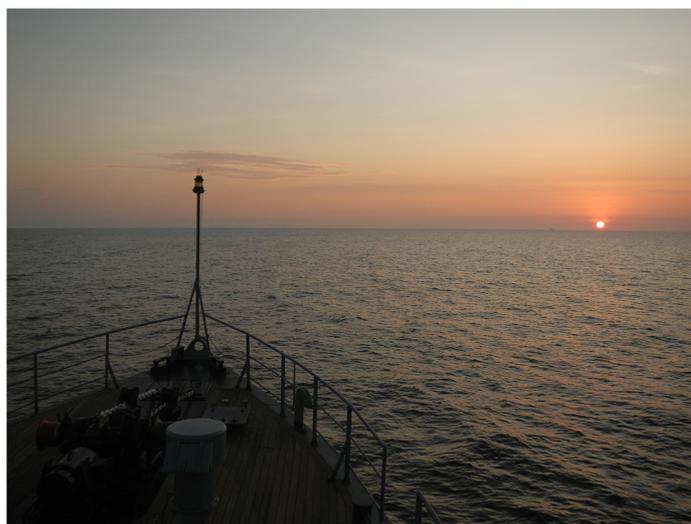


DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA REGIONAL

Informe Técnico N° A6913

ESTUDIOS DE GEOLOGÍA MARINA EN EL PERÚ

Región Mar de Grau



JULIO
2019

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II

DOMINIO MARÍTIMO Y MARGEN CONTINENTAL PERUANA

2.1 TESIS DE LAS DOSCIENTAS MILLAS MARINAS PERUANAS Y CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL ESTADO	3
2.2 DELIMITACIÓN DE LAS DOSCIENTAS MILLAS MARINAS PERUANAS - LÍNEAS BASE DEL DOMINIO MARÍTIMO DEL PERÚ	3
2.3 LÍMITES MARÍTIMOS PERÚ – ECUADOR Y EL GOLFO DE GUAYAQUIL COMO BAHÍA HISTÓRICA	6
2.4 LÍMITES MARÍTIMOS PERÚ – CHILE	9
2.5 IMPORTANCIA DE LA EXPLORACIÓN CIENTÍFICA DE LA MARGEN CONTINENTAL PERUANA	10

CAPÍTULO III

MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN EN GEOLOGÍA MARINA

3.1 GENERALIDADES	12
3.2 MÉTODOS DIRECTOS	14
3.2.1 MUESTREO DE SEDIMENTOS DE FONDO MARINO	14
3.2.2 EQUIPOS DE MUESTREO	14
3.2.2.1 Draga tipo Van Veen	15
3.2.2.2 Saca Testigos	17
3.2.3 PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE SEDIMENTO	21
3.2.3.1 Caracterización de los granos	21
3.2.3.2 Estudio micropaleontológico	23
3.3 MÉTODOS INDIRECTOS	25
3.3.1 HIDROACÚSTICA	25
3.3.1.1 Batimetría Multihaz	25
3.3.2 GEOFÍSICA	27
3.3.2.1 Sísmica	27

CAPÍTULO IV

CUENCA DEL PACÍFICO Y MARGEN CONTINENTAL PERUANA

4.1 GENERALIDADES	30
4.1.1 CUENCA PACÍFICO	30
4.1.2 MARGEN CONTINENTAL PERUANA	33

CAPÍTULO V

MORFOLOGÍA DE LA MARGEN CONTINENTAL PERUANA

5.1 GENERALIDADES	37
-------------------	----

5.2 BATIMETRÍA – GEOMORFOLOGÍA	37
5.3 ASPECTOS MORFOLÓGICOS DEL FONDO MARINO	38
5.3.1 MARGEN CONTINENTAL PERUANA	38
5.3.2 PLATAFORMA CONTINENTAL	38
5.3.3 FOSA OCEÁNICA	40
5.3.3 CANALES, VALLES Y CAÑONES SUBMARINOS	42
5.3.3.1 Canales y valles submarinos	42
5.3.3.2 Cañones submarinos	42
5.3.4 DORSAL DE NAZCA Y DORSAL DE CARNEGIE	43
5.3.5 BATIMETRÍA ENTRE PUNTA MAL PASO DE ASIA Y TAMBO DE MORA	

CAPÍTULO VI

SEDIMENTOS HOLOCÉNICOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL

6.1 GENERALIDADES	51
6.2 GEOQUÍMICA MARINA	51
6.3 SEDIMENTACIÓN	51
6.4 COMPOSICIÓN DEL FONDO	51
6.4.1 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	52

CAPÍTULO VII

REGISTROS DE CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL

7.1 GENERALIDADES	64
7.2 FORAMINÍFEROS COMO BIOINDICADORES DE CAMBIOS CLIMÁTICOS	64
7.3 LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL PERÚ, HACE 700 AÑOS	66

CAPÍTULO VIII

RECURSOS GEOLÓGICOS DE LA MARGEN CONTINENTAL PERUANA Y CUENCA PERÚ

8.1 GENERALIDADES	73
8.2 HIDRATOS DE GAS	73
8.3 FOSFATOS MARINOS	77
8.4 NÓDULOS Y COSTRAS POLIMETÁLICOS	79

REFERENCIAS

RELACIÓN DE ILUSTRACIONES

Figura

- Figura 2.1.** Mapa de Límites del Dominio Marítimo del Perú. Estos límites comprenden, el límite de las doscientas millas marinas y los límites marítimos Perú-Ecuador y Perú-Chile. En el año 2012, por acuerdo bilateral se ratificaron los límites marítimos Perú-Ecuador, dos años después en enero de 2014, la Corte Internacional de Justicia, estableció el límite marítimo Perú-Chile, definido por 10 pares de coordenadas geográficas en el sistema WGS 84. (Límites digitalizados según puntos georeferenciados mencionados en la Ley N° 28621 (2005), Ley N° 29687 (2011) y Ley N° 30223 (2014), sin embargo, este mapa no posee valor jurídico).
- Figura 2.2** . Mapa de las Doscientas Millas Marinas y su relación con la Margen Continental Peruana. El conocimiento geomorfológico y fisiográfico que actualmente tenemos del lecho y subsuelo marino, muestra que las doscientas millas marinas incluyen además de la Plataforma Continental o Zócalo Continental, el Talud Continental y parte de la Cuenca Perú.
- Figura 2.3** . Croquis mostrando al detalle los Puntos y Líneas de Base del Dominio Marítimo entre Puerto Salaverry a Puerto Casma. Las Líneas de Base en este sector están definidas por 11 puntos del sistema de líneas de base del litoral peruano; desde el Punto 72 Molón retenedor sur del Puerto Salaverry (08° 14' 03.6"S, 78° 59' 30.8"O) a Punto 83 Islote Roca Negra (09° 26' 15.0"S, 78° 25' 44.5"O) a partir de los cuales se traza doscientas millas de anchura del mar, y delimitan las aguas interiores del sector, sobre las cuales el Estado ejerce soberanía y jurisdicción. (Tomado de Croquis de la Carta sector Puerto Salaverry a Puerto Supe, PERU RUTA PC-LB-03, Ley N° 28621 Ley de Líneas de Base del Dominio Marítimo del Perú).
- Figura 2.4** Mapa de límite marítimo Perú-Ecuador y Golfo de Guayaquil como bahía histórica. Por la declaración internacional del Golfo de Guayaquil como bahía histórica (2012), se incorpora a las aguas interiores del Perú 4,177 km2 de área marítima, incluido suelo y subsuelo, tomando como divisor de este espacio el paralelo 3°23'33.26" latitud sur, y fijando el punto de inicio del límite marítimo Perú-Ecuador (PLM) en las coordenadas: 03°23'31.65" S, 81°09'12.53" O (Ley N°30223, Informe geológico-geomorfológico del Golfo de Guayaquil, Perú-Ecuador, 2015).
- Figura 2.5** Carta del Límite Externo-Sector sur del dominio marítimo del Perú. Ubicación de los Puntos de Base que definen la frontera marítima Perú - Chile, desde el Punto "Punto de inicio de la frontera marítima" hasta el punto "C". (Decreto Supremo N° 035-2014-RE Aprueba la Carta anexa que sustituye a la Carta que grafica el limite exterior - sector sur - del dominio marítimo del Perú, aprobada mediante Decreto Supremo N° 047-2007-RE.
- Figura 2.6** Mapa de ruta de los Cruceros Internacionales que desde el siglo XX realizan investigaciones en la Margen Continental Peruana. (Base de información de la National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).
- Figura 3.1** . Los buques de investigación, constituyen estaciones de investigación móviles, que proporcionan plataformas estables los cuales cuentan con equipos electrónicos y sistemas de navegación y comunicación especializadas, sumergibles y personal. Vistas de la Expedición SONNE SO-147 (año 2000), en la que participaron investigadores del INGEMMET (Cruise report SO-147 (2000)).
- Figura 3.2** A. Despliegue de la R/V Seward Johnson para una inmersión <http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/sealink/sealink.html>. B. Escena de muestreo de sedimentos de fondo marino en la plataforma frente a bahía Falsa (Piura), con brazo robótico del sumergible del buque Johnson en octubre de 1992.
- Figura 3.3** Métodos directos e indirectos de investigación en geología marina.
- Figura 3.4** A. Extracción del colector de testigo y sellado de la parte inferior del liner. B. Liberación del liner, giro a posición vertical y sellado con tapa plástica del extremo superior. (Crucero INGEMAR I).
- Figura 3.5** A. Muestreador tipo Soutar Box Corer del IMARPE. (Proyecto PALEOPECES). B. Vibrocorer. (Fuente: seabed_sediment_sampling_techniques).
- Figura 3.6** Submuestreo para implementación de la litoteca de geología marina del INGEMMET.
- Figura 3.7** Reacción de la materia orgánica en frío, con peróxido de hidrógeno (reducción de la materia orgánica).
- Figura 3.8** Secado de muestras en estufa a temperatura no mayor de 35°C.
- Figura 3.9** Sedimento retenido en una de las mallas tamizadas. B. Sedimento sobre el papel cansón.

- Figura 3.10** Tabla granulométrica del Manual de Clasificación de Rocas Sedimentarias del INGEMMET, ítem 4.2.1. (basado en Wentworth (1922) con modificaciones de la British Geological Survey (BGS) y Hallsworth y Knox 1999). A la derecha diferencia granulométrica de una muestra clasificada por tamices.
- Figura 3.11** Una buena resolución de submuestreo de un *core* o testigo está en función de la preservación de sus características sedimentarias (A). En una radiografía de Rayos X, se registran las laminaciones del testigo (B), base sobre la cual se elabora el patrón de submuestreo (C) (Morales, et al., 2007).
- Figura 3.12** Proceso de submuestreo del testigo según patrón (A). Submuestras listas para ser sometidas a procesamiento químico, lavado y secado (B) (Morales, et al., 2007).
- Figura 3.13** Muestra para análisis al estereomicroscopio (A). Identificación de foraminífero (B) (Morales, et al., 2007)
- Figura 3.14** El ecosonda es montado en el casco de la embarcación, desde aquí envía pulsos de ondas de sonido hacia el relieve de fondo, recibiendo las reflexiones como ecos a través de un transductor. Esta información se visualiza como imágenes tridimensionales del fondo. (<http://www.vistaalmar.es/ciencia-tecnologia/ingenieria-innovacion/2359-nueva-vista-fosa-mas-profunda-oceano.html>).
- Figura 3.15** Investigación geológica con perfilador de fondo (sub bottom profiles). (adaptado de https://www.google.com.pe/search?q=sub+bottom+profiling+survey&espv=2&biw=1244&bih=519&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjVrdWbq7RAhUKSSYKHcZ-DgUQ_AUIBigB#imgrc=bcvL-tEAdOcC1M%3A y http://www.gserentals.co.uk/rental_type.aspx?type=16).
- Figura 3.16** Entre los años 1986 a 2005, los proyectos Nazca Plate, Ocean Drilling Programme y Geomar, mediante ecosondas, sísmica de reflexión multi y mono canal, gravedad y mediciones magnéticas, obtuvieron el primer cuadro de perfiles batimétricos del sector nororiental de la margen continental peruana (Base de Datos Batimétricos del The general batimetric chart of oceans GEBCO).
- Figura 4.1** Evolución de los continentes y océanos (Blakey, 2014).
- Figura 4.2** Edades del piso oceánico y distribución de las placas tectónicas (Müller et al., 2008).
- Figura 4.3** Mapa estructural de la Placa de Nazca (Modificado de American Association of Petroleum Geologists, 1982 y Kulm, et al., 1983).
- Figura 4.4** Zona de subducción y su relación con el sistema de arco volcánico. (Kious and Tilling, 2014).
- Figura 4.5** Principales cuencas de antearco en la margen continental peruana sector norte y centro, mostrando estructuras en onshore y offshore que controlan la distribución en las cuencas sedimentarias (Modificado de Kulm, et al., (1988))
- Figura 4.6** Mapa tectónico de la margen continental del Perú: El estilo estructural de la margen está dominado por estructuras extensionales, que constituyen una serie de fallas normales que se extienden paralelos a la línea de costa (Mapa elaborado en base a bibliografía de PerúPetro y Boletines de la Carta Geológica del INGEMMET, fuente principal: Informe PERUPETRO S.A. (2003); Carlotto et al (2009)).
- Figura 5.1** Relieve del piso oceánico y de la margen continental peruana (interpretación, proyecto geología marina INGEMMET sobre base batimétrica de The Gebco-08 SID Grid, versión 20100927)
- Figura 5.2** Mapa geomorfológico de la Margen Continental Peruana y Llanura Oceánica: se distinguen la Plataforma continental, Talud continental, Fosa Peruano – Chilena y la Dorsal de Nazca. Perfiles transversales mostrando la amplitud de la plataforma y pendiente del talud, de la margen en sus sectores norte, centro y sur (Proyecto Geología Marina INGEMMET).
- Figura 5.3** Mapa de canales y valles de la margen continental peruana (sobre base batimétrica de The Gebco-08 SID Grid, version 20100927). A la derecha perfiles batimétricos 41 y 160, del Crucero Sonne SO-147, obtenidos con ecosonda multibeam Hydrosweep. Muestran sistemas de canales inactivos entre los 11°37.31' y 11°31.35' (Perfil 41), y Canales subparalelos en el talud superior, rellenos por sedimentos recientes entre los 11°40.01 y 11°33.20' (Perfil 160)
- Figura 5.4** Principales cañones submarinos de la margen continental
- Figura 5.5** Mapa de los cañones submarinos de la margen continental peruana sector norte: Perfil A-A' transversal al talud, muestra las profundidades alcanzadas por los cañones de Paita (1), cañon complejo Sechura (2), Cañon de Bayovar (3), Cañon península de Illescas (4), Cañon Lobos de Tierra (5), Cañon de Chiclayo (6) y cañon Lobos de afuera (7). A la izquierda block diagrama del área (escala vertical exagerada)
- Figura 5.6** Cañón submarino de Chiclayo.
- Figura 5.7** Cañones de la margen continental peruana sector sur.

- Figura 5.8** Mapa Batimétrico de Punta Mal Paso de Asia a Tambo de Mora.
- Figura 5.9** Sección geológica generalizada del margen continental en la latitud de Lima. Inferida de la geología continental y datos de perfiles sísmicos (Masías, 1976).
- Figura 6.1** Mapa de caracterización de sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Distribución de arcillas, ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental y sus concentraciones relativas con respecto a las concentraciones de arena fina y media
- Figura 6.2** Mapa de caracterización de sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Distribución de Arena fina, ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental y sus concentraciones relativas con respecto a las concentraciones de Limo-arcillas y arena media
- Figura 6.3** Mapa de caracterización de sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Distribución de arena media, ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental y sus concentraciones relativas con respecto a las concentraciones de limos- arcillas y arena fina.
- Figura 6.4** Mapa de ubicación de los testigos colectados en la plataforma continental frente a Callao y Pisco, testigo B0405-13 y testigo B0405-6, respectivamente.
- Figura 6.5** Mapa de isovalores de silicatos en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Distribución de los principales grupos: Olivino (fayalita), granate (uvarovita, almandino), aluminosilicatos (andalucita), piroxenos (agujita, enstatita, rodonita, etc) y anfíboles (actinolita, riebeckita, etc).
- Figura 6.6** Mapa de isovalores de sulfuros en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental, concentraciones relativas de annabergita y molibdenita.
- Figura 6.7** Mapa de isovalores de óxidos e hidróxidos en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental, concentración relativa de ilmenita, ramsdellita y todorokita
- Figura 6.8** Mapa de isovalores de haluros en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental, concentración relativa de halita.
- Figura 6.9** Mapa de isovalores de sulfatos en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental, concentración relativa de anhidrita.
- Figura 6.10** Distribución de minerales en la subcuenca marina Chancay (Girón, 2009)
- Figura 6.11** Mapas de distribución de minerales en la subcuenca marina Mala (Girón, 2009)
- Figura 7.1** Partes de un foraminífero
- Figura 7.2** a). Foraminífero planctónico, viven y brindan información de la columna de agua (imagen tomada de Centro de instrumentación. b). *Virgulinea fragilis* branca, foraminífero bentónico infaunal, viven introducidos algunos centímetros por debajo de la superficie, en los sedimentos. Brindan información de las condiciones biogeoquímicas de los sedimentos de fondo marino (Colectado de la plataforma continental peruana frente a Pisco, proyecto PALEOPECES)
- Figura 7.3** Foraminíferos bentónicos epifaunales, viven sobre la superficie del fondo brindan información de las condiciones biogeoquímicas de la interface agua-sedimento y sedimentos superficiales de fondo marino. A. *Cancris auriculus* (Fitchel & Moll) colectado de la plataforma continental peruana frente a Pisco, proyecto PALEOPECES. b. Vista de su abertura y pared perforada.
- Figura 7.4** Perfil batimétrico A-A' mostrando la Zona de Mínimo Oxígeno (OMZ) y el punto de muestreo del testigo B0405-13 a 199 m bnm en la zona de la plataforma externa y el punto de muestreo del testigo B0405-6 Perfil batimétrico B-B' colectado a 299 m bnm en la Zona batial superior.
- Figura 7.5** La identificación taxonómica y el análisis de las comunidades (diversidad y equidad), es el primer paso que da el investigador, para reconstruir las relaciones paleológicas, condiciones geoquímicas e identificar factores oceanográficos de la época. *Bolivina seminuda*, identificada en el testigo El testigo: B0405-6, es una especie oportunista, conocida por su capacidad para adaptarse a ambientes anóxicos, refleja las condiciones micróxicas en la plataforma continental peruana frente a Pisco y Callao.
- Figura 7.6** Especies del género *Bolivina* 1. *Bolivina seminuda* Cushman, 2. *Bolivina ordinaria* Phleger & Parker, 3, 4. *Bolivina plicata* d'Orbigny, 5. *Bolivina pacifica* Cushman & Mc Culloch, 6. *Bolivina costata* d'Orbigny, 7. *Bolivina striatula*.
- Figura 7.7** *Brizalina pseudobeyrichy* (Cushman)
- Figura 7.8** 1. *Buliminella curta* Cushman, 2. *Buliminella subfusiformis*.

- Figura 7.9** Especies de la Familia Bagginidae: *Cancris carmenensis*, 2. *Cancris auriculus* (Fitchel & Moll), 3. *Cancris inflatus* (d'Orbigny). a). lado umbilical, b). lado espiral, c). lado lateral.
- Figura 7.10** *Cassidulina limbata* Cushman & Hughes
- Figura 7.11** 1. *Epistominella pacifica* Cushman, a). lado umbilical, b). lado espiral, c). lado lateral
- Figura 7.12** *Globobulimina auriculata* (Bailey)
- Figura 7.13** 1. *Nonionella stella* Cushman & Moyer. a). lado espiral, b). lado umbilical, c). lado lateral.
- Figura 8.1** Distribución global de recursos minerales de fondo marino (Rona, 2008)
- Figura 8.2** Área explorada y muestreada por proyectos de investigación internacionales para conocer el potencial de los recursos minerales en la margen continental peruana y cuenca Perú
- Figura 8.3** Hidratos de gas (tomado de Laboratorios de USGS)
- Figura 8.4** Áreas con potencial para la formación de hidratos de gas.
- Figura 8.5** Distribución estratigráfica de sedimentos fosfáticos. Garrison, 1990 y Arning 2009 realizaron el estudio mineralógico, petrográfico e isotópico de fosforitas colectadas por el Ocean Drilling Programme (ODP) Leg 112.
- Figura 8.6** Ambiente de formación de nódulos de manganeso (Secretariat of the Pacific Community, 2013).
- Figura 8.7** Distribución y concentraciones de fosfatos en la Margen Continental.
- Figura 8.8** Concentraciones de Manganeso (ppm) en la Cuenca Perú
- Figura 8.9** Concentraciones de Cobre (ppm) en la Cuenca Perú
- Figura 8.10** Área de estudio proyecto GR23, valores de P2O5 (Datos cruceros Johnson sea Link II, SONNE 147, Wecoma)

Tablas

- Tabla 8.1** Agrupación de fosforitas y sedimentos fosfóricos según características físicas (Garrison. 1990).
- Tabla 8.2** Promedio de concentraciones de metales en los nódulos de manganeso de diferentes océanos.

Fotografía

- Fotografía 2.1.** Las aguas interiores del Golfo de Guayaquil sector peruano, están comprendidas entre el punto de inicio del Límite Perú - Ecuador (Tumbes) hasta Cabo Blanco (Vista del sector comprendido entre Cabo Blanco y el Nuro).
- Fotografía 2.2.** . El Golfo de Guayaquil es de interés vital para la economía binacional. En sus aguas se dan condiciones apropiadas para una alta biodiversidad y productividad pesquera, y en el suelo y subsuelo existen grandes yacimientos de hidrocarburos, los que evidencian la riqueza de los recursos vivos y no vivos.
- Fotografía 3.1** . El Buque de investigación científica BIC Humboldt, del Instituto del Mar del Perú (MARPE), está dotado de laboratorios y equipos hidroacústicos, que permiten realizar investigaciones interinstitucionales en el continente Antártico. Expedición ANTAR XXII (año 2014) en la que participaron investigadores del INGEMMET.
- Fotografía 3.2** Draga tipo Van Veen: Sistema de cucharas o mandíbulas, sistema de pesas laterales para asegurar una mayor penetración, y mallas para expulsión de agua una vez colectado el sedimento. (Crucero INGEMAR I)..
- Fotografía 3.3** Recuperación de draga (Crucero INGEMAR I).
- Fotografía 3.4** Recepción de draga para su apertura y descarga de sedimento colectado (Crucero INGEMAR I).
- Fotografía 3.5** Se procede a fotografiar la muestra con su respectiva escala y código (Crucero INGEMAR I)
- Fotografía 3.6** Sistema de pesas y aletas que otorgan peso y estabilidad para el lance y penetración del equipo en el lecho marino (Crucero INGEMAR I)
- Fotografía 3.7** Recuperación de la perforadora de gravedad. (Crucero INGEMAR I).
- Fotografía 3.8** Multicorer (Fuente: <http://response.restoration.noaa.gov/about/media/deep-sea-ecosystem-may-take-decades-recover-deepwater-horizon-spill.html>)
- Fotografía 3.9** Brazo manipulador con muestra de coral: ROV VICTOR 6000 (seabed sediment sampling techniques)
- Fotografía 3.10** El Buque de la Armada Peruana, BAP Zimic, equipado con ecosonda multihaz EM302 Kongsberg. https://www.dhn.mil.pe/index.php?secc=unid_hidrograficas&und=carrasco.
- Fotografía 3.13** Prospección sísmica con aire comprimido; hidrófonos colocados en 8 cables de 8 km de longitud cada uno. (www. El mundo es/baleares 72013/12/16).

Fotografía 3.14 Magnetómetro.

Fotografía 8.1 Nódulos y costras polimetálicas fueron colectadas del sector central de la margen continental peruana, por el Crucero Sonne SO-147(2000).

RESUMEN

El margen continental peruano comprende la plataforma y el talud continental. Corresponde a un margen típico de convergencia, donde la Placa de Nazca colisiona con la Placa Sudamericana, con comportamiento activo, tanto desde el punto de vista tectónico como sísmico. Su ancho puede variar de 126 km frente a la costa de Salaverry, a 5 km en el sur. La fosa peruano - chilena tiene un recorrido kilométrico continuo y alcanza una profundidad máxima de 7,415 m. Su configuración tectonosedimentaria está definida por 9 cuencas de antearco; Cuencas Tumbes, Talara, Lancones, Sechura, Salaverry, Lima, Pisco, Moquegua y Mollendo, las que se disponen paralelas a la línea de costa siguiendo una dirección NO-SE. Limitan entre sí por medio de levantamientos tectónicos mayores, denominados "Altos". Así tenemos el Alto de la plataforma externa el cual limita las cuencas de Trujillo, Lima, Pisco oeste y Mollendo y el Alto del talud superior que limita estas cuencas al oeste. El Alto de Paita limita las Cuencas Talara y Tumbes y la Cordillera de Los Amotapes limita las cuencas Talara, Lancones y Sechura.

