

# Potencial de la minería submarina: Aplicación SIG para el estudio previo de contratos de exploración de costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto en los fondos marinos internacionales conforme al código minero regulado por la AIFM (Kingsnton, Jamaica)

Manzanares, Antonio M.<sup>a</sup>, González, Javier<sup>b</sup>, Somoza, Luis<sup>b</sup>, Farjas, Mercedes<sup>a</sup>, León, Ricardo<sup>b</sup>, Medialdea, Teresa<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM), Campus Sur-Madrid, email: am\_manzanares@hotmail.com; <sup>b</sup> Área de Recursos y Geología Marina, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), C/ Ríos Rosas, 23-Madrid, e-mail: fj.gonzalez@igme.es

## RESUMEN

El control de los recursos naturales, cambiantes a lo largo de la historia, ha dado protagonismo a unos países frente a otros, generando en muchos casos conflictos entre grandes potencias. Actualmente los recursos minerales denominados de "alta tecnología" son clave para el desarrollo de la industria y de la sociedad moderna. Los metales que contienen estos minerales se emplean en múltiples usos: en la industria militar, los chips de ordenadores, la telefonía móvil, o los paneles solares. Algunos metales muy demandados, como es el caso del cobalto, el telurio y las tierras raras, son escasos en altas concentraciones en yacimientos de tierra firme, sin embargo los recursos minerales submarinos existentes podrían suplir esta escasez. Las costras de ferromanganeso ricas en cobalto ubicadas en montes submarinos de las cuencas oceánicas se presentan como una alternativa viable a la escasez de este tipo de metales estratégicos en los yacimientos minerales de tierra.

En este artículo se definen parámetros y se analiza el potencial minero de costras polimetálicas en el océano Atlántico Central mediante técnicas SIG (Sistema de Información Geográfica), utilizando para ello cartografías de uso público y aplicando la normativa que dicta la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (AIFM ó "ISA" en su acrónimo en inglés "International Seabed Authority") a los resultados obtenidos. A su vez, se muestra la alta utilidad de esta herramienta de análisis para la planificación y petición a la AIFM de contratos de exploración para recursos marinos.

**PALABRAS CLAVE:** montes submarinos, minería submarina, SIG, ISA, costras de ferromanganeso ricas en cobalto.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los recursos naturales, cada vez más escasos, son la clave para el desarrollo de los países industrializados. Actualmente el cobalto, el telurio y las tierras raras entre otros elementos, se han posicionado como metales estratégicos para el desarrollo de la sociedad moderna. El uso principal que se les da a estos metales está relacionado con la denominada "alta tecnología", ésta se refiere a aleaciones especiales, TIC (Tecnologías de la Información y Comunicaciones) e industria militar. La escasez de estos metales en tierra y la demanda cada vez mayor de los mismos hace que el medio marino vaya cobrando mayor protagonismo y se posicione como una alternativa viable para la obtención de este y otro tipo de metales desde yacimientos minerales submarinos (Rona, 2008; Somoza y González, 2011; Hein et al., 2013).

En el lecho marino existen montes submarinos que muy frecuentemente presentan costras de ferromanganeso ricas en cobalto. Una de las características más interesantes de este tipo de mineralizaciones es la porosidad de las costras, de hasta el 60 % (Hein et al., 2009), que favorece la adsorción de múltiples metales en la composición de los oxihidróxidos de Fe-Mn por intercambio de cargas iónicas y favorecida por el efecto de la gravedad. Así pues, los montes submarinos pueden estar cubiertos por extensos enlosados o hardgrounds de costras de hasta 25 cm de grosor, compuestas por proporciones variables e importantes de telurio (Te), cobalto (Co), níquel (Ni), bismuto (Bi), tungsteno (W), niobio (Nb), platino (Pt) y tierras raras (REEs) (Figura 1).

El potencial minero de los montes submarinos se puede evaluar en base a una serie de criterios mediante los cuales se pueden elegir zonas de mayor potencialidad para posteriormente realizar estudios de exploración de detalle. El área objeto de este estudio se centra en "La Zona" donde la exploración, prospección y futura explotación de recursos minerales del fondo y lecho marino está regulado por la ISA. Esta dicta que los derechos de exploración a contratistas para un área de hasta 550 km \* 550 km supone un canon de 500.000 \$, por lo que esta fase previa de identificación de áreas potenciales se torna crucial para la optimización de recursos.

## **2. MONTES SUBMARINOS Y COSTRAS DE FERROMANGANESO RICAS EN COBALTO**

Un monte submarino o seamount, atendiendo a su denominación en inglés, es una formación volcánica que emerge sobre el lecho marino por lo menos 1000 metros, cuya base es elíptica o circular y cuya cima comparada con la base es relativamente pequeña (Menard, 1964). La Organización Hidrográfica Internacional (IHO) define monte submarino como un accidente o un grupo de elevaciones aisladas mayores de 1000 m sobre el lecho marino con forma cónica. Estudios más recientes relacionados con ecosistemas en el fondo marino definen un monte submarino como cualquier accidente geográfico aislado mayor de 100 metros desde el lecho marino (Alder y Wood, 2004; Staudigel et al., 2010). En consecuencia, existe más de una definición formal de lo que es un monte submarino que varían principalmente en función de cuál sea el campo de aplicación del estudio, si bien la mayoría de los autores se refieren a los montes submarinos como una elevación de más de 1000 metros sobre el lecho marino.

