

Prevención de riesgos en prácticas de buceo profesional

Manuel Bernaola Alonso

Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. INSHT

Tanto el buceo profesional o trabajo en medio hiperbárico, que abarca sectores de la producción muy variados, como el buceo deportivo, que ha experimentado un amplio desarrollo respecto a los lugares y actividades, cuentan con un gran número de buceadores. Sin embargo, la práctica profesional se caracteriza por presentar unos riesgos muy específicos como son los trastornos disbáricos y de una peligrosidad contrastada, recogida en la legislación. No obstante, la prevención de riesgos laborales en este sector apenas está desarrollada, siendo sus riesgos y patologías desconocidas incluso para algunos de los profesionales de la medicina del trabajo y la prevención.

1. Introducción

En la actualidad, el buceo profesional, es decir, el trabajo en medio hiperbárico, abarca sectores de la producción tales como la extracción de hidrocarburos, ingeniería civil, mantenimiento de puertos, infraestructuras hidráulicas y centrales de energía (hidroeléctricas, térmicas y nucleares), construcción naval, acuicultura, salvamentos o reflotamientos y la investigación científica (geológica, biológica, arqueológica...). Además, hay que añadir el desarrollo que ha experimentado el buceo deportivo y los centros que ofrecen este tipo de servicios turísticos, que cuentan con un gran número de buceadores [1].

El buceo profesional se caracteriza por presentar unos riesgos muy específicos como son los trastornos disbáricos y de una peligrosidad contrastada, como se refleja en la legislación:

- Trabajos incluidos en el Anexo I del Reglamento de Servicios de Prevención: "g) Actividades en inmersión bajo el agua", como actividades especialmente peligrosas [2].
- Listado del RD 1299/2006 Cuadro de Enfermedades Profesionales: "2. Enfermedades profesionales producidas por agentes físicos: H. Enfermedades provocadas por compresión o descompresión atmosférica. Trabajos subacuáticos en operadores de cámaras submarinas hiperbáricas con escafandra o provistos de equipos de buceo autónomo" [3].
- Anexo II (Relación no exhaustiva de los trabajos que implican riesgos especiales para la seguridad y la salud de los trabajadores) del RD 1627/1997, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad

y salud en las obras de construcción: "5) Trabajos que expongan a riesgo de ahogamiento por inmersión. 7) Trabajos realizados en inmersión con equipo subacuático. 8) Trabajos realizados en cajones de aire comprimido" [4].

Sin embargo, la prevención de riesgos laborales en este sector apenas está desarrollada, siendo sus riesgos y patologías desconocidas incluso para algunos de los profesionales de la medicina del trabajo y la prevención.

El hábitat de sobrepresión, ya sea seco o húmedo, causa tales variaciones de volumen en las cavidades gaseosas del organismo (oídos, senos y sobre todo pulmones) que pueden dar lugar a barotraumas, tanto en la inmersión o descenso como en la emersión o ascenso [5].



A veces, se ignoran los riesgos bioquímicos debido a que el gas comprimido que permite respirar bajo el agua se hace más tóxico con la profundidad. Así, un gas que respirado en superficie no causa daño puede ser mortal bajo el agua. Cada gas (oxígeno, nitrógeno, anhídrido carbónico, helio) en profundidad tiene un umbral de toxicidad [6].

La presión absoluta a soportar en un medio hiperbárico es la suma de la presión atmosférica (1 bar) y la presión hidrostática (1 bar más por cada 10 metros de profundidad). Por este motivo cuando más se notan las variaciones de presión con la profundidad es en las primeras etapas de la inmersión.

Los accidentes de descompresión se deben a la disolución de los gases inertes (nitrógeno, helio) en los tejidos y dependen de la profundidad y de los tiempos de intervención. Cuando se ha producido una cierta saturación de gas inerte en los tejidos es necesario hacer en el ascenso paradas estáticas para dar tiempo a su eliminación. Si se omiten o se acortan es-

tas paradas, fuera de lo programado, se producirán burbujas intravasculares y/o extravasculares. La medida terapéutica para este tipo de accidentes consistirá en tratar a la víctima en una cámara hiperbárica para iniciar la descompresión de una forma lenta y progresiva.

Los accidentes biofísicos o "bands" son frecuentes y afectan al aparato locomotor causando dolores musculoesqueléticos provocados por la formación de burbujas de gas inerte en los tejidos periarticulares.

En el buceo deportivo la estimación de los tiempos y las profundidades de la inmersión se hacen en base a no necesitar de paradas de descompresión. En acuicultura los tiempos máximos de inmersión recomendados de buceo sin descompresión pueden alcanzar los 50 minutos a 20 metros, 15 minutos a 36 metros y 5 minutos a 57 metros.

Al referirse a la física de los gases en el buceo habrá que tener en cuenta las leyes de Boyle (para el control de la ve-

locidad de ascenso, no aguantar la respiración mientras se asciende y considerar que buceos repetitivos a poca profundidad pueden ser tan peligrosos como uno a mayor profundidad), Henry y Dalton. En consecuencia, durante el buceo es raro tener problemas con la toxicidad del oxígeno al respirar aire comprimido, pero sí los hay con el nitrógeno a partir de los 35 metros. En relación con la flotabilidad hay que tener presente el principio de Arquímedes.

El ahogamiento, que es otro de los accidentes típicos durante la inmersión, puede tener un origen mecánico o bioquímico, siendo la fase más peligrosa el ascenso a la superficie y por eso hay que respetar las paradas de descompresión.

El submarinista puede padecer alteraciones en la salud a largo plazo (molestias funcionales, dolor de oídos, rigidez, limitación en los movimientos, atrofia muscular) aun sin haber padecido problemas agudos o accidentes de hiperbarismo. Las enfermedades más frecuentes asociadas a la actividad son

los reumatismos, infecciones de senos, pérdidas de audición y la necrosis disbárica causadas por barotraumas [6, 7].

Los principios preventivos a respetar en este tipo de actividad son:

- Formación inicial previa y certificado de aptitud pertinente.
- Respetar las tablas de inmersión en las que se indican los tiempos de descompresión en las distintas etapas.
- Cumplir con la legislación vigente.

El Instituto de Seguridad y Salud Laboral de Murcia ha publicado dos fichas divulgativas (FD - 02/2008 y FD - 09/2008) sobre normas generales de seguridad y obligaciones de la empresa y mandos en las que, de forma resumida y concisa, presentan el contenido más relevante de la Orden de 14 de octubre de 1997 por la que se aprueban las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas [8, 9]. En el anexo I de esta Orden se dan las definiciones de los distintos aspectos relacionados con la actividad subacuática.

