

**12° período de sesiones**

Kingston (Jamaica)

7 a 18 de agosto de 2006

**Modelo de exploración y explotación minera aplicado a la selección de bloques para la extracción de costras de ferromanganeso con alto contenido de cobalto y sulfuros polimetálicos****Parte II: Sulfuros polimetálicos****Documento preparado por la secretaría\*****I. Introducción**

1. Se tiene conocimiento de más 300 emplazamientos de respiradores hidrotérmicos submarinos y fenómenos asociados de mineralización en los fondos marinos. De ellos, unos 100 contienen sulfuros polimetálicos (gráfico 1 y cuadro 1). La presencia de chimeneas negras hidrotérmicas de temperaturas elevadas (aproximadamente 350° C) es la característica más reconocible de esos emplazamientos, pero también se han descubierto otras muchas modalidades de mineralización. Aproximadamente el 40% de los emplazamientos conocidos están situados en la Zona. Por distintos motivos, incluidos los de carácter jurídico y técnico la reciente exploración comercial de sulfuros polimetálicos en los fondos marinos se ha restringido a yacimientos situados dentro de los límites de zonas económicas exclusivas establecidas (gráfico 2). En el presente documento se examinan los criterios y posibles modelos de adjudicación de bloques arrendados para fines de exploración en la Zona, y se exponen los fundamentos científicos de la selección de áreas de prospección y del calendario de cesión de los bloques arrendados durante la fase de exploración.

\* El presente documento es un resumen de un estudio más detallado preparado por los Sres. Mark Hannington y Thomas Monecke, consultores de la Universidad de Ottawa (Canadá). Los miembros del Consejo podrán consultar el texto completo del estudio, con los mapas y apéndices que lo acompañan, en el sitio web de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos.

<sup>1</sup> Los gráficos y cuadros se han omitido del presente documento de síntesis para facilitar su reproducción.

2. También se presentan ejemplos prácticos de la adjudicación de bloques arrendados en áreas con yacimientos de sulfuro conocidos, utilizando tanto “bloques contiguos” como “grupos de bloques contiguos”. A partir de los distintos criterios y procedimientos de selección posibles, se comparan dos modelos de adjudicación de licencias de exploración en 32 áreas diferentes en las que se tiene constancia de la existencia de al menos un yacimiento de sulfuros polimetálicos, 12 de las cuales están situadas en la Zona (gráfico 3). El resultado de los modelos de exploración en términos de su eficiencia en la selección de áreas que se sabe contienen sulfuros polimetálicos (y la cesión de otras que no los contienen) se examina a escala mundial, regional y desde la fase de prospección hasta la selección de los bloques que presentan las mejores condiciones para ser retenidos al final de la fase de exploración. En los modelos se tienen en cuenta:

- a) Las limitaciones geológicas de las áreas de prospección;
- b) Los conocimientos sobre la distribución de los sulfuros polimetálicos;
- c) Las características de los distintos yacimientos de sulfuros.

También pueden ponerse a prueba otros modelos que podrían ser más adecuados, utilizando los datos que se presentan en este documento.

3. Los sulfuros polimetálicos presentan una serie de rasgos importantes que los distinguen radicalmente de las costras y los nódulos en cuanto a sus condiciones geológicas, distribución y continuidad, y que deben tenerse en cuenta en la selección de las áreas. Las dimensiones de los yacimientos pueden oscilar desde unas pocas decenas hasta centenares de metros, mientras que las costras cubren áreas más amplias del fondo marino y presentan mayor continuidad física (véanse por ejemplo las escalas kilométricas en Hein *et al.*, 1999). Estas diferencias exigen estrategias de exploración que difieren en aspectos fundamentales.

4. El análisis contenido en este documento se basa en los conocimientos actuales sobre el tamaño y la distribución de los yacimientos de sulfuros polimetálicos. No se han tenido en cuenta posibles limitaciones económicas o técnicas a la exploración de sulfuros polimetálicos en las ubicaciones examinadas. Los modelos propuestos tan sólo contemplan la fase de exploración y no se ocupan de la explotación efectiva más que para estimar las dimensiones mínimas de los bloques requeridos por una explotación de varios años de duración. Los ejemplos de bloques arrendados que se utilizan en el presente documento no constituyen una evaluación económica de zonas o yacimientos específicos del fondo marino. Es posible que se mencionen yacimientos de sulfuros que podrían reunir los requisitos necesarios para su explotación comercial, pero no se han elaborado ni aplicado evaluaciones económicas. Todos los ejemplos se citan con fines estrictamente ilustrativos sin implicar en ningún caso que en la zona de que se trate existan realmente recursos susceptibles de explotación comercial. La información suministrada en este documento, incluidos el espesor y el área de volúmenes contiguos de sulfuros, la densidad aparente, el contenido medio (ley) de los metales y demás características mineralógicas y metalúrgicas, no puede emplearse para inferir la existencia de recursos, ni se ha querido afirmar implícitamente la presencia de dichos recursos, salvo como ejemplo hipotético y tan sólo en la medida en que existan datos que lo justifiquen. Todas las referencias a empresas comerciales que participan en la exploración submarina de sulfuros polimetálicos se incluyen asimismo con fines ilustrativos únicamente y no suponen aprobación de las actividades o los programas

de esas sociedades ni una recomendación para que se consideren modelos aplicables en la Zona. No se examina la cuestión de la coherencia con la Convención y el proyecto de reglamento sobre prospección y exploración de sulfuros polimetálicos y costras de ferromanganeso con alto contenido de cobalto en la Zona (ISBA/10/C/WP.1/Rev.1\*), excepto en cuanto al diseño de los modelos de exploración.

## II. Terminología

5. A los fines del presente documento y en los modelos que se presentan a continuación se ha utilizado la siguiente terminología:

a) Zona de prospección: área preliminar cuyos fondos marinos pueden contener sulfuros polimetálicos o zona propicia a la formación de sulfuros, una parte de la cual puede asignarse para fines de exploración según establece el proyecto de reglamento. En los 32 ejemplos que se presentan en este documento, la zona de prospección se define arbitrariamente como un área de menos de 5 x 5 grados que contiene al menos un yacimiento conocido de sulfuro u otro indicio positivo de mineralización. En realidad, una zona de prospección puede identificarse exclusivamente a partir de la existencia de características geológicas favorables, a falta de cualquier indicio de mineralización;

b) Zona de exploración: parte de la zona de prospección sobre la que se tiene una “licencia” y que comprende múltiples bloques contiguos o no contiguos reservados a la exploración avanzada. Normalmente su área no excederá de un grado de longitud por otro de latitud y contendrá al menos un yacimiento conocido de sulfuro u otro indicio positivo de mineralización. En los modelos que se presentan en este documento, las dimensiones de la zona de exploración equivalen a 100 bloques de 10 km x 10 km, según lo especificado en el proyecto de reglamento;

c) Bloque arrendado: parte de la zona de exploración cuyas dimensiones aproximadas son de 10 km. x 10 km. sin superar los 100 km<sup>2</sup>, según señala el proyecto de reglamento;

d) Zona propicia: parte de la zona de prospección que presenta una serie de características geológicas consideradas esenciales para la formación de sulfuros polimetálicos. Al definir los límites de una zona propicia, los dos indicadores básicos más utilizados son la existencia de indicios de actividad tectónica y de vulcanismo en el fondo oceánico. Normalmente, esos fenómenos impulsan la circulación hidrotérmica y dirigen los fluidos hidrotérmicos al fondo marino, donde pueden depositarse los metales. Una zona propicia puede presentar yacimientos de sulfuros polimetálicos u otros indicios positivos de mineralización, pero ello no es imprescindible;

e) Zona de condiciones más favorables: área elegida para la exploración avanzada que normalmente contendrá al menos un yacimiento de sulfuros. En los modelos que aquí se presentan, las zonas de condiciones más favorables son normalmente los bloques que contienen más de un yacimiento de sulfuros;

f) Yacimiento de sulfuros: masa diferenciada de sulfuros polimetálicos (por ejemplo, en forma de chimenea o montículo) o grupo de estructuras de este tipo en un área definida (por ejemplo, un campo de chimeneas) que normalmente (pero no siempre) estará asociado a respiraderos hidrotérmicos activos. Cuando un

yacimiento consiste en más de una de esas estructuras, ello implica un cierto grado de continuidad o agrupamiento (por ejemplo, un conjunto de chimeneas o montículos en una zona más reducida que la distancia que los separa del grupo más cercano). Las zonas de condiciones más favorables comprendidas en una licencia de exploración contendrán al menos uno de esos yacimientos.

6. En el presente documento no se hacen distinciones jurídicas o técnicas entre la “prospección”, actividad que normalmente no supone derechos exclusivos, según se define en el proyecto de reglamento, y la “exploración”, que sí entraña derechos de exclusividad. La prospección puede realizarse en múltiples zonas, algunas de las cuales pueden adjudicarse en el marco de un plan de trabajo de exploración, como indican los modelos que figuran más adelante. En este documento no se utiliza el término “depósito” más que para referirse a los depósitos masivos de sulfuros explotados comercialmente en tierra firme. Con ello se ha tratado de evitar confusiones en torno a lo que se entiende por depósito en el fondo del mar. En la literatura científica, el término “depósito” se ha aplicado a entidades muy diversas, incluidos montículos individuales de sulfuros, campos enteros de respiraderos e incluso a toda una región geográfica.

7. La definición de otros términos utilizados en el presente documento es la que se les atribuye en el proyecto de reglamento sobre prospección y exploración de sulfuros polimetálicos y costras de ferromanganeso con alto contenido de cobalto en la Zona.