Los montes submarinos, al igual que el resto de corteza oceánica, se originan a partir de material mantélico, y surgen de las dorsales oceánicas, zonas de punto caliente o arcos volcánicos. Debido a los movimientos convectivos mantélicos emerge magma generando relieve submarino, si esta salida de materia se hace de manera abrupta se generan montes submarinos. La formación de los montes submarinos de origen volcánico en el lecho marino genera sustratos basálticos duros apropiados para el depósito de costras de ferromanganeso que debido a las características de su elevada superficie específica y a su gran porosidad (60%) permiten la adsorción de gran cantidad de metales muy interesantes para la industria (Hein, 2009; González, 2009; González et al., 2010). Las costras de ferromanganeso son concreciones formadas esencialmente por hierro (Fe) y manganeso (Mn), que precipitan sobre sustratos duros oceánicos formando pavimentos (hardgrounds) y que incorporan una gran variedad y cantidad de metales accesorios y traza a su composición (Co, Ni, Bi, Mo, W, Te, REEs, Pt, etc). La ISA define a las costras de Fe-Mn ricas en cobalto, como depósitos que incorporan metales de origen continental y marino, precipitando a partir de las masas de aguas profundas en forma de capas delgadas (de hasta 25 centímetros de espesor), sobre rocas volcánicas de montes submarinos y cordilleras volcánicas sumergidas, a profundidades de 400 a 4000 metros (ISA, 2013). El término de costras de Fe-Mn ricas en cobalto es utilizado para aquellos depósitos de costras cuyos contenidos en cobalto podrían resultar de interés económico para su explotación comercial (González, 2009). La adsorción de minerales se hace de una forma lenta, del orden de entre 1 y 7 mm por cada millón de años (Hein, 2004), por lo que la edad de la estructura o monte submarino sobre el que se encuentren las costras puede indicar el potencial grosor de las mismas. Aquellos montes cuya coronación es sensiblemente horizontal reciben la denominación de guyots y por lo general tienen un gran potencial para presentar extensos afloramientos de gruesas costras de ferromanganeso en sus cumbres.

## **3. IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LAS COSTRAS DE FERROMANGANESO**

Las costras de ferromanganeso ricas en cobalto contienen una gran cantidad de metales estratégicos muy interesantes para la industria de alta tecnología, en algunos casos la proporción de estos metales en las costras de ferromanganeso puede llegar a ser 4 veces mayor que su equivalente en minas en tierra (figura 1). De todos estos metales lo más interesantes son el cobalto, el telurio y las tierras raras. El cobalto se considera como la clave para la viabilidad de una posible explotación minera submarina, el uso principal al que se destina es el de la industria del acero como componente para aleaciones especiales. El telurio se usa principalmente para la fabricación de placas fotovoltaicas, fabricación de aleaciones de cobre y en general para la fabricación de chips, de este metal no existe fuente primaria de extracción en minas situadas en tierra. En el caso de las tierras raras, la relación producción – demanda no es tan crítica como en el caso de los otros metales, sin embargo estos metales tienen una gran utilidad para industria militar y actualmente china ejerce un control de monopolio sobre su producción.

	Clarion-Clipperton Zone Nodules <sup>b</sup>	Global Terrestrial Reserve Base <sup>c</sup>	Global Terrestrial Reserves <sup>c</sup>	Prime Crust Zone <sup>b</sup>
Manganese	5,992	5,200	630	1714
Copper	226	1,000+	690	7.4
Titanium	67	899	414	88
TREO <sup>d</sup>	15	150	110	16
Nickel	274	150	80	32
Vanadium	9.4	38	14	4.8
Molybdenum	12	19	10	3.5
Lithium	2.8	14	13	0.02
Cobalt	44	13	7.5	50
Tungsten	1.3	6.3	3.1	0.67
Niobium	0.46	3.0	3.0	0.40
Arsenic	1.4	1.6	1.0	2.9
Thorium	0.32	1.2	1.2	0.09
Bismuth	0.18	0.7	0.3	0.32
Yttrium	2.0	0.5	0.5	1.7
PGM <sup>e</sup>	0.003	0.08	0.07	0.004
Tellurium	0.08	0.05	0.02	0.45
Thallium	4.2	0.0007	0.0004	1.2

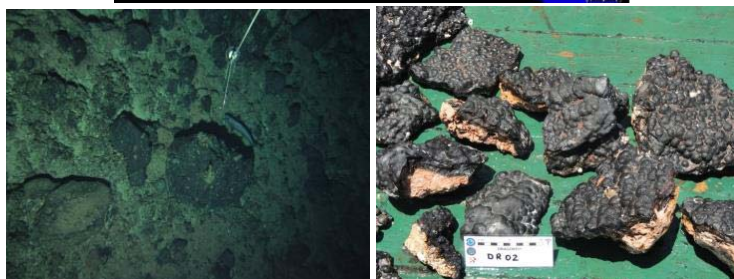
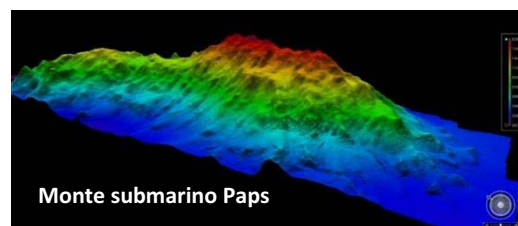


Figura 1 – Tabla comparativa de reservas de metales en tierra frente a zonas submarinas. En rojo, aquellos en los que existen más reservas submarinas que terrestres. (En T \* 10<sup>6</sup> T extraídas) (Hein et al., 2013). A la derecha, modelo 3D de un monte submarino del Sur de las Islas Canarias. Debajo fotografía submarina y costras de ferromanganeso encontradas sobre el monte submarino (tomado de González et al., 2012).

