

Ubicación potencial de los recursos minerales en zonas de posible extensión de la plataforma continental ecuatoriana

Nilton Sánchez, Lourdes Muñoz, Isabel García, Karla Tituana, Andrea Suárez, Carolina Rivas
Unidad de Extensión de la Plataforma Continental/Dirección de Plataforma Continental y Fondo Oceánico
(DIPAFO)/Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR)

nilton.sanchez@inocar.mil.ec, lourdes.munoz@inocar.mil.ec, isabel.garcia@inocar.mil.ec, karla.tituana@inocar.mil.ec,
andrea.suarez@inocar.mil.ec, carolina.rivas@inocar.mil.ec

Resumen—En las últimas décadas ha surgido un interés por los depósitos minerales encontrados en el lecho marino debido a la creciente demanda global de metales. Esto se debe al potencial de las mismas para suplir la futura escasez de las reservas minerales existentes en la corteza continental. Este artículo presenta información concerniente a los recursos minerales potenciales en el fondo marino ecuatoriano, los ambientes geológicos y geotectónicos propicios para su formación y un breve análisis vectorial de la posible ubicación de dichos recursos dentro del área de extensión de plataforma continental de Ecuador, con la aplicación del artículo 76 de la Convención de las Naciones Unidas sobre el derecho del mar. Se obtuvieron las áreas potenciales para los sulfuros polimetálicos, cortezas de ferromanganeso y nódulos polimetálicos de 100.756 km², 26.775 km² y 184 km² respectivamente, las cuales se ubicaron en ciertas secciones de la cordillera del Carnegie, Coco y Colón. Estos recursos minerales proporcionarían diversos beneficios económicos para el país, dependiendo del tipo de mineral y sus concentraciones.

Palabras Claves—Depósitos minerales, fondo marino, nódulos polimetálicos, sulfuros masivos, cortezas de manganeso

Abstract—In the last few decades there has been an increasing interest on the seabed mineral resources given by the growing demand for metal. This is due to the potential capacity to supply future shortage of continental crust mineral reserves. This article compiles information concerning the potential seabed mineral resources found in the Ecuadorian seabed, the appropriate geological and geotectonical environments for its development and a brief vector analysis of the possible location of these resources within the Ecuadorian continental shelf extension area based on the application of Act. 76 of the United Nations Convention on the Law of the sea. We obtained the potential areas of polymetallic sulphides, ferromanganese crusts and polymetallic nodules which correspond to 100.756 km², 26.775 km² and 184 km² respectively, and are located in certain sections within the Ridge of Carnegie, Colón and Cocos. These mineral resources would provide different economic benefits to the country depending on the type of minerals in the deposits and their concentrations.

Keywords—Mineral deposits, seabed, polymetallic nodules, massive sulphides, manganese crust.

I. INTRODUCCIÓN

El fondo marino presenta una diversidad de ambientes, muchos de los cuales son propicios para la formación de depósitos minerales. Los tres principales depósitos minerales de aguas profundas son los sulfuros masivos polimetálicos, los nódulos de manganeso y las cortezas de ferromanganeso ricas en cobalto [1].

Sulfuros masivos polimetálicos: Los depósitos de sulfuros masivos en los fondos oceánicos se forman sobre y debajo del lecho marino, debido a la acumulación de minerales alrededor de respiraderos hidrotermales y el reemplazo metasomático por fluidos mineralizados ascendentes, situados en ambientes geotectónicos como dorsales mid-oceánicas, dorsales trasarco, arco islas, islas oceánicas, relacionados con la formación de nueva corteza oceánica [2]. Normalmente se forman a profundidades que van desde los 1500 a 3000 m, con temperaturas de hasta 400 °C, precipitando metales como Cobre (Calcopirita), Zinc (Blenda), Plomo (Galena), Oro y Plata [3], [4].

Nódulos de Manganeso: Son depósitos cuyo origen puede ser hidrogenético o diagenético. El primero ocurre cuando la precipitación de los minerales se da a partir del agua del mar y el segundo sucede cuando la precipitación mineral se da a partir de fluidos intrasedimentarios en los procesos de compactación y litificación de sedimentos [5], [6].

Existen varios factores que influyen en su formación, entre ellos la tasa de sedimentación, las corrientes de fondo, disponibilidad de núcleos, zonas de alta productividad en la topografía marina, la distancia hasta las fuentes que suministran los metales, el potencial de oxidación y la actividad biológica. Los nódulos se encuentran dispersos en las llanuras oceánicas, dorsales meso-oceánicas activas e inactivas, en el borde continental y pisos oceánicos profundos [7].