Los estudios geomorfológicos regionales muestran un accidentado y dinámico fondo marino con canales, cañones submarinos y extensas áreas de subsidencia y deslizamientos. Impresionantes cañones disectan el talud en forma de "V", con cabeceras que van generalmente desde el borde de la plataforma hasta la fosa, alcanzando de 2 a 14 km de ancho y un promedio de 200 a 1,000 m de incisión, encauzando sedimentos de las cuencas del talud superior medio hacia la fosa peruana.

Además de los recursos de hidrocarburos, investigaciones a la fecha, señalan que la Cuenca Perú y la margen continental peruana contienen potenciales recursos minerales tales como nódulos y costras polimetálicas, principalmente frente a las costas septentrional y central del Perú, en el caso de esta última. Estos se han originado como producto de los intensos procesos biogeoquímicos que ocurren en la columna de agua y fondo marino. Finalmente, la margen continental peruana en toda su extensión constituye el piso de un gran ecosistema oceánico y alta diversidad específica, con sistemas de corrientes oceánicas que controlan la dinámica y variabilidad climática en el país.

ABSTRACT

The Peruvian continental margin includes the continental and slope shelf. It corresponds to a typical convergence margin, where the Nazca Plate collides with the South American Plate, with active behavior, both from the tectonic and seismic point of view. Its width can vary from 126 km off the coast of Salaverry, to 5 km in the south. The Peruvian - Chilean trench has a continuous kilometric route and reaches a maximum depth of 7,415 m. Its tectosedimentary configuration is defined by 9 forearc basins Tumbes, Talara, Lancones, Sechura, Salaverry, Lima, Pisco, Moquegua and Mollendo, which are arranged parallel to the coastline following a NO-SE direction. They limit each other through major tectonic surveys, called "Altos". So we have the Alto of the external platform which limits the Trujillo, Lima, Pisco oeste and Mollendo basins and the Alto of the upper slope that limits these basins to the west. The Alto de Paita limits the Talara and Tumbes basins and the Amotapes mountain range limits the Talara, Lancones and Sechura basins.

The regional geomorphological studies show a rugged and dynamic seabed with canals, submarine canyons and extensive areas of subsidence and landslides. Impressive canyons dissect the slope in the form of "V", with headings that go generally from the edge of the platform to the pit, reaching extensions of 2 to 14 km wide and an average of 200 to 1,000 m of incision, channeling sediments of the basins of the upper slope towards the Peruvian trench.

In addition to hydrocarbon resources, investigations to date, point out that the Peru Basin and the Peruvian continental margin contain potential mineral resources such as polymetallic nodules and crusts, mainly off the northern and central coasts of Peru, in the case of this last. These have originated as a result of the intense biogeochemical processes that occur in the water column and seabed. Finally, the Peruvian continental margin in all its extension constitutes the floor of a large oceanic ecosystem and high specific diversity, with oceanic current systems that control the dynamics and climatic variability in the country.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Ante la inmensidad de los océanos es difícil imaginar que acontece en sus profundidades, en un mar como el peruano generalmente estamos más conscientes de los procesos oceanográficos y biodiversidad sobre la cual sustentamos nuestra economía, sin conocer que la configuración de fondo es compleja, presentando ambientes que son definidos por su batimetría, y morfología y que gran parte de las reservas de recursos geológicos, actuales y futuras se encuentran bajo los mares y océanos.

Para los geólogos, los sedimentos y rocas de fondo, constituyen registros donde se conserva una información privilegiada sobre la historia del Planeta: evolución de la Tierra y la vida, extinciones, cambios climáticos, origen y extinción de las especies, pero sobretodo la existencia de las más fabulosas reservas energéticas y minerales. Desde hace tiempo la exploración por hidrocarburos ha sido la actividad más desarrollada en los mares del mundo entero, sin embargo en las últimas décadas, instituciones científicas y consorcios privados han dirigido su interés hacia uno de los más excepcionales recursos minerales del medio marino como son los nódulos polimetálicos (constituidos por cobre, níquel, cobalto, hierro y manganeso), los cuales se encuentran a profundidades de 200 a 5000 mbnm., de tal manera que el estudio geológico de las márgenes continentales constituye parte imprescindible de las estrategias económicas y geopolíticas, de las naciones.

En el Perú la margen continental es la prolongación sumergida del continente hacia el Océano Pacífico, como expresión de la convergencia de la Placa sudamericana con la Placa de Nazca, reconociéndose tres ambientes característicos: la Plataforma continental, Talud continental y Fosa Peruana. Es tectónica y sísmicamente activa, jugando un papel importante la Dorsal de Nazca. Presenta un relieve accidentado con deltas, bancos y cañones submarinos, los cuales encauzan sedimentos desde las cuencas del talud superior hacia la fosa. Frente a las costas de San Juan en Ica la fosa oceánica alcanza los 4,800 mbnm. Su configuración tectónica nos muestra 9 cuencas sedimentarias de antearco, de las cuales las cuencas Tumbes, Talara, y Sechura son actualmente explotadas por hidrocarburos. En cuanto a sus recursos minerales, se conoce muy poco, desde las primeras exploraciones, en la década de los 60 hasta la actualidad los objetivos de las investigaciones nacionales y extranjeras en el área, han estado orientadas al conocimiento estratigráfico, tectónico, químico, físico, biológico y oceanográfico de la plataforma continental y mar peruano, sin embargo algunos reportes señalan micronódulos enriquecidos con Cu, Ni, y Co hacia el sector occidental de la fosa Peruana, nódulos de Mn a los 88° 30.7' O y 04° 49.2' S, y costras de Mn a los 76° 50' O y 13° 37.8' S. En general las investigaciones señalan que la plataforma y talud son áreas favorables para la formación de fosfatos por ser una zona de mínima oxigenación y ratios de sedimentación bajos. También se tienen reportes de hidratos de gas hacia los sectores occidentales de las cuencas Salaverry y Lima (Kvenvolden & Kastner, 1990).

Según señala la Asamblea General de las Naciones Unidas en su informe sobre el programa: Los Océanos y Derecho del mar a la letra dice; "La ciencia y tecnologías marinas desempeñan una función en la promoción de la ordenación y uso sostenibles de los océanos y los mares". Es así como el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en concordancia con los objetivos del Estado Peruano, y a la luz de investigaciones preliminares, inicia a partir del año 2005 estudios de geología marina en el ámbito de su plataforma continental a través del proyecto de investigación GR-8 "Geología de la Plataforma continental del Perú, estructura y evolución de la margen continental peruana", a fin de sentar bases para la exploración de sus recursos minerales, energéticos y evaluar los peligros geológicos que en dicha zona pudieran existir.

La información vertida en el presente atlas es una introducción a la geomorfología, geología estructural, sedimentología y micropaleontología de la margen continental, refleja los esfuerzos preliminares del proyecto, de acopio y análisis de la información existente en el medio con el fin de obtener los fundamentos necesarios para un objetivo estudio de la margen continental del Perú. Siendo las fuentes principales de información las obtenidas a través de cooperaciones institucionales (IMARPE-PERUPETRO), informes técnicos y publicaciones científicas

derivadas de cruceros de investigación extranjeros, informes técnicos de compañías petroleras como Petroperú, Repsol y Savia y bases de datos batimétricos nacionales (Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú) e internacionales (*The General Bathymetric Chart of Oceans* - GEBCO). Presentamos el mapa tectónico de la plataforma continental del Perú a escala 1:1000,000, en él se muestra la configuración tectónica de la plataforma continental peruana; cuencas tectono-sedimentarias, sistemas de fallas, lineamientos etc., mapas de caracterización y dispersión mineralógica y granulométrica de sedimentos de fondo, los cuales presentan a escala regional la abundancia relativa de minerales metálicos y no metálicos y su relación con la distribución de arenas, limos y arcillas. Finalmente, los estudios micropaleontológicos aplicados a la reconstrucción de paleoambientes marinos y sus ecosistemas.

CAPÍTULO II

DOMINIO MARÍTIMO Y MARGEN CONTINENTAL PERUANA

2.1 TESIS DE LAS DOSCIENTAS MILLAS MARINAS PERUANAS Y CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL ESTADO

A lo largo de la historia de la humanidad, sobre todo desde la revolución industrial y la II Guerra Mundial, los mares y océanos incluidos su lecho y subsuelo, constituyen un instrumento geopolítico de desarrollo económico, social y político, necesarios de conocer, delimitar y legislar, para su protección, conservación y reglamentación. Siendo el Perú un país marítimo, con acceso a un mar de gran riqueza ictiológica y geológica a través de un litoral de 3,080 Km., su historia ha estado siempre relacionada a la protección de este y de sus límites marítimos.

En 1947, el ministro y canciller peruano Enrique García-Sayán, enterado de que en Europa y América se preparaban una expedición ballenera y una flota atunera rumbo a mares peruanos, decide tomar acciones, en ejercicio de la soberanía y en resguardo de los intereses económicos nacionales, y propone la *Tesis de las Doscientas Millas Marinas*, fijando el dominio marítimo de la nación en doscientas millas, dentro de cuyos límites deben ser ejercitados la protección, conservación y vigilancia de las riquezas naturales. Sustentada en fundamentos geográficos, geológicos, biológicos, económicos y políticos-jurídicos, fue determinante para su aprobación, el reconocimiento de que la plataforma submarina o zócalo continental forma con el continente una sola unidad morfológica y geológica, con riquezas naturales en esta y en sus aguas epicontinentales (Decreto Supremo N° 781 del 1° de agosto de 1947). En virtud de lo cual, en el artículo 54 de la Constitución Política del Perú (1993), se reconoce que el dominio marítimo del Estado peruano, queda comprendido por el mar adyacente a sus costas, su lecho y subsuelo, hasta la distancia de doscientas millas marinas medidas desde las *Líneas de Base* que establece la ley y en el cual el Estado ejerce soberanía y jurisdicción. Este límite comprende la Margen Continental Peruana y parte del sector oriental de la Cuenca Perú. (Figura 2.1, 2.2).

2.2 DELIMITACIÓN DE LAS DOSCIENTAS MILLAS MARINAS PERUANAS - LÍNEAS BASE DEL DOMINIO MARÍTIMO DEL PERÚ

Las Líneas de Base de los estados, según el Derecho Internacional, son líneas terrestres mediante las cuales un estado ribereño puede delimitar sus espacios marítimos. Pueden ser líneas de base normales o curvas las cuales siguen la dirección de la baja marea en el litoral, normalmente se encuentran ubicadas totalmente en el territorio del estado. Según nuestra Constitución Política (1993), es a partir de estas que se mide la anchura del dominio marítimo del estado hasta la distancia de doscientas millas marinas, denominándose "*Líneas de Base del Dominio Marítimo Peruano*". Quedan definidas por 266 puntos del sistema de líneas de base del litoral peruano, georeferenciados, iniciando en el norte en el punto denominado "*Punto de Frontera en la Boca de Capones*", coordenadas 03°23'31.65"S, 80°18'49.27" O (WGS 84), y hasta el sur en el punto "*Playa Santa Rosa*" (Frontera Marítima Perú – Chile) coordenadas 18° 21' 00.42"S, 70° 22' 49.80"O.

Las aguas comprendidas dentro de las líneas de base, forman parte de las aguas interiores del Estado, en las cuales se ejerce soberanía y jurisdicción (Artículo 3°, Ley N° 28621) (Figura 2.3.), el límite exterior del dominio marítimo del Perú es trazado de modo que cada punto del citado límite exterior se encuentre a doscientas millas marinas del punto más próximo de las líneas de base (Artículo 4°, Ley N° 28621) (Figura 2.3). Las Líneas de Base

del Dominio Marítimo Peruano se establecen según los decretos ley de Líneas de Base del Dominio Marítimo del Perú y su adecuación: Ley N° 28621 (2005), Ley N° 29687 (2011) y Ley N° 30223 (2014).

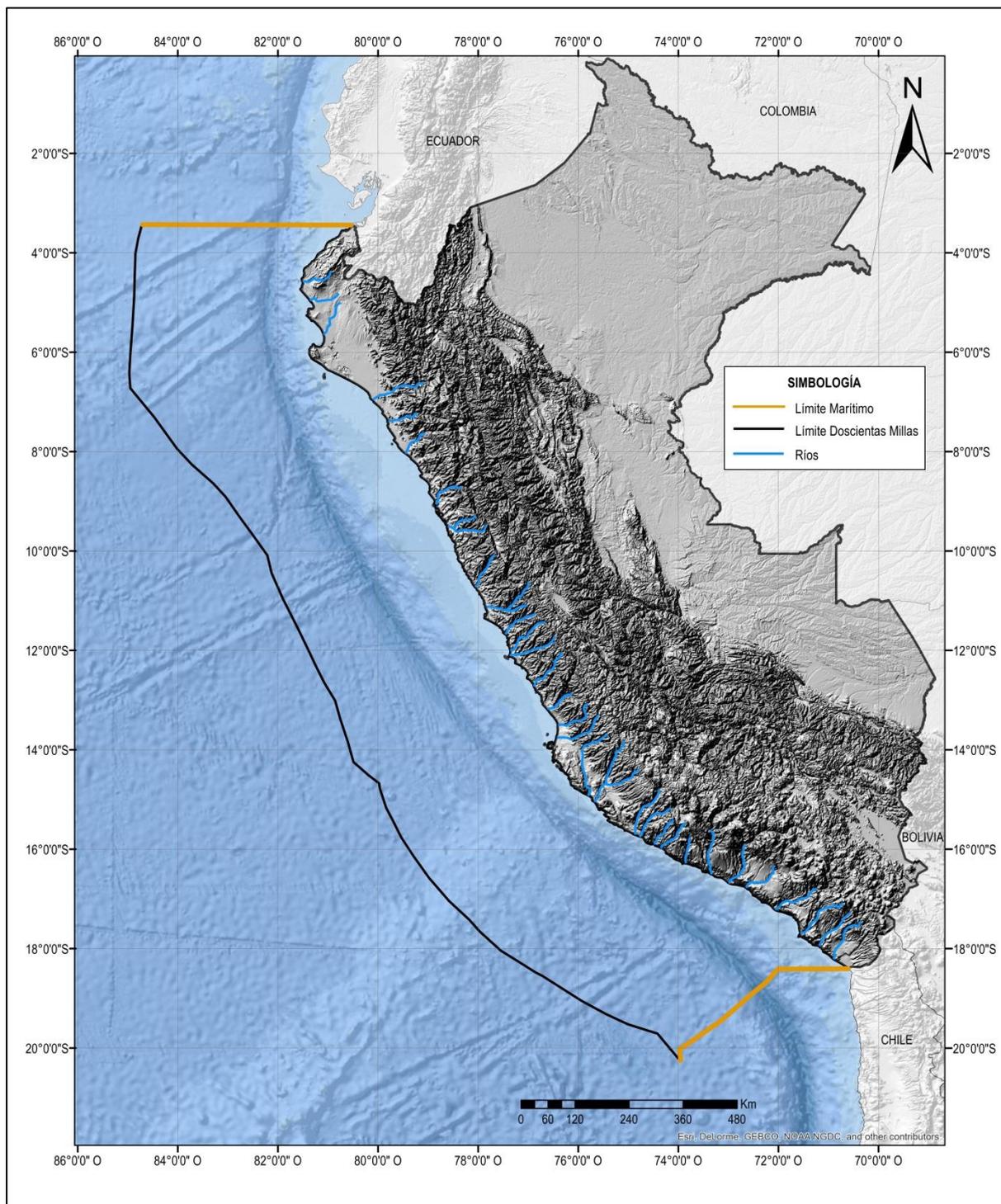


Figura 2.1. Mapa de Límites del Dominio Marítimo del Perú. Estos límites comprenden, el límite de las doscientas millas marinas y los límites marítimos Perú-Ecuador y Perú-Chile. En el año 2012, por acuerdo bilateral se ratificaron los límites marítimos Perú-Ecuador, dos años después en enero de 2014, la Corte Internacional de Justicia, estableció el límite marítimo Perú-Chile, definido por 10 pares de coordenadas geográficas en el sistema WGS 84. (Límites digitalizados según puntos georeferenciados mencionados en la Ley N° 28621 (2005), Ley N° 29687 (2011) y Ley N° 30223 (2014), sin embargo, este mapa no posee valor jurídico).

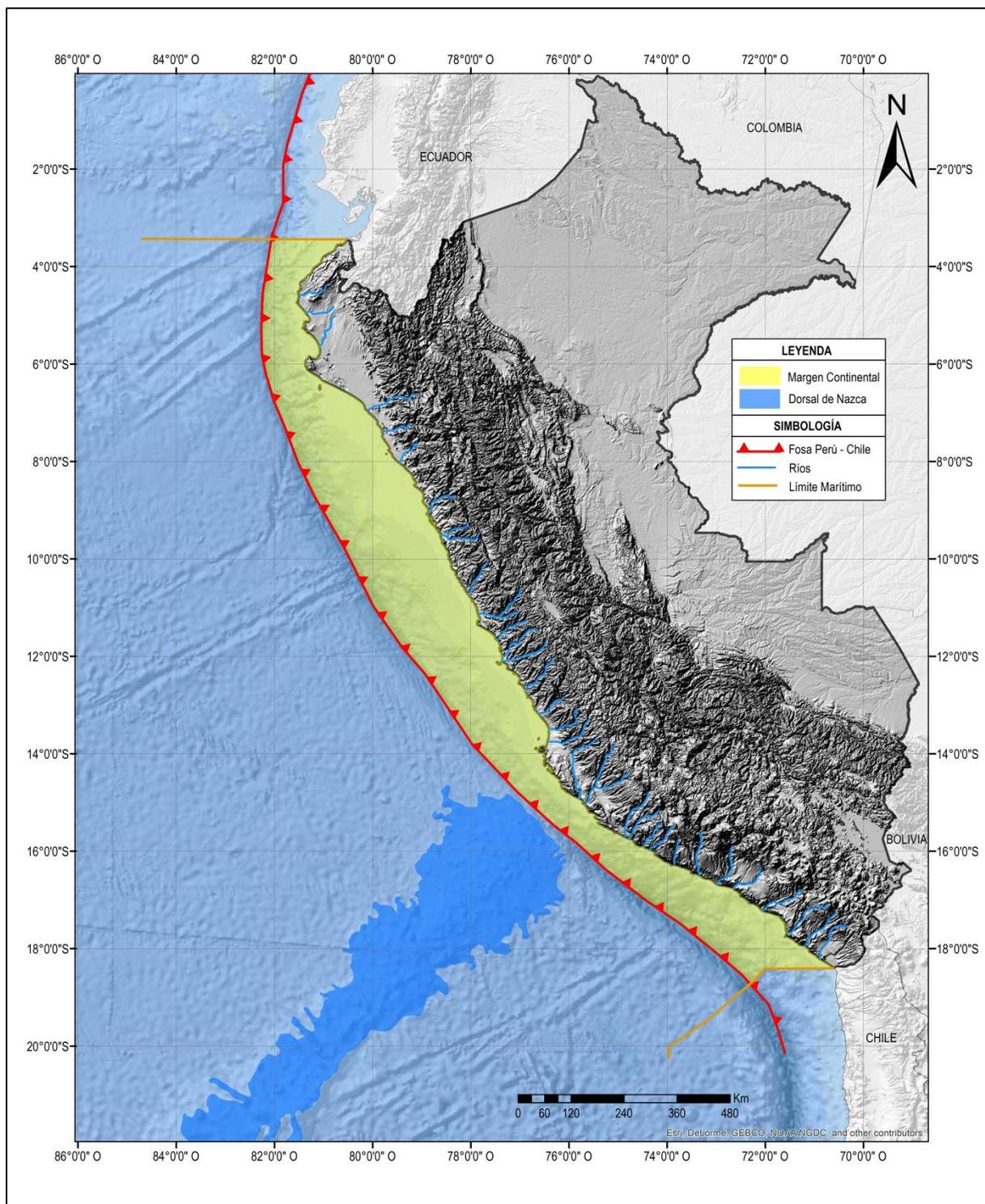


Figura 2.2. Mapa de las *Doscientas Millas Marinas* y su relación con la *Margen Continental Peruana*. El conocimiento geomorfológico y fisiográfico que actualmente tenemos del lecho y subsuelo marino, muestra que las doscientas millas marinas incluyen además de la Plataforma Continental o Zócalo Continental, el Talud Continental y parte de la Cuenca Perú.

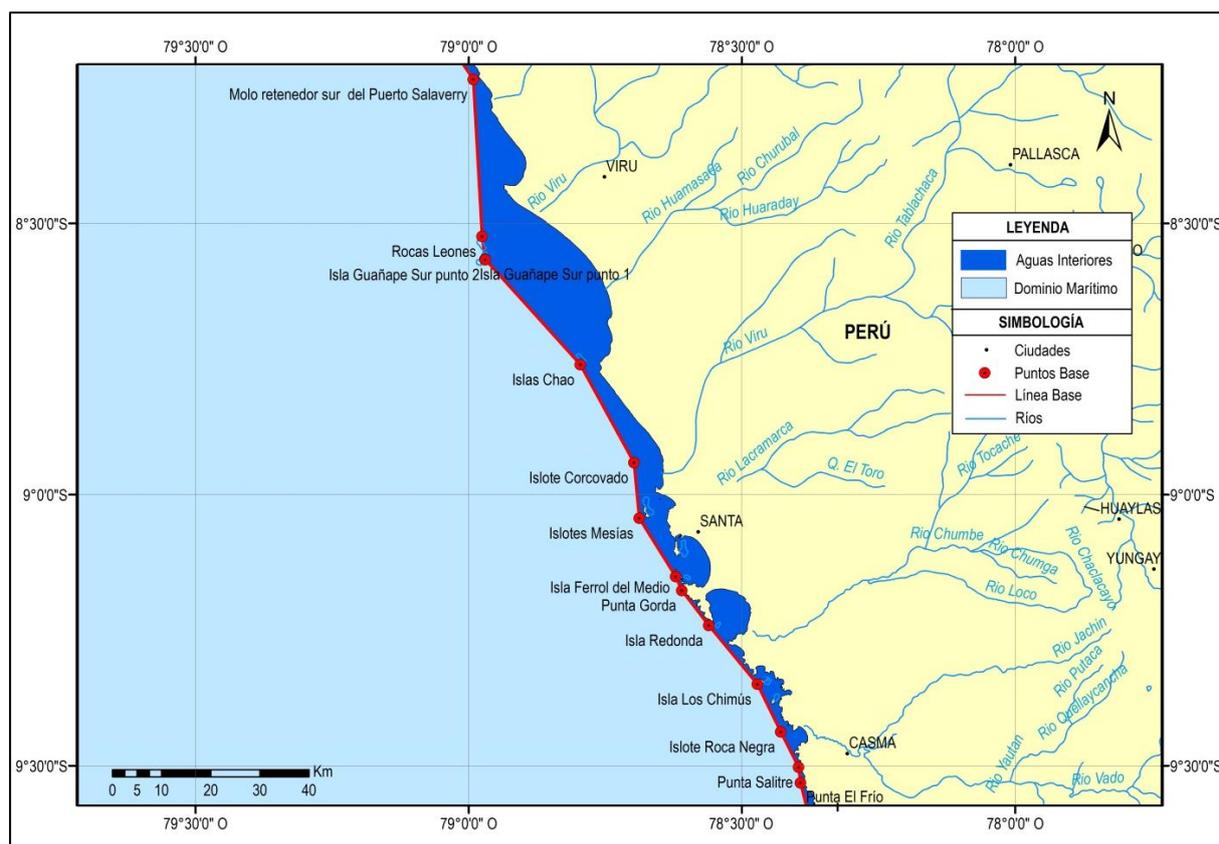


Figura 2.3. Croquis mostrando al detalle los Puntos y Líneas de Base del Dominio Marítimo entre Puerto Salaverry a Puerto Casma. Las Líneas de Base en este sector están definidas por 11 puntos del sistema de líneas de base del litoral peruano; desde el *Punto 72* Molón retenedor sur del Puerto Salaverry ($08^{\circ} 14' 03.6''S$, $78^{\circ} 59' 30.8''O$) a *Punto 83* Islote Roca Negra ($09^{\circ} 26' 15.0''S$, $78^{\circ} 25' 44.5''O$) a partir de los cuales se traza doscientas millas de anchura del mar, y delimitan las aguas interiores del sector, sobre las cuales el Estado ejerce soberanía y jurisdicción. (Tomado de Croquis de la Carta sector Puerto Salaverry a Puerto Supe, PERU RUTA PC-LB-03, Ley N° 28621 Ley de Líneas de Base del Dominio Marítimo del Perú).