2. Modificaciones ambientales en el medio acuático

Con la profundidad el medio acuático sufre ciertas modificaciones respecto de la superficie [6,10]:

a) Absorción del espectro solar.

Los colores desaparecen a medida que la profundidad aumenta (a 10 metros desaparece el rojo, a 30 metros, el amarillo y a los 40 sólo se aprecian el gris y el azul verdoso). Así, la sangre será verde a menos que se encienda una linterna. A 400 metros la oscuridad es absoluta.

La cantidad de luz reflejada por el agua, mayor si hay pequeño oleaje, dependerá de la situación del sol:

- En la mañana se refleja del orden del 35%.
- A las 10 de la mañana, un 17%.
- Al atardecer, un 35%.

b) Cambios en la refracción de la luz. Se produce una distorsión visual similar a la del hipermetope (imagen borrosa al formarse detrás del centro óptico) y los objetos se ven más cerca de lo que están. Se corrige usando máscara o gafas de buceo.

La luz al contacto con el agua sufre refracción. Igual que una moneda sumergida en el fondo de un vaso con agua se ve desde fuera más grande, lo mismo ocurre en las inmersiones con los objetos que se ven más próximos y grandes.

c) Aumento de la velocidad del sonido. Dificulta la orientación por estímulos auditivos, lo que obliga a recurrir a otros sentidos.

d) Aumento de la densidad. Dificulta la progresión en su interior y produce sensación de ingravidez. La densidad del agua es 800 veces mayor que la del aire.

e) Disminución de la temperatura. El agua del mar está entre 12° C y 26° C y a 40 metros, entre 12° C y 17° C (convección y conducción), muy por debajo de la temperatura corporal, de forma que sumergido hay una pérdida calórica del orden de 25 veces mayor que en condiciones normales, lo que limita la permanencia en profundidad. En el buceo profesional se llegan a soportar temperaturas de 0° C con sensación de abandono o de estar perdido y por eso se necesitan trajes de supervivencia o isotermos.

Para permanecer en aguas por debajo de 27° C se recomienda usar traje y a 15° C es indispensable un buen aislamiento térmico. Los trajes pueden ser:

- **Abiertos o húmedos** de neopreno, cortos o largos, no herméticos, resistentes y de espesor variable. Se usan hasta temperaturas de 10° C.
- **Secos de volumen variable o constante:** mantienen el cuerpo fuera del contacto con el agua y limitan la pérdida de calor corporal. El aire en su interior causa efecto ventosa por lo que se necesita un mecanismo de aire insuflador que compense la presión exterior en la inmersión. En la emersión ocurre el efecto contrario y tiende a hincharse en exceso. Se usan en buceo profesional de duración media y en buceo deportivo de aguas frías.
- **Secos calientes** con un conducto umbilical que proporciona calor, mezcla respiratoria y comunicación.

En situaciones comprometidas y trabajos que requieran varias inmersiones hay que adoptar las medidas de supervivencia térmica y, además, se necesitan embarcaciones de apoyo y rescate dotados de equipos de recuperación hipotérmica [11].

3. Técnicas de buceo. Buceo profesional

Hay dos formas o técnicas básicas de buceo:

- Buceo semiautónomo con suministro de aire respirable desde la superficie a través de una manguera de unos 100 metros, ya sea de flujo continuo para cascos o de demanda para máscaras y reguladores tipo "Hooka".
- Buceo autónomo, bien porque el buzo incorpora el sistema de respiración con aire o mezclas sintéticas (tipos abierto, semicerrado y cerrado) o el buceo de apnea.

El buceo con suministro de aire desde la superficie, ya sea con escafandra clásica Helmet o con equipo Hooka, soluciona el problema de los trabajos complejos en inmersiones de larga duración al liberar al buceador de preocuparse del equipo, dándole mayor libertad para manipular las herramientas y la protección personal, a cambio de limitar sus desplazamientos.

Presenta ciertas ventajas (suministro ilimitado de aire, comunicación con superficie y mayor seguridad por la ayuda en imprevistos como enganches o retrasos en el ascenso, posibilidad de usar sistemas de vídeo, en aguas turbias da apoyo psicológico y el umbilical es una vía segura para el retorno) pero también inconvenientes (más equipamiento, embarcación de apoyo de mayor porte y en operaciones importantes se precisa más personal auxiliar).

Las condiciones del medio (turbidez, contaminación, profundidad) determinan el material a utilizar. Así, en aguas turbias y contaminadas se recomienda el uso de traje seco y máscara facial con presión positiva y lo normal, en estos casos, es usar dos medios de suministro de aire, empleando un compresor de baja presión y una batería de botellas como fuente auxiliar y, además, el buzo deberá llevar una botella de seguridad. Hasta 40 metros de profundidad se utiliza aire comprimido o enriquecido pero en intervenciones profundas, de hasta 90 metros, se emplean mezclas ternarias (He/N/O) y binarias (He/O) con tablas de descompresión adecuadas.

El buceo profesional de intervención con suministro de aire desde superficie, que conlleva un equipo más pesado que el buceo deportivo, permite mayor profundidad y tiempo de permanencia bajo del agua con un mayor control de la descompresión. Así, se puede permanecer,

La seguridad en este tipo de trabajos requiere establecer previamente los procedimientos de emergencia. Por lo tanto, en cualquier intervención de buceo profesional hay que elaborar un plan de emergencia y evacuación

en teoría, hasta 5 horas en inmersiones a 10 m de profundidad.

En el buceo con complejo de saturación para tiempos superiores, casos poco frecuentes y que implican la saturación total de los tejidos, se suelen realizar trabajos de intervención en operaciones de reflote, obras hidráulicas y las que requieran inmersiones prolongadas, profundas y en medios hostiles. En estos casos las paradas de descompresión son obligadas si bien al ser el tiempo constante da mayor seguridad y puede efectuarse una descompresión de menos riesgo que si se hacen varias sucesivas.

La seguridad en este tipo de trabajos requiere establecer previamente los procedimientos de emergencia. Por lo tanto, en cualquier intervención de buceo profesional hay que elaborar un Plan de

emergencia y evacuación. El jefe de equipo tiene que haber realizado un curso de primeros auxilios para accidentes de buceo y durante la inmersión siempre debe estar preparado un buzo de socorro.

