

Llega la era de la minería submarina

El desarrollo de la sociedad moderna y el avance en la investigación tecnológica dependen íntimamente de la minería. Éstos están representados por algunos elementos como las tierras raras, el cobalto, el telurio o el platino que son codiciados por los países industrializados por su escasez y por sus propiedades físicas y/o químicas específicas.

Por **Redacción** - 12 mayo, 2017

Introducción

La historia del avance tecnológico de la humanidad está estrictamente ligada a la de los metales desde los primeros descubrimientos en la antigüedad. El progreso científico ha permitido el desarrollo de los sistemas minero/metalúrgicos, así como la creación de nuevas aleaciones con el objeto de cubrir las necesidades industriales y tecnológicas.

El desarrollo de la sociedad moderna y el avance en la investigación tecnológica dependen íntimamente de la minería. Éstos están representados por algunos elementos como las tierras raras, el cobalto, el telurio o el platino que son codiciados por los países industrializados por su escasez y por sus propiedades físicas y/o químicas específicas. La Unión Europea tiene una dependencia del 100% en el aprovisionamiento de estas materias primas que proceden de países extranjeros, esencialmente China, África subsahariana y Rusia. En las décadas de los años 60-70, varias grandes compañías mineras barajaron la posibilidad de explorar los fondos oceánicos en búsqueda de yacimientos minerales, debido a la preocupación originada por la disminución en el ritmo de descubrimiento de nuevos yacimientos de recursos minerales, y a que se suponía que la mayoría de los grandes yacimientos terrestres ya habían sido descubiertos y/o explotados. Hay que tener en cuenta que los mares y océanos cubren el 71% de la superficie de la Tierra y que la mayor parte de sus fondos permanecen aún inexplorados, albergando depósitos minerales de interés económico como los nódulos de manganeso, las costras ricas en cobalto o los sulfuros hidrotermales polimetálicos. Se estima que los fondos marinos representan la mayor reserva de la Tierra de muchos de los metales estratégicos. Cabe señalar que las reservas conocidas del 96% del cobalto, el 84% del níquel o el 79% del manganeso se encuentran en los yacimientos submarinos. Por tanto, los recursos minerales submarinos pueden ser una fuente importante para el suministro de metales base y de

alta tecnología como el cobalto, el telurio, el níquel, los metales nobles o las tierras raras en un mundo que los demanda de forma creciente.

LA AUTORIDAD INTERNACIONAL DE LOS FONDOS MARINOS REGULA LAS ACTIVIDADES DE EXPLORACIÓN Y FUTURA EXPLOTACIÓN DE MINERALES SUBMARINOS MÁS ALLÁ DE LAS JURISDICCIONES NACIONALES

Estos depósitos submarinos están constituidos por una variedad de yacimientos entre los cuales los más importantes por tamaño y tonelaje son los de nódulos de manganeso, las costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto y los sulfuros polimetálicos submarinos (ISA, 2017). Además de estos yacimientos también se pueden encontrar depósitos submarinos de tipo placer (como los de oro, estaño o diamantes), fosforitas y evaporitas.

Primeros descubrimientos

En el año 1868, se descubrieron depósitos minerales formados por concreciones de hierro-manganeso en el fondo marino del Mar de Kara (océano Glacial Ártico). Posteriormente, la expedición de la fragata Challenger (1873-1876) puso de manifiesto la existencia de esas mismas concreciones en otros mares y océanos con su descubrimiento al suroeste de la isla de El Hierro (Canarias), y los denominaron nódulos de manganeso. Entrada la segunda mitad del siglo XX, John Mero (1965) señaló la posibilidad de considerar los nódulos de ferromanganeso como recursos con potenciales contenidos en metales de interés industrial: cobre, cobalto, níquel y manganeso.

Los sulfuros polimetálicos, en cambio, se descubrieron durante la campaña oceanográfica sueca *Albatross* realizada en el mar Rojo, en 1948. Durante esta expedición, se hallaron depósitos minerales originados por la presencia de salmueras en grietas del fondo marino, donde había evidencias de una intensa actividad hidrotermal.

Las jurisdicciones marítimas y la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos

En este régimen de descubrimientos y con el fin de poder reglamentar los trabajos de exploración de estos recursos en 1994, se creó la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (*International Seabed Authority*, ISA) en virtud de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho Internacional del Mar de 1982.

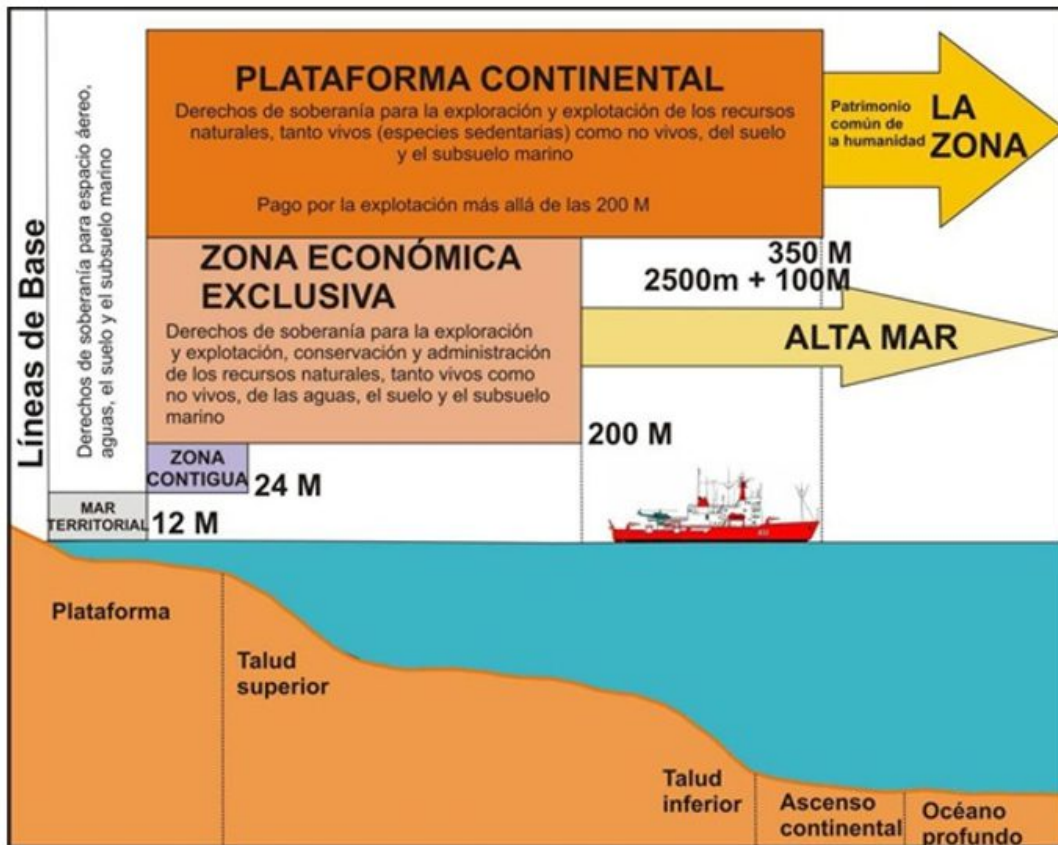


Figura 1. Distinción de las zonas marítimas de acuerdo con la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho Internacional del Mar de 1982 (Somoza, 2012).

En base a la Convención de 1982, el denominado 'Mar Territorial' es el área hasta las 12 millas náuticas sobre el cual, un país tiene derecho de soberanía sobre el espacio aéreo, el agua, suelo y subsuelo marino. Entre las 12 y 200 millas, se encuentra la 'Zona Económica Exclusiva' (ZEE) sobre la cual un país tiene soberanía para la exploración, explotación, conservación y administración de los recursos naturales vivos o no (minerales y recursos energéticos) en sus aguas, suelo y subsuelo marino. Pasadas las 200 millas, la 'Plataforma Continental' de un país, se puede llegar a ampliar hasta 350 millas, y dentro de esta zona un país tiene derechos para explorar y explotar recursos naturales del suelo y subsuelo marino aunque hay que pagar previamente por ello. Finalmente, el resto de los fondos marinos constituyen 'La Zona', que es considerada patrimonio común de la humanidad, y por lo tanto se necesita la formalización y contratación de una parcela de exploración con la ISA (Fig. 1).

En los últimos 20 años, la ISA, organismo regulador de las labores de exploración protección y, en el futuro, de explotación de recursos submarinos en 'La Zona' ligado a las Naciones Unidas, ha establecido los reglamentos que regulan la exploración para los depósitos de nódulos de manganeso (2000), sulfuros polimetálicos submarinos (2010) y costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto (2012). Tras establecer dichas regulaciones, se han firmado contratos de exploración de estos recursos entre la ISA y numerosos contratistas internacionales que han constituido

consorcios de países, entre los que se encuentran Reino Unido, Francia, Japón, Alemania, Rusia y China.

Los recursos minerales submarinos

De entre todos los recursos minerales submarinos que se han mencionado con anterioridad, los más importantes, debido a su potencial económico e industrial, son los yacimientos de minerales polimetálicos: nódulos de manganeso, costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto y sulfuros polimetálicos submarinos (Fig. 2). Estos depósitos se distribuyen a lo largo de todos los fondos oceánicos, como se aprecia en la Fig. 3.