### III. Base de datos

8. Las áreas analizadas en el presente documento se seleccionaron a partir de una base de datos mundial sobre sulfuros polimetálicos y sistemas hidrotérmicos asociados de los fondos marinos (Hannington *et al.*, 2002, 2004). La base de datos se divide en dos secciones separadas que fueron elaboradas en 2002 y 2004 respectivamente para el Depósito Central de Datos de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos. La primera es una base de datos digital que contiene la ubicación y la descripción de más de 300 yacimientos de sulfuros polimetálicos y actividad hidrotérmica asociada en los fondos marinos. La segunda es una recopilación de publicaciones de análisis geoquímicos de más de 2.600 muestras de sulfuros polimetálicos de los fondos marinos (61.000 registros). A partir de estos datos, se seleccionaron 32 zonas propicias para poner a prueba los modelos de adjudicación de licencias de exploración, incluidas 12 situadas dentro de la Zona.

9. Los datos batimétricos utilizados para definir las zonas iniciales de prospección se extrajeron del atlas digital de los fondos marinos GEBCO, que emplea una retícula de 1 minuto (Carta Batimétrica General de los Océanos, British Oceanographic Data Center, 2003). Aunque la equidistancia estándar de la carta GEBCO es de 500 metros en este documento se ha utilizado una equidistancia de 1.000 metros para facilitar el trazado. A partir de las predicciones de datos batimétricos globales de Smith y Sandwell (1997) pueden crearse mapas regionales similares. Los datos de esta retícula de 2 minutos elaborada a partir de mediciones de la gravedad por satélite, tienen la ventaja de cubrir las regiones más remotas e inaccesibles de los fondos oceánicos.

10. Las zonas propicias a la formación de sulfuros polimetálicos se seleccionaron a partir de mapas de 5 x 5 grados, que aparecen en el apéndice 3. Los mapas que

ilustran la aplicación de modelos de exploración a esta escala se incluyen en el apéndice 4. En cada mapa se superpone una retícula con espaciado de 0,1 grados a las zonas consideradas propicias a la formación de yacimientos de sulfuros polimetálicos en las que podrían llevarse a cabo prospecciones. Esta retícula se corresponde con bloques de dimensiones aproximadas de 10 km x 10 km (0,1 x 60 millas marinas x 1,852 km = 11,11 km de espaciado de la retícula). Para facilitar la ubicación de los sulfuros en el mapa se utilizan grados decimales. En todos los casos la colocación de la retícula se basa en una serie de criterios que se examinan en el apéndice 2.

11. Varios ejemplos de mapas de 30 x 30 minutos (equidistancia de 100 metros) ilustran la distribución de los yacimientos de sulfuro en áreas determinadas sobre las que puede haber información batimétrica más detallada. Esos mapas aparecen en el apéndice 5 y su batimetría más precisa podría utilizarse para reducir significativamente el tamaño inicial de una zona propicia, pero no hay datos disponibles para todas las regiones de los océanos.

#### **IV. Modelos para la selección de bloques arrendados**

12. Las áreas propicias a la formación de yacimientos de sulfuro fueron seleccionadas en 32 áreas cartográficas de 5 x 5 grados a partir de las características geológicas generales de cada área según se indican en el apéndice 2 (por ejemplo, áreas que incluyen crestas de cordilleras submarinas, montes submarinos apartados del eje dorsal, arcos volcánicos, cuencas de retroarco, etc.). Se tuvo en cuenta toda una gama de características físicas de los sulfuros polimetálicos de los fondos marinos, incluidas la separación entre los yacimientos y las dimensiones de los posibles descubrimientos. Para obtener más información puede consultarse el apéndice 2 y los documentos de Hannington *et al.* (1995, 2005) y Herzig y Hannington (1995, 1999, 2000) que contienen información general sobre ese tema. También se puede obtener información adicional del Estudio Técnico No. 2 de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos “Sulfuros polimetálicos y cortezas de ferromanganeso de alto contenido de cobalto: situación y perspectivas”. El proceso de selección se ve restringido en cierta medida por la resolución batimétrica de los mapas. Al utilizar la carta GEBCO, con su equidistancia de 1.000 metros, grandes zonas adyacentes a las estructuras geológicas que presentan características favorables (por ejemplo las faldas de las cordilleras) quedan incluidas en la selección inicial debido a la incertidumbre respecto de la geología del fondo marino. Una batimetría de mayor resolución permitiría reducir la selección de zonas propicias, según se explica más adelante (véase el capítulo V, Resultados).

13. En el apéndice 4 se presentan varios modelos que explican cómo se podrían reducir estas áreas a un mínimo de bloques de exploración según el calendario de cesión propuesto en el proyecto de reglamento (50% del área asignada después del quinto año, 75% después del décimo y un máximo de 25 bloques después del décimo quinto año). Si la exploración tiene éxito, se espera que los 25 bloques adjudicados de manera definitiva contengan sulfuros polimetálicos en cantidad suficiente para sostener una explotación multianual, es decir, una explotación que se mantenga durante más de un año a niveles razonables de rendimiento comercial. Se han propuesto varios modelos de explotación multianual (que rinden de 1 a 2 millones de toneladas por año), aunque no se ha especificado la ley de los metales extraídos ni los niveles de producción u otros aspectos técnicos. Los modelos de explotación que se proponen están basados en comparaciones con explotaciones mineras comerciales en

tierra firme. Esta es una estrategia razonable, pues hay que suponer que toda explotación submarina futura deberá competir con la extracción en tierra firme.

14. En los yacimientos de gran tamaño (por ejemplo el promontorio hidrotérmico trasatlántico geotraverso (TAG) o el Valle Central (Middle Valley)) o, más frecuentemente, en múltiples yacimientos de una zona más amplia pueden registrarse acumulaciones de más de 1 millón de toneladas. Se desconocen las dimensiones de las áreas susceptibles de contener esta cantidad de sulfuros, que podrían corresponder a 20 bloques de 50.000 toneladas cada uno, dos bloques de 500.000 toneladas o un bloque de más de 1 millón de toneladas. Sin embargo, a partir de las comparaciones con los depósitos de fósiles de sulfuro, se estima que el tonelaje medio en los bloques de condiciones más favorables de 10 km x 10 km no superará las 500.000 toneladas (véase el apéndice 2). Según las previsiones, pocos bloques de este tamaño contendrán más de 1 millón de toneladas y la mayoría no superarán las 50.000 toneladas. De los 100 yacimientos examinados en el presente estudio, tan sólo dos, además del denominado Atlantis II Deep, han revelado un contenido de más de 1 millón de toneladas de sulfuro en las perforaciones realizadas. No llegan a cinco los demás yacimientos con dimensiones adecuadas para albergar más de 1 millón de toneladas. De ellos, sólo dos están situados en la Zona (promontorio hidrotérmico trasatlántico geotraverso (TAG) y cresta del Pacífico oriental a 13° de latitud norte).

15. La ubicación de los yacimientos de sulfuros en los mapas del fondo marino ha demostrado que cada yacimiento abarca una superficie de 1 kilómetro de diámetro como máximo, y no se prevé que su explotación se extienda a un área más amplia. En ningún caso las dimensiones previstas de un único yacimiento superan el tamaño mínimo de un bloque de 10 km x 10 km. En la mayoría de los casos, los bloques explotables no serían contiguos ni constituirían un subgrupo de una misma zona de exploración inicial. Tal vez sea necesario seleccionar los bloques para explotación de varias zonas de exploración no contiguas, divididas entre dos o más licencias. Los siguientes ejemplos ilustran cómo podrían adjudicarse los bloques contiguos y no contiguos en la fase de exploración.

#### **A. Modelo de exploración 1 (bloques contiguos)**

16. En este modelo, dentro de cada una de las áreas de 5 x 5 grados se seleccionaron zonas de geología propicia delimitadas físicamente por segmentos de cordilleras u otros accidentes geológicos de escala similar que contenían al menos un yacimiento de sulfuros polimetálicos u otro indicio positivo de mineralización (véase el apéndice 3). Cada zona propicia corresponde a aproximadamente 500 bloques contiguos de 10 km x 10 km (50.000 km<sup>2</sup>), lo que equivale a unas 20 veces el tamaño del área adjudicada definitivamente para la explotación, según se define en el proyecto de reglamento (20 x 25 bloques = 500 bloques).

17. Se seleccionó para la exploración avanzada una única zona de exploración que abarcaba 100 bloques contiguos de 10 km x 10 km (10.000 km<sup>2</sup>), como la que podría definirse en un plan de trabajo. En este modelo se eligió una zona de exploración que contenía al menos uno de los yacimientos de sulfuro conocidos en el área de 5 x 5 grados (véase el gráfico 4) y que representaba no más del 20% de la zona original de prospección. En todos los casos, se seleccionaron 100 de los bloques de condiciones más favorables (dispuestos en cuadrados de 25 bloques)

para incluir tantos yacimientos de sulfuro conocidos como fuese posible. Este esquema imita el proceso de selección que se utilizaría en una zona propicia durante la primera fase de exploración. Después de cinco años el área se reduce a 50 bloques contiguos y transcurridos 10 años a 25 bloques también contiguos (gráfico 4).

18. Como área arrendada con carácter definitivo en la zona de exploración se seleccionó un área única de 25 bloques contiguos de 10 x 10 km. (2.500 km<sup>2</sup>) contenía como mínimo un yacimiento conocido de sulfuro. En este modelo, los bloques finalmente arrendados fueron seleccionados de modo que contuvieran el máximo número de yacimientos conocidos de sulfuro en un área que no excediese del 25% de la zona original de exploración (gráfico 4).