2.3 LÍMITES MARÍTIMOS PERÚ – ECUADOR Y EL GOLFO DE GUAYAQUIL COMO BAHÍA HISTÓRICA

El 23 de noviembre de 2012, en el marco de la política de cooperación e integración fronteriza Perú-Ecuador, se dio lugar a la declaración presidencial conjunta que nombra el Golfo de Guayaquil como bahía histórica, representando este acto, una reivindicación al ejercicio de la soberanía sostenida en el tiempo, para el logro de metas específicas de carácter binacional en materia de desarrollo social y económico en un espacio vital para ambos estados. Siendo el Golfo de Guayaquil un mar interior, esta declaratoria permite al Perú obtener $4,177 \text{ km}^2$ de mar con ejercicio de soberanía y jurisdicción, y el establecimiento definitivo de los límites marítimos entre ambos estados, siendo el punto de inicio del límite marítimo las coordenadas: $03^{\circ}23'31.65'' \text{ S}$ y $81^{\circ}09'12.53'' \text{ O}$ en el sistema WGS 84 (Ley N°30223) (Figura 2.4).

Durante seis meses, asesores de las fuerzas navales, jurídicos y técnicos, entre ellos INGEMMET (Resolución suprema N°193-2012-1), trabajaron para preparar el sustento técnico-jurídico de declaratoria. Uno de los componentes claves de este sustento, fue el marco geológico – geomorfológico, donde los estudios concluyen en una alta correlación litoestratigráfica, cronoestratigráfica y tectónica en toda la extensión del Golfo, desde el ámbito marino hasta el continental, de tal manera que Perú y Ecuador, a través del Golfo de Guayaquil, comparten una historia geológica en común (Informe geológico-geomorfológico del Golfo de Guayaquil, Perú-Ecuador, 2015).

El Golfo de Guayaquil es la principal escotadura del borde continental sudamericano en el Pacífico. Define una entrada marina de más de 204 km. de ancho entre Puntilla de Santa Elena en el Ecuador y Cabo Blanco en el

Perú (Fotografía 2.1, 2.2). La declaratoria presidencial implica la protección 16,836 km² de aguas históricas entre los dos países, donde los estados celebrarán acuerdos de conservación, exploración y explotación sostenible de sus recursos naturales.

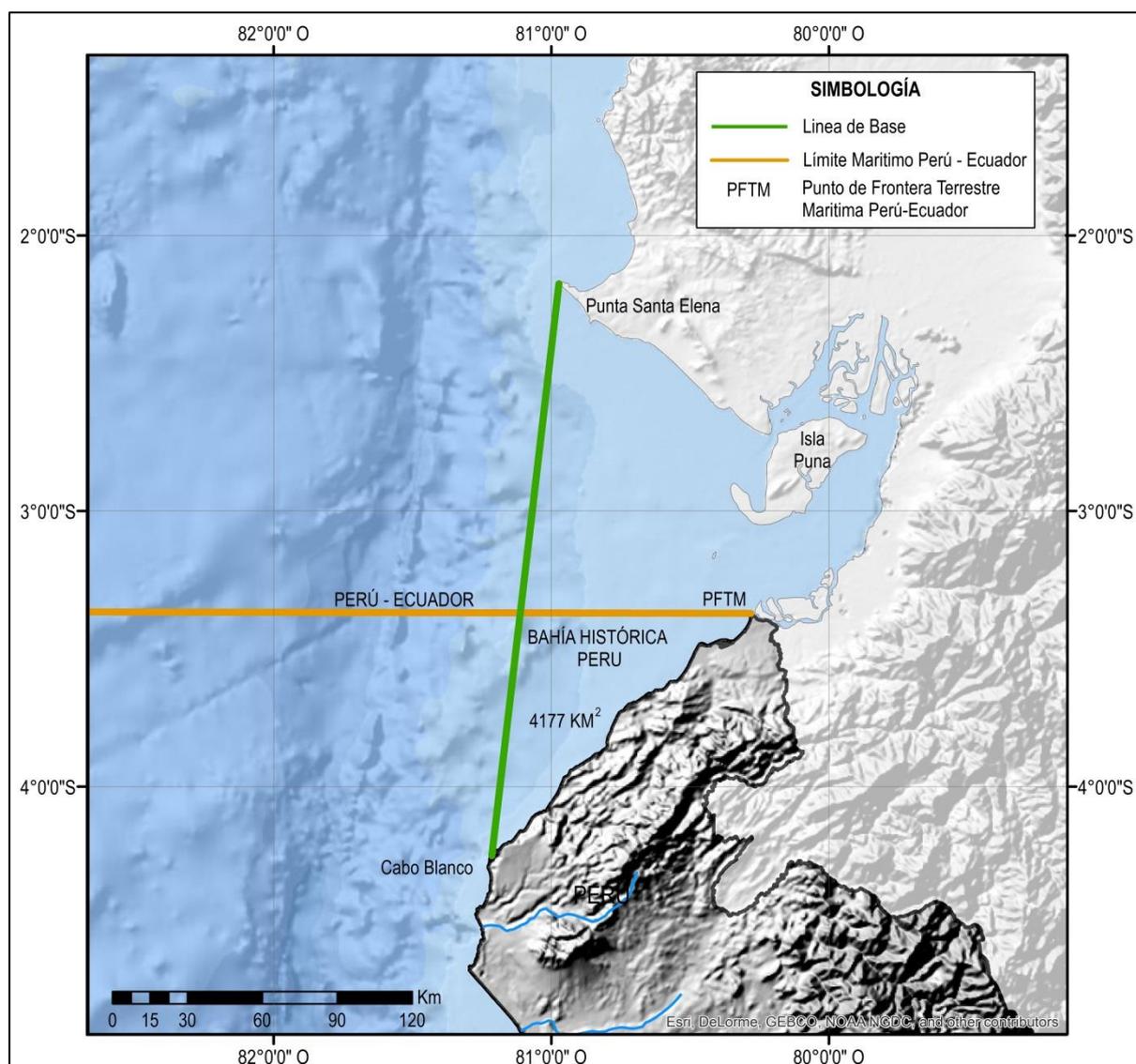


Figura 2.4. Mapa de límite marítimo Perú-Ecuador y Golfo de Guayaquil como bahía histórica. Por la declaración internacional del Golfo de Guayaquil como bahía histórica (2012), se incorpora a las aguas interiores del Perú 4,177 km² de área marítima, incluido suelo y subsuelo, tomando como divisor de este espacio el paralelo 3°23'33.26" latitud sur, y fijando el punto de inicio del límite marítimo Perú-Ecuador (PLM) en las coordenadas: 03°23'31.65" S, 81°09'12.53" O (Ley N°30223, Informe geológico-geomorfológico del Golfo de Guayaquil, Perú-Ecuador, 2015).



Fotografía 2.1. Las aguas interiores del Golfo de Guayaquil sector peruano, están comprendidas entre el punto de inicio del Límite Perú - Ecuador (Tumbes) hasta Cabo Blanco (Vista del sector comprendido entre Cabo Blanco y el Ñuro).



Fotografía 2.2. El Golfo de Guayaquil es de interés vital para la economía binacional. En sus aguas se dan condiciones apropiadas para una alta biodiversidad y productividad pesquera, y en el suelo y subsuelo existen grandes yacimientos de hidrocarburos, los que evidencian la riqueza de los recursos vivos y no vivos.

2.4 LÍMITES MARÍTIMOS PERÚ – CHILE

El 27 de enero de 2014, la Corte Internacional de Justicia (CIJ), principal órgano en el plano judicial de la Organización de las Naciones Unidas, dio el fallo que estableció el límite marítimo entre las repúblicas del Perú y Chile, luego de un largo proceso histórico que inicia en enero de 2008, y donde el Perú demanda a la CIJ determinar el límite marítimo entre ambos países y el reconocimiento de los derechos soberanos exclusivos.

Según lo resuelto en este fallo, el 11 de julio del mismo año, el presidente de la República, Ollanta Humala Tasso suscribe la Ley N° 30223 de líneas de base del dominio marítimo del Perú, según la delimitación marítima entre la república del Perú y la república de Chile, y el 19 de agosto aprueba la nueva Carta de Limite Exterior-Sector Sur - del Dominio Marítimo del Perú (Decreto Supremo N° 035-2014-RE), donde constan las coordenadas geográficas del punto de inicio de la frontera marítima (PIFM), las de los Puntos de Base contribuyentes, las de los puntos A, B y C y las de los puntos intermedios de la línea equidistante A-B, en el sistema WGS 84 (Figura 2.5), que reconocen un espacio marítimo de 49,356 mil kilómetros cuadrados con derechos soberanos.

Cabe resaltar la vocación pacífica del Perú al recurrir a la máxima instancia judicial para la solución del contencioso confirmando el firme compromiso de nuestro país con el principio internacional de solución de controversias por medios pacíficos.

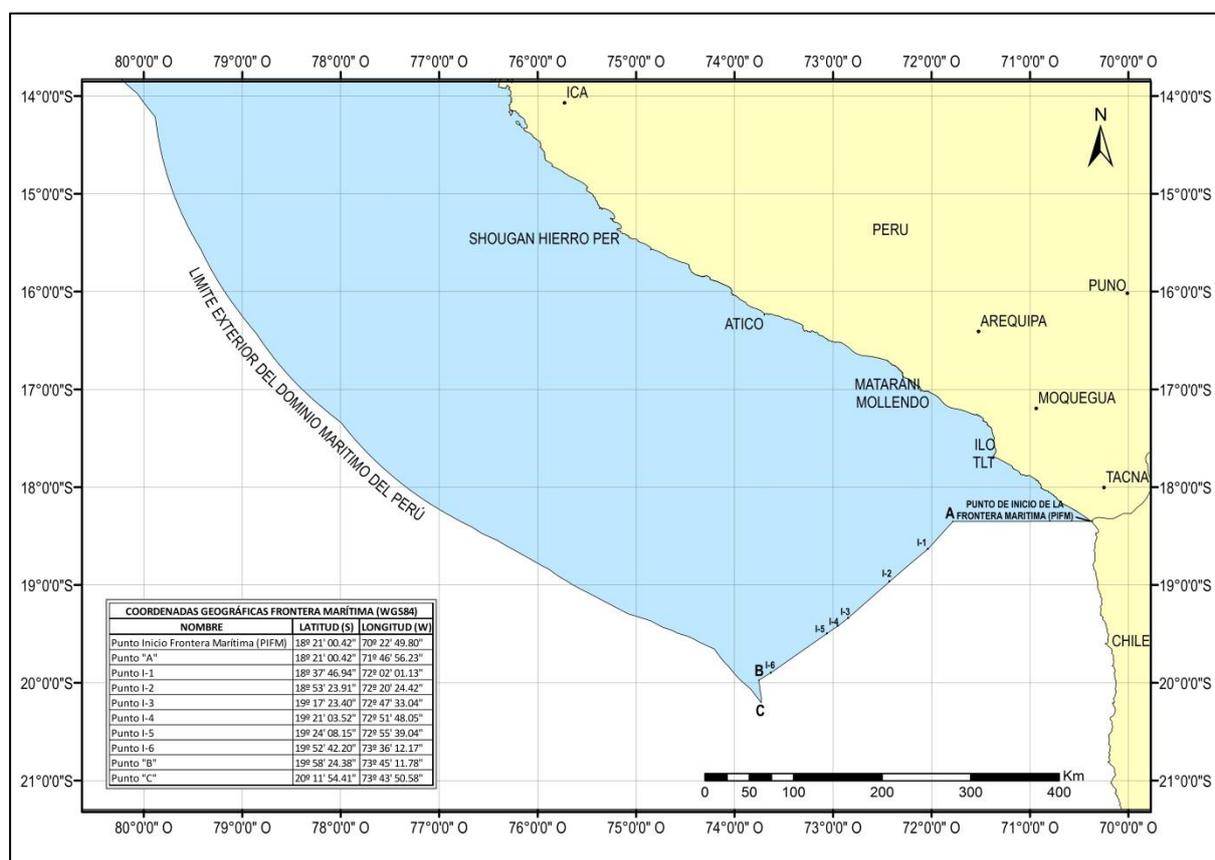


Figura 2.5. Carta del Límite Externo-Sector sur del dominio marítimo del Perú. Ubicación de los Puntos de Base que definen la frontera marítima Perú - Chile, desde el Punto "Punto de inicio de la frontera marítima" hasta el punto "C". (Decreto Supremo N° 035-2014-RE Aprueban la Carta anexa que sustituye a la Carta que grafica el limite exterior - sector sur - del dominio marítimo del Perú, aprobada mediante Decreto Supremo N° 047-2007-RE.

2.5 IMPORTANCIA DE LA EXPLORACIÓN CIENTÍFICA DE LA MARGEN CONTINENTAL PERUANA

Los primeros estudios del mar peruano estuvieron dirigidos al conocimiento de la Corriente peruana y cambios estacionales que ocurren en el Océano Pacífico, impulsados por la necesidad de un mayor aprovechamiento y control de recursos pesqueros. Así la primera investigación nacional estuvo a cargo del Consejo de Investigaciones Hidrobiológicas del Perú (1958-1966), con el Buque de la Armada Peruana "BAP Bondy" se cubrió un transecto desde Callao hasta Talara, con 8 estaciones oceanográficas y biológicas, obteniendo información sobre parámetros oceanográficos y datos meteorológicos. Luego se constituiría el Instituto del Mar del Perú (IMARPE), con investigaciones avocadas al estudio del mar peruano y sus recursos biológicos.

Proyectos internacionales dieron una visión regional de la composición, estructura y evolución de la margen continental peruana, así el Proyecto *Nazca Plate*, con la participación del *Oregon State University (OSU)*, el *Hawaii Institute of Geophysics (HIG)* y *NOAA Pacific Oceanographic Laboratory (1972-1973)* tuvieron por objetivo: (1) Realizar estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, correlacionar las estructuras y estratigrafía de la margen continental con las estructuras de la costa así como describir las características morfológicas de la margen continental, (2) Conocer sobre la formación de depósitos metalíferos a lo largo del límite divergente de la Placa de Nazca, y Cuenca Bauer, y los procesos responsables de volcanismo y formación de depósitos de oro encima de la zona de convergencia. Otro proyecto de importancia fue el *Ocean Drilling Program – ODP, Leg 112 (1986)* donde participaron investigadores del INGEMMET, con el objetivo de estudiar los procesos geológicos-tectónicos, climatológicos y paleoceanográficos en la margen continental peruana, con resultados sedimentológicos, diagénesis, bioestratigrafía/paleontología, paleoceanografía y geoquímica. En el año 1992 el Instituto de Investigaciones de Ciencias del Mar de *Universität Zu Kiel, Alemania (Forschungszentrum für marine Geowissenschaften der Christian – Albrechts – Universität Zu Kiel)*-GEOMAR (1992), realizó estudios de geofísica, sedimentología y geoquímica frente a Paita, Chiclayo, Chimbote y Callao (Figura 2.6).

La historia de estos estudios de geología marina y sus resultados, van de la mano con los avances tecnológicos, influenciados por motores básicos como: el económico centrado en la búsqueda de yacimientos submarinos minerales y de petróleo; la defensa nacional y los planes de reordenamiento nacional. En relación al primero el conocimiento que hoy tenemos sobre los recursos minerales de la margen continental peruana, vislumbra una serie de posibilidades; basados en los resultados de las investigaciones que indican condiciones geoquímicas favorables y concentraciones polimetálicas de interés

El reconocimiento de nuestra soberanía y jurisdicción sobre las 200 millas marítimas, y la formal delimitación de límites marítimos Perú-Ecuador y Perú-Chile, deben ser alicientes para la implementación de programas nacionales de investigación de geología marina para el conocimiento y gestión de los recursos geológicos de fondo marino, y que en un plan de asociación preferencial o prioritario redunden en el desarrollo fronterizo e integración fronteriza. Como plan de acción están el cartografiado batimétrico, geomorfológico, y geofísico, y la caracterización cualitativa y cuantitativa de los sedimentos superficiales y subsuperficiales de las zonas con potencial mineral (Figura 2.5).

Es también de vital importancia establecer una visión como república fundamentalmente marítima, a través de programas de concientización de la población. Los cuales pueden ir desde el uso de mapas temáticos a nivel educacional que grafiquen en su integridad nuestro territorio el mismo que debe comprender las Doscientas Millas marítimas y límites marítimos actuales.

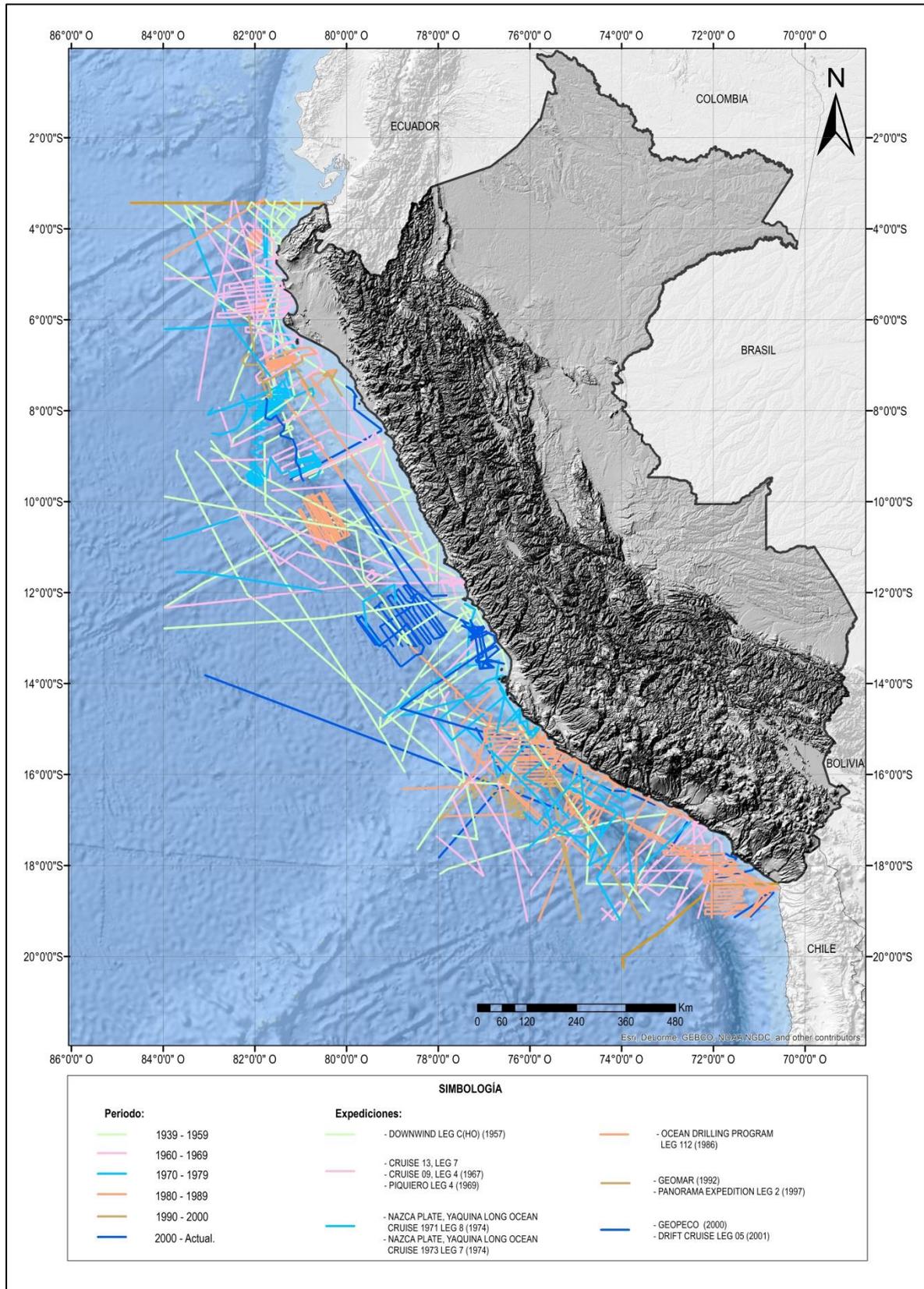


Figura 2.6. Mapa de ruta de los Cruceros Internacionales que desde el siglo XX realizan investigaciones en la Margen Continental Peruana. (Base de información de la *National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA).

CAPÍTULO III

MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN EN GEOLOGÍA MARINA

3.1 GENERALIDADES

Las investigaciones geológicas de las márgenes continentales consisten en el reconocimiento y cartografiado geológico de sus fondos marinos. Los estudios batimétrico, geomorfológico, tectónico, sedimentológico y micropaleontológico, entre otros, permiten conocer sobre la configuración y evolución de fondo; composición y distribución de sedimentos del fondo; procesos y dinámica de fondo, y los cambios en la circulación e interacción de los océanos y la atmósfera. La clasificación y cartografiado de los diferentes tipos de fondo marino, es información clave para conocer el potencial de los recursos geológicos: minerales metálicos y no metálicos, que encierra el fondo marino, y para su aplicación en temas como la reconstrucción de los procesos geológicos de transferencia continente-océano, dinámica costera, regeneración de playas, contaminación de suelos y paleoceanografía, entre otros.

Las investigaciones en geología marina, requieren de plataformas de operación como son los barcos, estos pueden ser de investigación implementados con equipos, instrumentos, laboratorios y software para la medición y obtención de datos; barcos pesqueros o comerciales acondicionados temporalmente; torres de perforación, y submarinos (Figura 3.1, 3.2.A). En el año 1992, el sumergible *Vessel Johnson* descendió en el sector norte de la plataforma peruana, a la altura de Punta Falsa (Piura), se colectaron costras polimetálicas y sedimentos de fondo para estudios de facies geoquímicas y sedimentarias en márgenes con afloramiento costero (*upwelling*) y zonas de mínimo oxígeno (Figura 3.2.B).

Los métodos de estudio pueden ser directos e indirectos. Son directos los que brindan información de áreas específicas del suelo o subsuelo marino, tales como muestras de sedimentos o rocas, fotografías y videos de fondo, e indirectos, si aplican fundamentos geofísicos y a partir de ecosondas, sonares y perfiladores sísmicos, brindan información regional sísmica y batimétrica, etc. (Figura 3.3, Fotografía 3.1.).



Figura 3.1. Los buques de investigación, constituyen estaciones de investigación móviles, que proporcionan plataformas estables las cuales cuentan con equipos electrónicos y sistemas de navegación y comunicación especializadas, sumergibles y personal. Vistas de la Expedición SONNE SO-147 (año 2000), en la que participaron investigadores del INGEMMET (Cruise report SO-147 (2000)).

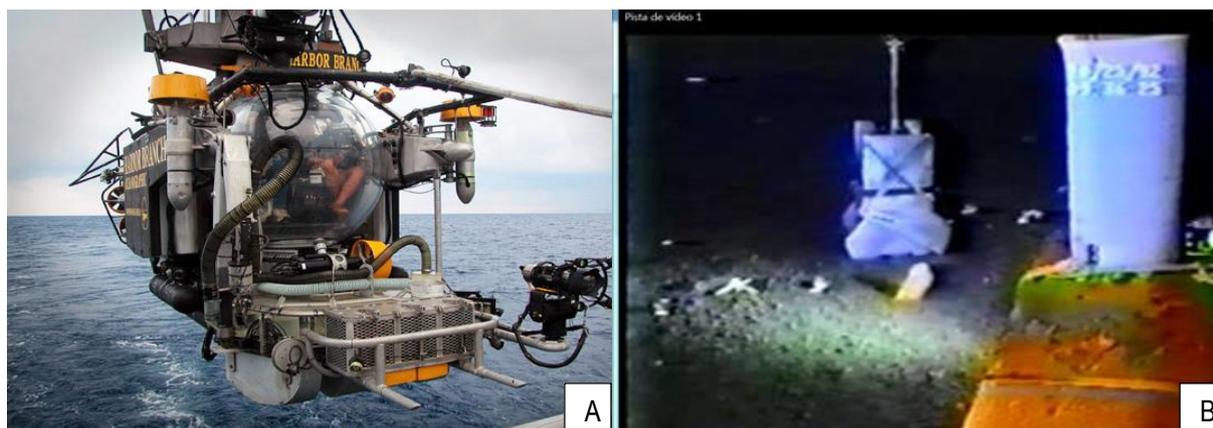


Figura 3.2. A. Despliegue de la R/V Seward Johnson para una inmersión <http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/sealink/sealink.html>. B. Escena de muestreo de sedimentos de fondo marino en la plataforma frente a bahía Falsa (Piura), con brazo robótico del sumergible del buque Johnson en octubre de 1992.