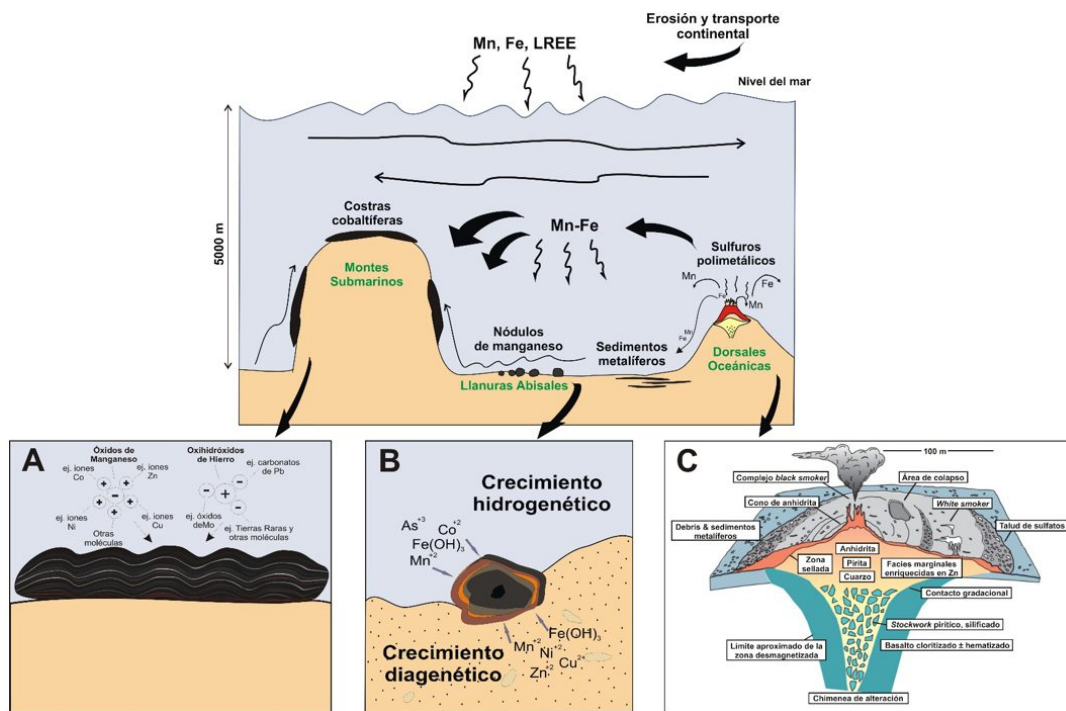


Figura 2. Diagrama sintético de formación de los diferentes depósitos polimetálicos submarinos. A) Costras de ferromanganeso ricas en cobalto (Modificado de Marino et al., 2016); B) Nódulos de hierro-manganeso (Modificado de Martínez y Lunar, 1992); C) Sulfuros polimetálicos (Modificado de Hannington et al., 1998).

LOS TRES GRANDES RECURSOS MINERALES DE LOS FONDOS MARINOS PROFUNDOS SON LOS NÓDULOS DE MANGANESO, LAS COSTRAS DE FERROMANGANESO CON ALTO CONTENIDO EN COBALTO Y LOS SULFUROS POLIMETÁLICOS

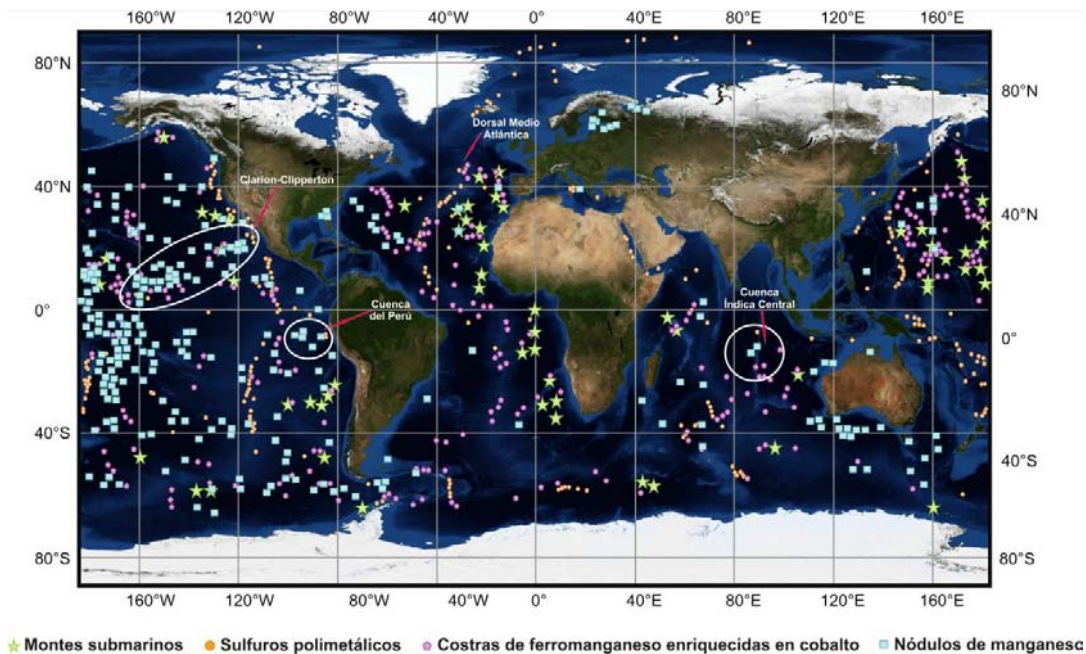


Figura 3. Localización mundial de los principales depósitos polimetálicos y montes submarinos asociados a ellos (Tomados de las bases de datos de la ISA y del proyecto europeo EMODnet Geology).

La localización de estos yacimientos ha sido posible gracias a la información adquirida a lo largo de numerosas campañas oceanográficas en todos los mares y océanos realizadas por numerosos países y cuyos datos han sido objeto de informes públicos y/o publicaciones científicas. Las principales técnicas de adquisición de datos están representadas por tecnología de sonar multihaz, técnicas geofísicas de reflexión, dragado mecánico de muestras del fondo además de las observaciones directas del fondo marino gracias a la utilización de vehículos no tripulados (ROV) que permiten la toma de fotografías y grabaciones de vídeo además de la toma de diferentes tipos de muestras y parámetros físico-químicos in situ.

- **Nódulos de manganeso**

Los nódulos de manganeso son concreciones minerales con formas subsféricas o elipsoidales (Figs. 4A, 4B) que pueden medir en media entre 1 y 20 cm (Fig. 4) de diámetro y están constituidos básicamente por óxidos de manganeso y hierro. Su génesis se produce por una combinación de procesos hidrogenéticos y diagenéticos de precipitación mineral alrededor de un núcleo duro (Fig. 4C). Estos depósitos se forman fundamentalmente en las llanuras abisales a profundidades superiores a 3000 m y por lo general poseen una tasa de crecimiento medio inferior a 20 mm/Ma.