Cortezas de Ferromanganeso ricas en cobalto: Las costras cobálticas generalmente están dispuestas como incrustaciones en capas individuales, suelen encontrarse como incrustaciones en montes, dorsales y mesetas submarinas y se forman cuando los minerales que se precipitan del agua marina fría caen sobre sustratos de rocas duras a través del tiempo. Los elementos químicos que suelen contener las cortezas ferromanganíferas son: hierro, cobalto, níquel, cobre, manganeso [2], [8].

La Provincia Volcánica de Galápagos (PVG) ha sido objeto de estudio en muchas investigaciones, a causa de la compleja actividad tectónica del área debido a la interacción del hotspot Galápagos y el centro de divergencia Cocos-Nazca; esta interacción promueve una mayor variedad de vulcanismo en sus alrededores, lo que ha permitido la formación de minerales metálicos y fluidos minerales de alta salinidad [4], [9], [10]-[14]. El fondo marino de los espacios marítimos jurisdiccionales del Ecuador es rico en estos minerales, muchos de los cuales son de gran interés

económico, lo que ha despertado el interés del país de extender su plataforma continental y ganar soberanía sobre nuevos espacios que posiblemente contengan dichos minerales [4], [9], [11], [15], [16].

Gracias a la adhesión del Ecuador a la Convención de las Naciones Unidas sobre el derecho del mar (CONVEMAR), el país tiene la oportunidad de extender su territorio marítimo y ganar jurisdicción sobre el suelo y subsuelo del fondo marino (Ver Fig. 1), siguiendo las directrices de la CLCS/11 y aplicando el artículo 76 de la CONVEMAR. Las áreas potenciales de extensión de la plataforma continental ecuatoriana son posibles en las cordilleras submarinas de Carnegie, Coco y Colón.

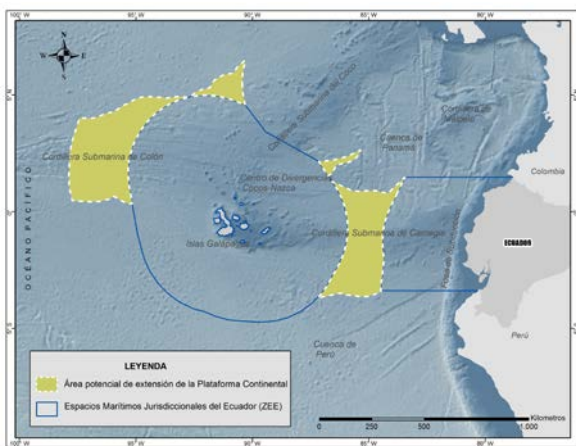


Fig. 1. Mapa de ubicación de las áreas potenciales de extensión de la plataforma continental.

II. MÉTODO

La selección y cálculo de áreas potenciales de recursos minerales en las zonas de extensión de la plataforma continental, se realizó considerando una metodología de dos fases como muestra la Fig. 2. La primera fase consiste en la recopilación de información científica y técnica de las características y ambientes geológicos propicios para la formación de cada recurso mineral objeto de este estudio; sin embargo, también se recopiló información con respecto a las condiciones geológicas existentes en los espacios marítimos ecuatorianos y en las áreas que pretenden extenderse. Esta primera fase concluye con la obtención de tablas de resultados, tanto como las condiciones generales como las de la zona de estudio. La segunda fase inicia con la comparación de las tablas de resultados, al existir condiciones similares se procede a realizar un análisis de información raster existente del área de estudio, extrayendo aquellas áreas que posean la condiciones favorables para la formación de cada recurso, posteriormente se seleccionan aquellas que se encuentren dentro de las áreas de extensión de la plataforma continental, calculando la superficie que podrían ocupar dichos recursos. Finalmente se elabora cartografía temática que muestra la ubicación potencial de los recursos minerales en las zonas de potencial ampliación de plataforma continental ecuatoriana de conformidad con el artículo 76 de la CONVEMAR.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos utilizados para la elaboración de los mapas temáticos de la ubicación potencial de los recursos

minerales en zonas de posible extensión de la plataforma continental ecuatoriana consisten en base de datos de los principales organismos de investigación a nivel mundial (NOAA, InterRidge) e información vectorial reservada elaborada por la Dirección de Plataforma Continental y Fondo Oceánico del INOCAR. Para la ubicación potencial de los depósitos minerales se realizó un análisis vectorial preliminar, en donde se consideraron rangos favorables de profundidad para cada recurso de acuerdo a la información científica disponible y a los estudios a lo largo del Rift Galápagos.