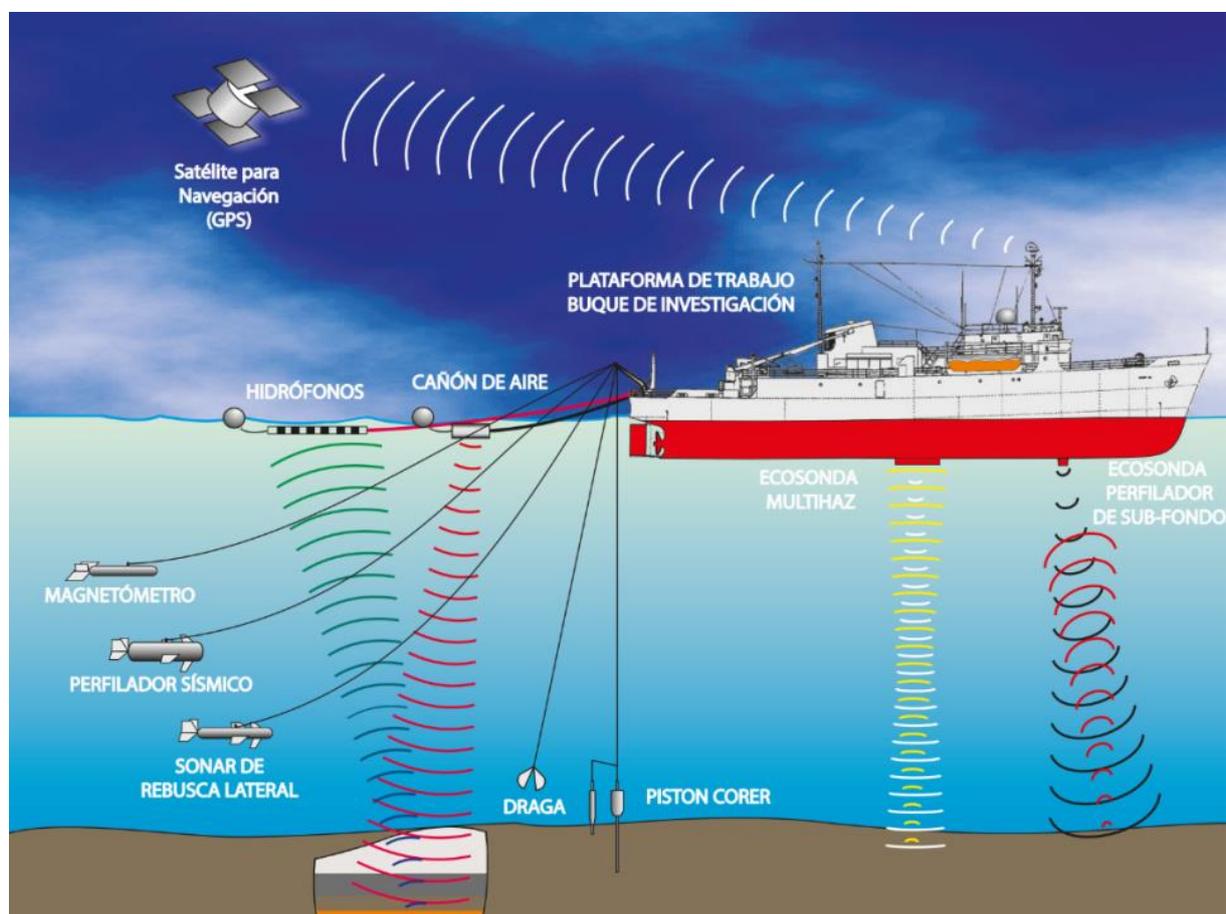


Figura 3.3. Métodos directos e indirectos de investigación en geología marina



Fotografía 3.1. El Buque de investigación científica BIC Humboldt, del Instituto del Mar del Perú (IMARPE), está dotado de laboratorios y equipos hidroacústicos, que permiten realizar investigaciones interinstitucionales en el continente Antártico. Expedición ANTAR XXII (año 2014) en la que participaron investigadores del INGEMMET.

3.2 MÉTODOS DIRECTOS

3.2.1 MUESTREO DE SEDIMENTOS DE FONDO MARINO

El muestreo de sedimentos de fondo marino constituye un método directo efectivo para la obtención de información aplicada a los estudios de Geología marina y cartografiado de fondo marinos. El análisis e interpretación de las muestras, mediante técnicas de laboratorio y estadística, brinda información de áreas específicas del suelo o subsuelo marino en sedimentología, morfometría, granulometría, mineralogía, geoquímica y micropaleontología, entre otros, permitiendo conocer la composición y distribución de fondo, los procesos sedimentarios que controlan ambientes sedimentarios modernos y evolución de fondo; potencial de recursos geológicos que encierra, así como los cambios en la circulación e interacción de los océanos en el pasado y presente.

3.2.2 EQUIPOS DE MUESTREO

Las técnicas de muestreo de sedimentos y rocas de fondo marino están en relación a los objetivos que la investigación persigue; muestreo de la epifauna e infauna, muestreo de capas de sedimentos superficiales o profundos y/o rocas más profundas y antiguas. Para muestras de roca se requiere de equipos de perforación, buques grandes y estables. En la última década se cuentan con embarcaciones como el Chikyu que esta implementada para perforar siete kilómetros en el lecho marino y alcanzar la zona de subducción activa por debajo de la fosa Nankai, costa afuera de Japón. Los sedimentos consolidados superficiales son muestreados con dragas, los más profundos requieren de muestreadores con pistón o empuje de extracción; *pistón corer*, *gravity corer*, *multicores*, saca testigos de caja, *vibracorer* y *grabs* los que tienen diferentes beneficios y limitaciones en el muestreo.

Dragas tipo *Van Veen* y *Gravity Corer* fueron utilizados durante el Crucero hidrogeológico INGEMAR I, para la colecta de sedimentos superficiales y testigos de fondo marino de la plataforma y talud continental frente a Punta Sal a Puerto Pariñas (Carta Náutica N°112). Este crucero organizado por el proyecto de Geología Marina del INGEMMET y la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, se llevó a cabo entre mayo y julio de 2016, con el fin de realizar el levantamiento batimétrico- geomorfológico de este sector.

3.2.2.1 Draga tipo Van Veen

La draga consiste de dos cucharas o mandíbulas metálicas articuladas y sujetas a dos brazos largos que penden de un cable. Desciende con el sistema abierto hasta tocar el fondo marino, capturando sedimentos superficiales y cerrándose automáticamente. Este mecanismo confiere una alta eficacia en la toma de muestras de sedimento superficial, minimizando la pérdida de material fino (Fotografía 3.2.).

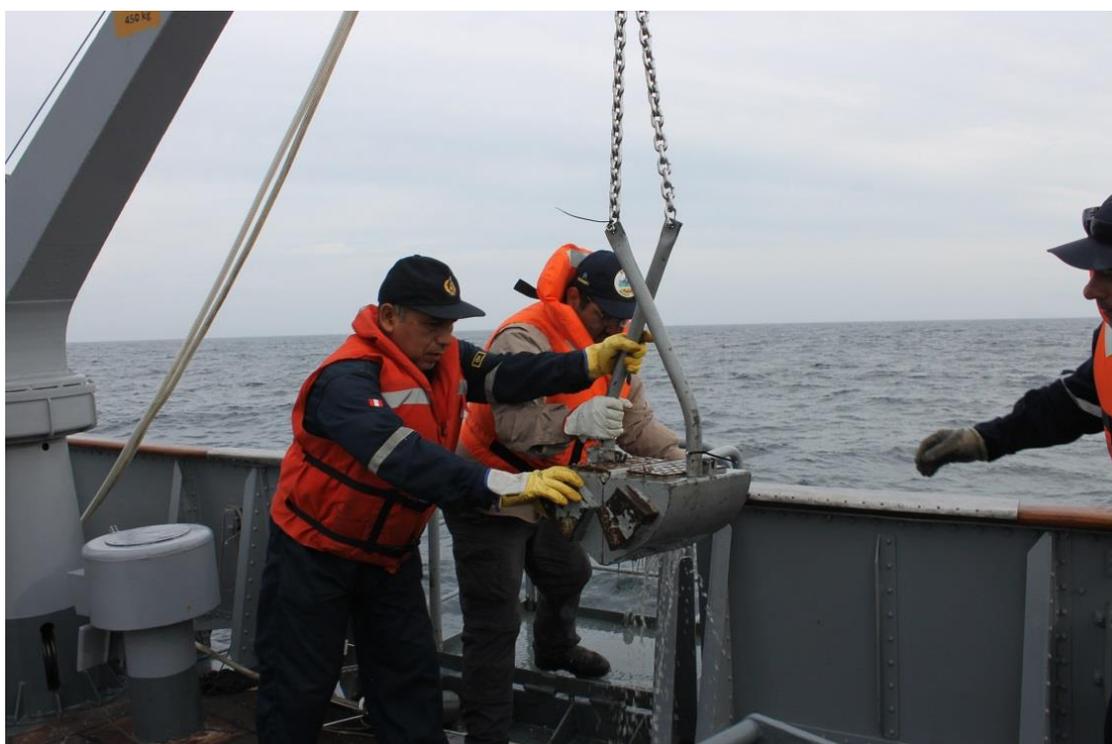
Este tipo de draga es utilizada ampliamente en estudios que requieren el muestreo de bentos y muestreo de sedimentos superficiales del fondo marino (Fotografía 3.3.). Debido a su sistema de cierre remueve el material superficial disturbando los primeros centímetros de su estratigrafía. No es recomendable para muestreo de sustratos gruesos y/o rocosos. Se pueden coleccionar muestras a más de 1000 mbnm.y emplear inclusive en condiciones de oleajes fuertes, recuperando hasta más de 4 kg. de sedimento (Fotografía 3.4 y 3.5).



Fotografía 3.2. Draga tipo Van Veen: Sistema de cucharas o mandíbulas, sistema de pesas laterales para asegurar una mayor penetración, y mallas para expulsión de agua una vez coleccionado el sedimento. (Crucero INGEMAR I).



Fotografía 3.3. Recuperación de draga (Crucero INGEMAR I).



Fotografía 3.4. Recepción de draga para su apertura y descarga de sedimento colectado (Crucero INGEMAR I).



Fotografía 3.5. Se procede a fotografiar la muestra con su respectiva escala y código (Crucero INGEMAR I).

3.2.2.2 Saca Testigos

La saca testigos recuperan testigos de sedimentos de fondo marino y costero de mayor longitud, bien preservados conservando su estratigrafía. Así los testigos pueden ser analizados temporal y espacialmente; obteniendo información estratigráfica, climática y paleoceanográfica.

Gravity corer o perforadora de gravedad o “saca testigo de gravedad”

Este equipo es de acero y está constituido por un sistema de 04 aletas estabilizadoras grandes unidas a un barril de longitud y diámetros variables, el cual presenta en el extremo opuesto un sistema de cierre de lanza constituida por una punta de bronce y colector de testigo de acero inoxidable. Al interior del barril se aloja un *liner* o tubo de PVC, reemplazable que será el revestimiento del testigo y fácil de retirar, en su extremo se inserta el colector de testigo. Entre la unión de las aletas y el barril se pueden incorporar pesas de plomo de 20 kg, 40 kg, 60 kg. a más según se requiera (Figura 3.6). Las pesas y las aletas brindan el peso y estabilidad suficientes para asegurar que el equipo penetre en el lecho y lo haga en línea recta.

Este sistema funciona mediante la adquisición de energía cinética en su caída libre hasta el fondo durante su recorrido a través de la columna de agua. Una vez que toca el fondo y debido a la energía alcanzada el equipo penetra en el sedimento, el cual queda dentro del liner y es retenido por el sistema de cierre de lanza. Puede coleccionar muestras por encima de los 6 metros de longitud (Fotografía 3.6, 3.7 y Figura 3.4 A, B).



Fotografía 3.6. Sistema de pesas y aletas que otorgan peso y estabilidad para el lance y penetración del equipo en el lecho marino (Crucero INGEMAR I).



Fotografía 3.7. Recuperación de la perforadora de gravedad. (Crucero INGEMAR I).



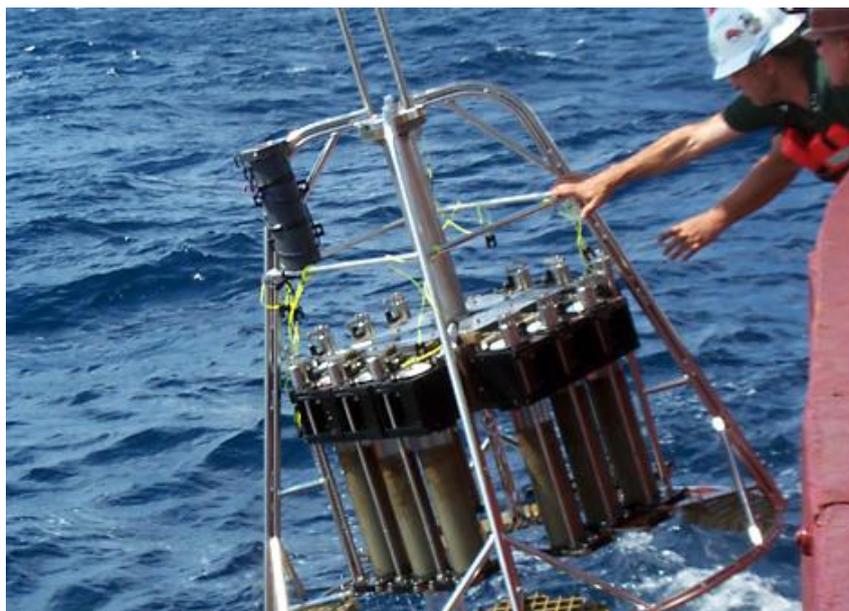
Figura 3.4. A. Extracción del colector de testigo y sellado de la parte inferior del *liner*. B. Liberación del *liner*, giro a posición vertical y sellado con tapa plástica del extremo superior. (Crucero INGEMAR I).

Pistón corer

Penetra usualmente más de 10 m., a diferencia del muestreador anterior acciona con un pistón. El corredor del pistón se baja al lecho marino, cuando el contrapeso golpea el lecho marino, se acciona el *corer* principal que cae libremente al fondo del mar. Los pesos en la parte superior del cañón aseguran la presión con fuerza para garantizar la penetración. El mecanismo inteligente del *pistón corer* está dentro del extremo superior del barril cuando este penetra en el lecho marino, el sedimento es empujado y aspirado en el barril asegurando una penetración máxima y compresión mínima.

Multicorer

Es *pistón corer* de tamaño pequeño. Se obtienen muestras cortas no perturbadas las que conservan la interface agua sedimento. Comprenden de multiconectores y *rack* de tubos. Los multiconectores descienden cuidadosamente hacia el fondo marino hasta una distancia prudente que mantenga los pies lejos del sitio a ser muestreado, entonces se baja un *rack* de tubos cortos por lo general 8, penetrando en el sedimento con la ayuda de un peso. Cuando se recupera el *corer*, se sella la parte superior del tubo una tapa creando vacío y reteniendo el sedimento colectado y columna de agua. Luego un brazo oscilante cierra la base de los núcleos conservando la muestra intacta en su tránsito hacia la superficie (Figura 3.8).



Fotografía 3.8. Multicorer (Fuente: <http://response.restoration.noaa.gov/about/media/deep-sea-ecosystem-may-take-decades-recover-deepwater-horizon-spill.html>).

Saca-testigos de Caja

Para estudios que requieran coleccionar grandes volúmenes de sedimento. Para estudios mega-faunales que requieren muestras más grandes y muchas veces desean estandarizar las áreas superficiales. Durante estudios de reconstrucción paleoceanográfica de la plataforma continental peruana, el grupo de estudios PALEOPECES (IMARPE, INGEMMET, IRD), utilizó un sacatestigos de caja tipo Soutar de dimensiones de 140 x 19.6 x 19.6 cm., para coleccionar 02 testigos de sedimentos de fondo marino uno frente a Callao y otro frente a Pisco (Figura 3.5.A).

Vibro-corer

Muestreo de sedimentos de arenas y gravas. Se trata de un muestreador a motor, por lo cual el equipo es bastante pesado y se despliega desde el bastidor lo que limita la altura de la plataforma. Por lo general tienen longitudes de 3 m o 6 m. (Figura 3.5.B).

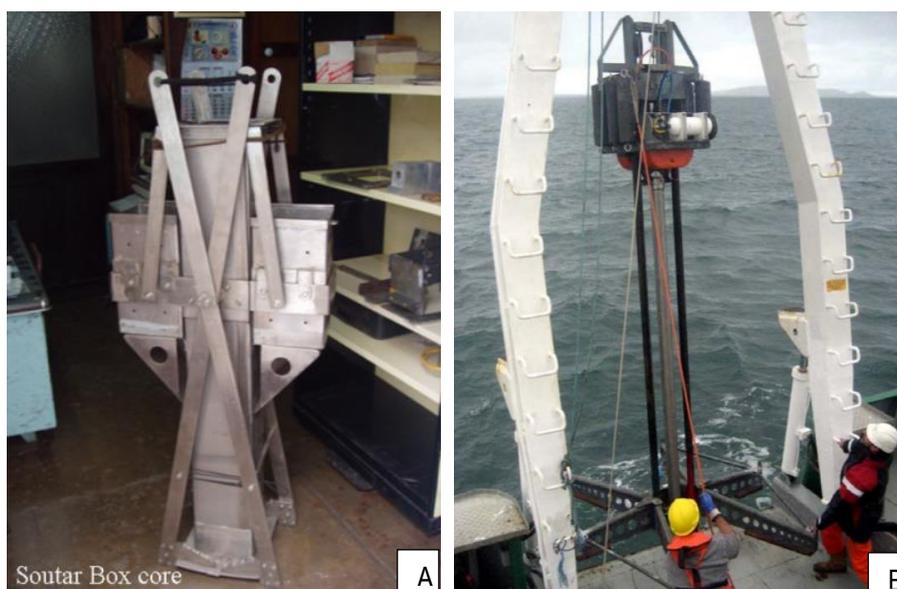
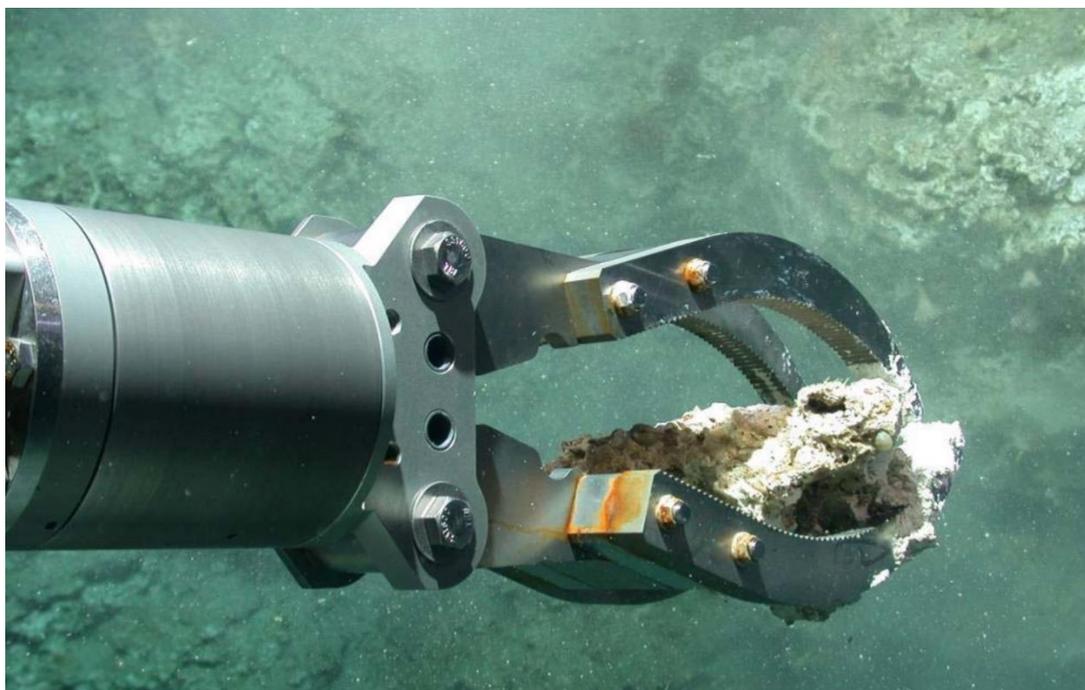


Figura 3.5. A. Muestreador tipo *Soutar Box Corer* del IMARPE. (Proyecto PALEOPECES). B. *Vibrocorer*. (Fuente: *seabed_sediment_sampling_techniques*)

Vehículos con control remoto (ROVs)

Instrumentos robóticos equipados con propulsión, brazos manipuladores, cámaras y otros sensores conectados y controlados desde una nave madre. Permiten muestreos precisos de sedimentos superficiales y recojo de clastos individuales, núcleos de rocas. Inspección del lecho marino desde el cual se pueden escoger los sitios de muestreo. Alcanza a muestrear sitios inaccesibles a otros muestreadores a través de un brazo manipulador controlado (Fotografía 3.9.).



Fotografía 3.9. Brazo manipulador con muestra de coral: ROV VICTOR 6000 (*seabed_sediment_sampling_techniques*)

3.2.3 PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE SEDIMENTOS

3.2.3.1 Caracterización de los sedimentos

El estudio de sedimentos oceánicos está orientado al conocimiento y comprensión de los procesos de formación, transporte y deposición del material que se acumula en los fondos marinos (sedimentología), este estudio inicia con la caracterización de sus granos relacionados al tamaño y forma (**granulometría** y **textura**), propiedades ópticas (**mineralogía**) y composición elemental (**geoquímica**). Para esto se requiere del tratamiento previo de las muestras en laboratorio, el cual debe estar equipado esencialmente con una campana extractora de gases, baño maría y agitador de tamices. El proceso considera el submuestreo, secado de muestra, disgregación mecánica, separación de contramuestra, disgregación química, filtrado, secado, tamizado de la fracción gruesa y de la fracción fina (Figuras 3.6 a 3.9.)

El análisis granulométrico a partir del empleo de tamices normalizados que van de 2 ms. a 63 μ m, se obtiene la distribución granulométrica desde el tamaño de gravas, arenas, limos, hasta arcillas (Figura 3.10). El análisis **mineralógico** se realiza por Difracción de Rayos X, se caracterizan las propiedades físicas y químicas de los minerales con estructura cristalina. Este análisis permite identificar facies mineralógicas, minerales autógenos de ambientes submarinos y transportados por sistemas fluviales, tipo de roca erosionada, transportada y depositada, tiempo y distancia de transporte de los sedimentos, resistencia del mineral a la abrasión y transporte, condiciones físicas y químicas de la zona de depósito o plataforma. En la plataforma continental peruana, son 06 los minerales relacionados al aporte terrígeno fluvial: Cuarzo, Albita, Moscovita, Clorita, Riebeckita y Augita.



Figura 3.6. Submuestreo para implementación de la litoteca de geología marina del INGEMMET



Figura 3.7. Reacción de la materia orgánica en frío, con peróxido de hidrógeno (reducción de la materia orgánica)



Figura 3.8. Secado de muestras en estufa a temperatura no mayor de 35°C.



Figura 3.9. Sedimento retenido en una de las mallas tamizadas. B. Sedimento sobre el papel cansón.

Clastos sedimentarios		Tamaño del clasto en mm.	Escala PHI
GRAVA	Bloques	256	-8
	Grava	64	-6
	Guijarro	16	-4
	Granos	4	-2
ARENA	Arena muy gruesa	2	-1
	Arena gruesa	1	0
	Arena media	0.5	1
	Arena fina	0.25	2
	Arena muy fina	0.125	3
LODO	Limo	0.032	5
	Arcilla	0.004	8



Figura 3.10. Tabla granulométrica del Manual de Clasificación de Rocas Sedimentarias del INGEMMET, ítem 4.2.1. (basado en Wentworth (1922) con modificaciones de la *British Geological Survey* (BGS) y Hallsworth & Knox, 1999. A la derecha diferencia granulométrica de una muestra clasificada por tamices.