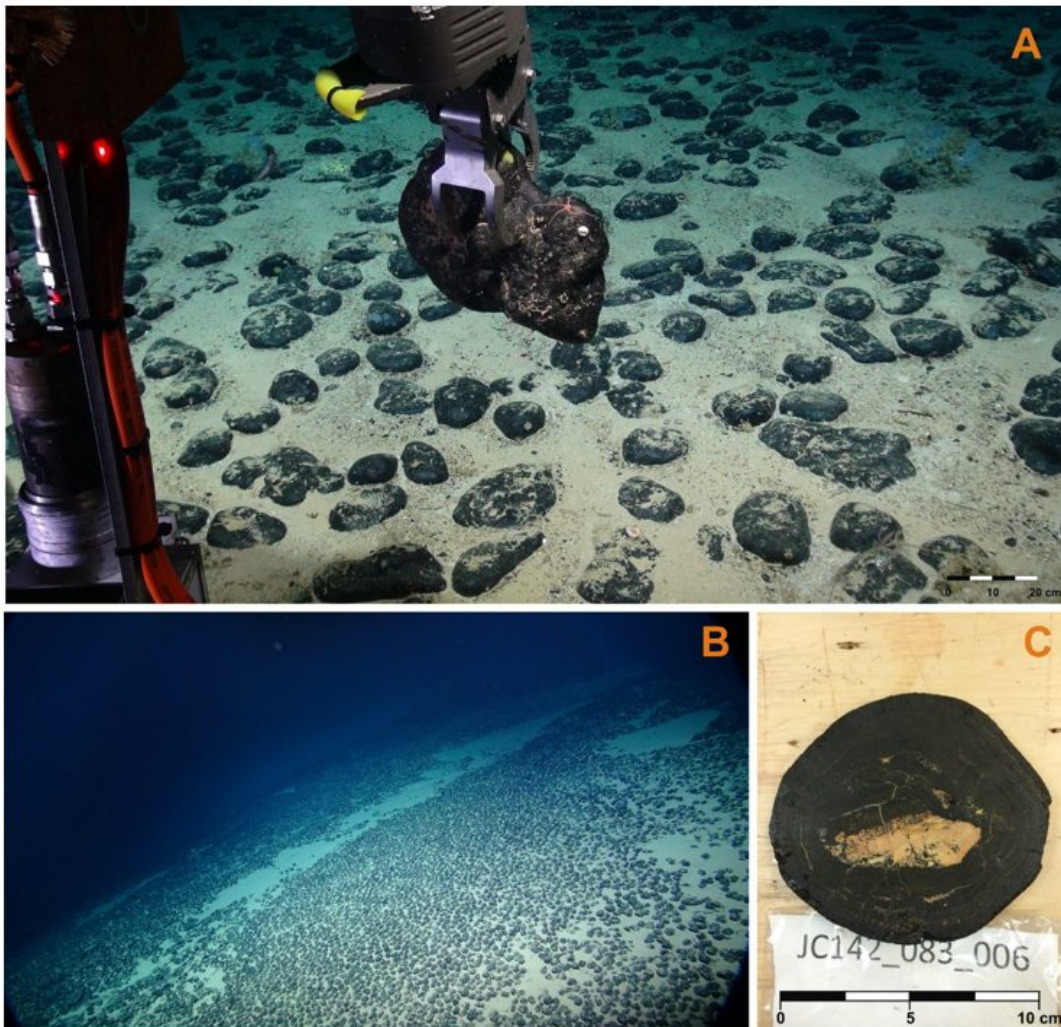


Figura 4. A y B) Imágenes submarinas de campos de nódulos de manganeso adquiridas con el ROV ISIS durante la expedición internacional JC142 en el monte submarino Tropic (Islas Canarias); C) Estructura interna de un nódulo subsférico con núcleo fosforítico, monte submarino Tropic. (Fuente: IGME)

La principal fuente de los metales que forman los nódulos es la erosión de los continentes. El transporte de grandes cantidades de elementos disueltos se debe sobre todo a la acción de los ríos, así como por la actuación del viento que levanta y mueve nubes de polvo tanto sobre tierra como por mar. Sin embargo, también hay aportes de elementos disueltos procedentes de fuentes hidrotermales; estas fuentes se originan por la salida de fluidos calientes en las dorsales oceánicas, en las zonas de subducción y cuencas tras-arco y en zonas de volcanismo intraplaca tipo "hot spots", donde la presencia de zonas anormalmente calientes del manto terrestre, puede facilitar la subida de fluidos e incluso llegar a formar montes submarinos o islas volcánicas como es el caso de Hawái (EEUU) o las Islas Canarias (España). Finalmente, cuando las condiciones son adecuadas, precipitan óxidos de hierro-manganeso que se acumulan en forma de nódulos por la acreción de capas concéntricas (Figs. 2 y 4) alrededor de un núcleo formado generalmente por fragmentos de roca o de antiguos nódulos. La formación y el lento crecimiento de estos depósitos, permite la acumulación de una gran cantidad de otros metales valiosos en la estructura misma de los óxidos.

Los nódulos de manganeso se consideran una fuente de recursos minerales económicamente rentable en los océanos debido a su abundancia en zonas relativamente localizadas (ej., Zona Clarion-Clipperton y Cuenca del Perú; Fig. 3), su composición y enriquecimiento en diferentes metales valiosos y su existencia como material suelto que yace sobre la superficie del lecho marino. Todos estos factores, hacen que estos recursos sean atractivos para la explotación minera en un futuro próximo. Los metales más abundantes que se pueden encontrar en los nódulos son hierro y manganeso principalmente y como subproducto de alto valor económico níquel, cobre y cobalto, así como cantidades variables de otros elementos trazas y tierras raras. La cantidad y proporción de estos elementos varía considerablemente dentro de un mismo nódulo, así como entre nódulos de diferentes tamaños, regiones y cuencas oceánicas y por este motivo hace falta un estudio extensivo de cada depósito para evaluar su interés económico.

Una región de especial interés económico de estos depósitos se encuentra en el océano Pacífico Central, entre la zona de fractura Clarion-Clipperton (Fig. 3). Se ha estimado que en esta zona los nódulos pueden llegar a concentrarse hasta valores de 10 kg/m² y se estima una concentración elemental media 3 kg/m² de manganeso, 80 g/m² de cobre, 25 mg/m² de cobalto y 0.2 kg/m² de níquel.

En el océano Atlántico, los nódulos están más escasa e irregularmente distribuidos en amplias áreas del fondo oceánico y, probablemente, las concentraciones económicamente más interesantes se encuentran en la denominada Meseta Blake (Atlántico Occidental) ya que en esta región los nódulos tienen un alto ratio de manganeso-hierro. En el Mar Mediterráneo, los nódulos de la costa oeste de Italia son de especial interés por razones similares.

- **Costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto**

Este tipo de depósitos polimetálicos son pavimentos de óxidos de hierro-manganeso, de hasta 26 cm de espesor, que se forman en los flancos y cumbres de montes submarinos, volcanes, crestas, guyots y mesetas submarinas de todos los océanos y a profundidades comprendidas entre 400 y 7000 m (Figs. 5A y B). En general las costras con mayores espesores, riqueza mineral y por lo tanto con mayor interés económico, suelen encontrarse entre 800 y 2500 m.

Las costras de ferromanganeso se forman de manera parecida a los nódulos de manganeso. Los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso precipitan formando capas subparalelas con morfología laminar a botrioidal (Figs. 5C y D). En este tipo de depósitos el crecimiento hidrogenético por precipitación

mineral a partir del agua marina fría es el más importante y depende de factores como la presencia de corrientes continuas que mantengan limpio de sedimentos el sustrato como también de una zona mínima de oxígeno. De este modo, las costras de ferromanganeso ricas en cobalto poseen una tasa de crecimiento medio entre 0.5 y 5 mm/Ma. Esta baja tasa de crecimiento les permite absorber sobre la superficie de los oxi-hidróxidos recién precipitados grandes cantidades de elementos trazas presentes en las aguas marinas en forma de aniones y cationes.

Las costras están formadas por diversas fases de óxidos de manganeso (esencialmente vernadita, todorokita, birnessita) e hidróxidos de hierro del grupo de la goethita, junto con minerales accesorios como son los minerales detríticos cuarzo o vidrio volcánico amorfo, feldespatos, calcita y fosfatos, además de restos biológicos procedentes de foraminíferos y cocolitos. La concentración de elementos metálicos varía entre un 15-31 % de manganeso, 7-18 % de hierro y ratios de manganeso/hierro que oscilan entre 1 y 3.4, para muestras obtenidas en el Océano Pacífico, mientras en el Océano Atlántico se han encontrado muestras más ricas en hierro (14-28 %) que en manganeso (8-20 %).

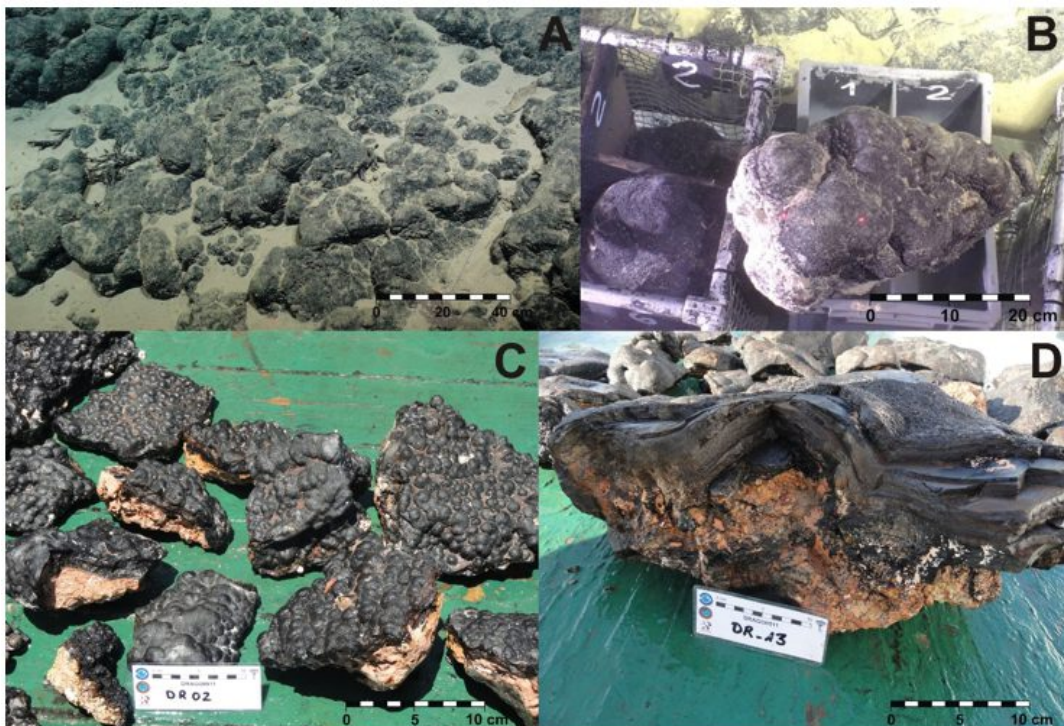


Figura 5. A y B) Imagen submarina y costras de ferromanganeso con altos contenidos en cobalto y telurio muestreadas en el monte submarino Tropic (suroeste de las islas Canarias) durante la expedición internacional JC142; C y D) Costras de ferromanganeso sobre sustratos rocosos, recogidas en los montes submarinos Echo y Drago durante la campaña oceanográfica DRAGO0511, en mayo de 2011 (Fuente: IGME).