## **B. Modelo de exploración 2 (bloques no contiguos)**

19. En este segundo modelo, la zona de exploración está dividida en cuatro grupos de 25 bloques, cada uno de los cuales contiene un yacimiento conocido de sulfuro u otro indicio positivo de actividad hidrotérmica en un área total de 10.000 km<sup>2</sup> (véase el ejemplo del gráfico 5). Durante la fase de exploración se irían cediendo en etapas sucesivas partes de cada grupo de bloques contiguos hasta que quedaran 25 bloques no contiguos de 10 x 10 km. cada uno, que contendrían todos los yacimientos conocidos de sulfuro existentes en los 10.000 km<sup>2</sup> originales. Aunque esa posibilidad no se ha considerado en este caso, en algunas zonas habría que seleccionar los bloques de arrendamiento óptimos de más de una zona de exploración de 10.000 km<sup>2</sup>. Nada garantizaría que los bloques de condiciones más favorables se identificaran correctamente en la fase de exploración, pero es razonable esperar que los exploradores aplicarían criterios apropiados para seleccionar el mayor número posible de bloques que contengan sulfuros.

## **V. Resultados**

### **A. Selección de zonas propicias y zonas de exploración**

20. De las 32 zonas de 5 x 5 grados contempladas en el presente estudio, el área media que presenta una geología propicia a los yacimientos de sulfuros polimetálicos es de 55.000 km<sup>2</sup> (cuadro 2). En los 20 ejemplos de zonas económicas exclusivas de los Estados y los 12 ejemplos de la Zona se eligieron áreas de dimensiones esencialmente equivalentes. Las áreas propicias de algunas de las zonas económicas exclusivas son más pequeñas debido a la proximidad de la tierra y al gran número de islas. En otras zonas económicas exclusivas esas áreas propicias son de mayor tamaño, gracias a la selección de zonas de retroarco y de arcos volcánicos. Las dimensiones de las zonas propicias seleccionadas en los ejemplos de la Zona varían menos que en muchas de las zonas económicas exclusivas, puesto que los centros de difusión de la cresta mesoocéanica de la Zona tienden a ser menos complejos geológicamente. En todos los casos, las zonas consideradas propicias a la formación de sulfuros polimetálicos son mucho más amplias que los 10.000 km<sup>2</sup> que abarcaría una única zona de exploración de tan sólo 100 bloques de 10 x 10 km.

21. La interpolación de los datos de la carta GEBCO en una retícula con equidistancias de 500 metros y espaciados de 1 minuto permite obtener información más detallada del fondo marino que puede ser útil para seleccionar zonas propicias

de menor tamaño, lo que podría reducir las zonas seleccionadas inicialmente hasta en un 50%. Por ejemplo, en el Pacífico nororiental, la zona propicia seleccionada a partir de los datos de la carta GEBCO es de 55.000 km<sup>2</sup>, mientras que si se hubieran adoptado equidistancias de 100 metros, podría haberse acotado una zona de unos 25.000 km<sup>2</sup> (apéndice 5). Incluso con una batimetría de mayor resolución, no siempre se recomienda excluir las zonas profundas o planas que flanquean las crestas. El yacimiento del Valle Central (Middle Valley) ilustra este problema, ya que, debido a su ubicación fuera de eje respecto del centro de expansión, podría no haberse incluido en la selección inicial de zonas propicias incluso con equidistancias de 100 metros. Así pues, al decuplicar la resolución de la batimetría a una escala de 5 x 5 grados no se reduce necesariamente en igual proporción el área seleccionada como zona propicia a la formación de sulfuros polimetálicos. Si se restringiera la exploración a aguas menos profundas (por ejemplo, de menos de 2.500 metros) por razones técnicas aún no especificadas, también quedarían excluidas muchas zonas con alta probabilidad de contener sulfuros polimetálicos, incluida la mayor parte de la Zona. Si bien en las zonas económicas exclusivas gran parte de los sulfuros polimetálicos conocidos se encuentran en aguas de menos de 2.500 metros de profundidad, en la Zona pueden encontrarse hasta a 4.000 metros (gráfico 6 y cuadro 1).

22. Cada una de las áreas propicias de cerca de 55.000 km<sup>2</sup> tiene, en promedio, 3,4 yacimientos de sulfuro (cuadro 2). En los ejemplos de la Zona se detectó una media ligeramente más elevada (de 3,7), como resultado del gran número de pequeños yacimientos de sulfuro que caracterizan las crestas de expansión rápida. Según el análisis de los 106 yacimientos de sulfuro que figura en el apéndice 3, la distancia media que los separa en cada área de 5 x 5 grados es de 98 km. (cuadro 2). En la Zona, la distancia media es de 95 km. (n = 43). Aunque la distancia es mayor en las crestas de transformación lenta (167 km.) que en las de transformación rápida (46 km.) el tamaño medio de cada yacimiento es mayor en las primeras. Estos datos indican que es probable que una licencia de exploración de tan solo 10.000 km<sup>2</sup> incluya sólo una parte de los yacimientos conocidos en esa zona. Dada la amplia distribución de los respiraderos, puede ser necesario arrendar bloques en varias ubicaciones separadas en distintas áreas propicias, probablemente dispersas. Aunque las zonas desfavorables pueden cederse de manera sistemática a fin de retener bloques contiguos, lo más probable es que los exploradores identifiquen rápidamente los lugares con mejores condiciones y que elijan una serie de bloques no contiguos para su prospección.

## **B. Comparación de los modelos 1 y 2**

23. En el modelo 1, la media de yacimientos existentes en los 100 bloques de condiciones más favorables (10.000 km<sup>2</sup>) es de 2,5. En los ejemplos de la Zona, la media de yacimientos (2,7) es ligeramente superior. En promedio, una zona de exploración que abarca 100 bloques contiguos reúne el 73% de los yacimientos conocidos de sulfuro en la zona propicia. En el ejemplo del gráfico 4, dos yacimientos quedaron fuera de la zona de exploración inicial y un tercero hubo de ser cedido a fin de mantener la contigüidad de los bloques en la selección final. En este ejemplo, los 25 bloques contiguos definitivos contienen sólo dos de los cuatro yacimientos de sulfuro existentes en la zona propicia original. En promedio, sólo el 53% de los yacimientos conocidos de sulfuro en una zona propicia quedan comprendidos en los 25 bloques finales (cuadro 2).

24. En el modelo 2, la zona de exploración se dividió en cuatro subzonas, cada una de las cuales comprendía 25 de los bloques con condiciones más favorables (con la misma área total de 10.000 km<sup>2</sup>). En este caso, se logró incluir el 97% de los yacimientos conocidos de sulfuro en los 100 bloques de condiciones más favorables. En los pocos casos en que quedaron yacimientos fuera de estos 100 bloques, el número total de yacimientos era superior al que podían contener las cuatro subzonas. En la mayoría de las áreas de 5 x 5 grados, se necesitarían bloques no contiguos para incluir todos los yacimientos conocidos de sulfuro en la zona propicia.

## VI. Conclusiones y recomendaciones

25. Es probable que el proyecto de reglamento sobre prospección y exploración no pueda aplicarse de igual manera a las costras y los sulfuros polimetálicos. Las zonas propicias a la formación de sulfuros polimetálicos son extensas, pero los yacimientos están más localizados y las áreas que pueden considerarse para la explotación son más reducidas que las de las costras. A diferencia de lo que ocurre con éstas, que están concentradas principalmente en montes submarinos fácilmente identificables en las inspecciones batimétricas, en el caso de los sulfuros polimetálicos pueden seleccionarse zonas muy amplias para las fases iniciales de prospección, que en 5 a 10 años, se reducen rápidamente a los lugares que presentan condiciones más favorables aunque también puede ser preciso explorar otras zonas para identificar suficientes recursos susceptibles de explotación. En la mayoría de los casos, una única zona de exploración de 10.000 km<sup>2</sup> no será suficientemente extensa para abarcar todos los sulfuros polimetálicos que pueden existir en un área de prospección de 5 x 5 grados. Para zonas más amplias, el calendario de cesión propuesto tal vez no permitiría evaluar todas las zonas con suficiente precisión para evitar que se abandonen prematuramente bloques con condiciones favorables.

26. De acuerdo con los datos disponibles sobre la distribución de los sulfuros polimetálicos en la Zona, es probable que haya que seleccionar grupos separados de bloques contiguos para abarcar todos los yacimientos conocidos de sulfuro en una licencia de exploración. También se cree que el uso de bloques contiguos, según se define en el proyecto de reglamento, no garantizará al contratista oportunidades adecuadas para una explotación multianual, y casi con toda seguridad habrá que solicitar múltiples licencias de 100 bloques para cubrir la zona de geología propicia. Debido a la distancia entre los yacimientos en una zona determinada, es probable que 100 bloques contiguos en un plan de trabajo de exploración sean insuficientes para descubrir recursos que permitan explotaciones multianuales. Será preciso dividir las zonas de exploración en grupos de bloques no contiguos a fin de asegurar que los grupos definitivos se extiendan en un área suficientemente amplia para contener tales recursos. Los 25 bloques seleccionados en última instancia para la explotación pueden no proceder de la misma asignación inicial de 100 bloques correspondiente a una sola licencia de exploración. En la mayoría de los ensayos del modelo 1, al menos un yacimiento quedó fuera de la zona inicial de exploración y otro más hubo de cederse a fin de preservar la distribución contigua de los 25 bloques finales. El reglamento debería prever la concesión de licencias de zonas de exploración suficientemente extensas para que contengan un número razonable de yacimientos, u otorgar otros derechos durante la fase de prospección a fin de asegurar un número suficiente de zonas de prospección que contengan recursos susceptibles de explotación. Debería permitirse la solicitud de licencias que abarquen bloques no contiguos para las fases de exploración y explotación.

