, la acción de la OHB sobre el organismo se basa en 2 principales efectos que son regidos por leyes básicas de la fisicoquímica: el efecto mecánico de reducción del volumen de los gases en relación al incremento de la presión, **efecto volumétrico** (Ley de Boyle-Mariotte), y en el aumento de la presión parcial de oxígeno en todos los tejidos, **efecto solumétrico** (Ley de Dalton y ley de Henry). [Ec. 4 y 3]

En ambiente hiperbárico la oxigenación se incrementa tanto por la concentración de O₂ administrada como por el aumento de la presión absoluta, a diferencia de la oxigenoterapia normobárica que únicamente maneja las concentraciones. El contenido de oxígeno transportado en sangre depende del grado de saturación de la hemoglobina (Hb) y su cantidad disuelta en plasma. La saturación al 100% de la Hb se traduce en un incremento del O₂ disuelto en el plasma. Acorde a la ley de Henry [Ec.3], al respirar oxígeno puro en medio hiperbárico se produce un aumento progresivo de la presión arterial de oxígeno que puede superar los 2.000 mmHg, a un valor ambiental de 3 atmósferas absolutas (ATA). El volumen de oxígeno disuelto y transportado por el plasma, mínimo a presión atmosférica, aumenta más de 22 veces [tabla 3]. De ello se deriva, como acción directa, un aumento de la presión venosa de oxígeno, que puede

superar los 600 mmHg, y de presión tisular de oxígeno, que puede sobrepasar los 400 mmHg [tabla 2]. El organismo se protege de la excesiva cantidad de oxígeno produciendo radicales libres oxigenados, sobre cuyo efecto la OHB actúa como modulador, y experimentando una vasoconstricción periférica dosis-dependiente. A pesar de la disminución de flujo que esto comporta, la gran hiperoxia logra siempre mantener en todos los casos un saldo de oxígeno favorable; es decir, se trata de una vasoconstricción no hipoxemiante. Fisiológicamente, si aumenta la presión, se inicia un proceso de sobresaturación del líquido (saturación en ley de Henry) al aumentar la concentración de gases disueltos. En cambio sí disminuye, se libera el gas disuelto del líquido hasta llegar a un estado de insaturación. Por tanto, el aumento de la presión parcial de O₂ conlleva el incremento de la cantidad disuelta en el plasma, aumentando su aporte a los tejidos independientemente del grado de saturación de la Hb.

En la tabla 3 se recogen las respuestas alveolar y arterial a las modificaciones de la presión y concentración de O₂. Se aprecia el notable incremento de la cantidad de oxígeno disuelto a 3 ATA suficiente para cubrir las demandas del organismo, con lo que la sangre venosa se arterializa. Asimismo la diferencia arteriovenosa de la presión parcial de O₂ incrementa su gradiente de difusión, mejorando la oxigenación tisular:

Tabla 3. Respuesta alveolar a las modificaciones de presión [10]

RESPUESTA ALVEOLAR Y ARTERIAL A LAS MODIFICACIONES DE LA PRESIÓN Y CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO				
Presión barométrica	1 ATA	1 ATA	2 ATA	3 ATA
Gas inspirado	aire	O ₂	O₂	O₂
PaO ₂ (mm Hg)	98	600	1218	1864
Contenido arterial de O ₂ (ml/100ml)	19,3	21,3	23,4	25,5
PvO ₂ (mm Hg)	39	48	68	360
Contenido venoso de O ₂ (ml/100ml)	14,3	16,3	18,4	20,5
Contenido de O ₂ disuelto (ml/100ml)	0,32	1,7	3,7	5,6

INDICACIONES

El efecto hiperóxico producido por la Oxigenoterapia Hiperbárica y sus escasas contraindicaciones, podrían permitir unas aplicaciones muy variadas en situaciones de hipoxia tisular, de forma que, en teoría, toda enfermedad en la que exista una reducción del aporte de oxígeno o bien una utilización insuficiente o inadecuada potencialmente se beneficiaría de un tratamiento de OHB.

La ECHM, establece que la OHB implica la administración de oxígeno a una presión no inferior a 2 bar o ATA, y una duración mínima de 60 min y enumera las indicaciones aceptadas para la OHB divididas en tres tipos:

Tipo 1: Muy recomendable, de importancia crítica para el resultado final del paciente: Fracturas abiertas con daños por aplastamiento, Prevención de la Osteorradionecrosis tras extracción dental, Osteorradionecrosis mandibular, Radionecrosis de tejidos blandos (cistitis, proctitis), ***Enfermedad Descompresiva**, ***Embolismo Gaseoso**, ***Infecciones bacterianas anaerobias o mixtas**, ***Envenenamiento por Monóxido de Carbono (CO)**. ***Destacadas las 4 principales indicaciones que revisamos en este trabajo**