3.2.3.2 Estudio micropaleontológico

Los testigos o *cores* constituyen registros sedimentarios a partir de los cuales se puede aprender la historia de la tierra. En estos registros la investigación micropaleontológica aporta señales claves para interpretar los procesos o cambios acontecidos a diferentes escalas de tiempo. La metodología para preparación y estudio micropaleontológico requiere de tiempo y paciencia; después de extraído el testigo debe ser conservado a temperaturas entre 3° a 4°C durante 60 días. Luego viene la etapa de submuestreo, esto es dividir el testigo y cortarlo longitudinalmente y transversalmente, según plan de submuestreo y resolución de estudio planificada (en estudios de alta resolución se obtienen submuestras cada 0.2 a 0.8 mm) (Figuras 3.11 y 3.12). Las submuestras se destinan para estudios de bioindicadores por foraminíferos, escamas, nanoplancton calcáreo, radiolarios etc., y para cronología. Cada submuestra así obtenida se prepara por procedimientos físicos y químicos. El Análisis

Taxonómico se realiza bajo estereomicroscopio, consiste en la identificación sistemática de las especies que contiene cada submuestra se describen características morfológicas tipo y se toman microfotografías (Figura 3.13). El tratamiento estadístico de la data obtenida, nos brinda información sobre la abundancia absoluta y relativa de las especies, densidades (n° de individuos en un gramo de sedimento seco) y abundancia relativa. Las variaciones temporales y espaciales de esta información pueden constituir señales importantes como efecto de la variabilidad de componentes o factores oceanográficos-climáticos, entre otros.

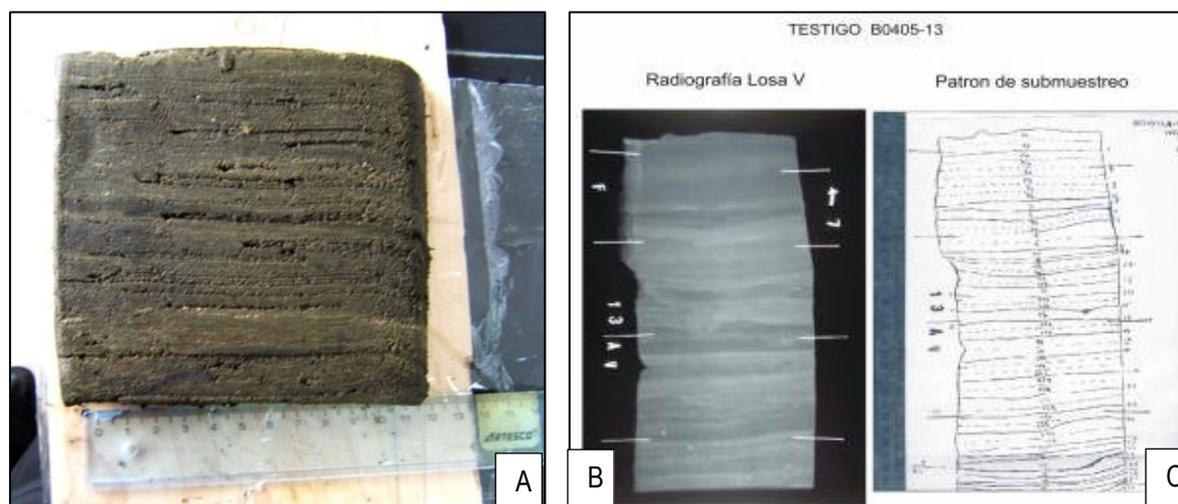


Figura 3.11. Una buena resolución de submuestreo de un core o testigo está en función de la preservación de sus características sedimentarias (A). En una radiografía de Rayos X, se registran las laminaciones del testigo (B), base sobre la cual se elabora el patrón de submuestreo (C) (Morales et al., 2007).

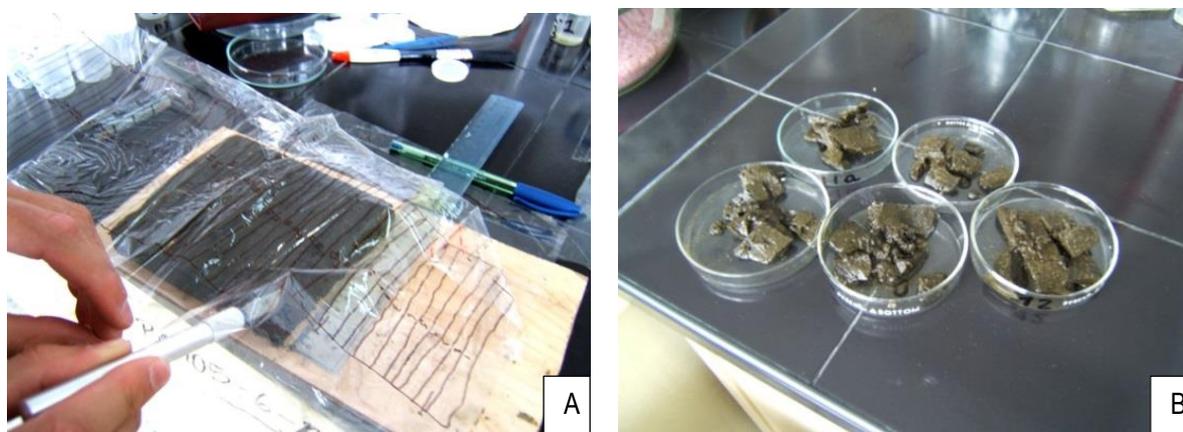


Figura 3.12. Proceso de submuestreo del testigo según patrón (A). Submuestras listas para ser sometidas a procesamiento químico, lavado y secado (B) (Morales et al., 2007).

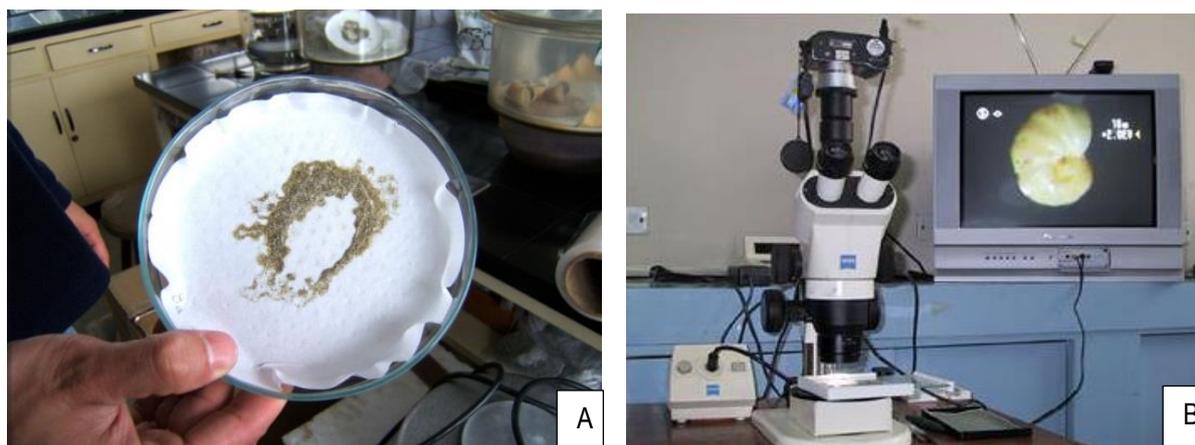


Figura 3.13. Muestra para análisis al estereomicroscopio (A). Identificación de foraminífero (B) (Morales et al., 2007)

3.3 MÉTODOS INDIRECTOS

3.3.1 HIDROACÚSTICA

3.3.1.1 Batimetría multihaz

La batimetría es la medición de las profundidades de lechos de océanos, mares, ríos, lagos y lagunas. Es información que permite conocer la morfología de fondo, y comprender los procesos de fondo, para su aplicación en el cartografiado geomorfológico, y planes de seguridad costera, marítima y zonación ecológica, económica y reordenamiento territorial.

Una de las técnicas más antiguas para medir las profundidades de los fondos marinos fue la sonda de plomo, consistente en una plomada amarrada a una cuerda, la cual era lanzada desde la proa de un barco hasta el fondo marino para leer la profundidad. En los años 30's, aparecen las primeras ecosondas cuyo fundamento es determinar la profundidad en función de la velocidad de propagación de una onda acústica en un medio conocido. Un transductor instalado en el casco del buque envía un pulso acústico, que recorre la columna de agua hacia el fondo, se refleja en éste y su eco es recogido por el mismo transductor, entonces conociendo la velocidad del sonido de este medio, y midiendo el tiempo transcurrido entre emisión y recepción, puede conocerse la distancia perpendicular al fondo (Figura 3.14).

Se conocen la ecosonda monohaz con haz de un sólo pulso, y la ecosonda multihaz, con una banda de pulsos en ángulo variable. En el Perú, ecosondas multihaz están instaladas a bordo de los buques de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN). La ecosonda multihaz EM302 Kongsberg instalada a bordo del Buque de Investigación Científica (BIC) Zimic de la DHN realizó el levantamiento batimétrico de la plataforma continental y talud superior entre Punta Sal a Punta Pariñas (Carta Náutica N°112). Opera a una frecuencia de 30 kHz y emite pulsos sonoros en forma de abanico por disparo (constituido por 432 haces). La distancia angular entre los haces del abanico es de 1°, donde el abanico suele tener una apertura máxima de 150°, permitiendo cartografiar el fondo marino hasta profundidades de columna de agua de 7000 m, con una cobertura horizontal de hasta 5 veces la profundidad. Para visualizar en tiempo real y grabar los datos adquiridos durante el crucero, el sistema multihaz EM302 cuenta con una unidad de control y procesamiento implementada a través del software SIS de Kongsberg.

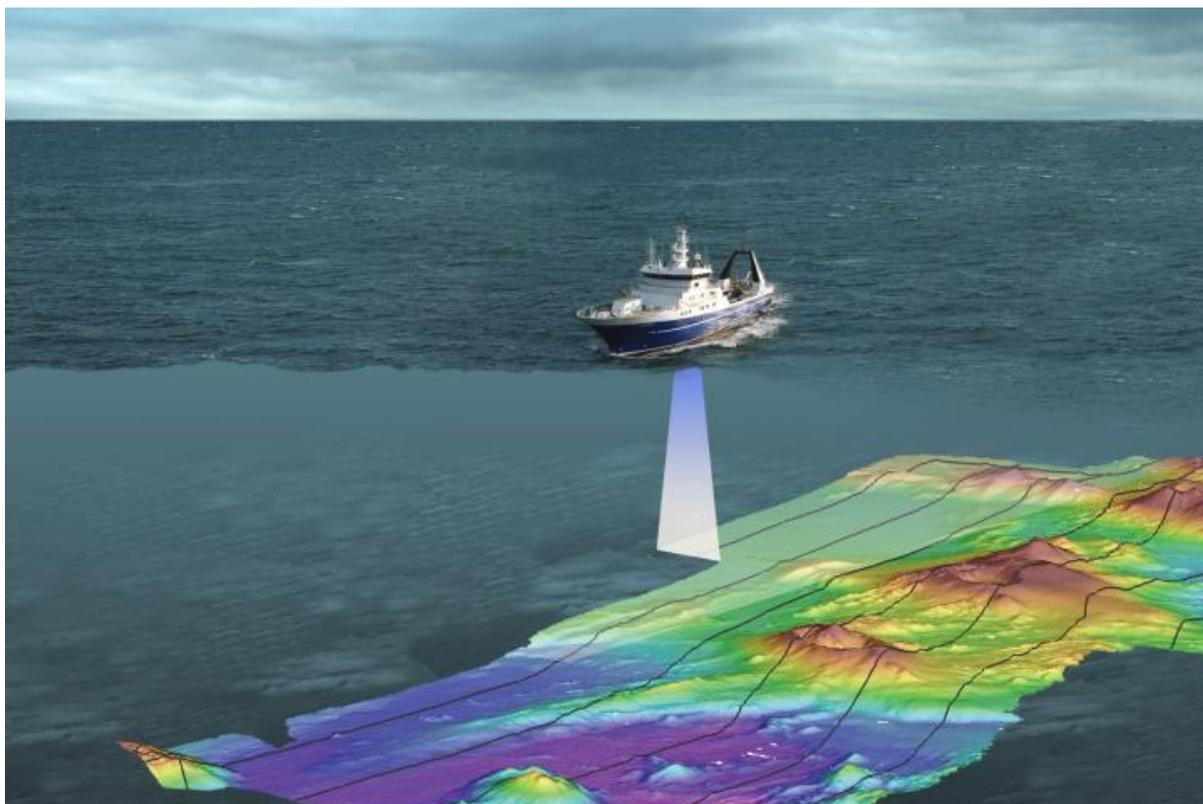


Figura 3.14. El ecosonda es montado en el casco de la embarcación, desde aquí envía pulsos de ondas de sonido hacia el relieve de fondo, recibiendo las reflexiones como ecos a través de un transductor. Esta información se visualiza como imágenes tridimensionales del fondo. (<http://www.vistaalmar.es/ciencia-tecnologia/ingenieria-innovacion/2359-nueva-vista-fosa-mas-profunda-oceano.html>).



Fotografía 3.10. El Buque de la Armada Peruana, BAP Zimic, equipado con ecosonda multihaz EM302 Kongsberg. (https://www.dhn.mil.pe/index.php?secc=unid_hidrograficas&und=carrasco)

3.3.2 GEOFÍSICA

La geofísica marina plantea el conocimiento de la composición y estructura del fondo marino y en general de la corteza oceánica, a través de los campos de la sísmica, gravimetría y geomagnetismo.

3.3.2.1 Sísmica

La exploración sísmica obtiene información geológica de los materiales que conforman el subsuelo, desde los primeros metros del terreno hasta varios kilómetros de profundidad, obteniendo una imagen de la estructura interna. Se tienen dos métodos la sísmica de refracción y la sísmica de reflexión.

Sísmica de reflexión monocanal

Estudia la propagación de ondas elásticas a través de la Tierra, se genera un frente de ondas elásticas artificiales, mediante explosiones, impactos mecánicos o vibraciones y se controla el tiempo de su retorno después de reflejarse en su camino con distintas interfaces, se registra en sismómetros. El análisis de la información, muestra que los cambios en la reflectividad reflejan variaciones del relieve de fondo, textura, propiedades mecánicas y estructurales de las rocas en profundidad, lo que puede corresponder a fallas, zonas con gas, superficies de erosión, etc., reconociendo su estratigrafía y geología estructural. Se tiene una amplia gama de emisores acorde a la penetración y resolución que se desee conseguir, entre ellos: *boomers*, *sparkers* y cañones de aire (Bartolomé, Rafael (2002).

Perfilador de subsuelo Sistema de sísmica de reflexión monocanal que permite adquirir datos de la geometría de subsuelo superficial con una alta resolución (e.g., resolución vertical teórica de 10 cm en los primeros metros por debajo del fondo marino) y con un moderado nivel de penetración que depende directamente del tipo de material existente (e.g., penetración de 5 m en sedimentos gruesos como arenas calcáreas y 50 m en sedimentos finos como arcillas) (Figura 3.15).

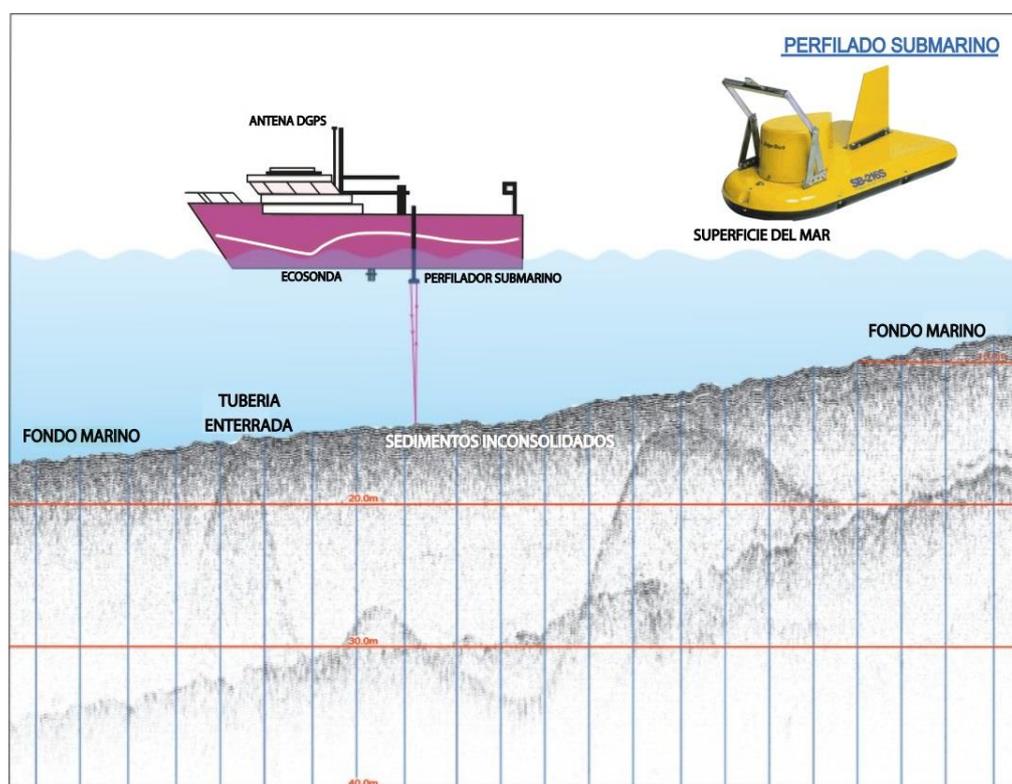


Figura 3.15. Investigación geológica con perfilador de fondo (Sub Bottom Profiler). (adaptado de https://www.google.com.pe/search?q=sub+bottom+profiling+survey&espv=2&biw=1244&bih=519&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjVrdWbiq7RAhUKSSYKHcZ-DgUQ_AUIBigB#imgrc=bcvL-tEAdOcC1M%3A y http://www.gserentals.co.uk/rental_type.aspx?type=16)

Sísmica de Refracción

La sísmica de refracción fue hasta la década de los 60 bastante aplicada para la exploración de cuencas sedimentarias, investiga zonas más profundas, que, con la sísmica de reflexión, ya que el método hace perfiles de refracción, determinando profundidad e inclinación. Se generan ondas sísmicas en superficie y se registra las que producen refracción total. Se utilizan boyas desechables o Sonoboyas que flotan libremente y transmiten por radio la información que reciben. Después de que se han lanzado al mar las sonoboyas, el barco realiza disparos a lo largo de la línea del perfil con cargas explosivas o cañones de aire comprimido. Las señales sísmicas que regresan a superficie son registradas por uno o dos hidrófonos suspendidos bajo cada sonoboya, amplificados y transmitidos al barco donde se graban en el instante del disparo (Fotografía 3.11).



Fotografía 3.11. Prospección sísmica con aire comprimido; hidrófonos colocados en 8 cables de 8 km de longitud cada uno. (www.El mundo es/baleares 72013/12/16).

Magnetómetro y Gravímetro: El magnetómetro marino, es un sistema para medir campos magnéticos, incluye un ordenador de control y visualización, una fuente de alimentación, un CPU y un sensor los dos últimos, remolcados a una distancia de más del doble de la eslora del barco para evitar interferencias. El gravímetro es un sistema de adquisición de datos de gravimetría. El sistema tiene un sensor montado en una plataforma giro-estabilizada. Los datos en bruto se procesan, filtran y escalan en un ordenador.



Fotografía 3.14. Magnetómetro.

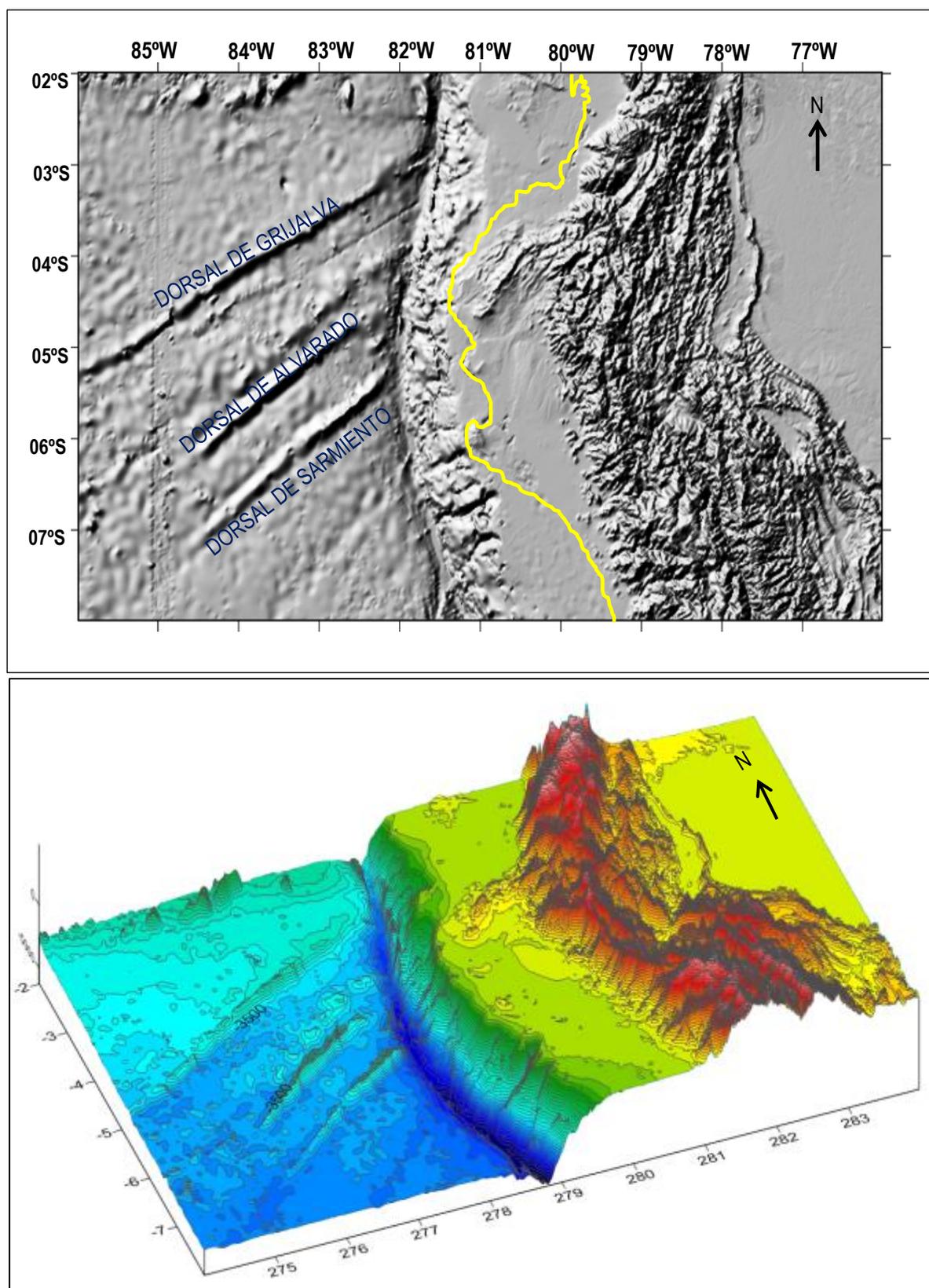


Figura 3.16. Entre los años 1986 a 2005, los proyectos *Nazca Plate*, *Ocean Drilling Programme* y *Geomar*, mediante ecosondas, sísmica de reflexión multi y mono canal, gravedad y mediciones magnéticas, obtuvieron el primer cuadro de perfiles batimétricos del sector nororiental de la margen continental peruana (Base de Datos Batimétricos de *The general bathymetric chart of oceans GEBCO*).

CAPÍTULO IV

CUENCA DEL PACÍFICO Y MARGEN CONTINENTAL PERUANA

4.1 GENERALIDADES

La cuenca del Pacífico constituye la mayor cuenca oceánica de la Tierra, su origen y evolución a través del tiempo están controlados por la tectónica de placas. La evolución de la cuenca Pacífica está asociada a la ruptura del supercontinente Pangea hace 220-200 Ma y la formación de los continentes Gondwana en el hemisferio sur y Laurasia en el hemisferio norte, hacia los 120 Ma en el Cretáceo superior estos continentes se fragmentaron dando lugar a la formación de los continentes y océanos que hoy conocemos, además de la actual distribución y movimiento de las placas tectónicas (Figura 4.1). Las reconstrucciones paleomagnéticas del piso marino en la cuenca Pacífico muestran que los sectores más antiguos del piso marino tienen una edad aproximada de 180 Ma (Müller et al., 2008). (Figura 4.2).