#### 4. MONTES SUBMARINOS EXPLOTABLES: CRITERIOS DE SELECCIÓN

El potencial minero de los montes submarinos es algo que no se sabrá con certeza hasta el momento en el que se haga prospecciones geológicas y geofísicas y análisis físico, mineralógico y químicos de las muestras obtenidas, ya que incluso tomando muestras el grosor y calidad de las costras puede ser significativamente variable dentro de un mismo monte submarino. Sin embargo, existen criterios para poder discernir a priori qué montes submarinos pueden ser interesantes en base a su potencial que se tratarán a continuación.

- Geomorfología: Dado que la adsorción de metales se favorece por la acción de la gravedad, los montes submarinos con coronación horizontal, guyot, mesetas, terrazas y collados son las zonas donde a priori se encontrará mejor y mayor cantidad de mineral, siendo especialmente interesantes las pendientes comprendidas entre 1 y 10 ° Tanto en guyots como en montes submarinos los flancos serán las zonas con menor calidad de mineral, del mismo modo que los flancos y taludes de islas y atolones (Hein et al., 2000; Zhang et al., 2008).
- Profundidad del monte submarino: Este criterio está condicionado por la tecnología existente para la extracción de mineral y por las características de los montes submarinos. Los montes submarinos más atractivos desde el punto de vista de potencial se sitúan en torno a 2000 – 2500 m, mientras que la tecnología para explotar a 2500 m es similar a la necesaria para 1500 m. Además conforme se gana en profundidad, las costras se vuelven más rugosas (micro relieve) y se pierde en calidad y cantidad de mineral (Hein et al., 2009).
- Superficie del área a explotar: Como se ha indicado en la introducción de éste capítulo, el grosor y calidad de los minerales de las costras de ferromanganeso es variable dentro de un mismo monte submarinos, por lo que es preferible escoger superficies grandes. Sin embargo existen condicionantes medioambientales que pueden inducir a elegir montes con superficie más pequeña, dado que aún no se sabe si es preferible elegir muchas zonas con superficie pequeña o una sola zona de gran superficie (Hein et al., 2009).
- Cobertura de sedimentos: Una capa de sedimentos alteraría negativamente las propiedades de las costras de ferromanganeso y por lo tanto derivaría en una menor cantidad y calidad de metales estratégicos. Según Yamazaki et al (1993 y 1996) los grosores de sedimentos mayores de un 70% se desecharían a la hora de la elección de una zona para una explotación, sin embargo el mismo autor afirma que a la hora de realizar la extracción del material se podría separar el mineral del sedimento. Existen 2 criterios por los que se puede deducir la existencia y abundancia de sedimentos en un monte submarino: 1) Corrientes submarinas predominantes: Ya que limpiarían el fondo de sedimentos. 2) Proximidad a costa: Dado que a mayor cercanía a costa mayor aporte de sedimentos (Hein, 2004; González et al., 2012).
- Afloramientos calcáreos: ocasionalmente se producen formaciones de atolones y de arrecifes calizos. Normalmente son afloramientos más jóvenes que las rocas volcánicas sobre las que se asientan y presentan costras de ferromanganeso delgadas. Debido a diversos procesos químicos las costras de ferro-manganeso quedan fuertemente soldadas a estos afloramientos por lo que su aparición marca el

límite de extracción ya que una extracción conjunta de material calcáreo y costras implicaría una notable disminución del contenido de metales por tonelada de material (Hein et al., 2009).

- Edad de la estructura volcánica: Como se ha indicado, los metales que son adsorbidos por las costras de ferromanganeso se fijan a razón de entre 1 y 7 mm por cada millón de años, por lo que se deduce que a mayor antigüedad de la estructura, mayor grosor y calidad de mineral. Según estudios realizados en el océano Pacífico se sabe que montes submarinos mayores a 65 millones años pueden llegar a contener costras de hasta 25 cm de grosor. (Hein, 2004).
- Eficiencia minera: Este criterio está condicionado por las condiciones del monte submarino a explotar, por lo que la profundidad y la rugosidad del terreno influirá notablemente. En este sentido las técnicas de extracción son un factor importante, y se encuentran en constante desarrollo tecnológico.
- Grosor de las costras: El grosor de las costras de ferromanganeso es variable dentro de un mismo guyot o monte submarino. En principio los grosores entre 2 y 3 cm se desecharan para la minería submarina, sin embargo, si las costras son lo suficientemente extensas se podría considerar costras de entre 3 y 6 cm (Hein et al., 2009).
- Proximidad a costa: Pese a que el presente trabajo tiene como ámbito de estudio “La Zona” es interesante escoger zonas de exploración lo más cercanas posible a costa, principalmente debido a criterios económicos y logísticos.
- Sismicidad: Una zona con gran sismicidad puede fragmentar costras de ferromanganeso haciendo que estas se desplacen a lo largo del talud del monte submarino, lo que condicionaría la extracción del material (Hein, 2004). Además zonas de gran sismicidad podrían indicar áreas donde el flujo de calor y de fluidos desde la corteza terrestre es alto, formando costras con grandes grosores pero empobrecidas en metales estratégicos. Si bien estas zonas podrían ser interesantes para la extracción de otro tipo de metales como cinc y plata o el hallazgo de yacimientos de otros recursos minerales marinos como podrían ser sulfuros polimetálicos hidrotermales (por ejemplo en las áreas de dorsal oceánica).