A nivel global, las costras tienen una cantidad de cobalto mayor respecto a los nódulos de manganeso. Se han encontrado muestras con un enriquecimiento de hasta un 2% de cobalto y la media en general es de 0.8 % en costras tomadas de montes submarinos, a profundidades inferiores a

1500 m. Estos depósitos también contienen cantidades significativas de otros metales, principalmente níquel, plomo, molibdeno, vanadio telurio y tierras raras (esencialmente cerio), además de cantidades relevantes de elementos del grupo del platino.

- **Sulfuros polimetálicos submarinos**

Los depósitos de sulfuros polimetálicos submarinos se originan por la emisión de fluidos hidrotermales a altas temperaturas y en consecuencia estos yacimientos están íntimamente ligados tanto a los procesos de formación de nueva corteza oceánica mediante la expansión de los fondos oceánicos como a las emisiones de material magmático derivados de la actividad volcánica submarina (Fig. 6). Por lo tanto, estos depósitos se localizan tanto a lo largo de los límites de placas tectónicas como en zonas de vulcanismo intraplaca.

Los procesos hidrotermales submarinos que originan las emisiones de fluidos a través de chimeneas (Fig. 6), se pueden dividir en dos grandes grupos: black smokers y white smokers. La diferencia básica entre los dos grupos de chimeneas es la temperatura de los fluidos emitidos al fondo oceánico. Los denominados black smokers (Fig. 6A) suelen estar asociadas a procesos hidrotermales de alta temperatura ($>350^{\circ}\text{C}$), localizados próximos a las dorsales medio oceánicas o en zonas de vulcanismo intraplaca. Los white smokers (Fig. 6B) se asocian a zonas con procesos de hidrotermalismo alejados del centro de emisión principal, por lo que reciben y expulsan fluidos más fríos ($<350^{\circ}\text{C}$).

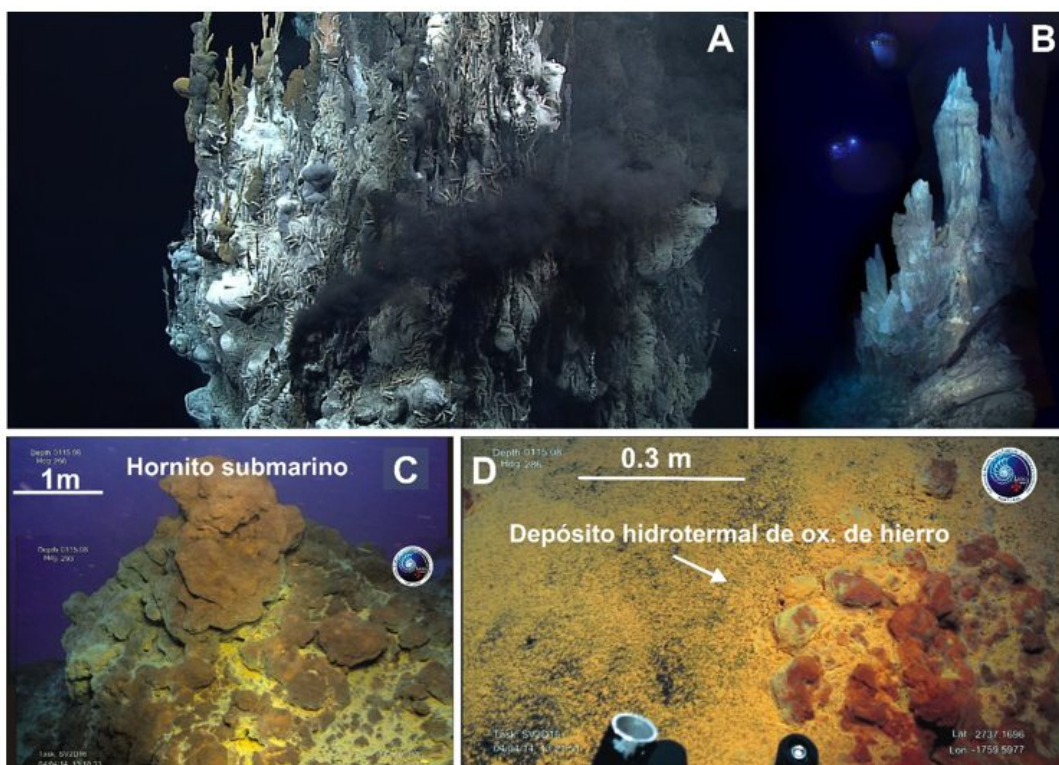


Figura 6. A) Chimeneas (black smokers) con emisión de fluidos que en contacto con el agua fría toma el característico color negro que precipitan formando sulfuros polimetálicos. Estas chimeneas se encuentran

en la cuenca tras-arco Mariana (Océano Pacífico Occidental; B) Chimeneas (white smokers) formadas por la precipitación de carbonato cálcico emitido (Campo hidrotermal Ciudad Perdida, Océano Atlántico Medio) (Fuente: NOAA); C y D) Hornitos submarinos y sedimentos metalíferos hidrotermales del volcán submarino Tagoro (El Hierro, Canarias) filmados y muestreados con el ROV LUSO en 2014 durante la campaña SUBVENT 2. (Fuente: IGME)

Además de las diferentes temperaturas, también los elementos emitidos son distintos, ya que los *black smokers* emiten principalmente monosulfuros metálicos (de color oscuro) que en contacto con el agua fría rápidamente precipitan formando chimeneas de gran tamaño. Los *white smokers* en cambio, emiten elementos como bario, calcio y silicio (que dan el color blanco a los fluidos) y suelen ser relativamente más pequeñas que las de alta temperatura.

Ambas emisiones hidrotermales tienen en común la presencia de una gran variedad de fauna extremófila asociada a las emisiones. En estas zonas se pueden encontrar gusanos, corales y diferentes variedades de crustáceos o peces, además de grandes comunidades microbianas quimiosintéticas que dependen de los nutrientes aportados por estas emisiones.

En estas zonas, la circulación de fluidos (principalmente agua marina que penetra en el fondo oceánico a través de las rocas) impulsados por flujos convectivos asociados a la actividad hidrotermal es el principal proceso de formación mineral en estos depósitos. Los fluidos hidrotermales lixivian y transportan metales, así como otros elementos a través de las rocas hasta la superficie del fondo marino. Una vez en contacto con el agua fría del océano los diferentes minerales presentes en los fluidos precipitan en zonas con determinadas condiciones físico-químicas formando depósitos con cantidades variables de minerales (ej. pirrotina, pirita, esfalerita, calcopirita y bornita). Algunos de estos yacimientos pueden contener cantidades significativas de galena y oro nativo.

Depósitos minerales submarinos en España

En España, se han encontrado y estudiado depósitos minerales en distintas áreas de la jurisdicción nacional así como en regiones que se encuentran dentro de la propuesta para la ampliación de los límites de la Plataforma Continental de España, registradas y presentadas ante la ONU (Fig. 7). Estos trabajos han sido liderados por el [Instituto Geológico y Minero de España \(IGME\)](#) desde finales de la década de 1970 a través de diferentes proyectos de infraestructura e investigación.

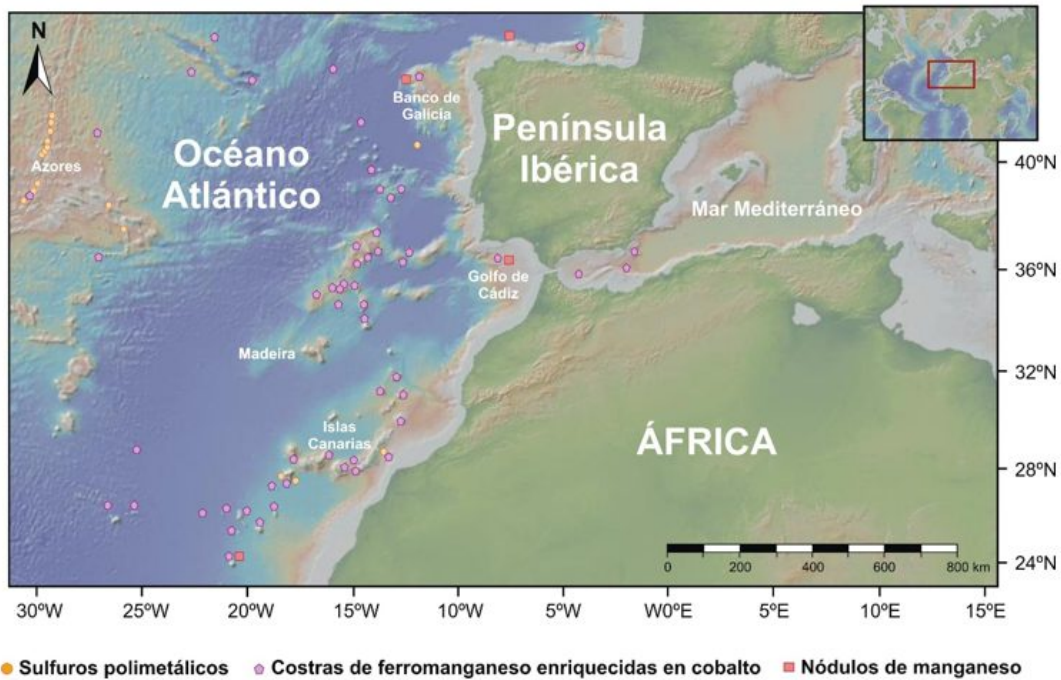


Figura 7. Mapa de situación con los diferentes depósitos submarinos de minerales polimetálicos que se han encontrado en aguas españolas y portuguesas. (Fuente: IGME y Proyecto EMODnet Geology).