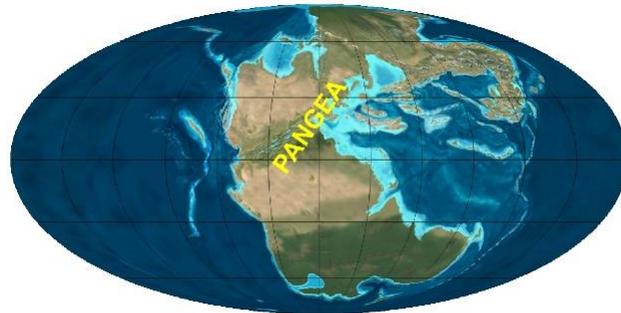
4.1.1 CUENCA PACÍFICO

La Cuenca Pacífico está constituida por un conjunto de placas tectónicas como: la del Pacífico, Nazca, Antártica, Cocos, Juan de Fuca y Australiana. Estas placas están limitadas entre sí por dorsales oceánicas, o cadenas montañosas submarinas donde ocurre una actividad tectónica mayor relacionada a sismos, volcanismo y orogénesis.

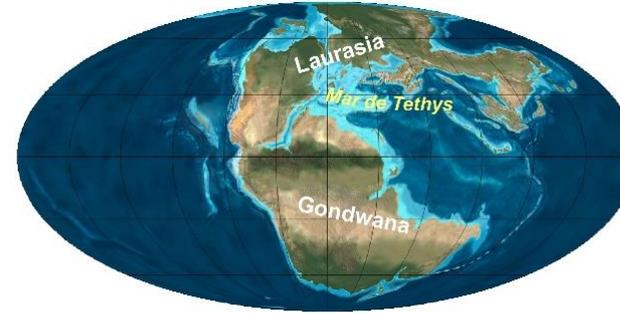
El territorio peruano, como gran parte de Sudamérica, está influenciado por la dinámica de las placas tectónicas que conforman la Cuenca Pacífica, principalmente por la placa de Nazca. La placa de Nazca se encuentra en el océano Pacífico Oriental, frente a las costas de Ecuador, Perú y Chile; está limitada al este por la fosa Perú-Chile, al norte con la placa de Cocos, límite definido por el *rift* de Galápagos y la dorsal de Carnegie, al oeste con la dorsal del Pacífico Oriental y al sur con la placa Antártica, límite definido por la dorsal de Chile.

La placa de Nazca está constituida por 3 cuencas sedimentarias principales: la cuenca Bauer, cuenca Chile y la cuenca Perú, limitadas entre sí por dorsales asísmicas (Figura 4.3.). La cuenca Bauer y Perú limitan hacia el norte con la dorsal de Carnegie y se encuentran separadas por la dorsal de Galápagos; la cuenca Perú y la cuenca Chile se encuentran separadas por la dorsal de Nazca y dorsal Sala y Gómez. La placa de Nazca es una zona orogénica activa, ocurren numerosas fracturas, fallas transformantes y de apertura oceánica que constituyen la zona de fractura de Grijalva, Alvarado, Sarmiento, Virú y Mendaña, esta última localizada entre los 10°S y 12°S de Latitud, con un ancho de 150 km marca una antigua zona de divergencia de placas (Kulm et al., 1983) (Figura 4.3).

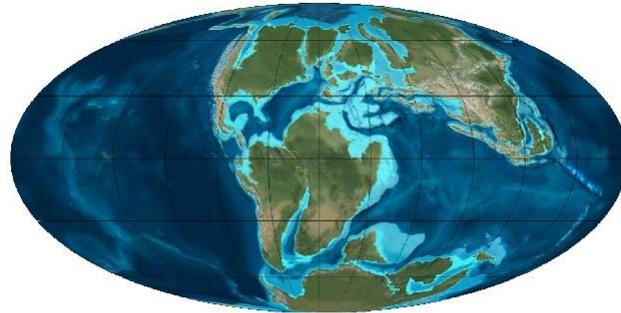
Perfiles marinos geofísicos (batimétricos, magnéticos y sísmica de reflexión) y sonares *multibeam* localizaron en los *rifts* márgenes y corteza, rupturas litosféricas, que muestran que la placa de Cocos y Nazca fueron una sola placa llamada Farallón. Durante el Mioceno, el estrechamiento y fracturamiento en una faja de varios kilómetros de ancho, con volcanismo fisural construyeron las dorsales volcánicas (Alvarado, Sarmiento), de 1 a 2 km de alto y paralelas al movimiento de una placa. Lo que es parecido al actual sistema de dorsales fisurales descritas para el flanco occidental del Pacífico y Dorsal de Nazca. (Lonsdale, 2005). Los montes submarinos de Nazca y Sala y Gómez son los más relevantes del océano Pacífico suroriental por su extensión y altura. Juntos tienen una extensión de 2,900 km., con 100 km de ancho en el caso de Sala y Gómez (Naar et al., 2001; Haase et al., 1997) y 300 km en el caso de Nazca (Woods & Okal, 1994). Su altura varía entre 1,000 m y 3,420 m. Son de origen volcánico, formados por el hotspot de Pascua (Naar et al., 2002) hace más de 30 millones de años, y se encuentran alineadas debido al desplazamiento de la placa de Nazca (Gálvez-Larach, 2009).



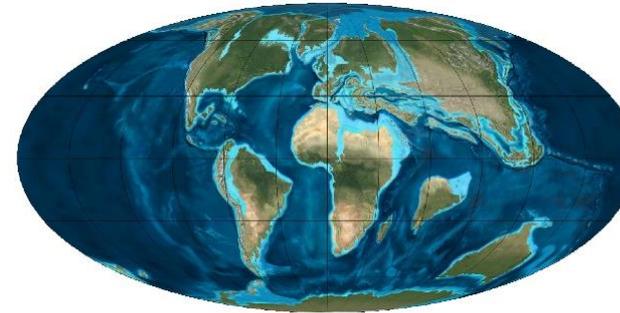
220 Ma Triásico superior



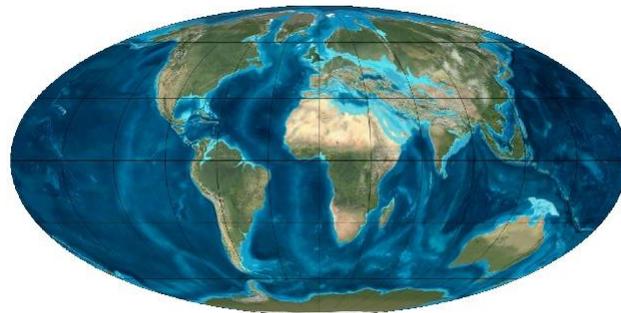
200 Ma Jurásico inferior



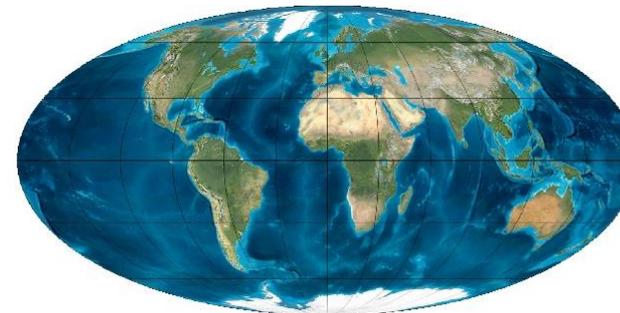
120 Ma Cretácico inferior



65 Ma Cretácico superior



35 Ma Oligoceno



Presente

Figura 4.1. Evolución de los continentes y océanos (Blakey, 2014).

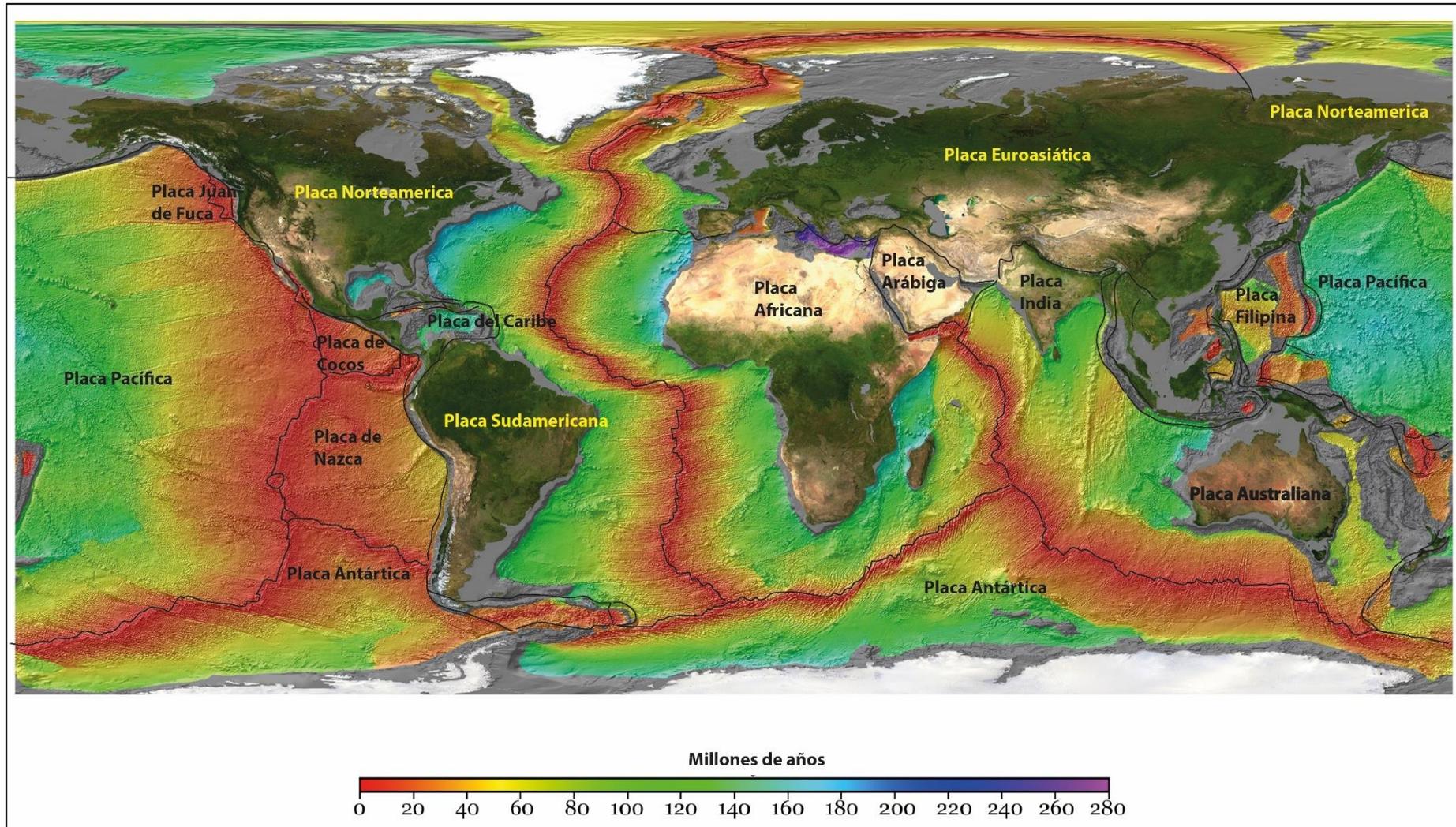


Figura 4.2. Edades del piso oceánico y distribución de las placas tectónicas (Müller et al., 2008).

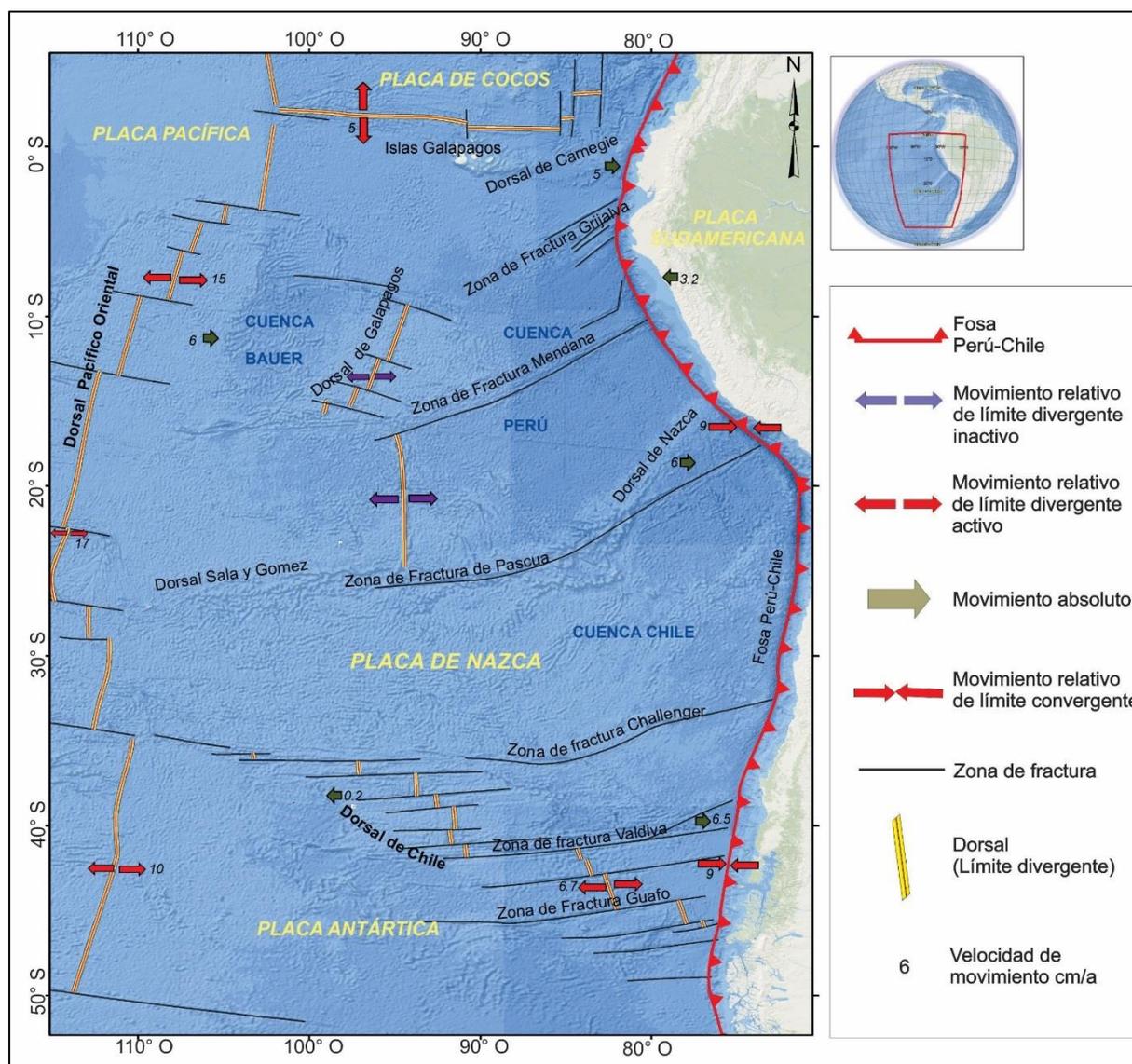


Figura 4.3. Mapa estructural de la Placa de Nazca (Modificado de *American Association of Petroleum Geologists*, 1982 y Kulm, et al., 1983)

4.1.2. MARGEN CONTINENTAL PERUANA

La margen continental de Perú se extiende a lo largo del segmento occidental del continente sudamericano. Limitada hacia el oeste por la Placa de Nazca, y al este por la Costa, los Amotapes, la Cordillera de la Costa y la Cordillera Occidental de los Andes. Corresponde a una margen convergente, formada por la interacción de los esfuerzos de las placas de Nazca y Sudamericana. La Placa de Nazca subduce a la Placa de Sudamérica en dirección N 72°E, con una tasa actual de convergencia de 8 mm/año.

Desde el Jurásico, la margen pacífica de América, se vio afectada por varias etapas tectónicas. Se estableció sobre el margen occidental y septentrional de América del Norte una zona de subducción, la cual fue acompañada de un magmatismo de arco (Megard, 1978; Pardo & Sanz, 1979; Aspden et al., 1987; Jaillard et al., 1990; Roperch & Carlier, 1992; Litherland et al., 1994; Romeuf et al., 1995). Al este de este arco volcánico se formó una cuenca extensiva de trasarco mientras que al oeste se acumularon los depósitos de antearco constituidos por secuencias sedimentarias volcánico-clásticas (Figura 4.4). En el antearco destaca la fosa peruano – chilena, el arco volcánico se encuentra en el frente orogénico andino y el trasarco está formado por la faja subandina.

Durante las diversas fases de la orogenia andina, se desarrolló paralelamente una depresión tectónica, conocida como Depresión Parandina (Fisher, 1956), ubicada entre el flanco occidental de la Cordillera de los Andes y el borde externo de la plataforma continental externa, zona donde esta quiebra hacia el talud y emergen altos estructurales (Alto de la Plataforma externa, Alto del talud superior), constituidos por rocas del basamento.

Los procesos de hundimiento, continuos, que tuvieron lugar a lo largo de la Depresión Parandina durante el Cretáceo superior al Cenozoico, generaron depocentros de sedimentación que conformaron las principales cuencas de antearco; cuencas internas ubicadas en la plataforma continental. Morfoestructuras en onshore y offshore como los altos estructurales de la plataforma externa (OSH) y Talud Superior (USR) (Kulm, et al., 1988), controlan la distribución de estas cuencas sedimentarias (Thornburg & Kulm 1981); Cuencas Talara, Sechura, Salaverry, Pisco oeste y Moquegua ubicadas en la plataforma continental, y las cuencas Trujillo, Lima y Mollendo ubicadas en el talud superior (Figura 4.5).

El estilo estructural de la margen está dominado por estructuras extensionales, que constituyen una serie de fallas normales que se extienden paralelos a la línea de costa, este régimen extensional fue interrumpido durante el Mioceno medio por la colisión de la dorsal de Nazca con la fosa Perú-Chile lo que provocó la inversión tectónica de algunas fallas normales (Romero et al., 2013) (Figura 4.6).

El sector norte de la margen continental, comprende las cuencas Progreso y Talara, donde las estructuras predominantes son fallas normales en dirección N-S y NO-SE, fallas inversas de dirección NE-SO que se prolongan en continente (Figura 4.6). El sector Centro de la margen continental, comprende las cuencas Trujillo, Lima, Salaverry y Pisco, donde predominan las fallas normales con dirección NO-SE y fallas inversas con dirección NO-SE en la cuenca Salaverry. La mayor deformación de la margen se encuentra entre los 14° y 17° donde la colisión de los 200 km de ancho, 1,000 km de largo y elevaciones de hasta 1.5 km sobre el piso marino, de la Dorsal de Nazca y el segmento peruano convergente producen una deformación ocasionando el acortamiento de la plataforma (Hampel, 2002).

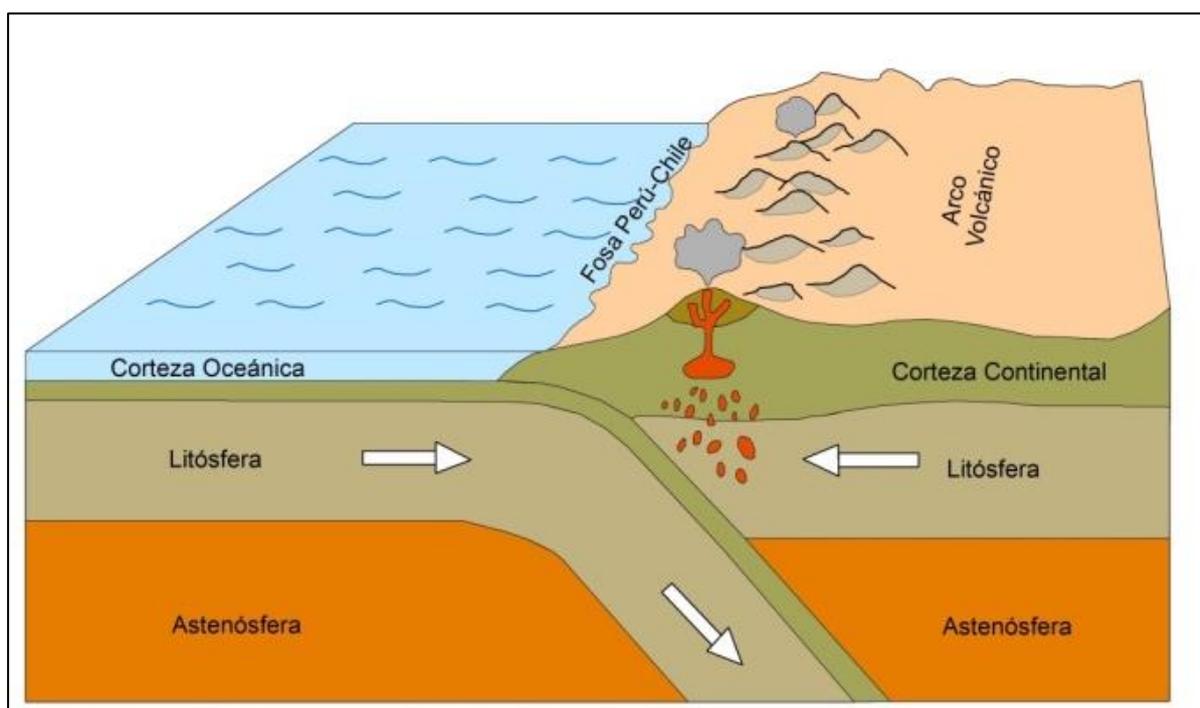
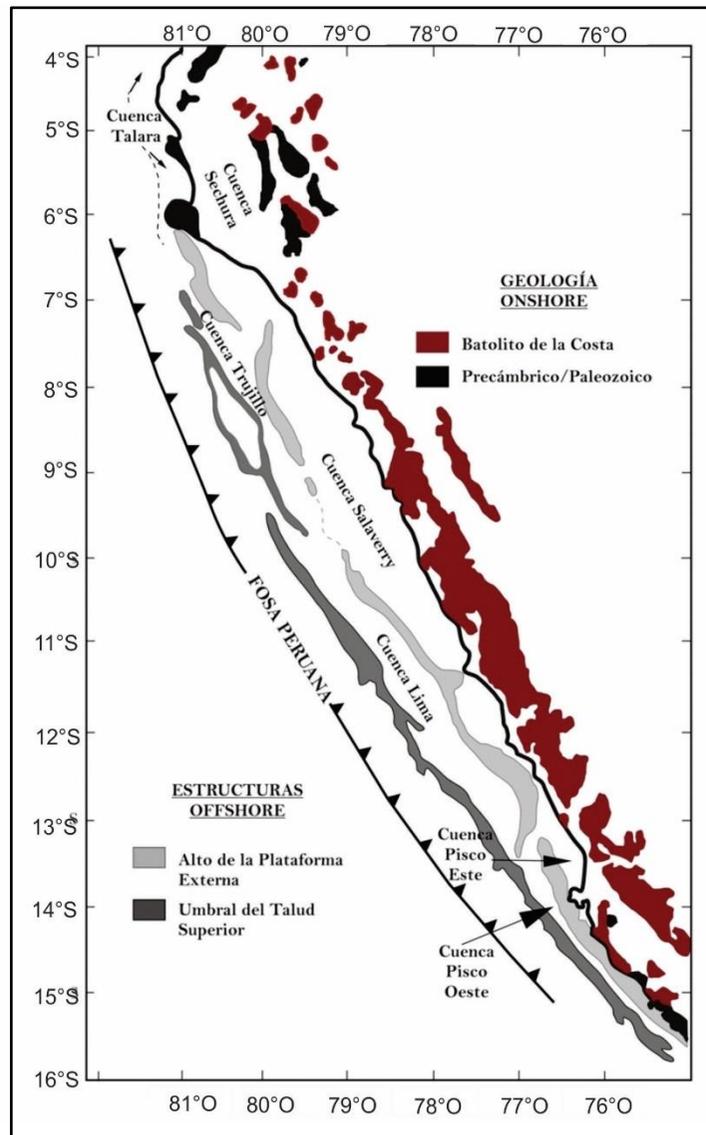
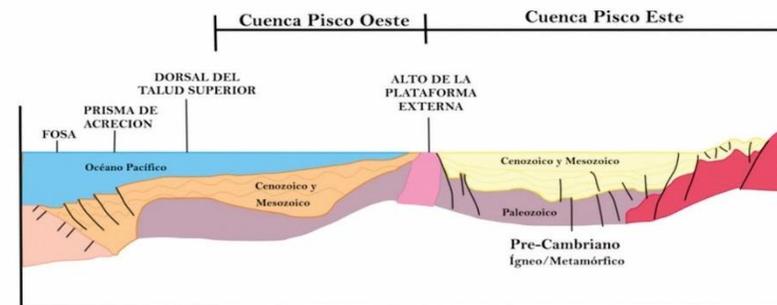


Figura 4.4. Zona de subducción y su relación con el sistema de arco volcánico.



Sección esquemática del margen tipo Pacífico mostrando las cuencas de antearco con respecto a los volcanes y plutones (modificado de Dickinson y Seely (1979)).