## 5. LA AUTORIDAD INTERNACIONAL DE LOS FONDOS MARINOS

La Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (ISA en su acrónimo en inglés “International Seabed Authority”), es un organismo autónomo que regula las labores de exploración, prospección y explotación de recursos mineros en “La Zona”. Fue creado como organismo autónomo en 1994 en virtud de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho Internacional del Mar en 1982 (ISA, 2013). La ISA dicta los códigos y reglamentos que rigen las labores de exploración de recursos minerales en las aguas internacionales patrimonio de la humanidad haciendo especial hincapié en aspectos medioambientales, del mismo modo que afirma que una exploración puede ser anulada si se encuentran restos arqueológicos o humanos. En el artículo 153 de la Convención, “sistemas de exploración y explotación”, se dan las líneas sobre el aprovechamiento y gestión de los recursos en “La Zona”.

Hasta el año 2013 la ISA ha establecido los reglamentos que regulan la exploración en “La Zona” de nódulos de manganeso (año 2000), sulfuros polimetálicos (año 2010) y costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto (año 2012). Y se han firmado contratos de exploración para estos recursos minerales entre la ISA y numerosos contratistas internacionales entre los que se encuentran consorcios de países como Reino Unido, Alemania, Francia, Rusia, China o Japón.

En el reglamento de la ISA sobre prospección y exploración de costras de ferromanganeso con alto contenido de cobalto se establecen claramente criterios geográficos sobre la extensión, dimensiones y localización de las áreas de exploración y que se han considerado para la elaboración de este estudio. Así en el artículo 12 dice:

Superficie total a que se refiere la solicitud:

1. A los efectos del presente reglamento, por “bloque de costras cobálticas”, se entiende una o más secciones de la retícula establecida por la Autoridad que puede tener forma cuadrada o rectangular, y una superficie no superior a 20 kilómetros cuadrados.
2. La superficie a que se refiera cada solicitud de aprobación de un plan de trabajo de exploración de costras cobálticas no podrá exceder de 150 bloques de costras cobálticas, que estarán configurados por el solicitante en conglomerados, como se indica en el párrafo 3.
3. Cinco bloques contiguos de bloques de costras cobálticas constituyen un conglomerado de bloques de costras cobálticas. Se consideran contiguos dos de esos bloques que coincidan en cualquier punto. Los conglomerados de bloques de costras ISBA/18/A/1112-57348 9 cobálticas no deben necesariamente ser contiguos, pero han de hallarse próximos entre sí y estar situados íntegramente en una zona geográfica que no mida más de 550 kilómetros por 550 kilómetros.

4. No obstante lo dispuesto en el párrafo 2, cuando el solicitante opta por aportar un área reservada para desarrollar actividades con arreglo al artículo 9 del anexo III de la Convención, de conformidad con el artículo 17 del presente reglamento, la superficie total a que se refiera la solicitud no podrá exceder de 300 bloques de costras cobálticas. Esos bloques estarán configurados en dos grupos de igual valor comercial estimado y cada uno de esos grupos de bloques de costras cobálticas estará configurado por el solicitante en conglomerados, como se indica en el párrafo 3.

## 6. METODOLOGÍA DE TRABAJO

### 6.1. Zona de trabajo

La zona de trabajo elegida para la ejecución del estudio es el océano Atlántico Central (Figura 2). Esta zona se ha elegido por varios motivos: en primer lugar se trata de la zona que más influencia podría tener para Europa y para España en particular; se trata de una zona relativamente poco estudiada; por último, el relieve submarino del océano Atlántico Central presenta una gran diversidad de tipologías que hace que sea un área en donde obtener gran variedad de resultados. Dentro del océano Atlántico Central, este estudio se centra en “La Zona”, esto es, en aguas internacionales patrimonio de la Humanidad ya que uno de los objetivos de este trabajo es aplicar la normativa vigente dictada por la ISA. Las zonas económicas exclusivas y aguas territoriales de los países ribereños están legislados por ellos, por lo que las condiciones de exploración y explotación las dictarán los países en cuestión.

### 6.2. Cartografía Base

La cartografía base de trabajo se obtuvo de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) de 1 minuto de arco de resolución, aproximadamente 1,8 km (GEBCO, 2007). Se trata de una compilación cartográfica de numerosas fuentes tanto de tierra como de mar (altimetría de satélite, sondas monohaz y multihaz). Esta cartografía está obtenida principalmente mediante satélites altimétricos, éstos están monitorizados mediante satélites GPS y estaciones en tierra, de manera que se sabe perfectamente la posición del satélite respecto a un elipsoide global de referencia. El satélite lleva montado un radar de apertura sintética que realiza mediciones sobre la lámina de agua, la lámina de agua se adapta al relieve batimétrico. Dado que las alturas se dan sobre el geoide, que está modelado, y las mediciones se hacen tomando como referencia el elipsoide, las alturas elipsoidales obtenidas con las mediciones del radar altimétrico se pueden transformar a alturas geoidales. Como se puede deducir, independientemente de la resolución de la cartografía utilizada para el trabajo, la cartografía tiene una precisión media debido a los medios con los que se ha obtenido, sin embargo este tipo de cartografía es homogénea, de manera que para realizar estudios globales resulta muy adecuada.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Identificación y definición de montes submarinos

Con la cartografía preparada se pasó a la fase de identificación y localización de montes submarinos, todo el proceso cartográfico se realizó con ArcGis 10. Para la localización de montes submarinos se utilizaron los algoritmos usados por Kitchingman y Lai (2004). Estos algoritmos están basados en el paquete de análisis hidrológico de ArcGis.