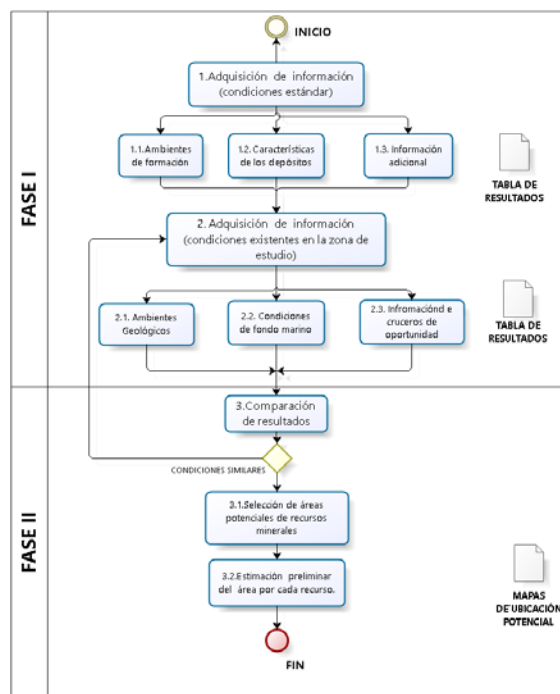


Fig. 2. Metodología para la selección de áreas de ubicación potencial de los recursos minerales en el área de extensión de la plataforma continental ecuatoriana.

Sulfuros masivos polimetálicos: A continuación, se muestra la Tabla I una comparación entre las condiciones generales propicias para la formación de depósitos de sulfuros masivos y las existentes en sitios puntuales donde se ha realizado exploración en el Rift de Galápagos [2], [3], [4], [11], [17], [18].

TABLA I
COMPARACIÓN ENTRE LAS CONDICIONES DE FORMACIÓN DE LOS SULFUROS MASIVOS POLIMETÁLICOS GENERALES Y LAS EXISTENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO

	Condiciones generales	Condiciones zona de estudio
Profundidad	3700 m (aproximadamente)	2000 m- 2550 m – 3100 m
Ambientes geotectónicos	Dorsales oceánicas Rifts, tras-arcs montañas submarinas Fumarolas negras Stockworks	Dorsal Cocos Nazca Rift Galápagos Fumarolas negras Montículos de minerales
Formas que suelen presentarse	Depósitos estratificados, Montículos de cientos de metros alrededor de los respiraderos.	precipitados sin forma definida Diseminaciones
Temperatura	hasta 400°C	350° C
Minerales encontrados	Cobre (Calcopirita), Zinc (Blenda), Plomo (Galena), Oro y Plata	Alúmina, Óxido de hierro (II),
Metales de interés		Zinc, cobre y hierro

Los resultados muestran que si bien los valores de profundidad son menores a la media, las estructuras (dorsal) presentes en la zona son capaces de generar condiciones de temperatura dentro del rango establecido para la existencia de estos recursos. Muestras tomadas en estas zonas han sido analizadas y entre sus resultados se tienen concentraciones de Zinc, Cobre y Hierro [4]. Las fotografías y videos tomados de las diferencias campañas de exploración confirman la existencia de fumarolas negras, diseminaciones y acumulación de minerales en el piso oceánico; en la Fig. 3 se observan imágenes del fondo marino Rift de Galápagos, cortesía de la Expedición Nautilus del 2015. Los resultados obtenidos en el mapa de la Fig. 4 muestran que los sulfuros masivos polimetálicos se encuentran en las áreas de extensión en el flanco sureste de la Cordillera de Cocos y a lo largo de la Cordillera de Carnegie y Colón, con una superficie total de 100.756 km².