Por la abundancia y características de los minerales descubiertos se pueden distinguir tres áreas geográficas de gran interés: el Golfo de Cádiz, el margen oeste de Galicia y los montes submarinos de las islas Canarias.

EN ESPAÑA EXISTEN 3 GRANDES ÁREAS DE INTERÉS: EL GOLFO DE CÁDIZ EL MARGEN OESTE DE GALICIA, Y LOS MONTES SUMERGIDOS DE LAS ISLAS CANARIAS

En el Atlántico noreste, dentro de la región del Golfo de Cádiz, hay extensos campos de nódulos de ferromanganeso (Fig. 8), con tamaños centimétricos, ligados a estructuras de emisión de fluidos ricos en hidrocarburos. Estos nódulos polimetálicos han sufrido un primer crecimiento diagenético en condiciones de reducción e influenciado por procesos de oxidación anaeróbica de hidrocarburos en diapiros y volcanes de fango. Acompañan a los nódulos campos de chimeneas y enlosados carbonatados formados por la oxidación anaeróbica de fluidos ricos en metano.

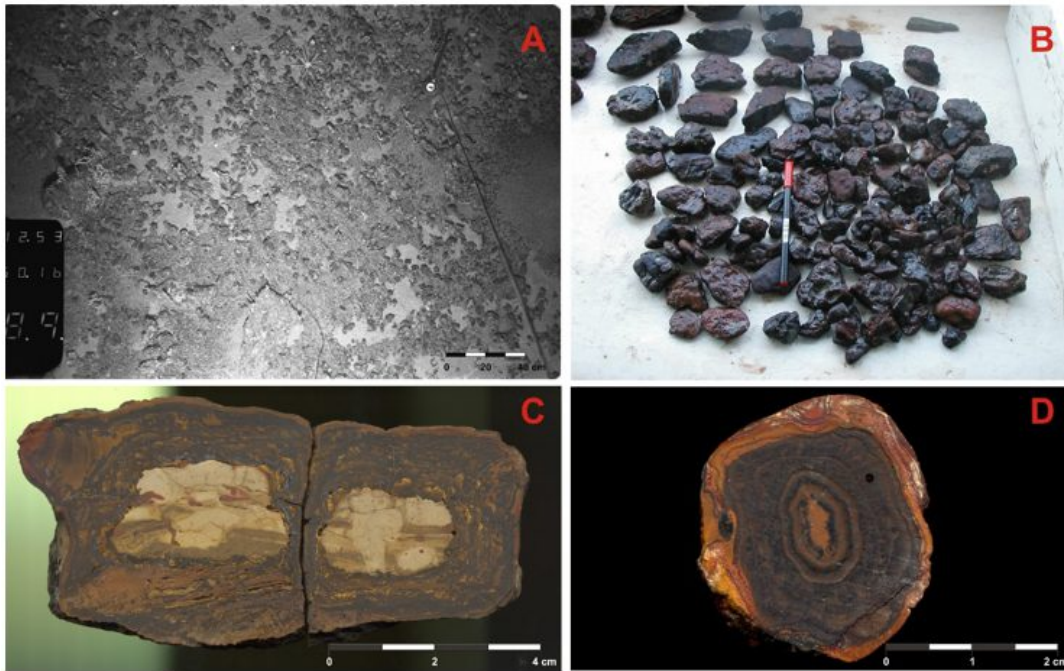


Figura 8. A) Imagen submarina tomada durante la campaña ANASTASYA 1999 de un campo de nódulos de manganeso acompañados de carbonatos derivados de metano, y distribuidos de forma heterogénea sobre el fondo marino del Golfo de Cádiz; B) Conjunto de nódulos de ferromanganeso con formas elipsoidales a tabulares dragados en estructuras de emisión de fluidos a 1000 m de profundidad. C y D) Secciones de nódulos de manganeso con una morfología tabular y esférica, respectivamente. Se puede apreciar con claridad las diferentes capas de óxidos de hierro y manganeso (González et al., 2012).

Posteriormente, los nódulos sufrieron un crecimiento hidrogenético en el sedimento del fondo marino controlado principalmente por la acción de la corriente mediterránea de salida (MOW), siendo más intensa esta acción durante los periodos de glaciación, por el aumento de la erosión en el fondo y promoviendo la precipitación superficial de óxidos. Debido a este origen, estos nódulos son ricos esencialmente en hierro (38.58 %) y manganeso (6.03 %), mientras que por el contrario, son pobres en elementos traza como níquel (0.011 %), cobre (0.004 %) y cobalto (0.01 %). También se puede encontrar en el suroeste del Golfo de Cádiz, costras de hierro-manganeso fosfatizadas conformando un pavimento sobre el suelo marino del denominado Banco del Guadalquivir.

Al norte de la Península, se encuentra el Banco de Galicia, concretamente en el margen noroeste de la placa Ibérica (Figs. 7 e 9D). En esta región hay montes submarinos del Mesozoico (ej. Vasco de Gama, Porto, Vigo...) reactivados y elevados durante el proceso tectónico pirenaico en el Cenozoico y posteriormente, influenciados por la convergencia entre las placas Ibérica y Euroasiática. Como consecuencia de su historia geológica y de su situación geográfica en esta región se han formado principalmente tres tipos de depósitos minerales: enlosados de fosforitas, nódulos de manganeso enriquecidos en cobalto asociados a procesos geotermales, nódulos ricos en hierro ligados a depósitos contorníticos, y costras de hierro-manganeso hidrogenéticas.

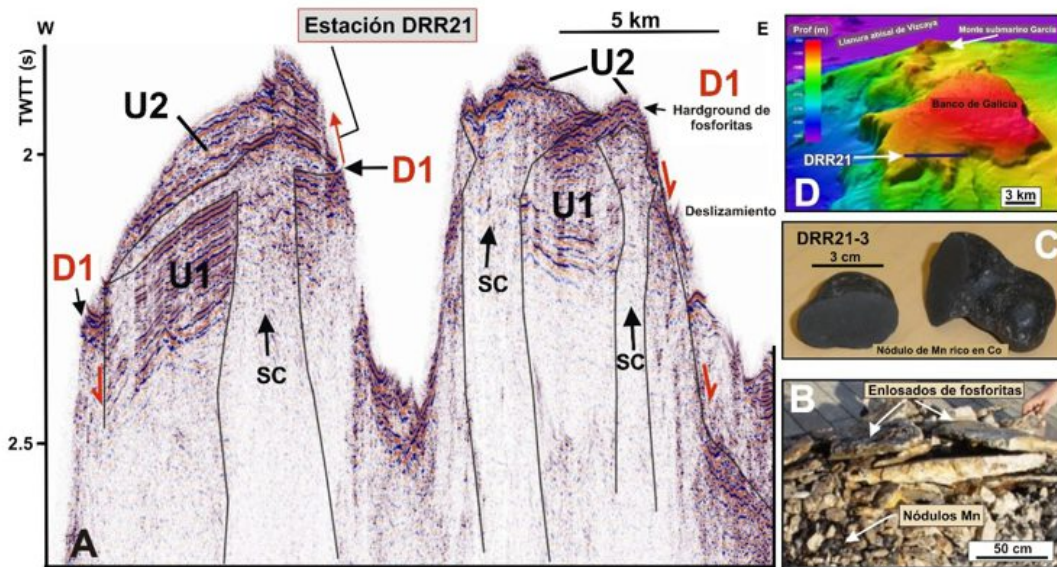
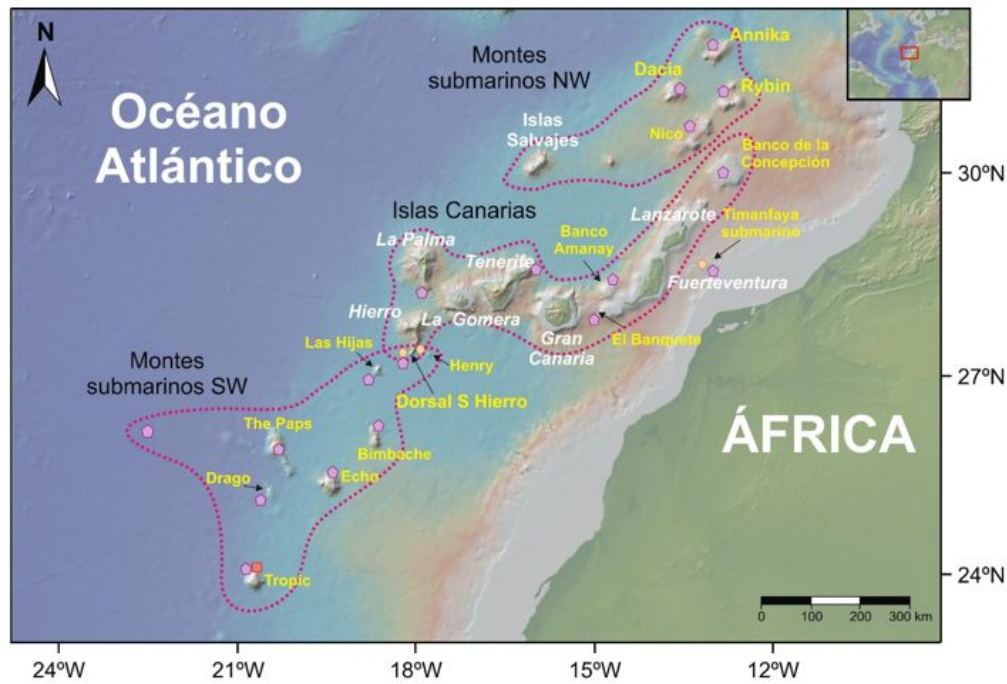


Figura 9. A) Perfil sísmico multicanal a través de montículos y cañones en el sur del Banco de Galicia con una exageración vertical $\times 18$ ($V = 2 \text{ km/s}$); B) Enlosado de fosforitas y nódulos de manganeso enriquecidos en cobalto, dragados en la estación de muestreo DRR21; C) Secciones de un nódulo de manganeso rico en cobalto; D) Ubicación del perfil sísmico obtenido en la estación de muestreo DRR21. (González et al., 2016).