- En primer lugar se eliminó la parte positiva, parte terrestre, de la cartografía objeto de estudio
- La parte negativa se multiplicó por -1, de manera que la batimetría se convirtió en topografía
- Se le aplicó el algoritmo “flow direction”, dirección de flujo, que calcula el camino descendente del agua de una celda respecto a sus vecinas.
- Las celdas que no tienen vecinas que hagan fluir el agua se localizaron mediante el algoritmo “sink”, sumidero.

En este proceso de inversión de la cartografía podemos decir que la batimetría se convirtió en topografía, y con ello los montes submarinos que antes eran elevaciones se convirtieron en depresiones, es decir, en zonas donde el agua no fluye y se acumula (sumideros).

Tras la localización de sumideros, se discriminaron aquellos que no cumplen con la definición de que han de medir al menos 1000 m sobre el lecho marino. Este procedimiento generó errores en zonas conflictivas como en crestas y cabezas de taludes, además no definió los montes submarinos, sólo los localizó (Figura 2a). Para solucionar esta situación se ideó una metodología consistente en calcular un modelo de pendientes y otro de desviaciones estándar de las altitudes de la zona de estudio. Posteriormente se realizó un estudio de cómo se comportaban estos modelos en montes submarinos conocidos y se realizó una reclasificación de valores que se ajustaran lo máximo posible a las características de ellos combinando el resultado en un solo modelo. Esta metodología dio resultados satisfactorios en montes submarinos aislados pero no resolvía completamente los problemas de identificación y definición de montes submarinos en crestas, ni el problema de los taludes (Figura 2b). Por todo ello, se tuvo que realizar la identificación y definición de montes submarinos de una manera semiautomática, de manera que la localización se hizo fácilmente mediante los algoritmos de Kitchingman y Lai y la definición se realizó con la ayuda de la metodología desarrollada por los autores de este trabajo. Los resultados obtenidos en este trabajo están muy condicionados por el operador cartográfico, puesto que las fases de identificación y definición de montes submarinos se realizan de manera semiautomática, además la resolución de la cartografía también influye en la elección de montes submarinos al existir la posibilidad de obviar accidentes submarinos que sean de menor tamaño que la resolución del ráster. Se eligió una resolución de ráster que cumpliera un compromiso entre capacidad de cálculo y resolución de análisis.

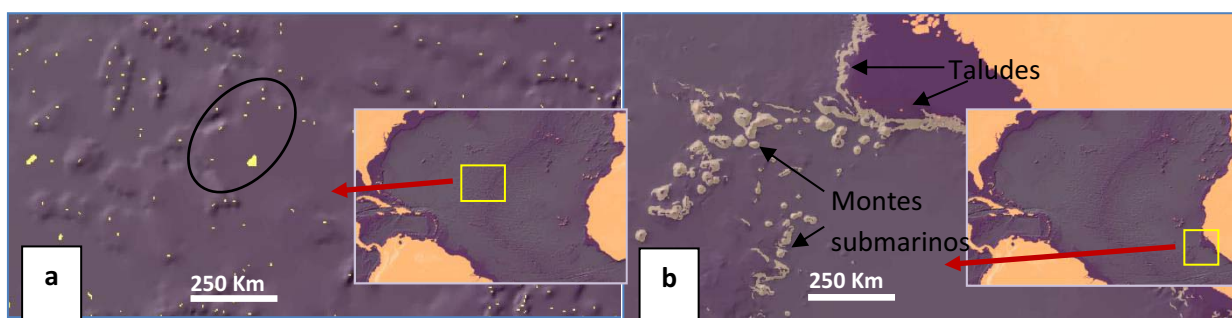


Figura 2 – Océano Atlántico Central. a) detalle de ubicación de montes submarinos erróneos en el área de estudio. b) detalle de montes submarinos definidos correctamente y taludes marcados erróneamente.

## 7.2. Cálculo del potencial minero

Para el cálculo del potencial minero se eligieron una serie de criterios cuantitativos y se convirtieron en variables cualitativas: potencial alto (valor 1), medio (valor 2) y bajo (valor 3). El criterio objeto de estudio en cada caso se reclasificó obteniéndose para cada uno un mapa temático de potencial minero. Con todos los criterios estudiados se realizó una media simple obteniéndose un mapa total de potencial minero (Figura 3).

- Profundidad montes submarinos: Los valores se reclasificaron de manera que las profundidades entre 800 y 2200 m tomaron valor 1, ya que ésta es la franja en la que las costras de manganeso presentan mayor riqueza en metales valor 2 para la franja de profundidades entre 2200 y 2500 m y valor 3 para profundidades mayores a 2500 m.
- Profundidad de la cima; Este criterio se ideó en base a la operatividad de las labores extractivas. Las profundidades menores a 1500 m toma valor 1, la franja comprendida entre 2200 y 2500 m toman valor 2 y las profundidades mayores a 2500 m toman valor 3.
- Superficie explotable: a mayor superficie mayor aprovechamiento y mayor probabilidad de encontrar costras con grosores aceptables. De manera que las superficies mayores a 500 km<sup>2</sup> toman valor 1, las comprendidas entre 130 y 500 valor 2 y las menores de 130 km<sup>2</sup> toman valor 3.
- Edad del monte submarino: La edad de los montes submarinos indica el tiempo que han tenido las costras de ferromanganeso de adsorber metales estratégicos. Para estudiar este criterio se usó un mapa ráster de edad de la corteza oceánica descargado de la NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/mggd.html>). La clasificación de los valores se hizo conforme al siguiente criterio: Edades mayores de 65 Ma valor, 1 comprendidos entre 65 y 20 Ma valor 2 y menores de 20 Ma valor 3.
- Corrientes marinas predominantes: Para implementar este criterio, se digitalizó un mapa de corrientes marinas predominantes obtenido de [www.age-geografia.es](http://www.age-geografia.es). Las distancias al eje de la corriente principal menores a 150 km tomaron valor 1, las comprendidas entre 150 y 300 km valor 2 y las mayores a 300 km valor 3.