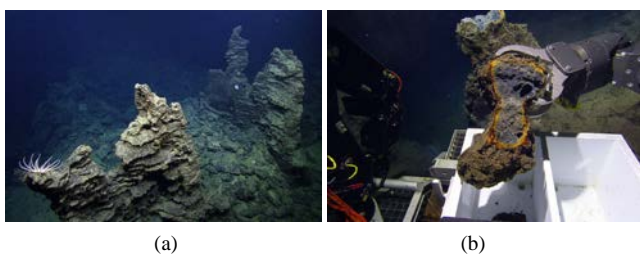


Fig. 3. (a) Sección del Rift Galápagos con chimeneas hidrotermales extintas. (b) Muestra de roca del fondo marino tomada con un ROV. Fuente: OET/NautilusLive, Campaña de exploración del 2015.

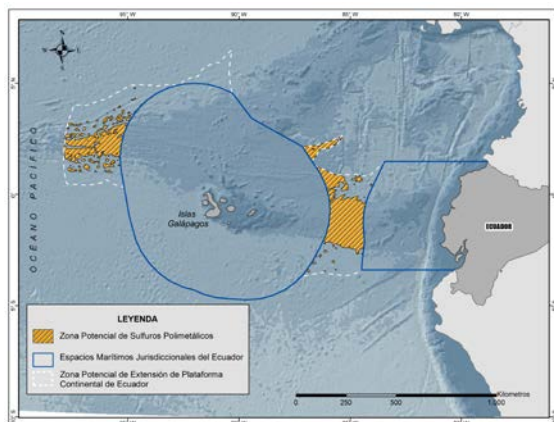


Fig. 4. Zonas de posible ubicación de sulfuros masivos polimetálicos en las áreas potenciales de extensión de la plataforma ecuatorialiana.

Nódulos de Manganeso: En la tabla II se presentan de forma puntual algunas condiciones generales que deben existir en los fondos oceánicos para la formación de depósitos de nódulos polimetálicos [19], [20].

TABLA II CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS NÓDULOS DE MANGANESO	
Profundidad	4000 - 6000 metros. (aproximadamente)
Ambientes	Sedimentario marino Depósito de origen hidrogenético y diagenético
Estructuras que suelen presentarse	Llanuras oceánicas, dorsales meso-oceánicas activas e inactivas, borde continental, piso oceánico profundo.
Elementos concentrados en minerales	Hierro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Manganeso (Mn), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Plata (Ag).

La Fig. 5 muestra la ubicación potencial de los nódulos de manganeso en las zonas de extensión. Se observa que los nódulos se presentan en pequeñas áreas a lo largo del centro de la Cordillera de Colón, ocupando una superficie de 184 km².

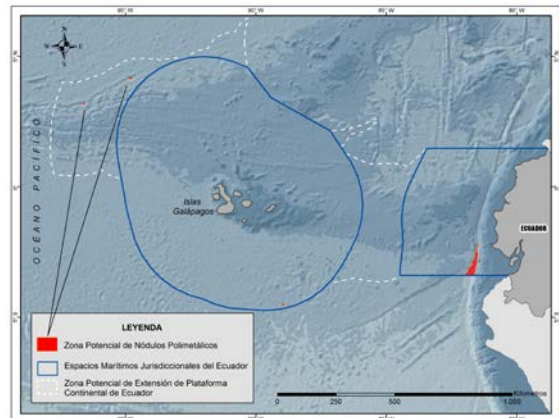


Fig. 5. Zonas de posible ubicación de Nódulos de Manganeso sobre la corteza oceánica en las áreas potenciales de extensión de la plataforma ecuatorialiana.

Cortezas de Ferromanganeso ricas en cobalto: Las principales características, mineralogía y estructuras presentes en los ambientes de formación de los depósitos de costras ferromanganosas en los fondos marinos se presentan en la Tabla III [2], [21].

TABLA III CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS CORTEZAS DE FERROMANGANESO	
Profundidad	800 – 2500 m. (Enriquecidas en Cobalto)
Estructuras que suelen presentarse	Montes submarinos, cordilleras y mesetas (rocas limpias de sedimentos durante millones de años).
Elementos concentrados en minerales	Cobalto (Co), Titanio (Ti), Cerio (Ce), Níquel (Ni), Platino (Pt), Manganeso (Mn), Talio, Teluro (Te).

Por último, las cortezas de ferromanganeso se ubican en las áreas de extensión a lo largo de la cordillera de Carnegie y en pequeñas secciones de la cordillera de Colón tal como se muestra en la Fig. 6, con una superficie total de 26.775 km².