Los enlosados de fosforitas (Fig. 9B) que aparecen en el Banco de Galicia, forman pavimentos sobre el suelo marino con un diámetro de decímetros, espesores centimétricos, y caracterizados por colores blancos, marrones, y rojizos que permiten su sencilla identificación; asimismo, este tipo de depósito mineral aparece asociado a las costras de ferromanganeso hidrogenéticas con concentraciones de hasta un 27 % de hierro y un 15 % de manganeso en su composición, y los depósitos de costras crecen sobre la superficie de las fosforitas, que actúan como substrato rocoso. También en el Banco de Galicia, se han encontrado campos de nódulos de manganeso enriquecidos en cobalto (hasta un 4%), o bien en hierro, con capas concéntricas formadas por la precipitación de los óxidos de hierro y manganeso y suelen presentar formas variables, siendo comunes las subsféricas e irregulares (Fig. 9C).

Las Islas Canarias se encuentran en el Atlántico Central, distan alrededor de 100 Km de la costa de Marruecos (Fig. 7). La Provincia Volcánica de las Islas Canarias contiene un gran número de montes y colinas submarinas tanto en dirección noreste como hacia el suroeste, donde se encuentran los montes submarinos más profundos y antiguos. Todas estas elevaciones submarinas como las islas mismas tienen un origen volcánico y se deben a una zona de manto superior anormalmente caliente que a lo largo de más de 160 Ma ha promovido el ascenso de magmas mantélicos.



● Sulfuros polimetálicos ● Costras de ferromanganeso enriquecidas en cobalto ■ Nódulos de manganeso

Figura 10. Provincia de los montes submarinos de las islas Canarias. Sobre el mapa están representados los depósitos de costras de ferromanganeso enriquecidas en cobalto, así como lo de sulfuros polimetálicos-sedimentos metalíferos (Fuente: IGME y Proyecto EMODnet Geology).

En la provincia de los montes submarinos canarios se han encontrado varios depósitos de minerales submarinos. El depósito más importante por extensión y tonelaje es representado por las costras de ferromanganeso ricas en cobalto. Estas costras cubren prácticamente todas las elevaciones submarinas de la zona con espesores que varían desde una pátina milimétrica hasta costras de más de 25 cm.

Las costras más ricas y gruesas se localizan en las cumbres y flancos de los montes submarino del suroeste, esencialmente en los montes Echo, The Paps, Tropic, Drago y Bimbache (Fig. 10), aunque hay registros de su presencia en todos los demás. Estos depósitos de ferromanganeso son ricos en hierro (20 %), manganeso (14 %) y elementos trazas como cobalto (0.5 %), níquel (0.25 %), vanadio (0.2 %), tierras raras (0.25 %) y elementos del grupo del platino (0.02 %). Estos valores representan un enriquecimiento de los elementos estratégicos de las costras canarias con respecto a otros depósitos a nivel mundial (Fig. 11). El telurio es el elemento que aparece más enriquecido en las costras de ferromanganeso, con valores medidos de 50 ppm, representando enriquecimientos de unas 10.000 veces sobre los valores medios de la corteza terrestre.

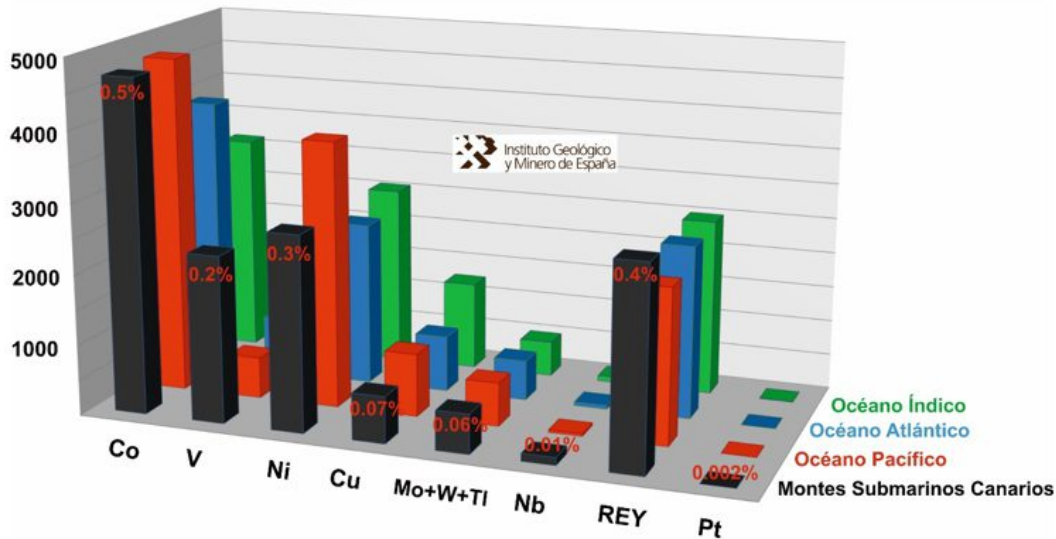


Figura 11. Concentración de los elementos estratégicos de las costras de ferromanganeso estudiadas de los montes submarinos canarios, en relación con otros depósitos marinos. Co (cobalto); V (vanadio); Ni (níquel); Cu (cobre); Mo+W+Tl (molibdeno + wolframio + talio); Nb (niobio); REY (tierras raras e itrio); Pt (Platino) (Fuente: Modificado de Marino et al., 2016).

En los montes submarinos canarios se han encontrado también grandes campos de nódulos de manganeso de tamaño decimétrico cubriendo parte de las cumbre y flancos de los montes. Otro depósito importante es representado por las fosforitas. Estas últimas se pueden encontrar tanto a la base de las costras o sustituyendo en parte los óxidos de hierro y manganeso dentro de ellas como formar los núcleos alrededor de los cuales crecen los nódulos de manganeso.

De momento, todavía no se ha demostrado la presencia de sulfuros polimetálicos en la zona de las Islas Canarias, aunque sí se han localizado fuentes hidrotermales, según estudios realizados in situ en la campaña SUBVENT 2 tras la erupción del volcán submarino de La Restinga en octubre 2011-marzo 2012. De este modo, se ha confirmado la emisión de fluidos ricos en hierro y azufre con la formación de depósitos hidrotermales metalíferos (Figs. 7 y 9). Estas emisiones son debidas a la presencia de un importante vulcanismo intraplaca consecuencia de la existencia de una zona del manto anormalmente caliente que propicia los procesos volcánicos y la formación de fuentes hidrotermales y sedimentos metalíferos asociados este vulcanismo de punto caliente.

Minería submarina: presente y futuro

Hasta ahora se ha evidenciado la riqueza mineral de los fondos oceánicos tanto a nivel mundial como en el territorio nacional, y es por ello, que se ha planteado la posibilidad de explotar estos depósitos de minerales con altos contenidos en elementos estratégicos, necesarios para el desarrollo de la tecnología actual.

LA MINERÍA SUBMARINA A GRAN PROFUNDIDAD ES UN RETO TECNOLÓGICO, ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL QUE TENDRÁ SU PRIMER EXAMEN CON LA PUESTA EN PRODUCCIÓN DE COBRE Y ORO EN 2019 A 1600 METROS DE PROFUNDIDAD EN EL PROYECTO SOLWARA 1 (PAPUA-NUOVA GUINEA)

Desde la Convención sobre el Derecho del Mar del año 1982, la ISA ha firmado contratos de 15 años para la exploración de los depósitos de sulfuros, nódulos y costras polimetálicas con veintitrés consorcios de diferentes países hasta el año 2015, sobre 2.2 millones de km² en los fondos marinos de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico. De estos contratos, catorce son para la exploración de nódulos de manganeso: trece en la zona de fractura de Clarion-Clipperton (Figs. 3 y 12) y uno en la Cuenca del Índico Central (Fig. 3). En relación a los sulfuros polimetálicos, hay concedidos cinco contratos de exploración en el suroeste y en el centro de la dorsal de la India y en la dorsal media del océano Atlántico (Fig. 13), mientras que los contratos de costras con altos contenidos en cobalto, se han concedido en el Pacífico Occidental.