Tipo 2: Recomendable, influye positivamente en el resultado final del paciente: Lesiones de pie diabético, Necrosis de la cabeza femoral, Injertos cutáneos comprometidos y colgajos musculocutáneos, Oclusión de la arteria central de la retina, Aplastamiento sin fractura, Lesiones radio inducidas de tejidos blandos (distintos a cistitis y proctitis), Cirugía e implante en tejido irradiado (tratamiento preventivo), Úlcera Isquémica, Osteomielitis Crónica Refractaria, Quemaduras de 2º Grado y más del 20% del cuerpo, Neumatosis Quística Intestinal, Neuroblastoma en Fase IV

Tipo 3: Opcional, la Oxigenoterapia Hiperbárica es una terapia a considerar. Daño cerebral (Lesión cerebral aguda y crónica, accidente cerebrovascular crónico, encefalopatía post-anóxica), Lesiones radio inducidas de laringe, Lesiones radio inducidas del Sistema Nervioso Central, Síndrome de Reperusión tras procedimiento vascular, Reimplantación de miembros, Heridas no cicatrizantes secundarias a procesos sistémicos, Enfermedad de células falciformes, Cistitis intersticial

Indicaciones descritas para la OHB en la web de la Sociedad Española de Medicina Hiperbárica

A continuación revisaremos brevemente otras aplicaciones alternativas de la OHB, debidas a otros mecanismos que resultan interesantes y a tener en cuenta en sus posibles usos terapéuticos.

INTOXICACIÓN POR MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El CO se produce en forma endógena en las anemias hemolíticas y de forma exógena como resultado de la combustión incompleta de elementos carbonados y posteriores envenenamientos. En estos casos de envenenamiento por monóxido de carbono, el CO ingresa a los pulmones, rápidamente pasa a la sangre uniéndose firmemente a la

hemoglobina, formando la carboxihemoglobina COHb (unión 200-250 más estable que la oxihemoglobina -OHb-), a la mioglobina del músculo (40 veces más estable que la OHb) y hasta hace algunos años, observaciones in vitro, indicaban que producía el bloqueo de la cadena respiratoria mitocondrial, uniéndose a la citocromo oxidasa a₃ y al citocromo oxidasa P-450 lo que lleva al bloqueo de la oxidación celular con la consecuente hipoxia. Dado que el cerebro y el corazón son órganos que poseen un elevado índice metabólico, son los más frecuentemente afectados. Una concentración del 0,06% en el aire inspirado alcanza para bloquear el 50% de la Hb. Circulante. Recientes estudios de otras funciones celulares in vivo, sugieren que ocurre una lipoperoxidación celular, probablemente debido a la hipoxia celular transitoria. También ocurre desplazamiento hacia la izquierda de la curva de disociación de la Hb, lo que dificulta la liberación del O₂ a los tejidos. [9] Para liberar al Monóxido de Carbono de la Hemoglobina son necesarias altas concentraciones de oxígeno a presión ambiental elevada para destruir el enlace formado. La OHB no sólo aporta el oxígeno necesario, sino que además contrarresta la hipoxia o anoxia que puede presentarse en los tejidos. La oxigenación hiperbárica (OHB) proporciona oxigenación tisular debido a la elevada PO₂ que se logra al disolverse el O₂ en el plasma, y por la rápida disminución del edema cerebral [10]. El oxígeno hiperbárico favorece la disociación de la COHb, disminuyendo notoriamente su vida media y la eliminación del CO del organismo, a la vez que oxigena los tejidos hipóxicos, libera la citocromooxidasa a₃ y la p450 desbloqueando la cadena respiratoria, inhibe la peroxidación lipídica. Aplicar de forma precoz la OHB reduce drásticamente la mortalidad en estos casos y disminuye la incidencia de secuelas neurológicas producto de la hipoxia. Además, previene el llamado síndrome tardío que se presenta entre los 3 días y las 3 semanas posteriores a la intoxicación.

GANGRENA GASEOSA (MIONECROSIS COSTRIDIAL)

Normalmente esta infección se produce como consecuencia de la contaminación de un foco con clostridios, especialmente en pacientes con fracturas expuestas y/o con lesiones que implican una importante pérdida de tejidos blandos.