## Referencias

- Hannington, M.D., de Ronde, C.E.J. y Petersen, S., 2005, Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems, en *100th Anniversary Volume, Review of Economic Geology*, págs. 111 a 142.
- Hannington, M.D., Jonasson, I.R., Herzig, P.M., y Petersen, S., 1995, Physical and chemical processes of seafloor mineralization, en Humphris, S., Fornari, D. y Zierenberg, R., eds., *Physical, Chemical, Biological and Geological Interactions within Hydrothermal Systems: AGU Monograph 91*, págs. 115 a 157.
- Hannington, M.D. Petersen, S., Herzig, P.M. y Jonasson, I.R., 2004, A global database of seafloor hydrothermal systems, including a digital database of geochemical analyses of seafloor polymetallic sulphides: Geological Survey of Canada Open File 4598, 1 CD-ROM.
- Hannington, M.D., Petersen, S., Herzig, P.M. y Jonasson, I.R., 2002, Global database of seafloor hydrothermal systems, including a geochemical database of polymetallic sulphides. Preparada para la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos de las Naciones Unidas, Depósito Central de Datos, Ver.1.0, 2002.
- Herzig, P.M. y Hannington, M.D., 1999, Recent advances in the study of polymetallic massive sulphides and gold mineralization at the modern seafloor, en Cronan, D.S., ed., *Handbook of Marine Mineral Deposits: CRP Press Inc.*, págs. 347 a 368.
- Herzig, P.M. y Hannington, M.D., 1995, Polymetallic massive sulphides at the modern seafloor: *Ore Geology Reviews*, vol. 10, págs. 95 a 115.
- Herzig, P.M., Petersen, S. y Hannington, M.D., 2002, Polymetallic massive sulphides deposits at the modern seafloor and their resource potential, en *Polymetallic Massive Sulphides and Cobalt rich Ferromanganese Crusts - Status and Prospects: United Nations International Seabed Authority, Technical Study No. 2 (Estudio Técnico No. 2 de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos; Sulfuros polimetálicos y cortezas de ferromanganeso de alto contenido de cobalto: Situación y perspectivas)*, págs. 7 a 35.
- Herzig, P.M., Petersen, S. y Hannington, 2002, Technical requirements for exploration and mining of seafloor massive sulphide deposits and cobalt-rich ferromanganese crusts, en la versión inglesa del Estudio Técnico No. 2 de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos; Sulfuros polimetálicos y cortezas de ferromanganeso de alto contenido de cobalto: Situación y perspectivas, págs. 90 a 100.
- Hein, J.R., Kochinksy, A., Bau, M., Manheim, T., Kang, J-K., y Roberts, L., 1999, Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific, en Cronan, D.S., ed., *Handbook of Marine Mineral Deposits: CRP Press Inc.*, págs. 347 a 368.
- Smith, W.H.F. y Sandwell, D.T., 1997, Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings: *Science*, vol. 277, No. 5334 págs. 1956 a 1962.

## Cuadros

1. Cuadro 1. Densidad de los respiraderos hidrotérmicos de alta temperatura y los yacimientos de sulfuros polimetálicos en los fondos marinos (Hannington *et al.*, 2005).
2. Cuadro 2. Análisis de zonas propicias, número de yacimientos de sulfuro y distancia entre los yacimientos en 32 áreas (de 5 x 5 grados).

## Gráficos

1. Gráfico 1. Distribución de los respiraderos hidrotérmicos y los yacimientos de sulfuros polimetálicos en los fondos marinos (Hannington *et al.*, 2005). Las cifras se refieren a los yacimientos enumerados en el cuadro 1. Otros respiraderos hidrotérmicos de baja temperatura, costras de ferromanganeso y sedimentos metalíferos aparecen indicados con círculos abiertos. También se indican las principales cordilleras en expansión y zonas de subducción (arcos volcánicos y retroarcos).
2. Gráfico 2. Ubicación de las zonas económicas exclusivas nacionales (las áreas sombreadas corresponden aproximadamente al límite de 200 millas marinas). También se muestra la distribución de cordilleras mesoocéánicas en la Zona.
3. Gráfico 3. Ubicación de 32 de las áreas de 5 x 5 grados examinadas en el presente documento.
4. Gráfico 4. Aplicación del modelo 1 en la Cordillera Central del Océano Índico, en que aparecen 100 bloques contiguos de 10 km x 10 km arrendados para su exploración que contienen al menos un yacimiento conocido de sulfuro u otro indicio positivo de mineralización en el área de 10.000 km<sup>2</sup>. El 50% de la zona se cede en la primera fase de exploración (5 años), lo que deja 50 bloques contiguos de 10 km x 10 km, que contienen 3 de los 5 yacimientos conocidos de sulfuro en un área de 5.000 km<sup>2</sup>. En la fase final de exploración se retienen 25 bloques contiguos de 10 km x 10 km, que contienen dos de los yacimientos conocidos de sulfuro en un área de 2.500 km<sup>2</sup>. En este modelo, dos yacimientos quedaron fuera de la zona inicial de exploración y un tercero hubo de cederse a fin de retener únicamente bloques contiguos en la selección final de 25.
5. Gráfico 5. Aplicación del modelo 2 en las mismas zonas del gráfico 4, con 100 bloques no contiguos de 10 km x 10 km, divididos en cuatro grupos de 25 bloques contiguos de 2.500 km<sup>2</sup>, que contienen todos los yacimientos conocidos de sulfuro en un área total de 10.000 km<sup>2</sup>. Nada garantiza que los bloques de condiciones más favorables sean identificados correctamente en la fase de exploración, pero se espera que los exploradores apliquen criterios apropiados para seleccionar el mayor número de bloques que contengan sulfuros. Es posible que la superficie de la zona inicial de exploración deba abarcar mucho más de 10.000 km<sup>2</sup> a fin de asegurar que todos los yacimientos de sulfuro queden incluidos en la fase final de exploración.
6. Gráfico 6. Distribución de los respiraderos hidrotérmicos de los fondos marinos en distintos entornos volcánicos y tectónicos según su profundidad (extraído de Hannington *et al.*, 2005, modificado según Massoth *et al.*, 2003).

## **Apéndice 1: Párrafos pertinentes del proyecto de reglamento**

### **Artículo 12**

#### **Superficie total a que se refiere la solicitud**

1. La superficie a que se refiere cada solicitud de aprobación de un plan de trabajo para la exploración estará compuesta por no más de 100 bloques.
2. En el caso de sulfuros polimetálicos o costras cobálticas la superficie de exploración consistirá en dos bloques contiguos. A los efectos del presente artículo, se considerarán contiguos los bloques que tengan contacto en cualquier punto.
3. No obstante lo dispuesto en el párrafo 1 *supra*, cuando un contratista haya optado por aportar un área reservada para realizar actividades en virtud de lo dispuesto en el artículo 9 del anexo III de la Convención, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 17, la superficie total a que se refiere la solicitud no excederá de 200 bloques.

### **Artículo 17**

#### **Datos e información que deberán presentarse antes de la designación de un área reservada**

1. Cuando el solicitante opte por aportar un área reservada, el área a que se refiere la solicitud abarcará un área lo bastante extensa y de suficiente valor comercial estimado para permitir dos explotaciones mineras. El solicitante dividirá los bloques de que se compone la solicitud en dos grupos de igual valor comercial estimado compuestos por bloques contiguos. El área que se asignará al solicitante estará sujeta a lo dispuesto en el artículo 27.

### **Artículo 27**

#### **Dimensión del área y cesión de partes de ella**

1. El Contratista cederá los bloques que se le hubieran asignado según lo dispuesto en los párrafos 2, 3 y 4 del presente artículo.
2. A más tardar al final del quinto año contado a partir de la fecha del contrato, el Contratista cederá:
  - a) Al menos el 50% del número de bloques que se le hubieran asignado; o
  - b) Si el 50% de ese número de bloques resultara ser un número fraccionario, el número entero de bloques inmediatamente superior.
3. A más tardar al final del décimo año contado a partir de la fecha del contrato, el Contratista cederá:
  - a) Al menos el 75% del número de bloques que se le hubieran asignado; o
  - b) Si el 75% de ese número de bloques resultara ser un número fraccionario, el número entero de bloques inmediatamente superior.
4. Al final del decimoquinto año contado a partir de la fecha del contrato, o cuando el Contratista solicite derechos de explotación, lo que antes suceda, el Contratista designará para su conservación hasta un máximo de 25 bloques de entre el resto de los bloques que se le hubieran asignado.

5. El resto de los bloques revertirán a la Zona.
6. El Consejo, a solicitud del Contratista y por recomendación de la Comisión, podrá, en circunstancias excepcionales, diferir el calendario de cesión. La determinación de esas circunstancias excepcionales competará al Consejo e incluirá, entre otras, la consideración de las circunstancias económicas imperantes u otras circunstancias excepcionales imprevistas que se hubieran presentado en conexión con las actividades operacionales del Contratista.

## Apéndice 2: Parámetros modelo

1. En el presente apéndice se examina, como guía para la selección de zonas de prospección, una variedad de características de los sulfuros polimetálicos de los fondos marinos y los entornos geológicos en los que se encuentran. A continuación se presenta una breve reseña de los principales parámetros utilizados para las dorsales mesoocéánicas. La exposición exhaustiva de otras características geológicas que figuran en el cuadro 1 excede el alcance de este documento, pero debería ser objeto de cualquier examen más profundo de la exploración de los sulfuros polimetálicos de los fondos marinos en el mundo. Para mayor información, se remite al lector a los documentos de Hannington *et al* (1995, 2005) y Herzig y Hannington (1995, 1999, 2000) sobre el tema. También puede obtenerse información adicional del Estudio Técnico No. 2 sobre sulfuros polimetálicos y cortezas de ferromanganeso de alto contenido de cobalto, situación y perspectivas, publicado por la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos.