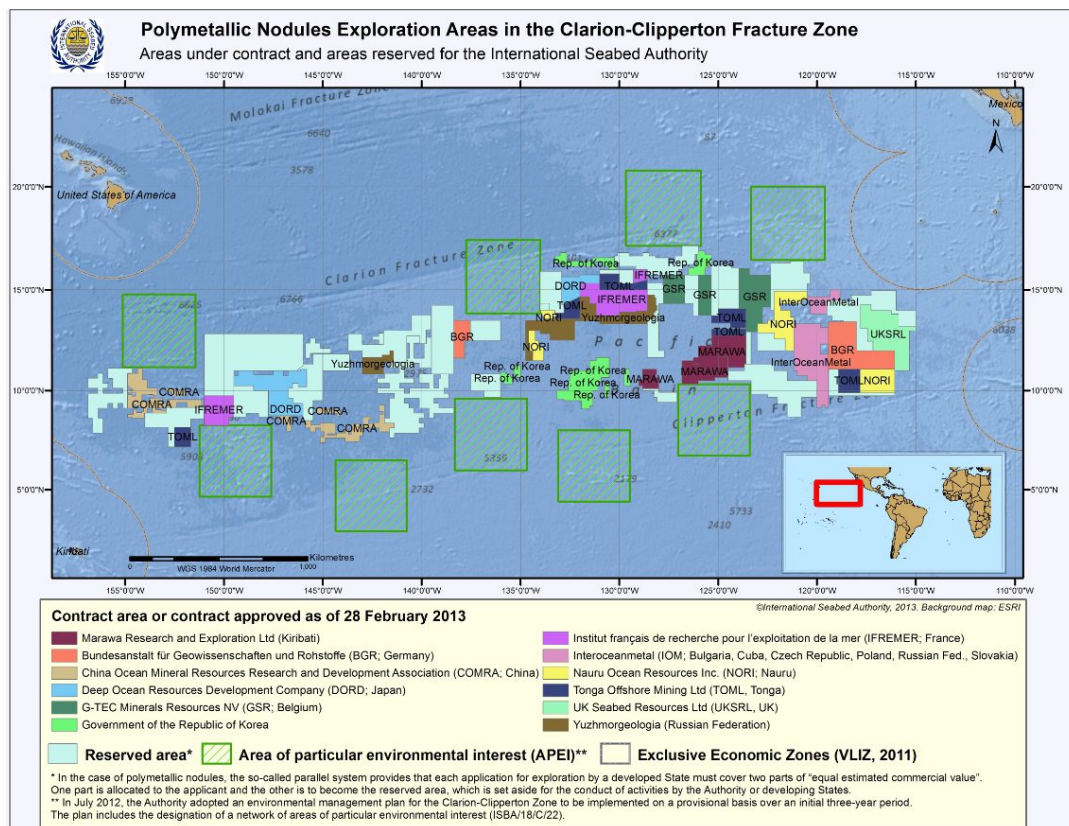


Figura 12 Áreas de exploración para los depósitos de nódulos polimetálicos en la zona de fractura Clarion-Clipperton (ISA, 2014).

Según el convenio regulador establecido por la ISA, cada consorcio tiene el derecho exclusivo de explorar un área inicial de 150.000 km² durante los primeros ocho años de contrato y finalizado ese tiempo, la mitad del área

inicial de exploración deberá ser abandonada a criterio de los contratistas. Asimismo, los Estados Partes que participen en cada proyecto tienen la obligación de preservar y proteger el ambiente marino, así como controlar la contaminación del medio procedente de cualquier fuente, evaluando por ello los efectos potenciales de las actividades a desarrollar durante y posteriormente a las fases de exploración y explotación.

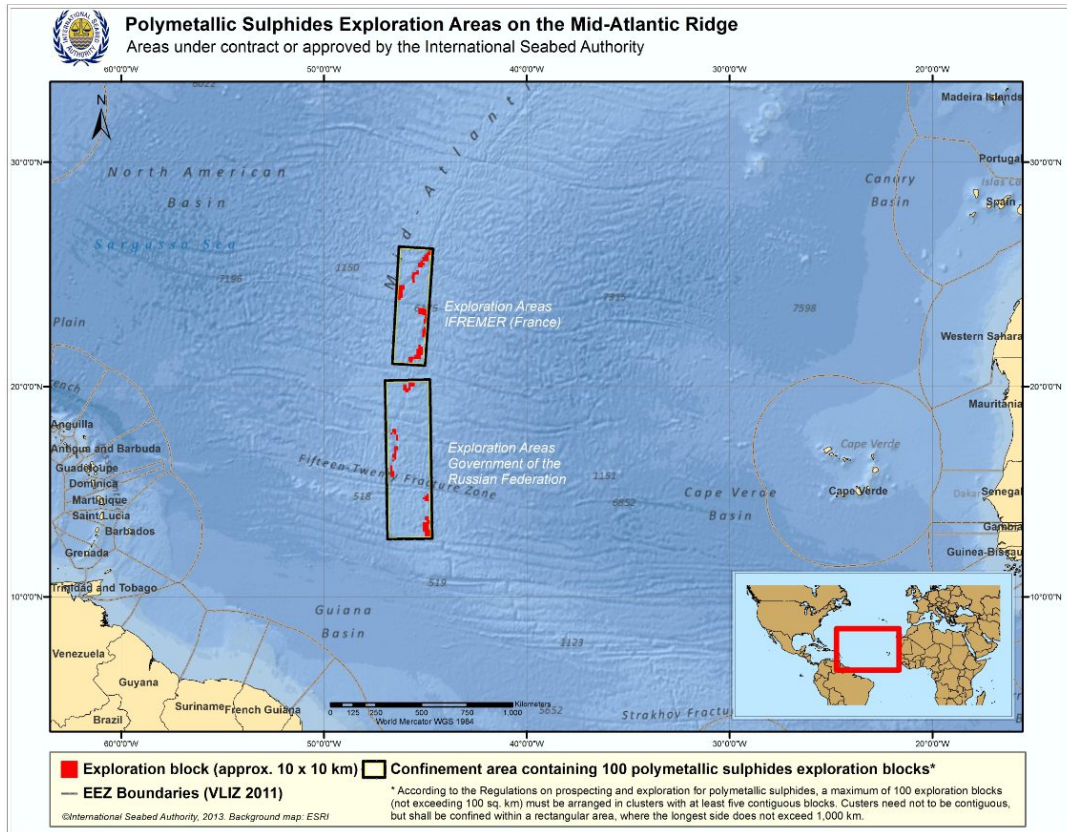


Figura 13. Área de exploración para los depósitos de sulfuros polimetálicos en la dorsal medio Atlántica (ISA, 2013).

En los fondos marinos profundos situados fuera de la jurisdicción de los países marítimos, es decir en 'La Zona', estas responsabilidades medioambientales son compartidas entre los estados pertenecientes a los consorcios, ya que 'La Zona' y sus recursos son considerados patrimonio común de la humanidad, garantizando por ello, la preservación de la biodiversidad de los fondos marinos.

En relación a la tecnología de prospección minera submarina, es pionera la empresa canadiense *Nautilus Minerals*; el éxito de esta compañía reside en utilizar tecnologías procedentes de la industria del petróleo y gas para la exploración y extracción de recursos minerales en alta mar, combinando estas tecnologías con técnicas mineras de dragado en superficie (Fig. 14).