En el buceo autónomo, el buzo se desplaza libremente en el agua sin conexión con la superficie. Es el caso más frecuente en todas las modalidades deportivas, en las que se alcanza una profundidad máxima de 30 metros. Puede ser:

- Buceo con aparatos
- Buceo con mezcla de gases
- Apnea

Este tipo de buceo con aparatos (Scuba) consiste en realizar la inmersión con la ayuda de un equipo autónomo de respiración de forma que la reserva de aire determina el tiempo bajo el agua. Entre 25 y 40 metros, se recomienda utilizar trajes secos y para respirar una mezcla nitrox diferente al aire. Se trata de un aire enriquecido, con mezclas de oxígeno y nitrógeno, que contiene más oxígeno que el aire ordinario (Nitrox I con 32% de oxígeno / 68% de nitrógeno, Nitrox II con 36/64).

La reducción de nitrógeno en el gas respirado reduce el riesgo de tener accidentes de descompresión y permite aumentar la profundidad y los tiempos de permanencia en el fondo sin necesidad de efectuar paradas obligadas en el ascenso. No obstante, como el oxígeno empieza a ser tóxico a presiones superiores a 1,6 bar, el Nitrox puede ser peligroso a ciertas profundidades y habrá que respetar la profundidad permitida según sea la composición de la mezcla a respirar.

Se admite usar como máximo una mezcla Nitrox (50/50) para inmersiones de una hora a 35 metros sin descompresión en el ascenso. Entre las ventajas del

uso de una mezcla de gases enriquecida cabe citar:

- Menores tiempos de descompresión.
- Menores intervalos en superficie para eliminar el nitrógeno residual en las inmersiones sucesivas.
- Menor tiempo hasta poder volar, una vez finalizada la intervención.

El buceo autónomo a pulmón o Apnea es una práctica en la que el buzo aguanta la respiración sin ningún aparato de ayuda y se desplaza libremente en el agua sin conexión con la superficie a la que vuelve para tomar aire. Es el caso más frecuente en la práctica deportiva, donde se alcanzan profundidades más allá de los 30 metros. Se dan hasta seis categorías (Apneas estática, dinámica, libre, de pesos constante o variable y sin límites).

Para la práctica del buceo profesional, sin fines recreativos, hay que seguir una formación y un entrenamiento específico ya que se dan ciertas condiciones:

- Mayores profundidades o tiempos de inmersión.
- Uso de mezclas de gases.
- Escafandras o sistemas autónomos de respiración especiales.
- Equipos de apoyo (humanos, médicos y técnicos).

Las dos categorías principales de buceo profesional son el buceo técnico (científico, comercial o industrial, documental, naval y policial) y el buceo militar.

Entre las actividades requeridas a buzos profesionales cabe destacar:

- Recogida de algas.
- Filmación e informes NDT.
- Estudios y recogidas de muestras.
- Construcción submarina.
- Reparaciones en presas y pantanos.

- Salvamento de buques y embarcaciones.
- Mantenimiento de piscifactorías.
- Soldadura y corte subacuático.
- Revisiones en plantas nucleares.
- Trabajos en aguas contaminadas.
- Voladuras subacuáticas.

Para la definición de buceo técnico, que es controvertida, se suelen tener en cuenta diversos criterios, tales como:

- La profundidad.
- Uso de recirculadores (rebreather) semicerrados o cerrados.
- Uso de mezclas de aire enriquecidas (Nitrox) o mezclas de gases distintos al aire (Trimix, Heliox, Nitreliox, Hidreliox...).
- Buceo en grutas si se superan las zonas alcanzadas por la luz del día o con más de 30 metros hasta una salida o cámara de aire.
- Necesidad de paradas descompresivas.

Hay quien defiende que el buceo técnico exige un equipo y entrenamiento específicos y que no tiene continuidad con el buceo recreativo, pero otros piensan que no está claro que el "buceo técnico" no sea sino una forma más avanzada.

Una definición poco restrictiva, adoptada por la Asociación Profesional de Instructores de Buceo (PADI), es considerarla como la inmersión en la que el buceador no puede salir directamente a la superficie si se presenta una emergencia. Para buceadores noveles se establece una profundidad límite recomendada de 18 metros y no se consideran, en ningún caso, recreativas las inmersiones que van más allá de 40 metros.

En la práctica, se puede considerar buceo técnico el que sobrepasa en tiempo y profundidad al de Scuba deportivo y agrupa las intervenciones que se hacen con mezclas de gases y las que requieren paradas de descompresión en el ascenso al alcanzar los 50 metros.

En el **Buceo autónomo**, el equipamiento básico constará de:

- Gafas o facial ligero de buceo.
- Dos reguladores independientes.
- Un sistema de control de la presión del aire de la botella, la cual se recomienda esté dotada de un mecanismo de reserva.
- Guantes de trabajo.
- Cuchillo.
- Aletas.
- Recipientes con doble grifería.
- Chaleco hidrostático equipado con un sistema de hinchado bucal y otro automático procedente de la botella de suministro principal o de un botellín anexo.
- Traje húmedo o seco de volumen variable en función de las condiciones ambientales.
- Reloj.

Hay quien defiende que el buceo técnico exige un equipo y entrenamiento específico y que no tiene continuidad con el buceo recreativo

- Profundímetro u ordenador.
- Cinturón de lastre.
- Brújula.
- Juego de tablas oficiales plastificado o sistema digital computarizado equivalente.

En caso de llevar traje seco de volumen variable, éste debe llevar un sistema de hinchado desde la botella de suministro principal y una válvula de purga, no siendo obligatorio, en este caso, el uso de un chaleco hidrostático.

En **Buceo con suministro desde superficie**, el equipamiento constará de:

1) Un **cuadro de distribución de gases** para al menos dos buceadores, con un sistema de alimentación principal de suministro respirable y al menos otro de reserva, batería de botellas industriales, en el que se controle la presión de la batería o suministro principal, la presión enviada al buceador, además de su regulación, la profundidad del buceador y un sistema para pasar inmediatamente a la batería de emergencia.

2) **Umbilicales**, que estarán fabricados y homologados para uso específico del buceo. En caso de intervenciones desde la superficie, su longitud total será al menos un 50 % superior a la profundidad de trabajo.

3) **Comunicaciones**: serán por telefonía por cable. Tendrá línea de comunicación buceador-superficie, superficie-buceador, buceador-buceador y un sistema de alimentación eléctrica de emergencia.