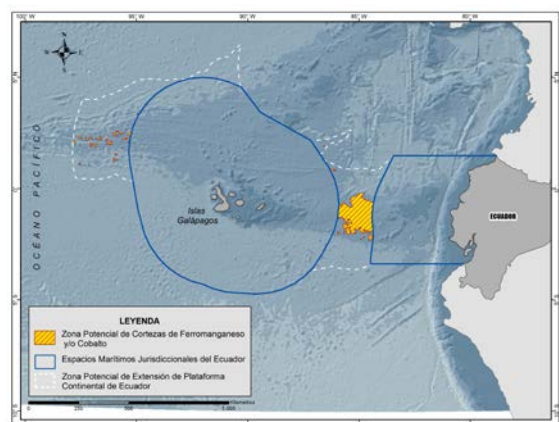


Fig. 6. Zonas de posible ubicación de Corteza Ferromanganeso en las áreas potenciales de extensión de la plataforma ecuatorialiana.

Las áreas identificadas en el presente artículo corresponden a una referencia preliminar que pueden ser consideradas previamente a la exploración. Si bien la ubicación de los depósitos minerales corresponde a la potencial área de extensión de la plataforma continental del Ecuador, esas áreas de no ser consideradas como territorio ecuatoriano estarían bajo la regulación de la Autoridad Internacional de Fondos Marinos (ISA). Sin embargo, las áreas sobre las cuales se ubican los depósitos minerales son conocidas por ser zonas con alta biodiversidad y endemismo, especialmente aquellos fondos marinos con depósitos de fumarolas hidrotermales que poseen potencial biotecnológico y de explotación de recursos genéticos marinos [22], [23]. Adicionalmente, aún se desconoce la duración y escala de los impactos asociados a la extracción de minerales de fondos marinos y aquello supondría mayores filtros en el proceso de concesión de la exploración [24].

IV. CONCLUSIONES

El fondo marino de las áreas potenciales de extensión de la plataforma continental ecuatoriana, debido a sus condiciones geológicas, es favorable para la formación de sulfuros masivos polimetálicos, nódulos polimetálicos y cortezas de ferromanganeso. El análisis vectorial de la superficie batimétrica considerando el factor profundidad, mostró que existen áreas potenciales de estos recursos en ciertas secciones de la cordillera del Carnegie, Coco y Colón. Las áreas potenciales para los sulfuros polimetálicos, cortezas de ferromanganeso y nódulos polimetálicos corresponden a 100.756 km², 26.775 km² y 184 km² respectivamente. Sin embargo, también es importante no considerar únicamente los recursos minerales, sino también los recursos marinos vivos y genéticos y el impacto que la explotación de minerales de fondos marinos pudiera ocasionar, de no aplicar técnicas de explotación que reduzcan el impacto ambiental y de no existir regulaciones que controlen dichas actividades.