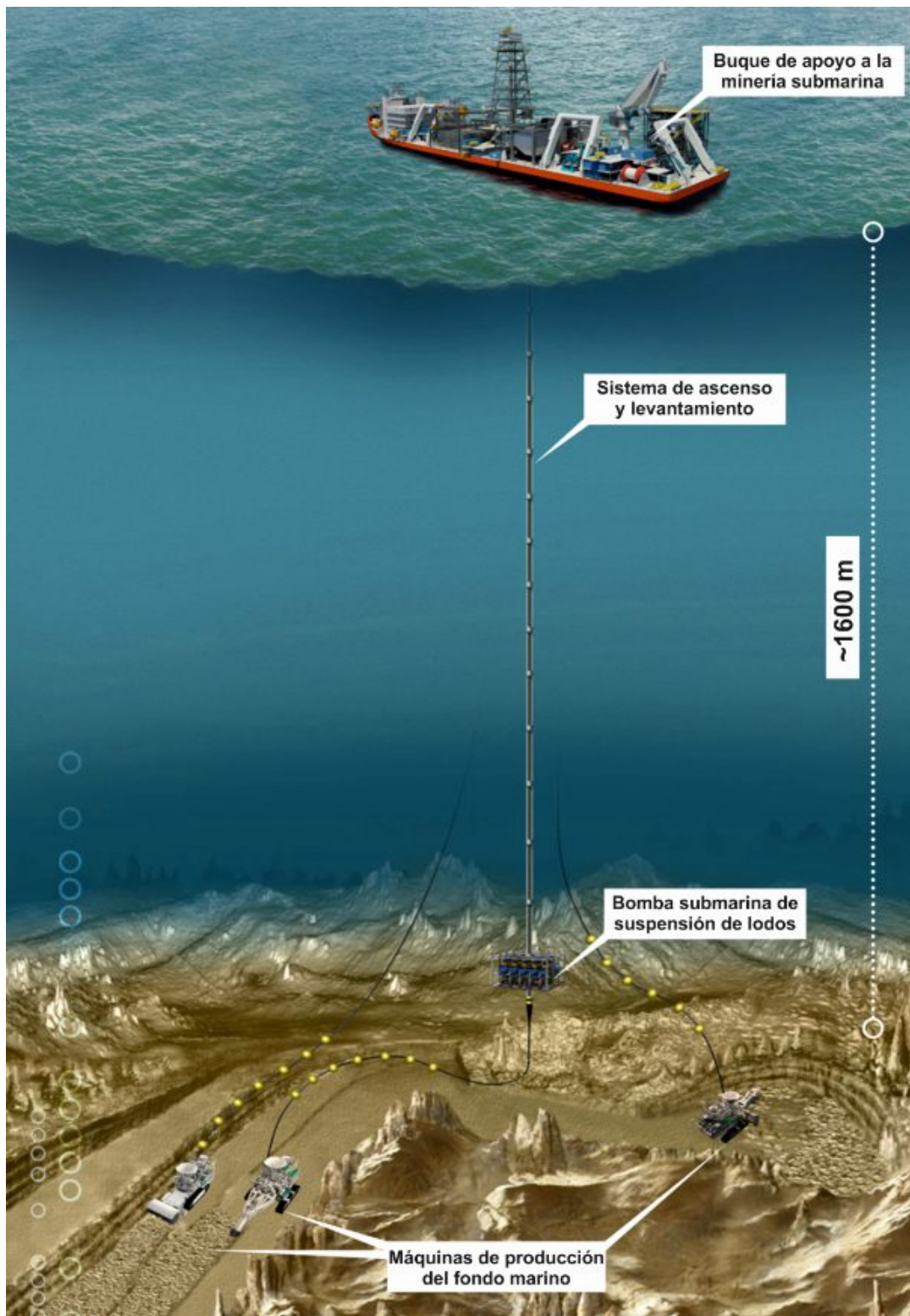


Figura 14. Diagrama de la futura explotación de los fondos marinos para la extracción de minerales polimetálicos en la mina Solwara 1 (Fuente: Nautilus Minerals).

Nautilus Minerals tiene la concesión de exploración en el yacimiento de sulfuros masivos polimetálicos ricos en cobre de alta calidad, plata, zinc y oro que están asociados a un sistema de emisiones hidrotermales marinas, descubierto en el año 1985 durante la ejecución del proyecto Solwara 2 en Papúa Nueva Guinea. Por ello, esta empresa tras finalizar la fase de exploración del campo Solwara 1, se prevé que comience con la explotación con fines comerciales de los sulfuros polimetálicos en 2019, utilizando maquinaria teledirigida como cortadoras (AC y BC) y recolectoras (CM) (Fig.

15). Con esta maquinaria, la empresa *Nautilus* se propone fracturar el sustrato rocoso del fondo marino en el que se localiza el yacimiento y extraer material mediante bombas de absorción, impulsándolo a través de tubos hasta los buques de apoyo a la minería submarina (Fig. 14) para que una llenos, transporten el material hasta las plantas de tratamiento y separación de las fases minerales.



Figura 15. Cortadoras y recolectoras submarinas propiedad de la empresa *Nautilus Minerals* (Fuente: *Nautilus Minerals*).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos SUBVENT (CGL2012-39524-C02-02); Ampliación de la Plataforma Continental al Oeste de las Islas Canarias (CTM2010-09496-E); EMODnet-Geology (2012/S96-158476), EXPLO-SEA (CTM2016-75947-R), REMIMARES (IGME-2571), proyecto de Garantía Juvenil en I+D+I (PEJ-2014-A-57173) y por la beca FPU (FPU014/06774). Los autores agradecen a las tripulaciones y equipos científico-técnicos de los buques Hespérides, Sarmiento de Gamboa, Miguel Oliver, James Cook (Reino Unido) y de la Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental (Portugal) por su experiencia en la toma de datos, muestras e imágenes submarinas para la elaboración de estas investigaciones.

EL SERVICIO DE CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA MARINA DEL IGME

El Servicio de Cartografía Geológica Marina del IGME participa en acciones nacionales e internacionales para la investigación de minerales submarinos a través de varios proyectos. Estos proyectos han permitido el descubrimiento en el Atlántico Norte y la región antártica de importantes mineralizaciones

polimetálicas de nódulos y costras de ferromanganeso, fosforitas, sedimentos metalíferos hidrotermales y biomineralizaciones de carbonatos derivados de la oxidación microbiana de metano.

El Servicio de Cartografía Geológica Marina del IGME tiene una gran experiencia en el campo de la investigación en aguas profundas desde 1992. El grupo ha participado en siete cruceros de investigación en la Antártida (Península Antártica, Mar de Weddell y Mar de Scotia). También ha organizado cruceros en el Golfo de Cádiz, margen marroquí, mar de Alborán, Islas Canarias, Mar Céltico, Galicia y el Golfo de Vizcaya a bordo de diferentes buques de investigación como el español «Hespérides» y el IFREMER francés «L'Atalante». El Grupo de Geología Marina ha participado en el programa EUROMARGINS de la Fundación Europea de la Ciencia (ESF). Entre los objetivos científico-técnicos del Servicio de Cartografía Geológica Marina se encuentran la cartografía geológica de los fondos marinos incluyendo la extensión de la plataforma continental, recursos minerales y energéticos marinos, emisiones frías y ambientes hidrotermales en aguas profundas, desde la plataforma hasta las llanuras abisales.

Para ampliar la información sobre los depósitos minerales en fondos marinos profundos pueden consultar las siguientes referencias y enlaces:

Depósitos minerales submarinos

- Hannington, M.D., Galley, A.G., Herzig, P.M., and Petersen, S., 1998, Comparison of the TAG Mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits, in Herzig, P.M., 8 Humphris, S.E., Miller, D.J. and Zierenberg, R.A., eds., Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 158: College Station, Texas, p. 389-415.
- Hein, J.R., T.A. Conrad, and H. Staudigel. 2010. Seamount mineral deposits: A source of rare metals for high-technology industries. *Oceanography* 23 (1), p. 184-189.
- Rona, P .A. 2008. The changing vision of marine minerals. *Ore Geology Reviews* 33, p. 618-666.
- Workshop on Minerals Other than Polymetallic Nodules Of the International Seabed Area. Office of Resource and Environmental Monitoring International Seabed Authority, Kingston, Jamaica, April 2004. ISBN: 976-610-647-9 (pbk).
- [Programa de cooperación internacional para el estudio de dorsales oceánicas](#)

Depósitos minerales submarinos en España

- [Proyecto EMODnet-Geology](#)
- González, F.J., Somoza, L., León, R., Medialdea, T., Torres, T., Ortiz, J.E., Lunar, R., Martínez-Frías, J., Merinero, R. 2012. Ferromanganese nodules and micro-hardgrounds associated with the Cadiz Contourite Channel (NE Atlantic): Palaeoenvironmental records of fluid venting and bottom currents. *Chemical Geology* 310-311, p. 56-78.
- González, F. J., Somoza, L., Hein, J. R., Medialdea, T., León, R., Urgorri, V., Reyes, J., Martín-Rubí, J. A. 2016. [Phosphorites, Co-rich Mn nodules, and Fe-Mn crusts from Galicia Bank, NE Atlantic: reflections of Cenozoic tectonics and paleoceanography](#). *Geochem. Geophys. Geosyst.* 17, 2, p. 346-374.
- Marino, E., González, F.J., Somoza, L., Lunar, R., Ortega, L., Vázquez, J.T., Reyes, J., Bellido, E., 2016. [Strategic and rare elements in Cretaceous-Cenozoic cobalt-rich ferromanganese crusts from seamounts in the Canary Island Seamount Province \(northeastern tropical Atlantic\)](#). *Ore Geology Reviews* (in press).
- Diaz-del-Río, V., Somoza, L., Martínez-Frías, J., Mata, M.P., Delgado, A., Hernández Molina, F.J., Lunar, R., Martín Rubí, J.A., Maestro, A., Fernández Puga, M.C., León, R., Llave, E., Medialdea, T., Vázquez, J.T. 2003. Vast field of hydrocarbon-derived carbonate chimneys related to the accretionary wedge/olistostrome of the Gulf of Cadiz. *Marine Geology*, 195, p. 177-200.

Minería submarina, jurisdicciones marítimas y códigos mineros

- [Autoridad Internacional de los Fondos Marinos \(ISA\)](#)
- [Compañía minera de exploración y explotación de sulfuros polimetálicos](#)
- Somoza, L. 2012. España amplía sus fronteras en el mar. XXX SEMANA DE ESTUDIOS DEL MAR. Ed. Fundación ASES MAR cap. 3. p. 45-66.

Tierra y Tecnología nº 49 |

<http://dx.doi.org/10.21028/em.2017.05.12> | **Autores: Egidio**

Marino^{a, b}; Iker Blasco^{a, c}; Lorena Blanco^a; F. Javier González^a; Luís Somoza^a y Teresa Medialdea^a

^a Instituto Geológico y Minero de España, (IGME), C/Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid | ^b Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Univ. Complutense de Madrid, C/Jose Antonio Novais, 2, 28040 Madrid | ^c Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, C/Raquel Meller, 7 280027 Madrid

Redacción

<http://www.icog.es>

Tierra y Tecnología es una publicación del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG). El ICOG es una institución sin finalidad lucrativa creada para la defensa y apoyo de los intereses de los Geólogos, creada por Ley 73/1978 de 26 de Diciembre, es una corporación de Derecho Público, amparada por Ley y reconocida por el Estado, con personalidad jurídica propia y capacidad plena para el ejercicio de sus funciones y cumplimiento de sus fines.