4) **Equipo de los buceadores:**

- Máscara facial a demanda, o casco a demanda o flujo continuo, equipado con comunicaciones. La máscara o el

casco, con o sin un pequeño distribuidor, deben ir equipados con una válvula antirretroceso.

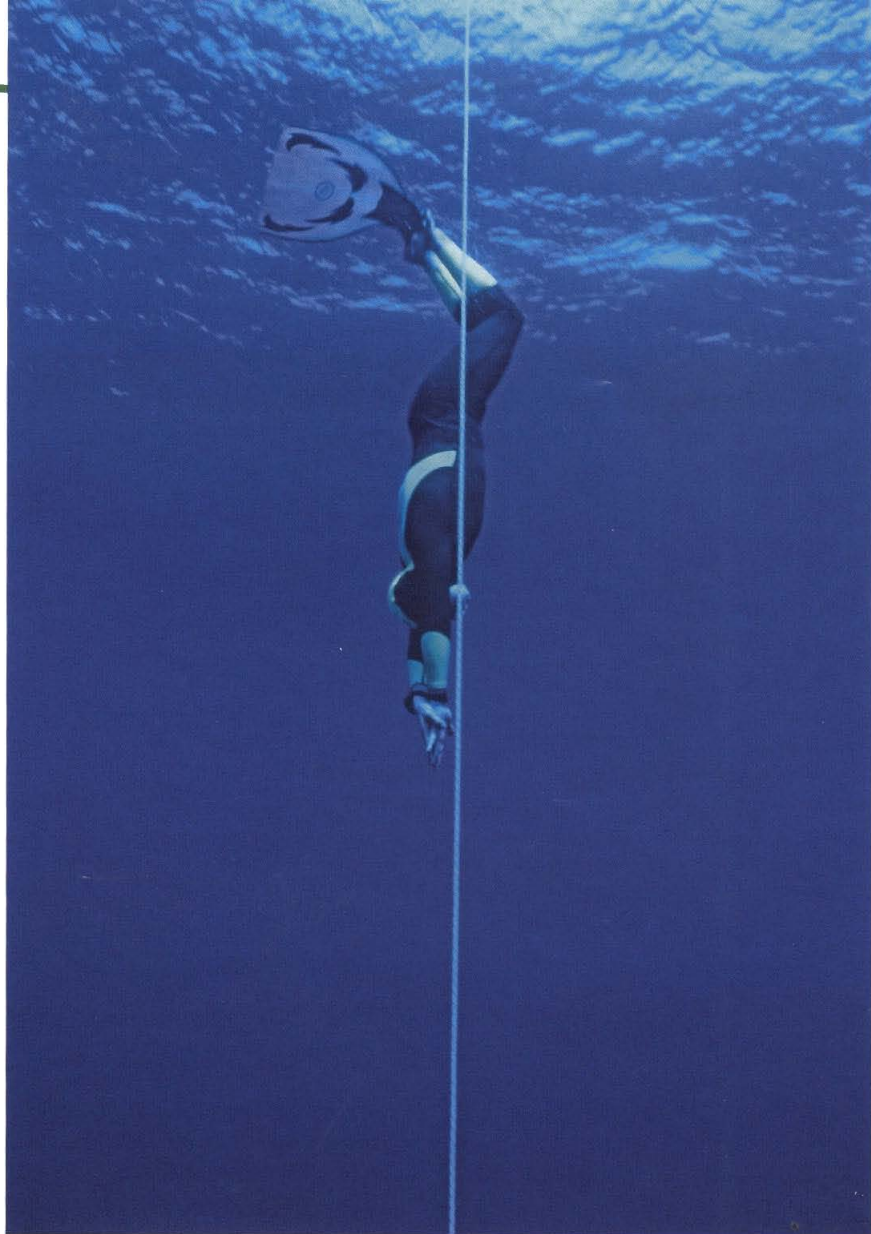
- Traje seco de volumen variable o constante.
- Arnés de seguridad.
- Botella de emergencia.
- Lastrado suficiente.
- Guantes de trabajo.
- Aletas o botas con plancha de protección.
- Cuchillo.
- En caso de utilizar mezclas que contengan helio como único gas inerte, o la temperatura del lugar de trabajo lo requiera, se utilizará traje de agua caliente.

Normalmente, en superficie se respira del orden de 17 veces por minuto a razón de 1/2 litro de aire cada vez y bajo

el agua, de 12 a 15 veces. En inspiración forzada se toma hasta 3 1/2 litros y el volumen residual, aun forzando la espiración, es de 1,2 litros.

El volumen de aire respirado en superficie es del orden de los 25 l/m, de 25 a 40 l/m en una tarea moderada y de 40 a 70 l/m si es pesada. Así, a 36 metros de profundidad en una tarea moderada se respira del orden de los 200 l/m (40 x 5) teniendo en cuenta la corrección por presión (5 bar). Además hay que añadir un volumen adicional para ventilar el casco o máscara (2 o 3 bar) por lo que en el caso de máscara gran facial a demanda se alcanzarían los 320 litros (40 x 8).

La **presión parcial** de un gas en una mezcla o disolución sería aproxi-



■ Tabla 1 ■ Tipos de lesión en medio hiperbárico según agente

Tipo de agente		Tipo de lesión
Agentes físicos	Presión	Barotraumas Alteraciones de oído Enfermedad descompresiva Enfermedad descompresiva crónica Lesiones pulmonares
	Frío	Hipotermia Síndrome de Raynaud Pie de inmersión
Agentes químicos	Intoxicación por gases	Narcosis nitrogenada Hiperoxia Hipercapnia Vapores de aceite y monóxido de carbono
		Dermatitis por sensibilización al material de buceo
Agentes biológicos		Lesiones por organismos marinos
		Otitis externas

madamente la presión de dicho gas si se eliminaran repentinamente todos los demás componentes presentes y sin que hubiese variación de temperatura. La presión parcial de un gas en una mezcla es proporcional a su concentración, o a su fracción molar, y a la temperatura. Esto sucede porque las moléculas de un gas ideal están tan alejadas unas de otras que no interactúan entre ellas. Como consecuencia de esto, la presión total, es decir, la suma de todas estas presiones, de una mezcla en equilibrio es igual a la suma de las presiones parciales de los gases presentes (*Ley de Dalton de las presiones parciales*).

Cuando se expone un líquido a un gas, las moléculas del gas se disolverán en el líquido. La presión parcial en un fluido es igual a la del gas con el que el fluido está en equilibrio.