Para que ocurra la infección clostridial tienen que converger las siguientes condiciones: a) presencia de clostridios; y b) una tensión de oxígeno disminuida en la región, como consecuencia de una disminución circulatoria o por un gran sufrimiento tisular con necrosis. Los clostridios, producen una gran cantidad de toxinas, pero la más importante

desde el punto de vista invasivo, es la alfa toxina, que es una enzima proteolítica. [9] La OHB posee acción bactericida sobre algunos gérmenes anaerobios esporulados, actúa directamente sobre los clostridios (y demás gérmenes anaerobios) ya que éstos carecen de enzimas tales como las catalasas y peroxidasas, entre otras, que actúen sobre la gran variedad de radicales libres que se producen durante la terapia hiperbárica, haciendo que mueran estas bacterias que producen la gangrena. [10]

EMBOLIA GASEOSA O AEROEMBOLISMO

Podemos definir al aeroembolismo, como la irrupción de gas en el torrente circulatorio arterial, lo que ocasiona diversos grados de isquemia y/o sufrimiento tisular. Si bien este cuadro está bien descrito entre las complicaciones del buceo, también se lo puede ver como complicación de actos quirúrgicos, diagnósticos y terapéuticos. El gas introducido en el sistema arterial, llegará al SNC o a la circulación coronaria, produciendo la patología. Por ejemplo, una herida penetrante en el tórax, puede lesionar una vena pulmonar, la que se pone en contacto con la atmósfera, permitiendo así que aire se introduzca en ella y se dirija al corazón de ahí al SNC o durante la diástole, a la circulación coronaria. Por supuesto, que ésta no es la única forma de que se produzca un aeroembolismo, también existe el que llamamos iatrogénico. [10] Al recomprimir al paciente, rápidamente disminuye el tamaño de la burbuja, de acuerdo con la ley de Boyle-Mariotte, disminuye el tamaño del émbolo. Al hacerle respirar oxígeno hiperbárico, se crea un gradiente positivo alrededor de la burbuja, lo que hace que ésta disminuya de tamaño por difusión del gas contenido dentro de ella, hacia afuera; a su vez, se logra una elevada presión parcial de oxígeno, lo que va a combatir la hipoxia tisular, y a disminuir el edema, como consecuencia de la hipoxia, lo que mejora aún más la microcirculación.

CONCLUSIÓN

Queda demostrado que la oxigenoterapia hiperbárica es la terapia de elección perfecta en caso de lesión disbárica, durante la cual, se restauran los valores de presión parcial normales, se favorece el intercambio gaseoso de oxígeno, revirtiendo la hipoxia y el reparto de gases en el plasma sanguíneo. Además, cabe destacar la utilidad de esta práctica clínica en otras patologías comunes como trastornos circulatorios, infecciones, intoxicaciones, enfermedad diabética y artropatías, tanto como tratamiento como

profilaxis de las mismas; de hecho podríamos tener en cuenta la OHB como medida de profilaxis y como terapia coadyuvante en todas estas patologías. Sin embargo no podemos dejar a un lado el plano económico. Se debería evaluar bien cada caso en el que se plantee el uso de esta técnica, ya que es una terapia cara, y a nivel nacional son pocas las cámaras hiperbáricas activas y disponibles, por lo que quizá sea esta la explicación de que haya quedado más relegada a un uso privado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] HALLS, M. I KRESTOVNIKOFF M. Submarinismo. Madrid: Guías Visuales Espasa, 2006.
- [2] COUSTEAU, J.Y. (dir.). Cousteau: Enciclopedia del Mar. Barcelona: Ediciones Folio, vols. 10 y 11, 1993.
- [3] Imágenes capturadas de la página web del Aquarium de Barcelona.
- [4] LEVINE, Ira N. (1978). Physical Chemistry, University of Brooklyn: Mcraw-Hil.
- [5] Aptitud psicológica para el buceo: Modelo causal en ámbito militar. Tesis doctoral Joaquín Colodro Plaza.
- [6] Efecto de la presión hiperbárica y diferentes presiones parciales de gases sobre la modulación vegetativa de la respuesta cardíaca: Aplicación de métodos lineales y no lineales en el análisis de VFC. Tesis doctoral presentada por D. Eduardo Barbosa Almeida.
- [7] SALAS PARDO, Emilio: Manual de Medicina Hiperbárica. Servicio de medicina subacuática del Hospital General de Defensa.
- [8] GALLAR, Fernando: Medicina subacuática e hiperbárica.
- [9] Bases y fundamento de la medicina hiperbárica y oxigenoterapia. A Jordi Desola CRIS - Unitat de Terapèutica Hiperbàrica. Hospital Cruz Roja Barcelona Volumen LIV, nº 1260, 5-11 de junio de 1998.
- [10] CHABÁS J.: Oxigenoterapia: enfermedades de los aparatos respiratorio, circulatorio, digestivo.
- Organismos y páginas webs consultadas: Sociedad Española de Medicina Hiperbárica (SEMH), Comité Coordinador de Centros de Medicina Hiperbárica (CCCMH), SARC buceo: Fundamentos de buceo, BuceoDonosti, Buceador.es