- Proximidad a la costa desde el punto de vista económico: Pese a que el estudio se centra en “La Zona” se tratarán de elegir montes submarinos que se encuentren lo más cercanos posible a costa para reducir costes económicos en combustible y abastecimiento. Así, el criterio seguido fue: valor 1 aquellos montes que se encuentren a menos de 200 M de costa, valor 2 para aquellos montes que se encuentren entre 200 y 350 M y valor 3 para los que se encuentren a más de 350 M.
- Proximidad a costa desde el punto de vista de aporte de sedimentos: Los aportes fluviales y eólicos desde los continentes influyen de manera negativa al enriquecimiento de metales estratégicos de los montes submarinos. De este modo los criterios elegidos, fueron: distancias mayores a 200 M toman valor 1, distancias comprendidas entre 200 y 100 M toman valor 2 y distancias menores a 100 M toman valor 3.
- Cobertura de sedimentos: La aplicación de este criterio dará como resultado un visión global del grosor de sedimentos de sobre el lecho marino, donde las zonas más jóvenes tendrá menor grosor y las más antiguas mayor grosor. Para ejecutar esta fase del trabajo fue necesario utilizar un mapa de grosores de sedimento que fue descargado de la NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/mggd.html>). Este ráster tiene menor resolución que la cartografía base utilizada, 5 minutos de arco, esto implica que las zonas de grosores anómalos (negativos), donde se localizan los montes submarinos, no quedan totalmente definidas. No obstante se aplicó este criterio con los siguientes valores: Valor 1 grosores de hasta 500 m, valor 2 valores comprendidos entre 500 y 1500 m, y valor 3 valores mayores a 1500m.
- Pendiente del monte submarino: Una pendiente sensiblemente horizontal favorece la adsorción de material, ya sean guyots, terrazas o zonas con pendientes suaves. El criterio de clasificación fue: Pendientes de hasta 10° toman valor 1, valores comprendidos entre 10° y 20°, y pendientes mayores a 20° valor 3.

Con todos los criterios se realizó una media simple para no condicionar los resultados y se obtuvo un mapa temático de potencial minero (Figura 3). En este mapa se observa como las zonas con mayor potencial se encuentran separadas de las dorsales oceánicas y relativamente cercanas a costa. Tanto en los resultados parciales como en el mapa fruto de promediar los criterios, se aprecia que la ubicación de los montes submarinos con mayor potencial cumplen los fundamentos teóricos, estando las zonas con mayor potencialidad minera alejadas de las dorsales, donde la antigüedad de la corteza es mayor (>60 Ma), las profundidades suelen ser menores que en las dorsales (800-2500 m), y la distancia a costa es mucho menor que en el centro del océano Atlántico (<400 M).

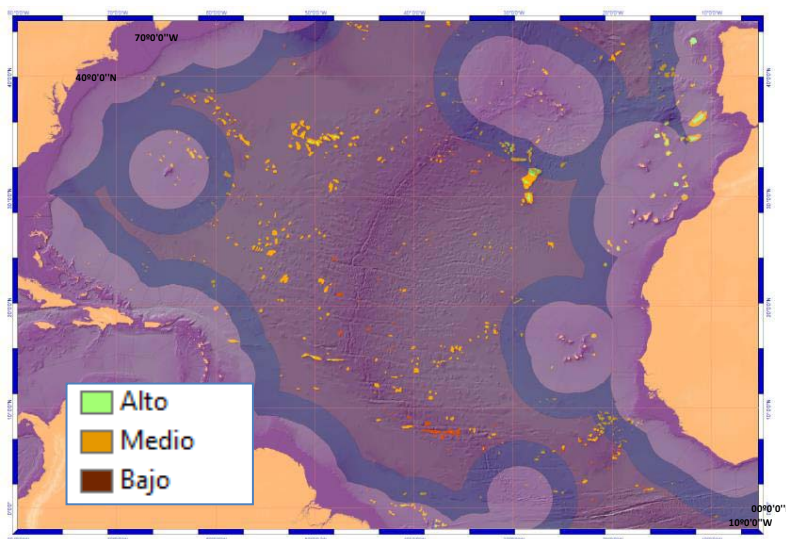


Figura 3 – Mapa final de potencial minero. Superposición de las ZEE (violeta) y ampliación de plataforma continental (azul) con la cartografía temática de potencial minero de montes submarinos localizados en el océano Atlántico Central.

### 7.3. Casos de aplicación del código minero de la ISA: permisos de exploración

Para la realización de esta fase del estudio se superpuso a la cartografía temática obtenida en el punto anterior las zonas económicas exclusivas de los países implicados en el estudio, esta información se obtuvo de [www.marineregions.org](http://www.marineregions.org). Posteriormente y en base a esta información se calculó con ArcGis la ampliación de la plataforma continental teórica, asumiendo que sería de 350 M desde la línea de base de los países implicados. Con esta cartografía (Figura 3) se eligieron dos zonas donde aplicar las directrices del reglamento de exploración y prospección que dicta la ISA para costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto. Estas zonas fueron elegidas por su alto potencial deducido de la anterior fase del estudio y son la zona situada entre Azores - Canarias y una zona al Este de la isla Bermuda.