Configuración estructural de la cuenca Pisco (Informe Perupetro, (2003))

Figura 4.5. Principales cuencas de antearco en la margen continental peruana sector norte y centro, mostrando estructuras en *onshore* y *offshore* que controlan la distribución en las cuencas sedimentarias (Modificado de Kulm, et al., (1988)).

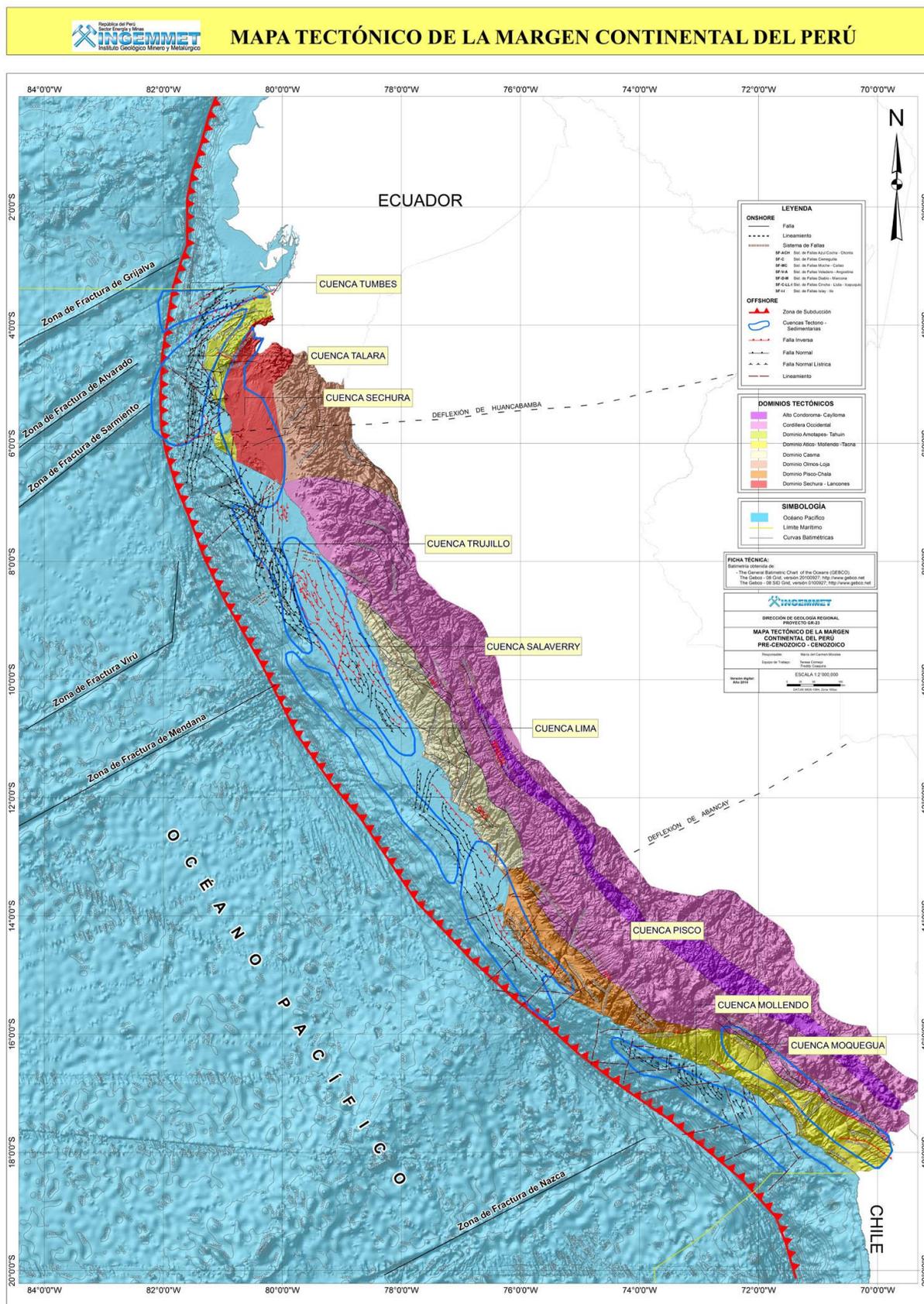


Figura 4.6. Mapa tectónico de la margen continental del Perú: El estilo estructural de la margen está dominado por estructuras extensionales, que constituyen una serie de fallas normales que se extienden paralelos a la línea de costa (Mapa elaborado en base a bibliografía de PerúPetro y Boletines de la Carta Geológica del INGEMMET, fuente principal: Informe PERUPETRO S.A. (2003); Carlotto et al (2009)).

CAPÍTULO V

MORFOLOGÍA DE LA MARGEN CONTINENTAL PERUANA

5.1. GENERALIDADES

La subducción de la placa oceánica debajo de la placa continental en aguas profundas juega un importante papel como producto del control tectónico global y de los procesos geológicos. Como consecuencia, el suelo oceánico presenta un paisaje accidentado, donde dominan dorsales mesoceánicas kilométricas y profundamente sumergidas, zonas de fracturas, cadenas montañosas submarinas y volcanes submarinos (Figura 5.1). La tensión en el descenso de la placa, genera terremotos y deslizamientos en el paisaje submarino.

Morfoestructuralmente se puede distinguir las grandes cuencas oceánicas y las márgenes continentales, en el Pacífico, frente a Perú, la margen continental comprende una zona de suave pendiente y ancho variable denominada plataforma continental, seguido por un rápido quiebre con inclinación más pronunciada, conocida como talud continental. Al pie entre el talud y la placa oceánica se tiene la fosa Perú-Chile.

En esta margen los rasgos más saltantes son cañones, canales, valles submarinos y zonas de deslizamientos. En el sector norte los sistemas fluviales de la vertiente del Pacífico han tallado profundos cañones submarinos durante una época en que el nivel del mar era más bajo, hoy sus cabeceras submarinas se ubican cerca de la boca de grandes ríos.

5.2. BATIMETRÍA-GEOMORFOLOGÍA

Los estudios de geomorfología submarina, orientados al análisis de la génesis y procesos modeladores de las formas de fondo, implican el uso intensivo de datos e información de carácter batimétrico, geológico y geofísico, colectados a través de instrumentos y métodos indirectos; perfiles sísmicos, ecogramas, perfiles batimétricos del fondo marino, análisis de los sedimentos colectados e información geológica y geofísica.

El relieve de fondo marino se representa a través de curvas isobatas en un mapa batimétrico. Al agregarse capas de información estratigráfica, sedimentológica y estructural, es aplicable a la ubicación de estructuras petrolíferas, análisis de potencial minero, dinámica de fondo, erupciones volcánicas, movimientos tectónicos, seguridad de la navegación marítima, obras hidrotécnicas, trazado de cables y tuberías subacuáticas y delimitación marítima, entre otras.

Desde la década del 70, proyectos internacionales y nacionales, han generado una importante cantidad de información geofísica, geológica y oceanográfica de la zona septentrional y central de la margen continental peruana, los mismos que han permitido tener un mejor conocimiento de la batimetría entre los 03° 23' y 14° de Latitud Sur. La base de datos batimétricos de la *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) con enfoque global, nos brinda datos de profundidad desde la línea de costa hasta la fosa, con una resolución espacial de 30 Arc-seg en su versión: *The GEBCO-08 SID Grid*, versión 20100927. Otras fuentes internacionales son la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Oregon State University* (OSU), *Institut Francais de Recherche pour L'exploitation de la Mer* (IFREMER) y *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* (BGR). En cuanto al aporte nacional, las investigaciones de la industria petrolera y pesquera orientada a la búsqueda de recursos renovables y no renovables también han generado información batimétrica; los cruceros del Instituto del Mar del Perú entre los años 2,000 y 2,013 obtuvieron aproximadamente 50 a 60 millones de datos batimétricos del margen continental peruano. Por otro lado, la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN), cuyo fin es brindar información orientada a los navegantes, capitánías, guardacostas marítimas de puerto y agencias marítimas, entre otras, prepara cartas náuticas a escalas regionales y locales (1:3'000,000, 1:100,000, 1:15,000) con datos de sondajes en los sistemas Datum Provisional La Canoa PSAD-56 y Datum Sistema Geodésico Mundial WGS-84.

El 20 de mayo del 2016 el INGEMMET y la DHN, dieron inicio al primer Crucero de Investigación de geología marina INGEMAR-I, orientado al levantamiento batimétrico - geológico del sector septentrional de la margen continental peruana; Carta Náutica N°112 Punta Sal a Punta Pariñas a escala 1: 100,000, como parte del plan de cartografiado geológico de la margen continental peruana. Durante el levantamiento de la Carta Náutica N° 112, se recorrieron 4,640 km² de plataforma y talud obteniendo más de 6'000,000 datos batimétricos que permiten visualizar el relieve de la plataforma y talud continental desde los 50 hasta los 4,000 mbnm, y con una resolución de hasta 10 m. marcando un hito en la historia del INGEMMET y en el desarrollo sostenible del Perú. El crucero se realizó con el BAP Zimic de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, con una tripulación total de 43 personas.

5.3. ASPECTOS MORFOLÓGICOS DEL FONDO MARINO

5.3.1. MARGEN CONTINENTAL PERUANA

La margen continental peruana corresponde al tipo de margen pacífica, es decir una margen activa y convergente, la cual constituye el antearco del sistema de subducción andino del Perú. Su evolución está controlada por procesos tectónicos tales como; consumo de la margen, erosión tectónica, crecimiento de la margen, acreción, subsidencia, levantamiento y formación de cuencas sedimentarias. Gran parte de la historia de su evolución ha sido influenciada por la subducción oblicua de la dorsal de Nazca, la cual con su cresta hizo un barrido a lo largo de la margen continental peruana, en dirección de norte a sur, primero levantándola y luego ocasionándole una fuerte subsidencia (Pecher et al., 2001; Hampel, 2002; Hampel et al., 2004).

La margen continental peruana está constituida por las unidades morfoestructurales: Plataforma Continental y Talud Continental (Figura 5.2).

5.3.3.1 Plataforma continental

Unidad morfológica comprendida por la prolongación de la placa continental, bajo el nivel del mar, a modo de una faja de tierra sumergida que se extiende desde la línea de costa hasta donde ocurre un cambio brusco de la pendiente, aproximadamente entre las isobatas 200 a 400 m. (Samamé, 1985; Masias, 1976). Su superficie tiende a ser horizontal y de ancho variable, en relación directa con la geodinámica de la margen, según lo cual se reconocen tres zonas Norte, Centro y Sur (Schweigger, 1964).

La zona norte; frente a la costa norte desde Tumbes hasta Punta Aguja (Piura), la plataforma es relativamente angosta, paralela a la línea de costa, con una distancia de 3 a 6 mn, hasta 35 mn frente a Puerto Pizarro y Máncora, llegando casi a desaparecer a la altura de Punta Balcones, Paita y la Península de Illescas (Figura 5.2). El primitivo zócalo continental se elevó y forma en la actualidad los tablazos piuranos. Este sector meridional tiene una tendencia a la emersión, desarrollo ligado a los fenómenos tectónicos del Golfo de Guayaquil (Macharé et al., 1986).

La zona central, frente al sector comprendido entre Punta Aguja e Isla San Gallán es más amplia, alcanzando 128 km frente a Chimbote (Ancash), 100 km frente a Salaverry (La Libertad) y 40 km frente a Lima (Figura 5.2). Con una tendencia al hundimiento, esto se explica por la presencia de material más denso en su estructura cortical.

La zona sur, es generalmente angosta, estrecha en Ica y ligeramente ensanchada frente a Arequipa, Moquegua y Tacna alcanzando en la Península de Paracas 5 mn (Teves & Evangelista, 1976). Entre Ático y Morro de Sama (Tacna) tiene un ancho de 20 a 30 km, alcanzando su mayor amplitud en la desembocadura de los ríos Majes y Tambo (Figura 5.2)

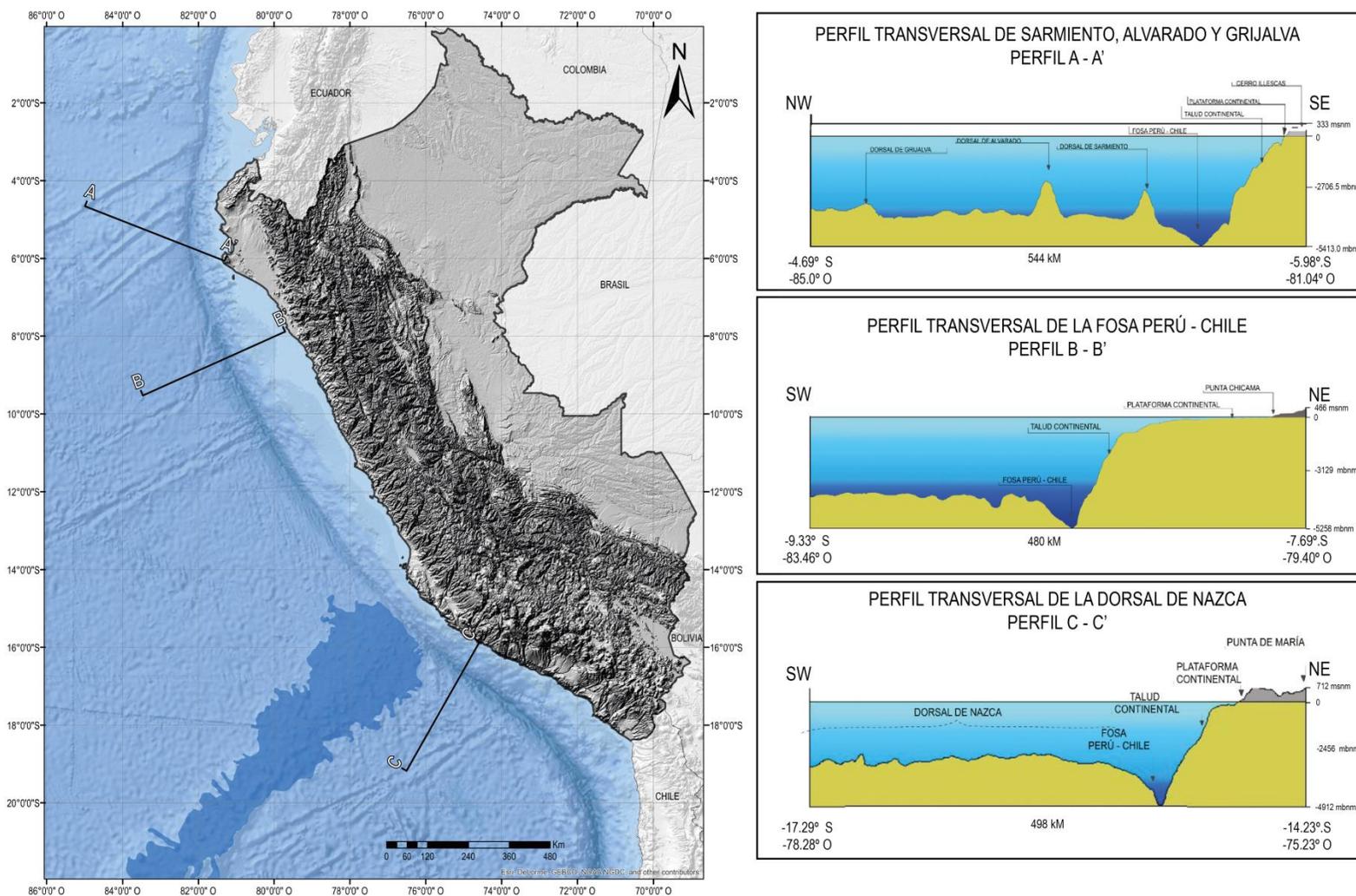


Figura 5.1. Relieve del piso oceánico y de la margen continental peruana (interpretación, proyecto geología marina INGEMMET sobre base batimétrica de *The Gebco-08 SID Grid*, versión 20100927).

5.3.3.2 Talud Continental

Comprende desde el borde externo de la Plataforma continental. Por sus características fisiográficas se diferencian 4 provincias fisiográficas: la provincia fisiográfica A ubicada entre los 6°S y los 9.5°S, cruzada por 07 cañones submarinos prominentes los cuales tienen sus cabeceras cerca del borde de la plataforma continental. La provincia B, comprende desde los 9.5°S hasta los 13°S, de relieve más suave. La Provincia C, entre los 14°S a los 16°S, asociada a la dorsal de Nazca. La provincia D, desde los 16°S a los 18°S, con cañones de menor dimensión.

5.3.2 FOSA OCEÁNICA

La Fosa Perú-Chile es una depresión que se extiende sobre el fondo marino frente a las costas de Perú y Chile, con una profundidad que apenas sobrepasa los 4,000 m. frente al norte del Golfo de Guayaquil, alcanza su mayor profundidad de 7415 m entre Tacna y Arica.

En su sección transversal en dirección oeste-este, la fosa marina presenta una ladera oceánica, una pequeña planicie de profundidad máxima por cuyo centro pasa el eje de la fosa y un talud o ladera continental generalmente más empinada que la primera. Longitudinalmente, de norte a sur es comúnmente uniforme en toda su extensión (Hayes, 1966; Barazangi & Isacks, 1976; Hussong et al., 1976; Coulbourn & Moberly, 1977).

Esta rellena de sedimentos suministrados por la red hidrográfica y clima que controlan estas latitudes (Machare et al., 1986). Hacia el norte la fosa está parcialmente rellena con sedimentos detríticos pelágicos y hemipelágicos superficiales que se deslizan por el talud, como flujos turbidíticos, *slumps*, y aporte continental. El eje de la fosa peruana-chilena, tiene profundidades de 5,780 m. en el norte, y máximas de 7,415 m. en el Sur. El punto más somero con 4,800 m. se encuentra, a los 15° 15'S y 76°W, frente a San Juan (Ica), donde actualmente se encuentra la Dorsal de Nazca, (Couch & Whitsett, 1981). Su piso es suave, plano y varía de 2 a 17 km.

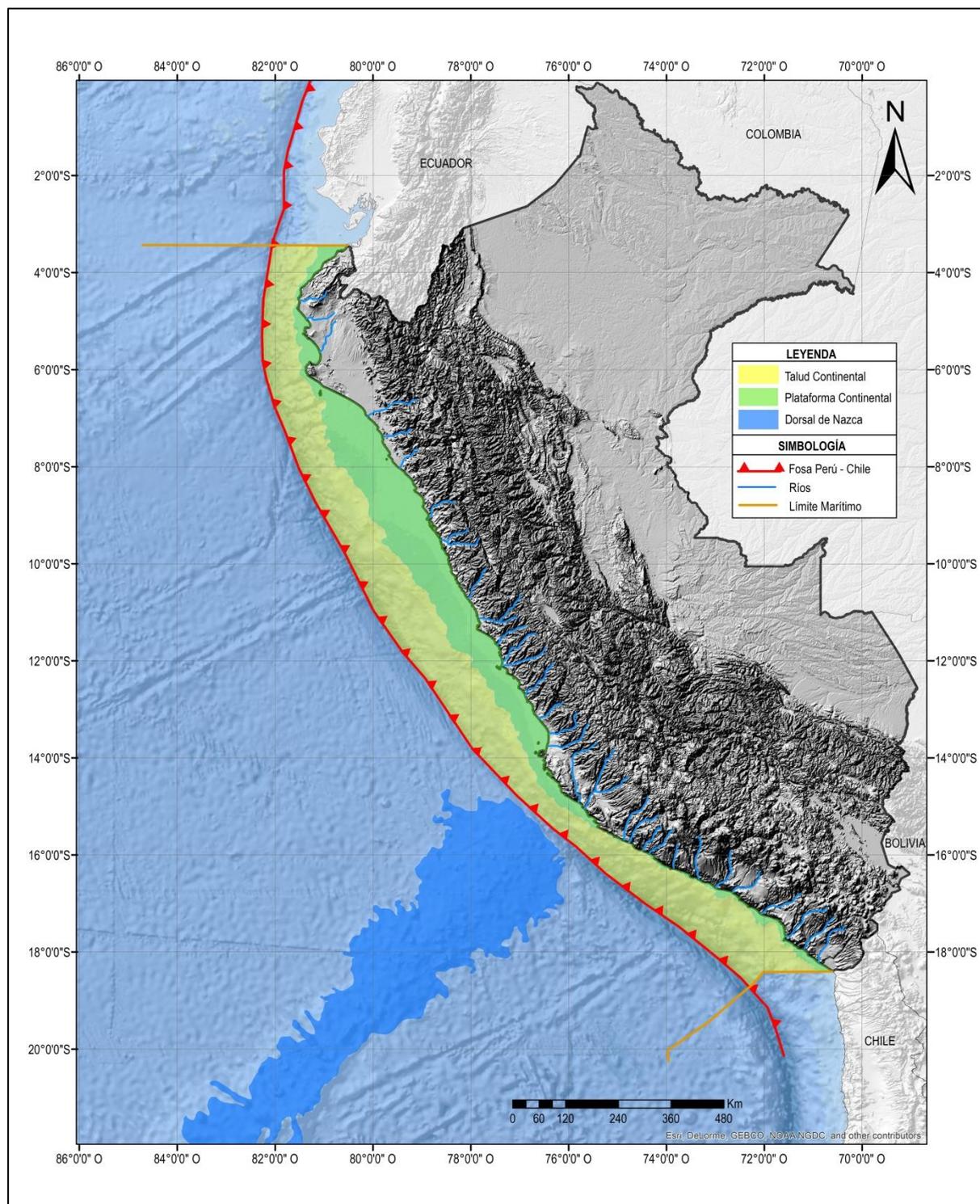


Figura 5.2. Mapa geomorfológico de la Margen Continental Peruana y Llanura Oceánica: se distinguen la Plataforma continental, Talud continental, Fosa Peruano-Chilena y la Dorsal de Nazca. Perfiles transversales mostrando la amplitud de la plataforma y pendiente del talud, de la margen en sus sectores norte, centro y sur (Proyecto Geología Marina INGEMMET).

5.3.3 CANALES, VALLES Y CAÑONES SUBMARINOS

5.3.3.1 Canales y valles submarinos

Se presentan en la margen continental en los tramos comprendidos entre 04° a 06°, 09° a 12° y 14° a 17°30' sobre todo en el borde del talud superior, como prolongaciones de los principales ríos o quebradas costeras en dirección perpendicular a la línea de costa, reflejando el patrón estructural que controla el lineamiento fluvial en la costa peruana, con profundidades promedios entre los 5 a 30 mbnm. y ancho máximo de 500 m. los canales menos profundos están cubiertos por sedimentos más jóvenes (Kudrass et al., 2000) (Figura 5.3.). Canales y valles se observan en la plataforma y talud frente al río Chancay, Mala, Cañete con orientación SO, frente al río Rímac y Chillón con orientación NO cortando el abanico submarino que forman ambos ríos (Girón, 2009).

Los canales y valles submarinos influyen en la distribución de los sedimentos, de la misma manera que ocurre en el continente, aunque con diferente cinemática (Girón, 2009) (Figura 5.3).

5.3.3.2 Cañones submarinos

Cortan el talud y plataforma, son normalmente sinuosos y angostos. Un cañón típico se presenta en forma de V con paredes abruptas, cuyas cabeceras generalmente ocurren a los 100 m. de profundidad o en el borde de la plataforma, y continúan hasta la fosa, otros solo se extienden hasta el talud medio.

A lo largo de la margen continental peruana son 17 los cañones submarinos que han sido identificados a partir de información batimétrica regional de la *General Bathymetric Chart of Oceans* (GEBCO). Se observan en la Zona norte entre los 04° y 07° S y en el sur a los 16° S, entre los 10° a 16°S no hay evidencia de cañones submarinos. Los cañones submarinos ejercen gran influencia en los procesos sedimentarios del fondo marino, y al igual que los canales y valles, representan importantes conductos para el transporte de sedimentos terrígenos desde la costa hacia las grandes profundidades. Sus orígenes en el sector norte se relacionan a las variaciones del nivel del mar como consecuencia de movimientos verticales más antiguos que el cuaternario (Duperret et al., 1995) (Figura 5.4).

Cañones sector norte

En el sector norte de la margen continental peruana entre los 05° y 06° 30' S se describen 7 cañones submarinos; Paita (Tevés & Evangelista, 1976), Sechura (Duperret et al., 1995), Bayóvar (Sosson et al., 1994), Península de Illescas (Sosson et al., 1994), Lobos de Tierra (Bourgois, 1988; Bourgois, 2007; Duperret et al., 1995), Chiclayo (Sosson et al., 1994) y Lobos de Afuera (Bourgois, 1988; Bourgois, 2007; Duperret et al., 1995). Los cuales corren con la pendiente, rectos y transversales, extendiéndose hacia el zócalo a una profundidad promedio entre los 100 a 150 m. de profundidad, sus secciones transversales en forma de "V" indican su origen erosional (Bourgois et al., 1990).