En submarinismo, la composición de los gases que se respiran se expresan por medio de la presión parcial y se calcula así:

Presión parcial = presión absoluta x fracción molar del gas;

para el componente "z" del gas: $P(z) = P \times Xz$

Por ejemplo: a 50 metros de profundidad, la presión absoluta es de 6 bar (1 bar correspondiente a la presión atmosférica + 5 bar debida al agua) y las presiones parciales de los componentes principales del aire (21% oxígeno y 79% nitrógeno) son:

$$P(N_2) = 6 \text{ bar} \times 0,79 = 4,74 \text{ bar}$$

$$P(O_2) = 6 \text{ bar} \times 0,21 = 1,26 \text{ bar}$$

El margen considerado como seguro para las presiones parciales de oxígeno en una mezcla gaseosa está entre 0,16 bar y 1,6 bar, ya sea por riesgo de sufrir hipoxia y pérdida repentina del conocimiento con una $P(O_2) < 0,16 \text{ bar}$ o por la toxicidad del oxígeno, que conlleva convulsiones, y que se convierte en riesgo para una $P(O_2) > 1,6 \text{ bar}$. Por lo tanto, la presión parcial del oxígeno determinará la profundidad máxima operativa de una mezcla gaseosa.

Por otro lado, la narcosis producida por efecto del nitrógeno es un problema en las mezclas gaseosas que con-

tienen dicho gas. La presión máxima prevista para el nitrógeno en submarinismo técnico es de 3,5 bar.

4. Riesgos del buceo

Los buceadores profesionales se enfrentan a diversidad de riesgos laborales y algunos son comunes a otras actividades laborales, es decir, los mismos que pueden afectar a "trabajadores de superficie" (golpes, cortes, quemaduras, atrapamiento, manejo de cargas, los derivados del uso de aparatos a presión). Además, comparten con otros trabajadores del mar riesgos como el ahogamiento o hidrocución.

Sin embargo, hay otros riesgos que son específicos de su actividad y que tienen su origen en el medio subacuático e hiperbárico en el que se desarrolla este tipo de trabajo.

Las tareas se realizan en un medio diferente al habitual y con tres peculiaridades que lo diferencian del resto:

- Aumento de la presión.
- Aumento de la densidad.
- Condiciones termohigrométricas desfavorables.

Estas características determinan unos riesgos diferenciados y específicos que se pueden clasificar según el tipo de agente responsable y las lesiones que pueden ocasionar (Tabla 1).

Por otro lado la apnea, como todo deporte, tiene su peligro y uno de los principales riesgos se presenta en el ascenso desde profundidades superiores a los 20 metros, al producirse una expansión de los pulmones a su volumen natural succionando el oxígeno del torrente sanguíneo y que puede dar lugar a estados de inconsciencia y ser causa de accidentes graves.

Fundamentos fisiológicos y riesgos

Las reglas físicas tienen una influencia en el cuerpo de un buzo en inmersión y conllevan una serie de efectos mecánicos y bioquímicos que hay que considerar.

El cuerpo humano está compuesto físicamente de materia en sus tres fases básicas (sólida, líquida y gaseosa). La única estructura rígida es el sistema esquelético y tiene la función mecánica de soportar los demás órganos y tejidos (principalmente los músculos y, con la ayuda de éstos, las vísceras). El sistema respiratorio, representa los órganos y tejidos con fase gaseosa. El tejido sanguíneo representa la fase líquida más importante del cuerpo. El resto de los tejidos (músculos y vísceras) tienen la consistencia propia de la carne, en mayor o menor medida firmes y deformables.

Por tanto, se pueden definir tres "compartimentos" básicos:

- Cajas rígidas determinadas por el sistema esquelético: la caja craneana (contiene cavidades en fase gaseosa como los senos nasales, frontales y parafrontales y parcialmente los conductos auditivos) y la caja torácica (contiene los pulmones y el corazón).
- Las vísceras abdominales: separadas de la caja torácica por el diafragma y con tejidos muy elásticos y deformables.
- La masa sanguínea como fase líquida, irrigando todo el cuerpo a través de vasos, con volúmenes considerables en el corazón y en los órganos muy vascularizados (pulmones y sistema nervioso).

Los reflejos de inmersión en el hombre

El hombre al ser esencialmente terrestre tiene su fisiología adaptada a este tipo de vida y presenta unos mecanismos

de respuesta fisiológica y sistémica (no voluntaria) a la situación de inmersión, como son:

- Disminución del ritmo cardíaco (< 60 pulsaciones por minuto o bradicardia).
- Aumento del ritmo respiratorio.
- Aumento de la presión arterial.
- Hipervolemia (aumento del volumen de plasma sanguíneo), contrarrestado por un aumento en la diuresis (secreción de orina).
- Mayor flujo de sangre hacia los pulmones a mayor profundidad para evitar el aplastamiento.

Efectos de la presión

Los cambios volumétricos por efecto de la presión pueden dar lugar a **barotraumatismos mecánicos** (hemorragias en senos paranasales o la rotura de tímpano) o **pulmonares** por sobrepresión en Scuba si los pulmones llegan al límite de dilatación y se rompen los alvéolos (neumotórax, enfisema mediastino o embolia) o por subpresión en apnea si se llega al límite de compresión y se rompen los alvéolos llenando los pulmones de sangre (edema pulmonar agudo).

El oxígeno que se respira se transporta una parte por la hemoglobina de la sangre y otra disuelta y se consume en el metabolismo celular dando lugar a dióxido de carbono transportado a los pulmones por vía venosa.

Considerando los **factores de disolución y de difusión** durante la inmersión la presión de nitrógeno aumenta y mientras que la sangre y tejidos nerviosos se saturan rápidamente, los tendones y huesos lo hacen de forma más lenta.

En el ascenso se da el proceso inverso de desaturación y es normal que se formen microburbujas de N₂ y de CO₂ que se eliminan por vía pulmonar. Si se hace demasiado rápido o sin respetar las paradas de descompresión, su cantidad y tamaño pueden ser considerables y dar lugar al accidente de descompresión (trombos, embolia y necrosis de tejido) que no se da en apnea al ser los tiempos de inmersión cortos e intercalar pausas en superficie. Los efectos que provocan esta situación de sobreesaturación tisular pueden ser inmediatos o progresivos.