La zona de Azores – Canarias (Figura 4) se subdividió en 4 áreas de exploración, de manera que se hicieron 4 casos de estudio, unos para un guyot aislado, otro para dos montes submarinos dentro de una misma área de exploración, otro caso de estudio de un monte parcialmente perteneciente a la ampliación teórica de la plataforma continental Portuguesa y otro íntegramente perteneciente a la plataforma continental (ZEE Portugal). Estos dos últimos casos son interesantes puesto que el país ribereño puede explorar y explotar su plataforma continental pero ha de pagar un canon a la ISA.

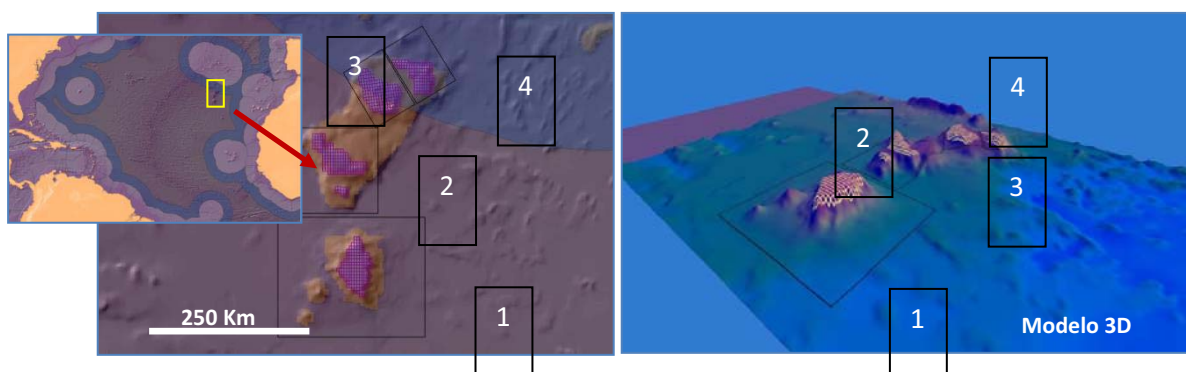


Figura 4 – Casos de estudio de Azores - Canarias con delimitación de las parcelas de exploración: 1) guyot aislado, 2) dos montes submarinos en una misma área de exploración, 3) monte submarino parcialmente perteneciente a la plataforma continental teórica de Portugal, 4) monte submarino totalmente perteneciente a la plataforma continental de Portugal.

La zona del Este de la Isla Bermuda (Figura 5) centra el interés al formar un cluster o conjunto de montes submarinos con potencial de exploración y explotación. Teniendo en cuenta que los derechos de exploración de un área geográfica valen 500.000\$ este tipo de estudios preliminares se perfilan como una herramienta fundamental para optimizar recursos. Los estudios in situ posteriores verificarán la bondad del método de análisis SIG del potencial minero de los montes submarinos. A este respecto existen bases de datos globales de montes submarinos donde se pueden consultar grosores, extensión, composición y otros rasgos de las costras y los montes submarinos que pueden implementarse al análisis SIG para verificarlo o para precisar con mayor exactitud las zonas de mayor potencial minero.

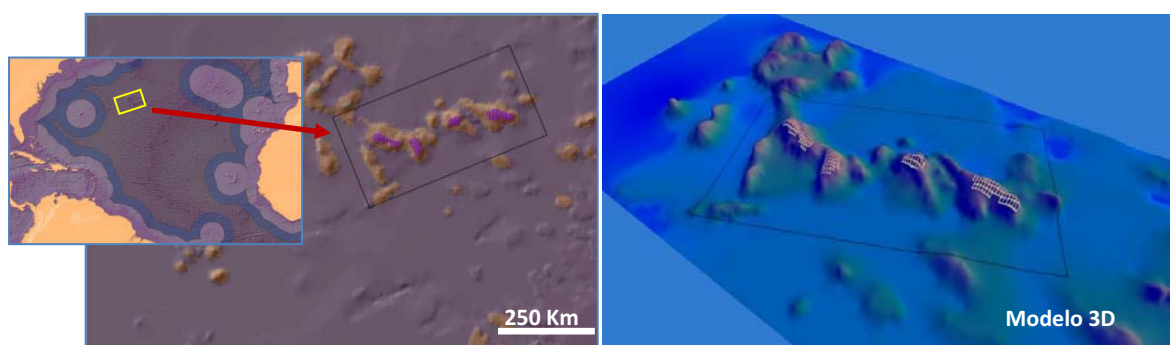


Figura 5 – Caso de estudio de Isla Bermuda con delimitación de las parcelas de exploración. Cluster o conjunto de montes submarinos en una misma área de exploración.



## 8. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra la potencia y utilidad de las herramientas SIG para los estudios previos de exploración y prospección conforme a los reglamentos de la ISA de zonas con potencial minero en montes submarinos de “La Zona”, utilizando cartografías marinas de uso libre.

Tras realizar el estudio de potencial se han localizado 553 montes submarinos en la fase de identificación y definición de montes submarinos en el océano Atlántico Central. De todos ellos según el estudio realizado, son susceptibles de ser explotados 51 montes submarinos que suponen una superficie total explotable de 4.527.999 Ha, esto significa que el 9,22% de los montes submarinos del Atlántico Central tiene potencial minero alto. No obstante este número podría variar, primero por la fase de identificación y definición de montes submarinos y en segundo lugar si se aplicaran más criterios a la selección y/o se aplicaran pesos en función de la importancia asignada a cada uno de ellos. 17 de los 51 montes submarinos se encuentran dentro de la ZEE de los países incluidos en la zona de estudio, lo que significa que son estos países los que conforme a su legislación regularán las labores de exploración y explotación, si se diera el caso, dentro de sus aguas. Si se centra el estudio en las áreas que se han elegido para los casos de estudio (Azores e isla Bermuda), se obtiene una superficie explotable de 1.139.849 Ha.