### 1. Consideraciones geológicas

2. Los sulfuros polimetálicos masivos son consecuencia de las altas temperaturas (alrededor de 350° C) de las chimeneas negras que se hallan en zonas de actividad volcánica actual o reciente en los fondos marinos, como las dorsales mesoocéánicas situadas a gran profundidad, las dorsales cubiertas por sedimentos, los montes submarinos emplazados en el centro de placas, los arcos volcánicos, y los entornos de los respiraderos en las cuencas de retroarco. Los precipitados hidrotérmicos consisten en grandes acumulaciones de minerales metálicos, especialmente de pirita, pirrotita, calcopirita y esfalerita que se encuentran sobre el fondo marino alrededor de chimeneas hidrotérmicas y debajo de él. La mayoría de las acumulaciones de sulfuro se asocian a emanaciones de respiraderos hidrotérmicos activos, pero alrededor del 20% de esos emplazamientos ya no están en actividad.

3. Alrededor del 65% de los yacimientos de sulfuro conocidos se encuentran en las dorsales mesoocéánicas; el resto se halla en cuencas de retroarco (22%), en arcos volcánicos submarinos (12%), y en volcanes intraplaca (1%). La distribución de las chimeneas es más o menos proporcional a la longitud de las dorsales y los arcos; las dorsales mesoocéánicas tienen una longitud combinada de 55.000 km y los arcos de islas y las cuencas de retroarco adyacentes tienen una longitud combinada de 22.000 km. Los sulfuros se encuentran en una variedad de sustratos diferentes, como el basalto de las dorsales mesoocéánicas, las rocas intrusivas ultramáficas, y tipos de lava más evolucionados asociados a arcos volcánicos, así como en los sedimentos que recubren tanto la corteza oceánica como la continental. Algunas de las zonas propicias a la formación de sulfuros polimetálicos son aquellas donde hay erupciones y movimientos de fallas intensos en los fondos marinos, que pueden

localizarse en general con mediciones batimétricas regionales. Las chimeneas negras se encuentran principalmente en las dorsales mesoocéánicas de expansión rápida, lo que refleja el flujo de altas temperaturas y un importante vulcanismo en los fondos marinos de ese entorno. Sin embargo, los sulfuros que más abundan no están siempre asociados a las tasas de expansión más veloz: los yacimientos de sulfuros de mayor tamaño se encuentran en los centros de expansión lenta o intermedia, en volcanes emplazados en los ejes de las dorsales, en cuencas de retroarco profundas y en hendiduras con sedimentos adyacentes a los márgenes continentales. El hecho de que no se conozcan yacimientos de sulfuro en algunas partes de los océanos (por ejemplo, en las regiones polares o el océano meridional) se debe principalmente a la dificultad de llevar a cabo investigaciones oceanográficas en esas latitudes. Los descubrimientos recientes de penachos hidrotérmicos y sulfuros masivos en el alto Ártico y la Antártida confirman que la actividad hidrotérmica de los fondos marinos en zonas remotas de los océanos no es muy distinta de la que se observa en otras zonas.

4. En la Zona, las dorsales mesoocéánicas y los volcanes intraplaca son los tipos de formación volcánica donde más se encuentran sulfuros polimetálicos (por ejemplo, la dorsal del Pacífico oriental, la dorsal Mesoatlántica o la dorsal del Índico central: gráfico 1). Las distintas dorsales mesoocéánicas se clasifican según su tasa de expansión y morfología, que varían como consecuencia de las tensiones tectónicas regionales y las tasas de emisión de magma. Las dorsales de expansión rápida (con tasas de expansión total de 6 a 10 cm por año) se dan en cortezas oceánicas relativamente delgadas y se caracterizan por la abundancia de erupciones volcánicas; las dorsales con tasa de expansión intermedia (de 4 a 6 cm por año) y lenta (de 1 a 4 cm por año) se dan en cortezas relativamente espesas y se caracterizan por una actividad volcánica que sólo ocurre en forma intermitente entre largos períodos de extensión esencialmente tectónica y sin presencia de magma y/o actividad intrusiva. Las dorsales de expansión rápida representan alrededor del 25% de la longitud total de las dorsales, mientras que el 15% de las cordilleras se consideran de expansión intermedia y el 60%, de expansión lenta. También se conocen centros de expansión sumamente rápida, como el sur de la dorsal del Pacífico oriental (hasta 17 cm por año) y centros de expansión muy lenta, como las dorsales del Ártico y del Índico sudoccidental (menos de 1 cm por año). La tasa de emisión de magma, la profundidad del magma subaxial y la relación entre el grado de extensión magmática y el grado de extensión tectónica influyen en la magnitud y el vigor de la convección hidrotérmica en las dorsales. Existe una correlación aproximada entre la tasa de expansión y la incidencia de los respiraderos hidrotérmicos; sin embargo, como se señaló más arriba, los yacimientos de sulfuro de mayor tamaño se encuentran en general donde las erupciones volcánicas son esporádicas y se alternan con largos períodos de actividad tectónica intensa.

5. Las dorsales (y las cuencas de retroarco) se encuentran físicamente fraccionadas en segmentos que miden de decenas a centenas de kilómetros, por distintos tipos de discontinuidades, como las fallas de transformación, la superposición de centros de expansión y otros desplazamientos no transformantes. Esas características afectan la distribución del calor magmático y la convección hidrotérmica y fijan límites naturales a las zonas que probablemente se seleccionen para la exploración de los sulfuros polimetálicos. En los segmentos grandes de las dorsales, los respiraderos de altas temperaturas generalmente están emplazados a lo

largo de las secciones menos profundas de la dorsal, en la mitad de los segmentos, mientras que en los extremos de los segmentos no suele haber magma ni calor.

6. En las dorsales de expansión rápida, como la parte sur de la dorsal del Pacífico oriental, la lava extrude sobre los fondos marinos a una velocidad superior a la de la tasa de expansión, de modo que los fluidos se acumulan y forman elevaciones volcánicas locales de hasta 100 m sobre el fondo marino circundante. Las fisuras eruptivas suelen estar emplazadas en una fosa tectónica axial angosta (de aproximadamente 1 km de ancho), que es el emplazamiento más común de los respiraderos hidrotérmicos. Existe una estrecha correlación entre los respiraderos y las zonas de las erupciones volcánicas más recientes. Sin embargo, las erupciones frecuentes pueden alterar el flujo de los fluidos hidrotérmicos y enterrar los yacimientos de sulfuro que se encuentran en las fisuras donde se producen las erupciones. Como consecuencia, los sistemas de respiraderos de las dorsales de expansión rápida tienden a ser pequeños (algo menos de unos pocos miles de toneladas, peso en seco) y es posible que los yacimientos de sulfuro se vean desplazados de su fuente de calor por la velocidad de la expansión.

7. Los centros de expansión intermedios o lentos, como la dorsal Mesoatlántica o la dorsal del Índico central se caracterizan por tasas inferiores de emisión de magma y un mayor control estructural del flujo hidrotérmico ascendente que en las dorsales de expansión rápida. Las dorsales de expansión lenta, en particular, se caracterizan por un valle axial limitado por fallas, ancho (de hasta 15 km) y profundo (de hasta 2 km). En esos sitios, las erupciones ocurren muy rara vez o en intervalos de cientos o miles de años. Cuando las tasas de expansión son lentas, los intervalos entre las erupciones pueden ser de hasta decenas de miles de años. Hasta 1984, se aceptaba en general que la actividad hidrotérmica en las dorsales de expansión lenta se vería limitada por la falta de calor magmático en las proximidades del fondo marino. Con el descubrimiento del promontorio hidrotérmico TAG en la dorsal Mesoatlántica, se hizo evidente que en las dorsales de expansión lenta podían encontrarse algunos de los sistemas hidrotérmicos de mayor tamaño de los fondos marinos. Es posible que esos sistemas estén bastante apartados del eje, donde el sustrato es suficientemente estable para permitir la formación de montículos de sulfuro durante muchos cientos de años, en contraposición a sistemas más jóvenes de respiraderos cerca de la zona neovolcánica, que no han tenido suficiente tiempo de acumular sulfuros masivos. Los respiraderos hidrotérmicos de las dorsales de expansión lenta se concentran generalmente a lo largo de las paredes del valle tectónico. Dada la magnitud de las fuerzas hidrostáticas que actúan sobre los fluidos hidrotérmicos, no es inusual que los respiraderos de altas temperaturas estén emplazados en la parte superior de las elevaciones estructurales, a muchos kilómetros del centro de la falla. Por esa razón, la exploración de las dorsales de expansión lenta debe incluir zonas extensas contiguas a la falla.

8. Los volcanes apartados de los ejes dorsales también pueden presentar actividad hidrotérmica. Esos volcanes suelen encontrarse a una distancia de 5 a 10 km de las cordilleras y su tamaño varía de unos pocos kilómetros a decenas de kilómetros de diámetro. Se conocen algunos yacimientos de sulfuro de gran tamaño en volcanes que están cerca de las cordilleras (por ejemplo, a 13° N de la dorsal del Pacífico oriental). Sin embargo, la mayoría de los volcanes apartados del eje se caracterizan solamente por precipitados de óxido de ferromanganeso, de baja temperatura. Es posible que ello se deba al tamaño reducido de los cuerpos magmáticos conexos o la falta de fallas profundas penetrantes asociadas a la actividad de esos volcanes.