REFERENCIAS

- [1] S. Petersen, A. Krätschell, N. Augustin, J. Jamieson, J. R. Hein, and M. D. Hannington, "News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources," *Mar. Policy*, vol. 70, no. March, pp. 175–187, 2016.
- [2] P. M. Herzig, S. Petersen, and M. D. Hannington, *Polymetallic Massive Sulphides and Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts: Status and Prospects*. 2002.
- [3] R. E. Boschen, A. A. Rowden, M. R. Clark, A. Pallentin, and J. P. A. Gardner, "Seafloor massive sulfide deposits support unique megafaunal assemblages: Implications for seabed mining and conservation," *Mar. Environ. Res.*, vol. 115, pp. 78–88, 2016.
- [4] A. Malahoff, "A Comparison of the Massive Submarine Polymetallic Sulfides of the Galapagos Rift With Some Continental Deposits," pp. 39–45, 1975.
- [5] J. R. Hein, A. Koschinsky, P. Halbach, F. T. Manheim, M. Bau, J.-K. Kang, and N. Lubick, "Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific," *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, vol. 119, no. 1, pp. 123–138, 1997.
- [6] D. Report, "Blue Nodules Deliverable report Deliverable 7. 1 : Initial Risk Management Plan," no. 688975, pp. 1–3, 2016.
- [7] B. J. Murton, L. M. Parsons, P. Hunter, and P. Miles, "Global Non-Living Resources on the Extended Continental Shelf: Prospects at the year 2000. Technical Study No. 1." p. 161, 2001.
- [8] P. A. Rona, "The changing vision of marine minerals," *Ore Geol. Rev.*, vol. 33, no. 3–4, pp. 618–666, 2008.
- [9] P. Goyes, *Fondos marinos de soberanía y jurisdicción del Ecuador*, Comisión N. Guayaquil, Ecuador, 2009.
- [10] D. J. Geist, D. J. Fornari, M. D. Kurz, K. S. Harpp, S. A. Soule, M. R. Perfit, and A. M. Koleszar, "Submarine Fernandina: Magmatism at the leading edge of the Galapagos hot spot," *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, vol. 7, no. 12, 2006.
- [11] L. Cnrs-cea and D. Cnrs, "The Galapagos hydrothermal mounds : history from about 600 , 000 years to Present," pp. 261–270, 1984.
- [12] K. Harpp, "Wolf–Darwin lineament and plume–ridge interaction in northern Galapagos," *Geochemistry Geophys. Geosystems*, vol. 3, no. 11, 2002.
- [13] D. Geist, W. M. White, F. Albarede, K. Harpp, R. Reynolds, J. Blichert-Toft, and M. D. Kurz, "Volcanic evolution in the Galapagos: The dissected shield of Volcan Ecuador," *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, vol. 3, no. 10, 2002.
- [14] K. S. Harpp, "Genovesa Submarine Ridge: A manifestation of plume-ridge interaction in the northern Galapagos Islands," *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, vol. 4, no. 9, pp. 1–27, 2003.
- [15] J. B. Corliss, J. Dymond, L. I. Gordon, J. M. Edmond, R. P. Von Herzen, R. D. Ballard, K. Green, D. Williams, A. Bainbridge, K. Crane, and T. H. Van Andel, "Submarine Thermal Springs on the Galapagos Rift," *Science (80-.)*, vol. 203, no. 4385, pp. 1073–1083, 1979.
- [16] C. Lalou, E. Brichet, and J. Lange, "Fossil hydrothermal sulfide deposits at the Galapagos Spreading Centre near 85°00 West: geological setting, mineralogy and chronology," *Oceanol. acta*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 1989.
- [17] ISA, "Proposed Technologies for Deep Seabed Mining of Polymetallic Nodules." pp. 1–456, 2001.
- [18] R. W. Embley, I. R. Jonasson, M. R. Perfit, J. M. Franklin, M. A. Tivey, A. Malahoff, M. F. Smith, and T. J. G. Francis, "Submersible investigation of an extinct hydrothermal system on the Galapagos Ridge: sulfide mounds, stockwork zone, and differentiated lavas," *Can. Mineral.*, vol. 26 pt 3, pp. 517–539, 1988.
- [19] ISA, "Decision of the Assembly of the International Seabed Authority regarding the amendments to the Regulations on Prospecting and Exploration for Polymetallic Nodules in the Area," vol. 27176, no. March, pp. 1–10, 2013.
- [20] S. E. Volkmann and F. Lehnen, "Production key figures for planning the mining of manganese nodules," *Mar. Georesources Geotechnol.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–16, 2017.
- [21] International Seabed Authority, "ISBA/16a/12/rev1 Decision of the Assembly of the International Seabed Authority relating to the regulations on prospecting and exploration for polymetallic sulphides in the Area." https://www.isa.org.jm/sites/default/files/files/documents/isba-16a-12rev1_0," *English*, vol. 2010, no. May, pp. 1–49, 2010.
- [22] D. J. Amon, A. F. Ziegler, T. G. Dahlgren, A. G. Glover, A. Goineau, A. J. Gooday, H. Wiklund, and C. R. Smith, "Insights into the abundance and diversity of abyssal megafauna in a polymetallic-nodule region in the eastern Clarion-Clipperton Zone," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. July, pp. 1–12, 2016.
- [23] J. Escobar, "El impacto producido por la actividad minera en los fondos profundos oceánicos sobre los recursos genéticos y el Reglamento para la prospección y exploración de nódulos polimetálicos en la Zona," *Com. Económica para América Lat. y el Caribe*, pp. 1–78, 2004.
- [24] K. M. Gjerde, P. Weaver, D. Billett, G. Paterson, A. Colaco, A. Dale, J. Greinert, C. Hauton, F. Jansen, P. M. Arbizu, K. Murphy, and A. Sweetman, "Report on the implications of MIDAS results for policy makers with recommendations for future regulations to be adopted by the EU and the ISA," no. December, p. 61, 2016.