Dentro de los resultados obtenidos, merece la pena destacar la presencia de montes submarinos con potencial alto y gran superficie ubicados en la zona del Golfo de Cádiz y en el Oeste de Portugal, del mismo modo que en el Sur de Canarias y el Banco de Galicia, éste último íntegramente perteneciente a la ZEE de España.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alder, J., wood, L. (2004). “managing and protecting seamounts ecosystems”. seamounts: biodiversity and fisheries. fisheries centre research reports. vol 12. nº 5. p 67 – 74.
- Autoridad Internacional de los Fondos Marinos. Código de minería. “Reglamento sobre prospección y exploración de costras de ferromanganeso con alto contenido de cobalto en La Zona”. <http://www.isa.org/jm/es/mcode> (Junio 2013).
- Claus, S., De Hauwere, N., Vanhoorne, B., Hernandez, F., Mees, J. (Flanders Marine Institute) (2013). [Marineregions.org](http://www.marineregions.org). Accessed at <http://www.marineregions.org> (Julio 2013).
- Computerized digital images and associated databases are available from the National Geophysical Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, <http://www.ngdc.noaa.gov/> (Julio 2013).
- General Bathymetric chart of the oceans. The GEBCO one minute grid. [http://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/) (Febrero 2013).
- González, F.J. (2009). Nódulos y costras de hierro-manganeso en el Golfo de Cádiz y la Antártida: génesis e implicaciones paleoceanográficas. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. Serie Tesis Doctorales, nº 17, 519 pp. ISBN: 978-84-7840-809-2.
- González, F.J., Somoza, L., Maldonado, A., Lunar, R., Martínez-Frías, J., Martín-Rubí, J.A., Castillo-Carrión, M. (2010). “High Technology Elements” in Co-Rich Ferromanganese Crusts from the Scotia Sea. *Macla* 13, 113-114.
- González, F.J., Somoza, L., Hein, J.R., Vázquez, J.T., Medialdea, T., León, R., Martín-Rubí, J.A., Bellido, E., Reyes, J. (2012). Deep-water seamounts and banks along the Atlantic Spanish continental margin as a potential source of raw materials. European Mineralogical Conference, Frankfurt. Vol. 1, EMC2012-422, 2012.
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Bau, M., Manheim, F.T., Kang, J-K., Roberts, L. (2000). Co-rich ferromanganese crusts in the Pacific. In: D.S. Cronan (Ed.), *Handbook of marine mineral deposits*. CRC Marine Science Series. CRC Press, Boca Raton, Florida, 239-279.
- Hein, J.R. (2004). Cobalt-rich ferromanganese crusts: global distribution, composition, origin and research activities. In: ISA (Ed.), *Minerals other than polymetallic nodules of the International Seabed Area*. Workshop Report, Kingston, Jamaica, 188-272.
- Hein, J.R. (2006). Seamounts and cobalt-rich Ferromanganese crust. U.S. Geological Survey.
- Hein, J.R., Conrad, T.A., Dunham, R.E. (2009). Seamount Characteristics and Mine-Site Model Applied to Exploration and Mining Lease-Block Selection for Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts; *Marine Georesources and Geotechnology*. 27 (2), 160-176.
- Hein, J.R., Conrad, T.A., Staudigel, H. (2010). Seamount Mineral Deposits: A source of rare metals for high – technology industries. *Oceanography*, vol 23, nº1, 184-189.
- Hein, R.J., Mizell, K., Koschinsky, A., Conrad, T.A. (2013). Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, 51, 1-14.
- Kitchingman, A., Lai, S. (2004). Inferences on potential seamount locations from mid – resolution bathymetric data. *Seamounts: Biodiversity and fisheries*. Fisheries Centre Research Reports. Vol 12. Nº 5, 7-12.
- Menard, H.W. (1964). *Marine Geology of the Pacific*. McGraw-Hill. New York, 271p.

- Naciones Unidas. Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del mar. [http://www.un.org/depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/convemar\\_es.pdf](http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/convemar_es.pdf) (Marzo 2013).
- Rona, P.A. (2008). The changing vision of marine minerals. *Ore Geology Reviews*, 33,618-666.
- Staudigel, H., Koppers, A.A.P., Lavelle, J.W., Pitcher T.J. and Shanks, T.M. (2010). Defining the word “seamount”. *Oceanography*, 23, 10-20.
- Somoza, L., González, F.J. (2011). Minería submarina: se inicia la explotación de los fondos oceánicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 19 (1), 115-118.
- Yamazaki, T., Igarashi, and Maeda, K. (1993). Buried cobalt rich manganese deposits on seamounts. *Resource geology special issue* 17: 76-82.
- Yamazaki, T., Tsurusaki, K. and Chung, J.S. (1996). A gravity coring technique applied to cobalt-rich manganese deposits in the Pacific Ocean. *Marine Georesources and Geotechnology* 14, 315-334.
- Zhang, F., Zhang, W., Zhu, K., Gao, S., Zhang, H., Zhang, Xi., Zhu, B. (2008). Distribution characteristics of cobalt –rich ferromanganese crust resources on submarine seamounts in the western pacific. *Acta Geologica Sismica*. Vol 82, nº 4, 796-803.