9. La mayoría de los respiraderos de las dorsales mesooceánicas se encuentran a una profundidad de 2.000 a 3.000 m, pero también se tiene conocimiento de un gran número de respiraderos situados hasta a 4.000 m de profundidad (gráfico 6 y cuadro 1). Los respiraderos más profundos se encuentran en centros de expansión lenta o ultralenta donde la fuerza de empuje en la corteza es inferior a aquella vinculada a grandes volúmenes de magma subaxial. Sin embargo, a escala regional, la mayoría de los respiraderos hidrotérmicos se concentran en la zona de la cumbre de los edificios volcánicos (las partes menos profundas de los centros de expansión de las dorsales mesooceánicas; las cumbres de montes submarinos apartados del eje). En un nivel más local, es posible encontrar yacimientos de sulfuro en las depresiones volcánicas o tectónicas superimpuestas que se encuentran en lo alto de los volcanes (por ejemplo, fosas tectónicas en la cumbre del segmento de una dorsal; calderas en las cumbres de los arcos volcánicos). Las partes más profundas de las laderas exteriores de las dorsales o los volcanes son zonas menos propicias para la actividad hidrotérmica y tienen menos probabilidades de contener grandes cantidades de sulfuros polimetálicos, salvo cuando existen estructuras importantes que canalicen los flujos hidrotérmicos ascendentes.

10. A diferencia de las zonas en las que podrían explotarse las cortezas, la capa de sedimentos no debería desalentar la exploración de sulfuros polimetálicos a menos que sea tan gruesa que impida que los fluidos hidrotérmicos lleguen a los fondos marinos. Sin embargo, algunos entornos ricos en sedimentos, como las dorsales sedimentadas y las márgenes con fallas, pueden explorarse especialmente para buscar sulfuros polimetálicos contenidos en sedimentos, sobre todo cuando existen otros indicios de mineralización (por ejemplo, flujos de temperatura elevada, indicios de actividad hidrotérmica por debajo de los fondos marinos o alteración del sedimento). Uno de los yacimientos de sulfuros polimetálicos más importantes que se conocen (el Valle Central, en la cordillera de Juan de Fuca) es una zona casi totalmente cubierta de sedimentos, aunque se constatan manifestaciones hidrotérmicas que indican mineralización del subfondo marino inmediato. En los modelos que se presentan en este documento, la capa de sedimento no se tiene en cuenta en la selección de los entornos geológicos propicios, pero es probable que ese criterio, junto con la presencia o ausencia de indicadores hidrotérmicos, sea utilizado por los exploradores en la selección de bloques con limitada actividad volcánica que serán excluidos de las licencias después de la primera fase de exploración.

11. Puede esperarse que el relieve batimétrico impida llevar a cabo actividades en muchas zonas de actividad volcánica y tectónica reciente. Esta puede ser una señal positiva de la existencia de procesos hidrotérmicos y magmáticos que propicien la concentración de sulfuros polimetálicos, pero el relieve extremo del terreno o la poca estabilidad del suelo pueden constituir un impedimento a cualquier explotación futura. Las paredes de las fosas tectónicas o las calderas de las cumbres de los edificios volcánicos que han estado activos recientemente son inherentemente inestables y escabrosas, aunque los fondos de las fallas o calderas pueden tener planicies localizadas donde es posible que se acumulen sulfuros polimetálicos. Un relieve típico en los centros de expansión rápida puede ser de decenas a cientos de metros en una distancia de 1 kilómetro; el relieve en los centros de expansión lenta puede ser de cientos de metros hasta 1 kilómetro, en distancias horizontales de 1 kilómetro. En algunos lugares, las erupciones volcánicas actuales pueden ser un impedimento para la exploración o la explotación de sulfuros. Algunos arcos

volcánicos no permiten la navegación debido a los peligros volcánicos que presentan.

## 2. Otras consideraciones

12. Las comunidades biológicas asociadas a los respiraderos hidrotérmicos activos suelen encontrarse en los yacimientos de sulfuros polimetálicos o cerca de ellos. Es posible que los reglamentos prohíban toda actividad que interfiera con esas comunidades de modo que una gran proporción de los yacimientos de sulfuros conocidos pueden quedar vedados a la exploración comercial en una etapa temprana. Las chimeneas y los montículos de sulfuros inactivos no suelen estar asociados a comunidades biológicas vivas y, por lo tanto, son candidatos potenciales para la explotación, pero se encuentran generalmente en las cercanías inmediatas de los respiraderos activos (a 1 ó 2 kilómetros) y presentan casi siempre las mismas características geológicas. Las actividades que afecten las acumulaciones de sulfuros inactivas contiguas a emplazamientos activos probablemente tengan efectos desconocidos en los sistemas activos de las cercanías y las comunidades biológicas conexas.

13. En algunos lugares, puede existir el peligro de enredo con equipos abandonados (como cables, dragas, aparejos de pesca e instrumentos científicos). Por ejemplo, en el promontorio TAG donde se hicieron perforaciones en 17 sitios en una zona de menos de 250 metros, hay numerosos pozos abandonados, e incluso tubos de perforación.

## 3. Tamaños de las zonas de exploración

14. La cantidad y distribución estimadas de los respiraderos hidrotérmicos de altas temperaturas en las cordilleras mesoocéánicas determinarán el tamaño óptimo de la zona de exploración. En general, no se conoce la distancia que existe entre un respiradero y otro, pero distintas mediciones geofísicas dan una idea de la posible cantidad de respiraderos en las cordilleras. Por ejemplo, la pérdida de calor de las zonas axiales de las dorsales mesoocéánicas del mundo es del orden de  $1,8 + 0,3 \times 10^{12}$  W (Mottl, 2003). Alrededor del 10% de ese calor se libera a las temperaturas de las chimeneas negras. Suponiendo un flujo de calor de 2 a 5 MW para una única chimenea negra (por ejemplo, con tasas de liberación de calor de 1 a 2 kg/seg: Converse *et al*, 1984), el flujo estimado de fluidos de alta temperatura hacia el fondo marino (10% de  $1,8 + 0,3 \times 10^{12}$  W) equivaldría a alrededor de 50.000 a 100.000 chimeneas (es decir, al menos una chimenea por cada kilómetro de cordillera). Sin embargo, la cantidad de chimeneas negras conocidas es sumamente reducida en comparación con esas cifras, y su distribución dista de ser uniforme. Un solo campo de chimeneas de gran tamaño puede contener hasta 100 chimeneas negras con una emisión total de calor de 200 a 500 MW (por ejemplo, Becker y Von Herzen, 1996). Por lo tanto, un campo de chimeneas cada 50 ó 100 km podría ser eventualmente responsable de la emisión estimada de altas temperaturas en las dorsales mesoocéánicas. Aunque esta estimación no tiene en cuenta las variaciones a gran escala del flujo de calor en función de la tasa de expansión y otros factores, es una guía de primer orden para elegir el tamaño de una zona de exploración a lo largo de un segmento dado de la cresta de la dorsal.

15. Las estimaciones independientes basadas en la distribución real de los emplazamientos de chimeneas conocidos sugieren que la distancia entre los

yacimientos de sulfuro a lo largo de segmentos de las dorsales mesoocéánicas puede ser bastante regular a escala regional. Un análisis de 100 yacimientos de sulfuro conocidos en 32 zonas de 5 x 5 grados examinadas en el presente estudio, indica que la distancia promedio entre los yacimientos es de 98 km (cuadro 2). La distancia promedio entre los yacimientos de la Zona (n = 43) es de 95 km. Aunque la distancia es mayor en las dorsales de expansión lenta (167 km) que en las de expansión rápida (46 km), los yacimientos de sulfuro de las dorsales de expansión rápida, considerados individualmente, son más grandes en promedio.

16. Dado que las chimeneas se encuentran distribuidas en una zona extensa, es posible que se solicite el arrendamiento de bloques en varios emplazamientos distintos en zonas propicias concretas y posiblemente separadas unas de otras, que requieran un trabajo de evaluación exhaustivo. Aunque los bloques que no sean propicios para la explotación podrán cederse sistemáticamente en el plazo de 15 años previsto en el proyecto de reglamento, es más probable que los exploradores determinen rápidamente cuáles son los emplazamientos más favorables y que pueda determinarse en poco tiempo una cantidad mínima de bloques propicios no contiguos. Esta posibilidad se examina en el modelo de bloques no contiguos.

#### **4. Tamaño de las zonas que se seleccionen para la explotación**

17. El tamaño mínimo de una zona de exploración está determinado por la magnitud del descubrimiento que se espera hacer y las características geológicas que delimitan su ubicación. Las grandes agrupaciones de yacimientos de sulfuro están determinadas principalmente por características geológicas que pueden conocerse fácilmente con estudios batimétricos (fosas tectónicas o calderas que miden algunas decenas de kilómetros como máximo). Otras características locales que determinan su ubicación son las fallas, los enjambres de diques, los lagos de lava u otros accidentes geográficos eruptivos, que alcanzan desde unas pocas centenas de metros hasta varios kilómetros. Es posible que los yacimientos de sulfuro consistan en montículos individuales o grupos de chimeneas y montículos que cubren zonas de los fondos marinos de decenas a centenas de metros de diámetro. Esos yacimientos pueden estar separados por distancias de cientos de metros hasta varios kilómetros, a menudo con zonas intermedias de sedimento estéril o lava. En el segmento Endeavour de la dorsal Juan de Fuca (gráfico A1), existen 30 complejos de sulfuro distintos distribuidos en ocho campos de chimeneas, a lo largo de un segmento del valle axial de 10 km. Los principales campos de chimeneas se encuentran a intervalos regulares, de 2 a 3 km (gráfico A2). En el campo hidrotérmico TAG, los tres montículos principales de sulfuros masivos (TAG, MIR y Alvin) están situados en una zona de unos 25 km<sup>2</sup> (gráfico A3). Sobre la base de esas observaciones, se prevé que las zonas de los fondos marinos que posiblemente se tendrán en cuenta para realizar exploraciones más avanzadas, que pueden incluir mapeos barométricos de alta resolución, fotografías y otras observaciones y muestreos de los fondos marinos, no excederán los 100 km<sup>2</sup>.