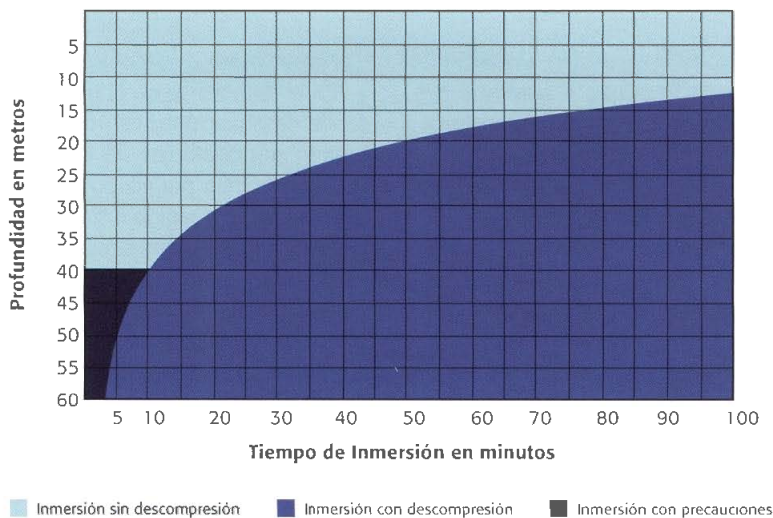
El oxígeno y el dióxido de carbono vuelven a su estado soluble dentro de la sangre con rapidez, pero el nitrógeno permanece en estado gaseoso y es por tanto el principal responsable.

El **síndrome de descompresión** es una enfermedad aguda o embolia gaseosa producida por una disminución brusca de la presión atmosférica y se caracteriza por la aparición de pequeñas burbujas e inflamación a nivel subcutáneo, pero el síntoma inequívoco es la aparición de un fortísimo dolor, que afecta a diversas partes del cuerpo. Ciertas regiones corporales pueden sufrir parálisis transitoria y en ocasiones se producen lesiones permanentes e incluso la muerte.

Las burbujas no eliminadas pueden obstruir los vasos sanguíneos y ser la causa de la enfermedad descompresiva (ED). Los síntomas aparecen a las pocas horas de finalizar la inmersión e incluso pasadas 24 horas y se pueden diagnosticar como leves o graves. La enfermedad se manifiesta como el clásico "trancazo" con síntomas cutáneos y dolores en huesos, articulaciones y músculos. La grave llega a afectar al SNC y sistemas periférico, cardiovascular y respiratorio o gastrointestinal.

Al considerar la descompresión en el buceo hay que tener en cuenta:

■ Figura 1 ■ Curva de seguridad en medio hiperbárico



- No usar equipos autónomos en intervenciones que requieran descompresión.
- Como regla general, efectuar la descompresión en cámaras hiperbáricas.
- Si no hay cámara disponible y se requiere descompresión, incorporar en la solicitud de buceo el programa de descompresión y hacerlo con equipo semiautónomo liviano.
- Durante las descompresiones no realizar actividad alguna.

Para evaluar los **efectos bioquímicos** hay que considerar, en primer lugar, el **equilibrio sanguíneo O_2 / CO_2** . El oxígeno suele presentar tensiones sanguíneas menores que las presiones parciales alveolares, lo que facilita el intercambio gaseoso y, si no es así, el mecanismo fisiológico es la sensación de asfixia por un aumento de la tensión sanguínea del CO_2 y la ligera acidificación de la sangre al producirse ácido carbónico. Cuando se incurre en una hiperventilación con un aumento voluntario de la frecuencia respiratoria, tal y como ocurre en la apnea antes de la inmersión, las presiones parciales de los gases y sus tensiones

sanguíneas tienden a igualarse, es decir, aumenta la tensión sanguínea del oxígeno y disminuye la del dióxido de carbono, el pH tiende a alcalinizarse y se retarda el reflejo de la asfixia.

En segundo lugar hay que tener en cuenta la **toxicidad de los gases**:

- **Hipercapnia:** o aumento anormal de la tensión de CO_2 en la sangre (tensión $CO_2 > 40$ mbar), y que presenta efectos tóxicos. Puede ocurrir en el buceo Scuba, cuando los buzos inexpertos tratan de disminuir la frecuencia respiratoria para "ahorrar" aire de la botella y en buzos profesionales, por un ejercicio intenso durante la inmersión. Si la situación no se controla, se puede amplificar y agravar la hipercapnia causando un síncope y la muerte por ahogamiento. Por otro lado, el buzo presa del pánico puede sufrir barotraumatismos o accidentes de descompresión por un ascenso fuera de regla.
- **Hiperoxia:** el oxígeno empieza a ser tóxico cuando su tensión tisular alcanza 1,7 bar. Aunque todos los tejidos se ven afectados por igual, el efecto neurotóxico es el que reviste

mayor gravedad. La intoxicación por oxígeno produce convulsiones, pérdida de conocimiento y puede llevar al consiguiente ahogamiento del buzo. El riesgo de hiperoxia marca los límites de seguridad del buceo autónomo con aire a 30 metros de profundidad máxima permitida y a 20 metros como profundidad máxima recomendada. Estas profundidades son los límites teóricos, pues en realidad los efectos tóxicos del oxígeno van más allá, ya que su consumo por los tejidos disminuyen considerablemente su tensión.

- **Narcosis de nitrógeno:** aunque el nitrógeno y otros gases inertes son químicamente estables, a concentraciones elevadas (presiones parciales o tensiones tisulares) producen efectos reversibles sobre el sistema nervioso. Los efectos son, en general, similares a los de una intoxicación por alcohol o a las sustancias narcóticas por lo que reciben el nombre de "narcosis". Cuando la tensión tisular del $N_2 > 4$ bar, los efectos se empiezan a manifestar, muy variable entre individuos, y son los buzos autónomos con aire los afectados, dependiendo del estado general del buzo. Los síntomas típicos son: euforia, despreocupación, alteración de la capacidad de raciocinio y de concentración, pérdida de memoria y desorientación, que pueden predisponer al buzo a sufrir accidentes e incluso al ahogamiento. Los efectos desaparecen al disminuir la presión, es decir, al ascender a profundidades menores. Junto a los barotraumatismos y accidentes por descompresión en el ascenso, la narcosis es el otro riesgo más importante en el buceo con aire comprimido.

Los factores reconocidos que incrementan el riesgo y la severidad de la narcosis por nitrógeno son: el frío, el estrés,

el esfuerzo, la fatiga y la retención de gas carbónico.

Al parecer, el factor principal que lleva a la narcosis es la velocidad vertical del descenso. La presión aumenta con la profundidad, pero el nitrógeno se disuelve más lentamente que otros gases en los tejidos y en especial en el tejido nervioso. La narcosis aparece cuando el gas penetra la capa lipídica de las membranas de las células nerviosas del cerebro interfiriendo con la transmisión de las señales entre las neuronas.

En 1907, **J. Scott Haldane** desarrolló la primera tabla de inmersión que permitía al buceador retornar a superficie efectuando paradas. Estas tablas se emplearon muy pronto universalmente. Haldane se basó en la velocidad con que un tejido absorbe o elimina un gas y que es proporcional a la diferencia de la presión parcial del gas en el ambiente y cuando está disuelto en el tejido. En este sentido y al hablar de tejidos, éstos se clasifican en tejidos lentos y rápidos, indicando así la mayor o menor rapidez en alcanzar el estado de saturación. Existen diferencias entre las tablas de descompresión elaboradas por rangos de tiempo considerados.

En cualquier caso, lo mejor y más seguro es no sobrepasar los límites de la curva de seguridad para no entrar en descompresión (Figura 1).

Según la normativa española sobre buceo, las tablas de descompresión actualmente vigentes son las aprobadas por Orden Ministerial de 14 de octubre de 1997 (Anexo III, y en el Anexo IV los cálculos para la inmersión sucesiva) y modificadas por Resolución de 20 de enero de 1999 [9].

Es recomendable efectuar siempre una parada de seguridad de 3 minutos,

entre 3 y 6 metros, aun cuando no se haya entrado en descompresión y también es muy importante respetar la velocidad de ascenso (< 9 m/seg.) para evitar accidentes de descompresión.

Al usar las tablas de descompresión hay que contar, para determinar el tiempo en el fondo, desde que entra el buzo al agua hasta que se deja el fondo, mientras que la duración de la inmersión va desde que entra en el agua hasta que sale.

Actualmente la computadora de buceo es una alternativa a las tablas de descompresión tradicionales y tiene la ventaja de monitorizar el buceo en el momento, generando un plan de buceo instantáneo y a partir de ahí variar el tiempo de inmersión según la profundidad.

5. Riesgos en la respiración de mezclas gaseosas hiperóxicas

El efecto fisiológico de un gas no depende de su concentración en la atmósfera sino lo que condiciona su absorción, es decir, la cantidad presente en los alvéolos pulmonares, según la ley de la difusión, que determina la amplitud y cinética de la contaminación tisular y sus posibles efectos.

Para conocer la cantidad de gas en el alvéolo hay que partir de la presión parcial del gas en la atmósfera (ley de Dalton) y efectuar las correcciones necesarias teniendo en cuenta la tensión de vapor de agua saturante del ambiente alveolar, el calentamiento del gas y la cinética de la absorción pulmonar. Para el O_2 es suficiente, en primera aproximación, su presión parcial en el aire sin corrección alguna.

Si una atmósfera contiene 25 ppm de CO a 1 atmósfera se hará tóxica a 3 bar, o sea a una profundidad de 20 metros ya que su presión parcial será tres veces

mayor y por tanto se superará tres veces el valor límite ambiental (VLA).

A 2.400 metros de altitud la presión parcial del oxígeno se reduce de 0,21 bar a nivel del mar a 0,16 bar que corresponde a un 16% de oxígeno, es decir, su valor límite mínimo respirable. En sentido contrario, si la presión parcial aumenta de 0,6 bar, se da una adaptación inversa a la producida con la altitud y la anemia ocasionada se hace sentir al volver a una situación normal. Por encima de este valor las células están afectadas y se produce la desaparición de surfatante (que mantiene los alvéolos húmedos y abiertos) y dificultad respiratoria (con tos, disnea y hasta neumonía) cuyos efectos iniciales son reversibles al volver a situaciones normales. La hiperoxia se presenta a partir de 1,6 a 2 bar y después de un tiempo de latencia (visión túnel, alucinaciones sonoras, picores en la boca y crisis convulsiva).

Los factores reconocidos que incrementan el riesgo y la severidad de la narcosis por nitrógeno son: el frío, el estrés, el esfuerzo, la fatiga y la retención de gas carbónico

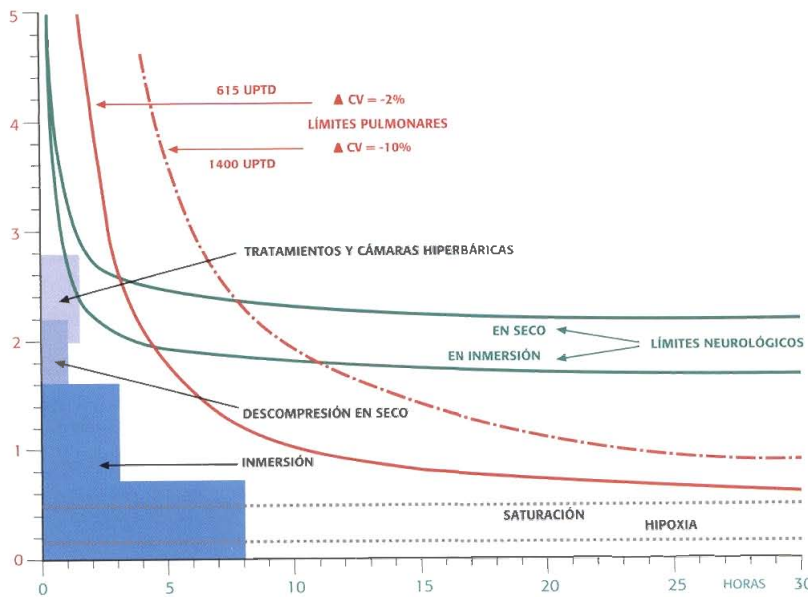
■ **Tabla 2** ■ **Tiempos máximos de exposición según presión parcial de oxígeno**

Exposición continua (hs)	PO ₂ (bar)
3	1,6
4	1,4
5	1,2
6	1,0
8	0,9

■ **Tabla 3** ■ **Valores de Kp**

PO ₂	Kp	PO ₂	Kp
0,50	0,00	1,70	2,07
0,60	0,26	1,80	2,22
0,70	0,47	1,90	2,36
0,80	0,65	2,00	2,50
0,90	0,83	2,10	2,64
1,00	1,00	2,20	2,77
1,10	1,16	2,30	2,91
1,20	1,32	2,40	3,04
1,30	1,48	2,50	3,17
1,40	1,63	2,60	3,31
1,50	1,78	2,70	3,44
1,60	1,93	2,80	3,57

■ **Figura 2** ■ **Zonas de PO₂ utilizables, según la exposición en horas**



Los valores de Kp se obtienen de la tabla 3. En la figura 2 se representan las zonas de PO₂ utilizables, según la duración de la exposición en horas.