18. De más de 100 emplazamientos de respiraderos hidrotérmicos de altas temperaturas y yacimientos de sulfuros polimetálicos que se examinan en el presente documento, sólo alrededor de un tercio presentan acumulaciones de sulfuros polimetálicos de decenas a centenas de metros de diámetro (Hannington *et al.*, 1995; Fouquet, 1997). El estudio de la mayoría de esos emplazamientos ha sido incompleto y en general las dimensiones que se informan incluyen extensas zonas de afloramientos de sulfuros discontinuos o sustratos estériles entre las chimeneas y

los montículos. Es difícil evaluar la continuidad de los cuerpos de sulfuro, incluso en los estudios más detallados. Varios ejemplos muestran que las estimaciones preliminares de las superficies de esos yacimientos no pueden utilizarse de modo confiable para determinar el volumen de sulfuros en los fondos marinos o cerca de ellos. Sólo puede obtenerse esa información mediante perforaciones, aunque los avances de los métodos de investigación geofísica en el futuro podrían proporcionar otros instrumentos para ese fin.

19. Cuando se descubrieron por primera vez sulfuros polimetálicos en la dorsal Explorer en el Pacífico nororiental (gráfico A1), se estimaba, sobre la base de observaciones submarinas, que el montículo de sulfuro de mayor tamaño medía 250 m x 200 m. Estudios recientes de alta resolución han mostrado que esta zona consiste principalmente en lava cubierta por sedimentos ferrosos discontinuos, con sólo cuatro grupos de chimeneas de 50 m de diámetro, que cubren menos del 25% de la zona que, según se pensaba inicialmente, debía contener sulfuros masivos (<http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations>). En un estudio similar del yacimiento Sunrise, en el volcán submarino Myojin Knoll del arco Izu-Bonin, se informó de la existencia de una zona de mineralización sulfúrica de 400 x 400 m (gráfico A4). Se calculó que existía una acumulación total de 9 millones de toneladas de sulfuros masivos, sobre la base de un relieve de 30 m y una densidad aparente de 1,9 gm/cm<sup>3</sup> (Iizasa *et al.*, 1999). Este cálculo se basa en tres suposiciones importantes: i) se estimó que el afloramiento de sulfuro cubría un 100% de la zona demarcada (es decir, incluidas las zonas entre dorsales y montículos de sulfuros ocultados por sedimentos); ii) el relieve observado se debía exclusivamente a la acumulación de sulfuros masivos en fondos llanos y no a fallas ni a accidentes volcánicos sepultados (por ejemplo, domos de lava); iii) la densidad aparente era uniforme y representaba la totalidad del volumen utilizado en el cálculo. En el gráfico A4, los estudios sobre una línea de no más de 5 km de longitud cubren una zona demarcada de 400 m x 400 m, lo que da una cobertura visual de no más de 30% (por ejemplo, los estudios basados en observaciones submarinas o filmaciones suelen tener un campo visual máximo de 10 m más allá del área cubierta por el estudio). Los afloramientos de sulfuros que pueden distinguirse visualmente, como las chimeneas de sulfuros activas o inactivas, sólo cubren alrededor de un 25% de la zona. Dadas las limitaciones que presentan los estudios visuales y las incertidumbres inherentes a los cálculos, el valor de esas estimaciones de tonelaje bruto es cuestionable.

20. Las perforaciones son suficientemente confiables para extrapolar las observaciones en la superficie a las profundidades y estimar la continuidad de los afloramientos de sulfuros. Dos ejemplos de yacimientos de sulfuros en zonas de sedimentos muestran la importancia de las perforaciones. En el Valle Central (Middle Valley) de la dorsal Juan de Fuca y en la depresión de Escanaba en la dorsal de Gorda, el fondo marino está marcado por numerosos bloques de sedimento elevados, de hasta 100 m de diámetro y 50 m de altura. Las perforaciones y otros estudios detallados mostraron que la mayoría de esos montículos son sills volcánicos sepultados. Sin embargo, las perforaciones realizadas en un montículo del Valle Central (Bent Hill, que tiene una expresión de superficie de 90 m x 60 m) intersectaron 95 m de sulfuros masivos debajo del fondo marino, y en otro montículo más pequeño, cubierto de sedimentos, a 300 m del lugar (montículo del ODP (One Drilling Programme)), también se encontraron principalmente sulfuros masivos (Davis *et al.*, 1992). En cambio, las perforaciones de accidentes geográficos similares a montículos en la depresión de Escanaba (270 m x 100 m),

indicaron que los sulfuros masivos estaban restringidos a una zona pequeña, de sólo 5 a 15 m de profundidad (Zierenberg y Miller, 2000).

21. Sólo ha sido posible realizar estimaciones confiables de la magnitud de las acumulaciones de sulfuros en unos pocos casos, en que ha habido información disponible obtenida de las perforaciones. En el promontorio TAG (200 m x 45 m), en la dorsal Mesoatlántica, la excavación de 17 pozos de una profundidad máxima de 125 m arrojó un tonelaje bruto de 2,7 millones de toneladas de sulfuros masivos de un promedio de 2WT % Cu y 1,2 millones de toneladas de mineralización en *stockworks* a 1 wt. % Cu (Hannington *et al.*, 1998). En Bent Hill y el montículo ODP en el Valle central, la perforación de cuatro pozos profundos arrojó un tonelaje bruto de entre 10 y 15 millones de toneladas (Fouquet *et al.*, 1998; Zierenberg *et al.*, 1998). Los yacimientos de las dorsales mesoocéánicas que siguen en orden de magnitud, sobre la base de superficies aparentes, pueden ser del orden de 100.000 a 1 millón de toneladas, pero no hay información de perforaciones. Sin embargo, la gran mayoría de los yacimientos de sulfuro conocidos son mucho más pequeños. Las estructuras y los montículos de sulfuro, considerados por separado, rara vez exceden unas pocas decenas de metros de diámetro, con tonelajes brutos de no más de unos pocos miles de toneladas cada uno. En la dorsal Endeavour, los 30 edificios de sulfuros emplazados a lo largo de 10 km de la dorsal, no pesan más de alrededor de 50.000 toneladas en total. En su mayoría, los yacimientos de sulfuro de las fisuras de las cuencas de retroarco y los arcos volcánicos del Pacífico occidental son de tamaño similar a los de las dorsales mesoocéánicas.

22. La exactitud de las estimaciones del tonelaje bruto se ve también afectada por la considerable incertidumbre que existe sobre las propiedades físicas de las chimeneas y los montículos de sulfuros. Hannington *et al.* (1998) utilizó una densidad aparente de entre 3,5 y 4 para el cálculo del tonelaje del promontorio TAG, basándose en mediciones de densidad en la superficie del núcleo de barrenación. Sin embargo, la densidad aparente en seco de las chimeneas de sulfuros, cortezas y sedimentos de otros yacimientos es muy inferior. Las chimeneas de sulfuros de la dorsal del Pacífico oriental tienen una densidad en seco de sólo 1 a 2 gm/cm<sup>3</sup> y un contenido de agua in situ de 25% a 50% (Crawford *et al.*). Es posible que existan densidades mayores en el interior de los montículos debido a la compactación, el rellenado de espacios abiertos y la recristalización hidrotérmica de los sulfuros, pero es claro que esos efectos no son uniformes.

## 5. Comparaciones con la minería en tierra

23. Aunque hay una gran imprecisión en el cálculo de las acumulaciones de sulfuros en los fondos marinos, se prevé que su volumen abarca una gama semejante a la de ciertos tipos de depósitos fósiles de sulfuro que se han explotado en tierra. Existen dos modelos que pueden ser pertinentes. Los yacimientos de sulfuros masivos conocidos como “tipo Chipre” han sido considerados durante mucho tiempo los análogos antiguos más cercanos de los sulfuros polimetálicos que se producen en las dorsales mesoocéánicas y en entornos maduros de cuencas de retroarco (por ejemplo, Hannington *et al.*, 1998, y las referencias citadas en su obra). Los yacimientos “kuroko” del Japón son análogos de los sulfuros polimetálicos que se encuentran en los entornos de los arcos volcánicos. El recurso a análogos antiguos para hacer predicciones supone que las condiciones de la formación de la mena han sido uniformes a lo largo del tiempo, dado que los fósiles registrados incluyen yacimientos de todas las eras. Sin embargo, es probable que no

se encuentre nada en los fondos marinos actuales que sea drásticamente diferente de lo que ya se sabe sobre esos yacimientos terrestres. Por lo tanto, probablemente no se necesiten modelos de ley y tonelaje especiales para los sulfuros polimetálicos de los fondos marinos actuales.

24. Los datos disponibles sobre los yacimientos de sulfuros tipo Chipre indican que su tamaño medio es de 1,6 millones de toneladas (gráfico A5). Esos datos se refieren principalmente a los yacimientos de mayor tamaño, dado que sólo se conocen o informan las leyes y los tonelajes de yacimientos cuyo tamaño ha justificado la explotación comercial. La gran mayoría de los yacimientos de sulfuro o son demasiado pequeños o tienen una ley demasiado baja para ser explotados y muchos yacimientos pequeños no se incluyen en las cifras publicadas sobre las reservas. Entre los yacimientos tipo Chipre, esto comprende más de 90 prospecciones no explotadas de menos de 100.000 toneladas cada una y es probable que haya muchos más yacimientos más pequeños que nunca se consideraron como prospecciones (Hannington *et al.*, 1998, y las referencias citadas en su obra). Algo similar ocurre con las numerosas chimeneas y montículos aislados que se encuentran en los segmentos activos de las dorsales mesoocéánicas. Cuando se incluyen las prospecciones no explotadas, las curvas descienden a tonelajes mucho más reducidos (gráfico A5). En el caso de los yacimientos tipo Chipre, se prevé que el tamaño medio, incluidos los yacimientos antieconómicos, será inferior a las 500.000 toneladas.

25. Durante la explotación de los yacimientos “kuroko” del Japón, se llevaron registros detallados de las dimensiones físicas de los cuerpos de mena extraídos. De los 44 yacimientos explotados en la cuenca de Hokuroku, la superficie media de los cuerpos de mena fue de alrededor de 200 m x 200 m (Tanimura *et al.*, 1983). Las concentraciones de mena ocupaban en general menos de 100 km<sup>2</sup> y contenían hasta 10 cuerpos de mena. Sangster (1980) indicó una distribución similar de cuerpos de mena en distritos de explotación minera de sulfuros masivos del Canadá, con un promedio de 12 yacimientos en una zona de 84 km<sup>2</sup>. En esas zonas, el yacimiento de mayor tamaño en general representa de un 60% a un 70% del total de las reservas de metales; el segundo yacimiento de mayor tamaño quizás contenga sólo de un 10% a un 20%. Es posible que la zona más cercana con un yacimiento importante se encuentre a una distancia de decenas a centenares de kilómetros. Aunque esas comparaciones pueden ser útiles para definir el tamaño de una zona para la exploración de los sulfuros polimetálicos de los fondos marinos, es importante recordar que las zonas representadas en los antiguos distritos mineros, suelen incluir yacimientos que están expuestos en distintos niveles estratigráficos (es decir, es posible que muchos más yacimientos estén expuestos en superficies erosionadas sobre la tierra que en un fondo marino llano).

26. La distribución del tamaño de los yacimientos de sulfuro en la mayoría de las zonas de los fondos marinos parece indicar que si se dieran tasas de explotación comparables a las de las minas en tierra, los recursos contenidos en 2.500 km<sup>2</sup> se agotarían en un año. Salvo en casos muy excepcionales, sería necesario buscar recursos adicionales en otras zonas para sostener una explotación multianual.

## 6. Comparación con la exploración comercial de los fondos marinos en las zonas económicas exclusivas

27. Las licencias de exploración comercial que fueron otorgadas a dos empresas (Nautilus Minerals en la cuenca de Manus oriental de Papua Nueva Guinea y Neptune Minerals en la región del arco volcánico de Tonga-Kermadec de Nueva Zelandia) ilustran muy bien las limitaciones de distintos modelos para la exploración y la selección de bloques para arrendamiento. Las licencias originales de prospección de Neptune Minerals en Nueva Zelandia abarcaban 33.000 km<sup>2</sup> en 1999 y se redujeron a una tenencia minera de 7.790 km<sup>2</sup> (24%) en 2003. Las licencias de exploración de Nautilus Minerals en Papua Nueva Guinea fueron de 15.000 km<sup>2</sup> en total en 1996. Los dos emplazamientos con condiciones más favorables para la explotación que se están explorando ahora en la cuenca de Manus oriental se encuentran en una zona de 2.500 km<sup>2</sup> (17%). En las tenencias mineras tanto de Neptune Minerals como de Nautilus Minerals, los yacimientos de sulfuro conocidos no podrían haber quedado comprendidos en una misma licencia de exploración única formada por 100 bloques contiguos (gráfico A6).

### Apéndice 2: Gráficos

1. Gráfico A1. Ejemplo de una zona de 5 grados x 5 grados en el Pacífico nororiental (con equidistancias de 1.000 metros), superpuesta a la dorsal Juan de Fuca y yacimientos de sulfuros polimetálicos conocidos en la parte sur de la cordillera Explorer, el Valle Central (Middle Valley) y la cordillera Endeavour.

2. Gráfico A2. Mapa de 30 minutos x 30 minutos de la cordillera Endeavour (con equidistancias de 100 m), que muestra el emplazamiento de yacimientos de sulfuro diferenciados, separados por una distancia de 2 a 3 km.

3. Gráfico A3. Distribución de los yacimientos de sulfuro en el campo hidrotérmico TAG, en la dorsal Mesoatlántica (Humphris *et al.*, 1995). Los tres principales montículos de sulfuros masivos (TAG, MIR y Alvin) se encuentran en una zona de alrededor de 25 km<sup>2</sup>.

4. Gráfico 4A. Mapa que muestra el estudio submarino del yacimiento de Sunrise, en el volcán submarino Myojin Knoll, en el arco volcánico Izu-Bonin (Iizasa *et al.*, 1999). La zona de mineralización de sulfuros que se muestra mide 400 m x 400 m. Sobre la base de un relieve de 30 m y una densidad aparente de 1,9 gm/cm<sup>3</sup>, se calculó que existía una acumulación total de 9 millones de toneladas de sulfuros masivos. Sin embargo, los estudios basados en observaciones submarinas o filmaciones suelen tener un campo visual máximo de 10 m más allá del área estudiada. En el mapa que se muestra, los estudios sobre una línea de no más de 5 km de longitud cubren la zona demarcada de 400 m x 400 m, lo que da una cobertura visual de no más del 30%. Los afloramientos de sulfuros que pueden distinguirse visualmente (como las chimeneas de sulfuros activas o inactivas), sólo cubren alrededor de un 25% de la zona. Dadas las limitaciones que presentan los estudios visuales, la falta de información sobre perforaciones, y el hecho de que los sulfuros no se encuentren en un fondo marino llano, el cálculo del tonelaje es incierto.

5. Gráfico A5. Modelo de tonelaje para 49 yacimientos de sulfuros masivos “tipo Chipre”, que muestra los distintos tamaños de los yacimientos. El tonelaje medio

(percentil 50) que se indica es de 1,6 millones de toneladas. Los datos en que se basa el gráfico son de Singer y Mosier (1986) e incluyen sólo los yacimientos de tamaño suficiente para haber sido explotados económicamente o respecto de los cuales se ha informado la existencia de reservas. La gran mayoría de los yacimientos de sulfuro son o demasiado pequeños o de una ley demasiado baja para ser explotados, y una gran cantidad de pequeños yacimientos no se incluyen en las reservas publicadas, por ejemplo, más de 90 prospecciones no explotadas de menos de 100.000 toneladas cada una (Hannington *et al.*, 1998, y las referencias citadas en su obra), y probablemente muchos más yacimientos de menor tamaño que nunca se tuvieron en cuenta como prospecciones. Cuando se incluyen las prospecciones no explotadas, las curvas descienden a tonelajes mucho más reducidos, como se ha señalado. En el caso de los yacimientos tipo Chipre, el tamaño medio, incluidas las prospecciones no explotadas, se estima en menos de 500.000 toneladas.

6. Gráfico A6. Ejemplos de licencias de exploración comercial en Papua Nueva Guinea y Nueva Zelandia. Las licencias de prospección originales de Neptune Minerals en Nueva Zelandia (A) comprendían 33.000 km<sup>2</sup> en 1999 y se redujeron a una tenencia minera de 7.790 km<sup>2</sup> (24%) en 2003 ([www.neptuneminerals.com](http://www.neptuneminerals.com)). Las licencias de Nautilus Minerals en Papua Nueva Guinea (B) abarcaban 15.000 km<sup>2</sup> en total en 1996 y se ha establecido ahora que 2.500 km<sup>2</sup> (17%) contienen las dos zonas de condiciones más favorables de la cuenca de Manus oriental ([www.nautilusminerals.com](http://www.nautilusminerals.com)). En esos ejemplos, las licencias de exploración de 100 bloques contiguos no habrían permitido incluir todos los yacimientos de sulfuro conocidos en una misma licencia minera (véase también el apéndice 3).

### **Apéndice 3: Mapas de 32 zonas propicias a la formación de sulfuros polimetálicos**

1. Se seleccionaron zonas que se consideran propicias a la formación de sulfuros polimetálicos en 32 zonas del mapa, de 5 x 5 grados. La zona de prospección se definió arbitrariamente como una zona de menos de 5 x 5 grados que contuviera al menos un yacimiento de sulfuro conocido u otro indicio positivo de mineralización. En cada mapa se superpone una retícula con espaciado de 0,1 grados a las zonas consideradas propicias a la formación de sulfuros polimetálicos, en las que podrían llevarse a cabo prospecciones. Esa retícula se corresponde con bloques de una dimensión aproximada de 10 x 10 km cada uno (0,1 x 60 mn x 1,852 km = 11,11 km de espaciado en la retícula). Para facilitar la ubicación de los sulfuros en el mapa se han utilizado grados decimales. En todos los casos, con la posición de la retícula se ha tratado cubrir todas las zonas propicias, sobre la base de las características geológicas generales de cada zona del mapa, como se explica en el presente documento. En los modelos presentados en este apéndice, el tamaño de las zonas propicias es aproximadamente 20 veces el tamaño de los bloques adjudicados de manera definitiva al final del ciclo de exploración de 15 años (20 x 25 bloques).

### **Apéndice 4: Mapas de 12 zonas de exploración modelo**

1. Se midieron zonas de exploración modelo utilizando mapas de 5 x 5 grados y equidistancias de 1.000 metros para 12 estudios de casos en la Zona. Se presentan modelos que ilustran cómo pueden reducirse esas zonas al número mínimo de

bloques arrendados con fines de exploración, según el calendario de cesión propuesto en el proyecto de reglamento (50% de las zonas asignadas después del quinto año; 75%, después del décimo año, y un máximo de 25 bloques después del decimoquinto año).

### **Apéndice 5: Mapas detallados de zonas seleccionadas con equidistancias de 100 metros**

1. Una serie de mapas de 30 x 30 minutos (con equidistancias de 100 metros) ilustra la selección de zonas propicias sobre las que puede haber información batimétrica más detallada. Los datos que se muestran provienen del inventario de batimetría con ecosondas multihaz del National Geophysical Data Center (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/multibeam.html>). Estos mapas pueden emplearse para reducir significativamente el tamaño inicial de una zona propicia, pero no hay datos disponibles para todas las regiones de los océanos.