De acuerdo con este criterio, se considera aceptable recibir unas 600 UPTD en una exposición y unas 400 UPTD para una jornada diaria. En oxigenoterapia hiperbárica (OHB) son valores habituales los 1.400 UPTD.

En la práctica, cuando hay que intervenir en un medio irrespirable, los Equipos de Protección Individual aportarán el aire para mantener la función respiratoria. Cuando la presión no es la normal, el aire puede que no sea el mejor gas y habrá que escoger una mezcla sintética de gases adecuada y con un contenido de oxígeno ajustado a la normativa. La elección se basará en que el oxígeno ejerza una presión parcial superior a 0,21 bar, ya sea por razones operacionales o por beneficiarse de las ventajas fisiológicas de hiperoxia, y se hará teniendo en cuenta la duración de la inmersión, las condiciones de la exposición y los objetivos marcados (inmersión, en seco, descompresión, medicinal).

En inmersión el máximo autorizado es 1,6 bar, que se corresponde con respirar oxígeno puro a una profundidad de 6 metros en plataformas de descompresión y equivale a una mezcla que contenga 10% de oxígeno a 150 metros. Si es en seco, en cajón hiperbárico, se permite hasta 2,2 bar y, según los casos, para ciclos de 30 minutos se interrumpen las exposiciones de 25 minutos con 5 minutos respirando aire.

La tabla 2 representa los tiempos máximos de exposición continuada en función de la presión parcial de oxígeno para que éste no sea tóxico.

La unidad de dosis tóxica pulmonar (UPTD) permite comparar los efectos potenciales de las exposiciones cuando la presión parcial de oxígeno es elevada, considerando los efectos tóxicos producidos para la respiración durante un minuto en relación con un gas que presente una PO₂ de 1 bar. Así, el número de UPTD será proporcional al tiempo de exposición (en minutos) y a un coeficiente sin unidades que depende de la presión parcial del oxígeno [12].

$$\text{UPTD} = Kp \times t$$

Por ejemplo, una mezcla respirable en un hábitat de saturación sin límite de duración y a 90 metros de profundidad (presión equivalente a 10 bar), debe contener un 4% de oxígeno, lo que significa una presión parcial de 0,4 bar.

La mezcla utilizada por los escafandristas cuando salen del hábitat (de 6 a 8 horas) y la que mantiene en la torreta de inmersión a 98 metros contiene del 7% al 9% de oxígeno ($0,76 < PO_2 < 0,97$) de forma que ni la una ni la otra son respirables en la superficie. Aunque el rango de presiones o de profundidad a las que una persona puede someterse sea amplio, por razones prácticas y para simplificar el procedimiento, se utilizará un único gas respirable, tanto en casos de inmersión como en la exposición hiperbárica en seco.

Por otro lado, la descompresión después de una inmersión dependerá de la cantidad de gas inerte absorbida en la intervención. Para minimizar la carga de gas inerte se escogerá durante la tarea una presión parcial de oxígeno lo más hiperóxida y fisiológica aceptable. La velocidad de eliminación de gas inerte dependerá de la presión parcial de éste en el gas respirado en la descompresión y, por tanto, se tratará de suministrar un gas que sea prácticamente oxígeno puro.

Los accidentes que pueden ocurrir durante la descompresión se deben a la disolución de los gases neutros (nitrógeno, helio) en los tejidos y que depende de la profundidad y del tiempo de permanencia. Los accidentes biofísicos generan dolores musculoesqueléticos y los provocan la formación de burbujas de gas inerte en los tejidos periarticulares;

el tratamiento, en estos casos, se efectúa en cámaras hiperbáricas. Por razones médicas, se usa el oxígeno como medio de reanimación y para obtener un efecto mayor se suministra oxígeno puro en un cajón hiperbárico a una presión superior a la atmosférica. Este es el principio de la oxigenoterapia hiperbárica y en el tratamiento de accidentes de descompresión.

Cuando la presión ambiental no es alta, como en el caso de la descompresión en una intervención de saturación, un valor de la presión parcial de oxígeno superior al 0,25 bar en atmósferas habitables puede aumentar el riesgo de incendio y, aunque fisiológicamente sea conveniente, no se debe superar este valor.

Mi agradecimiento a **Manuel Cantos** y **José Antonio Ponce** por su estímulo y colaboración.

■ Bibliografía ■

- Prevenção de riesgos laborales del buceo en piscifactorías. 2004. CCOO Federación de Comunicación y Transporte. Fundación para la Prevención de Riesgos Laborales. www.fct.ccoo.es
- Real Decreto 39/1997 de 17 de enero. Reglamento de Servicios de Prevención.
- Real Decreto 1299/2006 de 10 de noviembre. Cuadro de Enfermedades Profesionales.
- Real Decreto 1627/1997 de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.
- Enciclopedia de la OIT de Salud y Seguridad. Capítulo 36 "Aumento de la Presión barométrica". <http://www.insht.es> (Documentación. Enciclopedia de la OIT)
- "Fisiología y fisiopatología del buceo". Dr Jordi Desola Alà. Unidad de Terapéutica hiperbárica. Departament mèdic.
- INRS. Nuisances physiques au travail. Dossier 2005 La pression / Milieu hyperbare & Altitude <http://www2.inrs.fr/>
- ISSL Murcia FD 02-2008 y FD 09-2008 www.carm.es/issl
- Orden de 14 de octubre de 1997 por la que se aprueban las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas.
- Héctor Vera Bahamonde. Manual de buceo. (2007) ISBN 978-956-310-731-9
- HSE. Are you involved in a diving project? 2004 INDG 266 ISBN 0 717615294
 - General hazards. Diving information sheet nº 1
 - Diving system winches. Diving information sheet nº 2
 - Breathing gas management. Diving information sheet nº 3
 - Compression chambers. Diving information sheet nº 4
 - Diving in benign conditions and in pools, tanks, aquariums and helicopters underwater escape training. Diving information sheet nº 8
 - Divers' breathing air standard and frequency of tests. Diving information sheet nº 9
- INRS. Point de repère PR 12 2004 Hygiène et sécurité au travail. "Risques liés à la respiration de mélanges gazeux hyperoxidiques". Cahiers des notes documentaires 2º trimestre 2004- nº 195 p (89-94). <http://www2.inrs.fr/>