El cañón de Sechura se ubica entre los 5°15'S y 5°40' de latitud sur, es un complejo de 3 cañones que cruzan desde el talud superior hasta el talud inferior en dirección Este-Oeste, para luego girar en su parte inferior en dirección Norte-Noroeste (Duperret et al., 1995) (Figura 5.5). El cañón de Bayoyar, cruza completamente la plataforma alcanzando la fosa peruana (Sosson et al., 1994). El cañón Península de Illescas, ubicado entre los 06°S y 06°30'S va desde los 1,500 a 3,000 m de profundidad, es estrecho y consta de 4 canales tributarios, dos discurren en dirección SE, sus cabeceras están ubicadas a 500 m. y son pequeños, los otros interceptan el cañón a los 2,500 m (Sosson et al., 1994) (Figura 4.5). El cañón frente a Chiclayo, se ubica entre los 06°10'S y 07°18'S, su cabecera se encuentra cerca al quiebre de la plataforma y alcanza la fosa a una profundidad mayor a 5,000 m y una longitud de 80 km., es el más grande y profundo de la margen. A los 1,000 m se estrecha en la parte oriental y se ensancha hacia la parte occidental. Sus paredes escarpadas alcanzan entre los 1,000 y 2,000 m. tiene tres tributarios, en general su morfología es de quebradas meandriiformes (Sosson et al., 1994) (Figura 5.5).

Cañones sector sur

Al sur de los 16°00'S, la región es compleja muestra patrones de depresión y drenaje submarino (Li et al., 1995; Hagen et al., 1994), se tiene el cañón frente a Chala (frente al río Ocoña) (Tevés & Evangelista, 1976) y cañón frente al río Quilca, ubicado a los 17° S (Figura 5.7).

Entre los 8°00' y la dorsal de Nazca, donde la zona de fractura de Mendana entra a la fosa, el paso al talud superior está marcado por *gullies* o barrancos. Entre los 13°00'S y 12°00'S, el talud medio es cortado por numerosos y estrechos *gullies*, posiblemente resultantes de la erosión superficial (Kukowski, et al, 2008).

5.3.4 DORSAL DE NAZCA Y LA DORSAL DE CARNEGIE

Es una cadena montañosa submarina de la placa de Nazca, se extiende en dirección suroeste-noreste y se localiza entre los paralelos 15°00' y 26°09'S y los meridianos 86°30' y 76°06'O. Su extremo meridional limita con la dorsal Sala y Gómez y su extremo septentrional se adelgaza y subducta perpendicular a la Fosa peruana, a la altura de la costa de Nazca. Presenta 1,100 km de longitud, 300 km de ancho (Woods & Okal, 1994) y profundidad promedio entre 2000 y 3000 m. alcanzando los 2,000 metros de altura (Palacios, 1995). Es algo asimétrica, su extremo sur es más somero que el septentrional, con una escarpa de falla inclinada hacia el mar y una pendiente suave inclinada hacia el continente. Sobre esta dorsal ocurren pequeños montes de forma cónica, atolones y *guyots* o montes submarinos y mesetas con cimas que alcanzan hasta 200 m de superficie, algunos están constituidos por restos biogénicos del Cenozoico al Holoceno y estructuras volcánicas que se ubican en su flanco (Kukowski et al., 2008).

De las dorsales de Nazca, Salas y Gómez; emergen sobre las aguas del Océano Pacífico, las cimas de la isla de Pascua y la isla Salas y Gómez (Gálvez-Larach, 2009), los montes de mayor antigüedad (34 Ma.), se han encontrado en el sector norte de la cordillera de Nazca (*Earth Reference Data and Models*, 2007). Los montes submarinos de Nazca y Salas y Gómez son de origen volcánico, formados por el hotspot de Pascua (Naar et al., 2002) hace más de 30 millones de años, y que se encuentran alineadas debido al desplazamiento de la placa de Nazca.

Hacia el norte en el límite de la placa de Cocos, se eleva la cordillera submarina o Dorsal de Carnegie (32°S y 34°S), con una longitud aproximada de 1,350 km, 300 km de ancho y 3,000 metros de altura, se extiende hacia la fosa del Ecuador.

5.3.5 BATIMETRÍA ENTRE PUNTA MAL PASO DE ASIA A TAMBO DE MORA

La integración de capas de información batimétrica, estratigráfica, geomorfológica, mineralógica, geoquímica y tectónica, permite la caracterización geológica del fondo marino e identificación de áreas con potenciales recursos geológicos, las cuales deben ser prioritarias para la investigación. La plataforma continental frente a Punta Mal Paso de Asia (Lima) a Tambo de Mora (Ica), constituye una de las zonas de interés de la margen continental peruana, muestras colectadas en los Cruceros de investigación Johnson sea Link II y SONNE 147 Wecoma, muestran concentraciones de fosfatos.

El INGEMMET ha compilado información batimétrica de las Cartas Náuticas de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN, 1999-2010), del *Nazca Plate Project* (1973), *Perú - Chile trench and forearc Project* (1987) y del *Génesis Expedition Project* (1997), y ha elaborado el mapa batimétrico preliminar del sector, a escala 1/100,000. Este mapa está constituido por más de 4,000 datos de sondajes y profundidades que van de la línea de costa, hasta el talud superior a los 2,988 mbnm. De la interpretación se tiene que el ancho promedio de la plataforma entre Punta Mal Paso de Asia y Tambo de Mora (12° a 13°30') es de 32 km. entre los 100 y 800 metros bajo el nivel del mar, destacando la plataforma externa cuyo borde o límite con el talud, está definido por tres grandes coronas de deslizamiento e indentaciones, representando una zona de subsidencia.

Reportes de sedimentos turbidíticos en el talud, argumenta el tectonismo que activa el flujo de densidad mediante avalanchas y controla la geomorfología de la margen, en este sector.

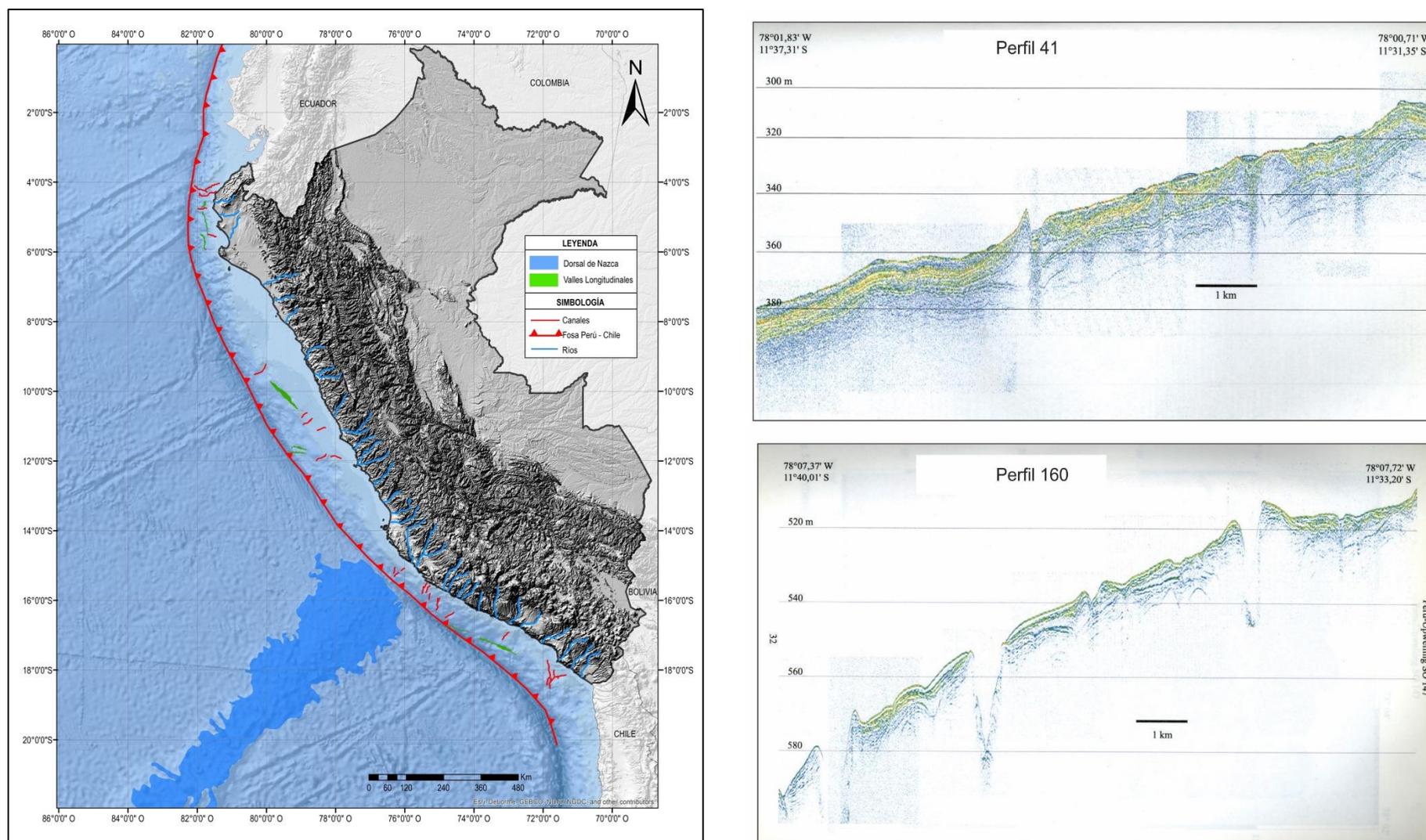


Figura 5.3. Mapa de canales y valles de la margen continental peruana (sobre base batimétrica de *The Gebco-08 SID Grid, version 20100927*). A la derecha perfiles batimétricos (Kudras et al, 2000) 41 y 160, del Crucero Sonne SO-147, obtenidos con ecosonda multibeam Hydrosweep. Muestran sistemas de canales inactivos entre los 11°37.31' y 11°31.35' (Perfil 41), y Canales subparalelos en el talud superior, rellenos por sedimentos recientes entre los 11°40.01 y 11°33.20' (Perfil 160).

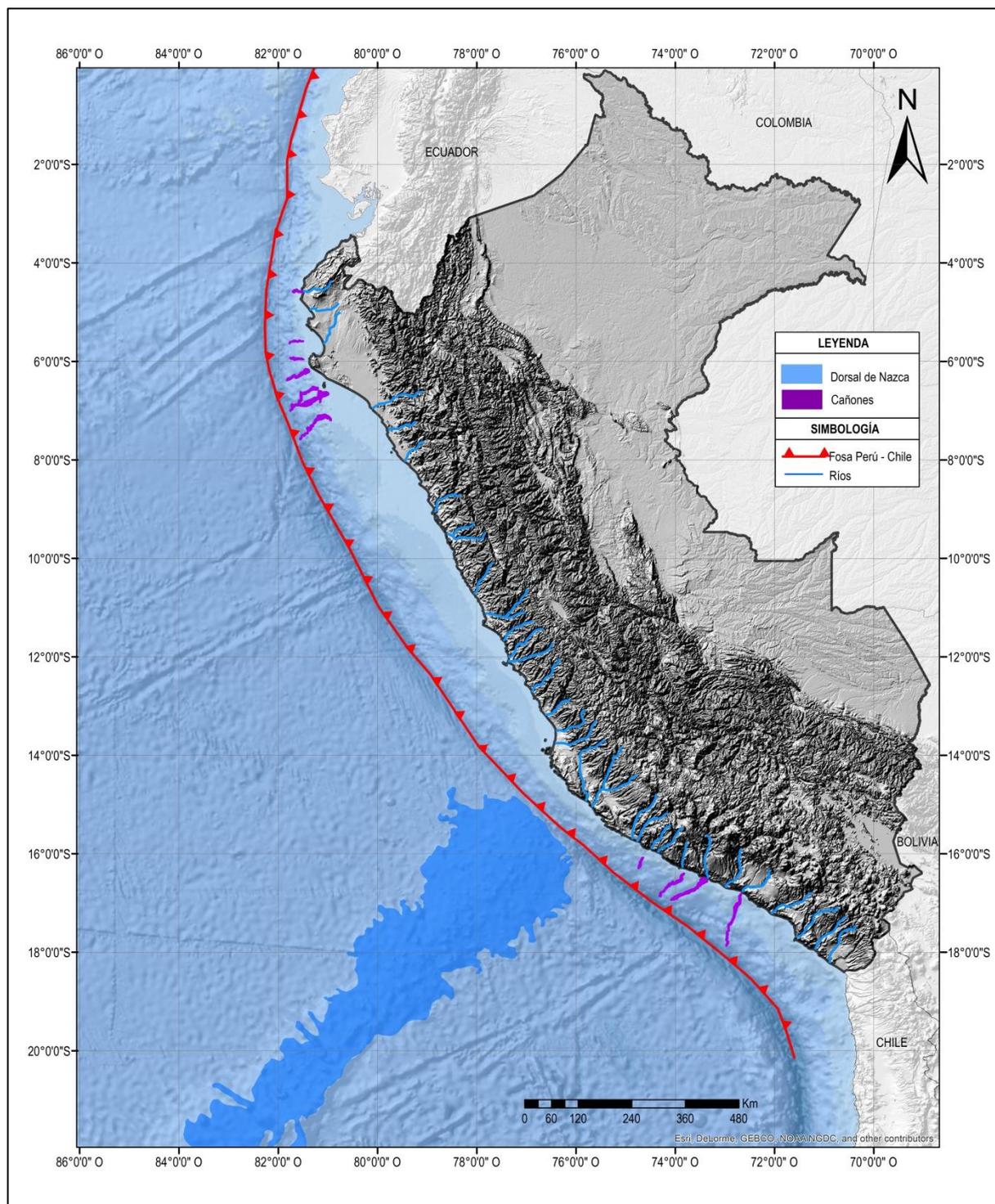


Figura 5.4. Principales cañones submarinos de la margen continental

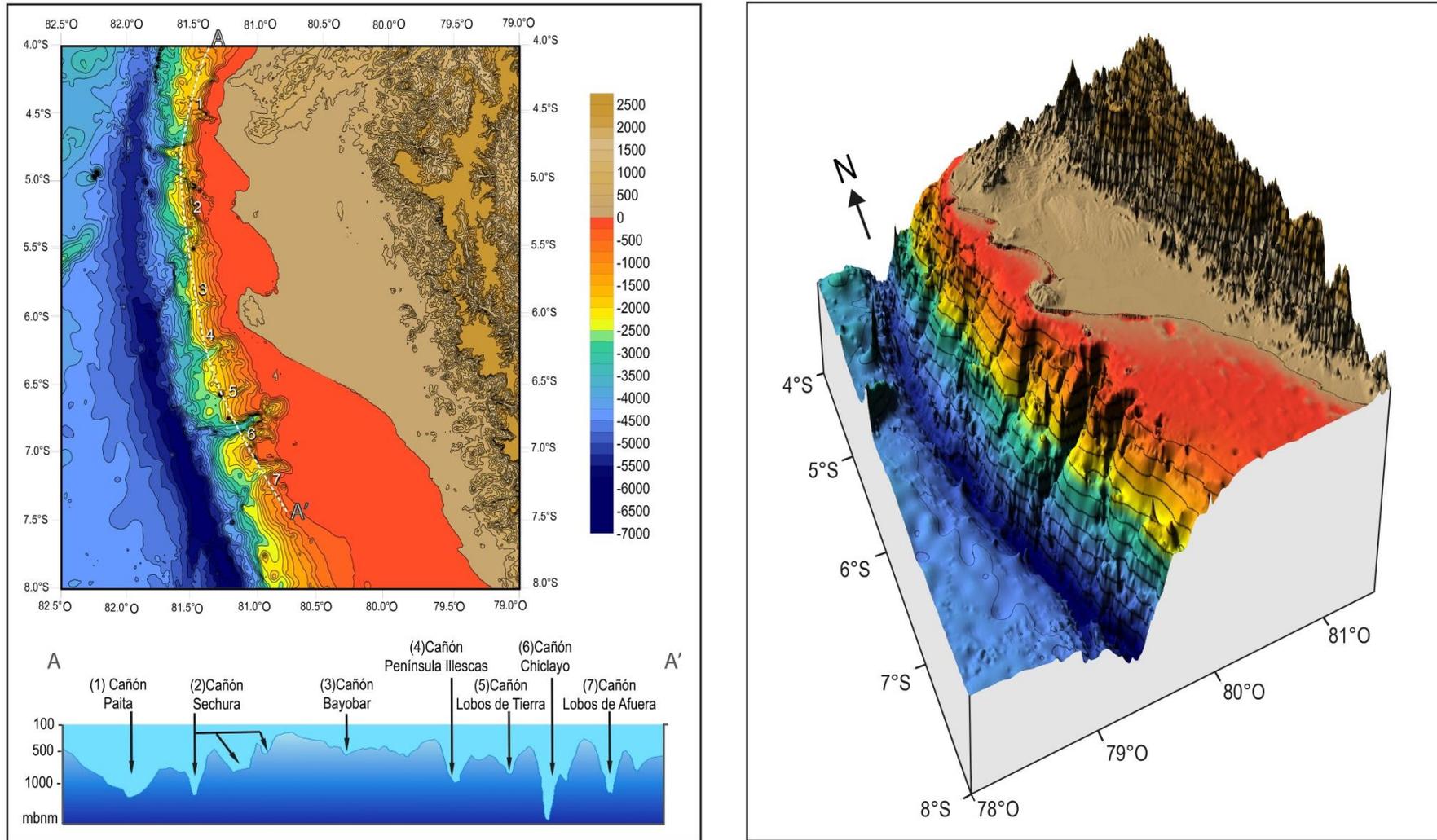


Figura 5.5. Mapa de los cañones submarinos de la margen continental peruana sector norte: Perfil A-A' transversal al talud, muestra las profundidades alcanzadas por los cañones de Paita (1), cañon complejo Sechura (2), Cañon de Bayovar (3), Cañon península de Illescas (4), Cañon Lobos de Tierra (5), Cañon de Chiclayo (6) y cañon Lobos de afuera (7). A la izquierda block diagrama del área (escala vertical exagerada).

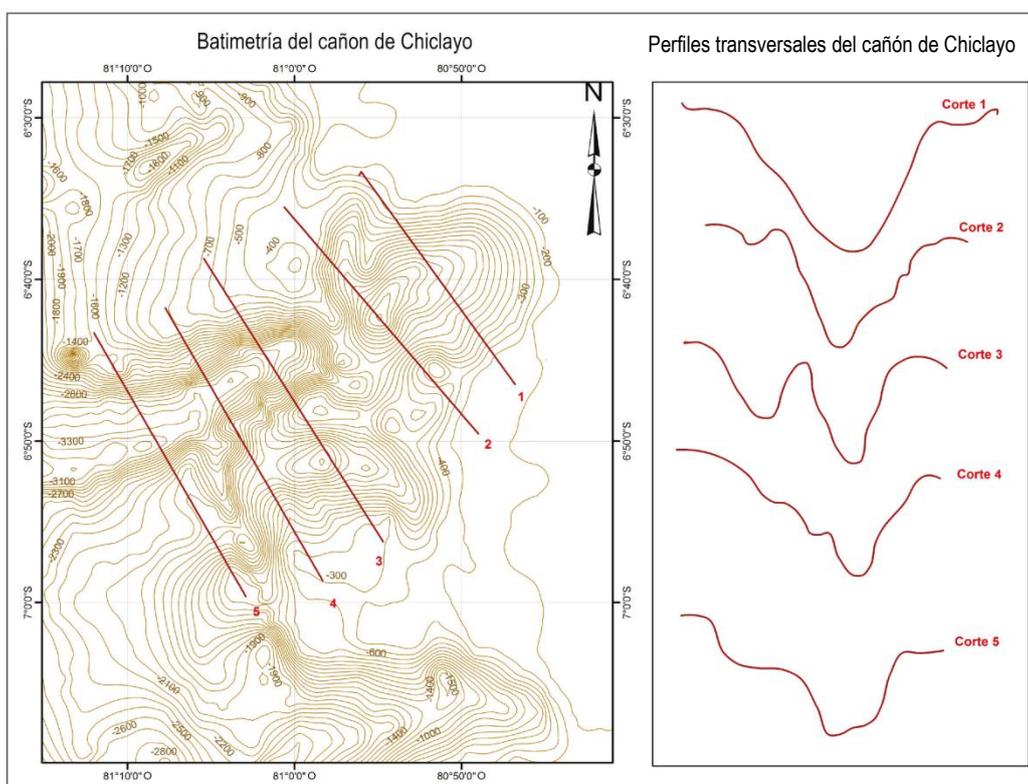
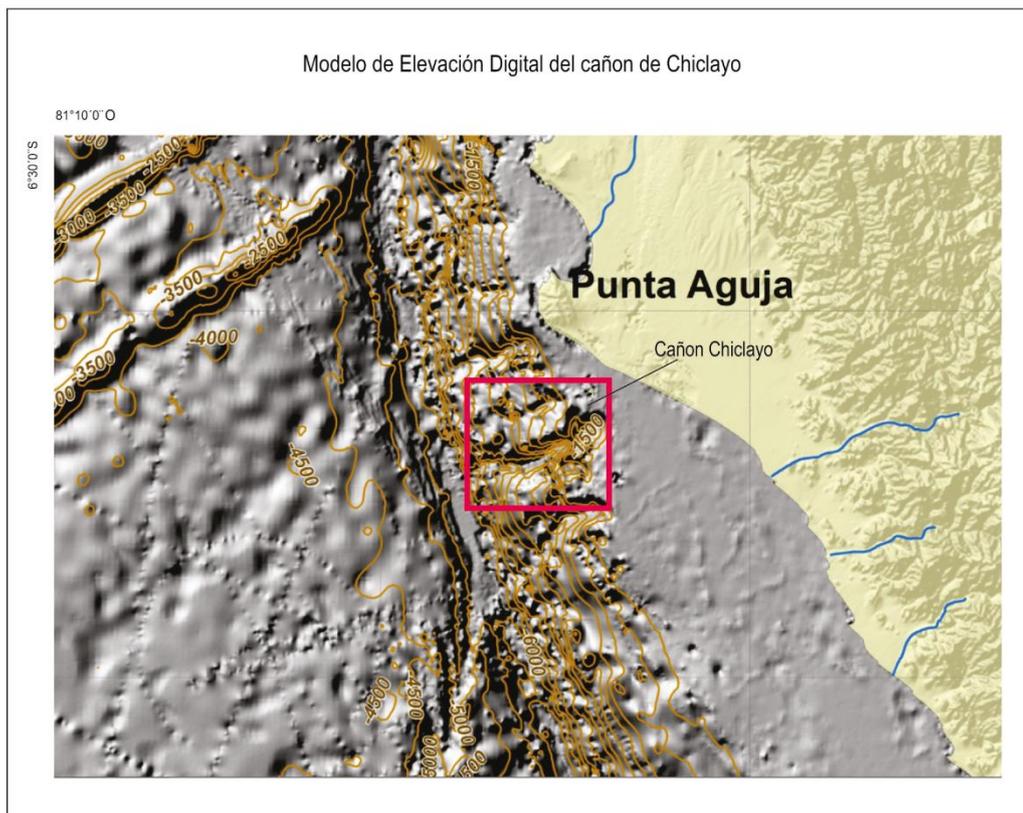


Figura 5.6. Cañon submarino de Chiclayo.

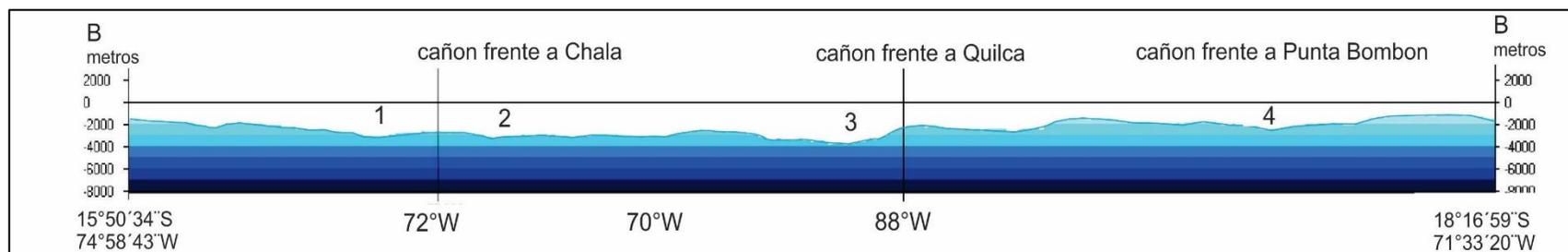
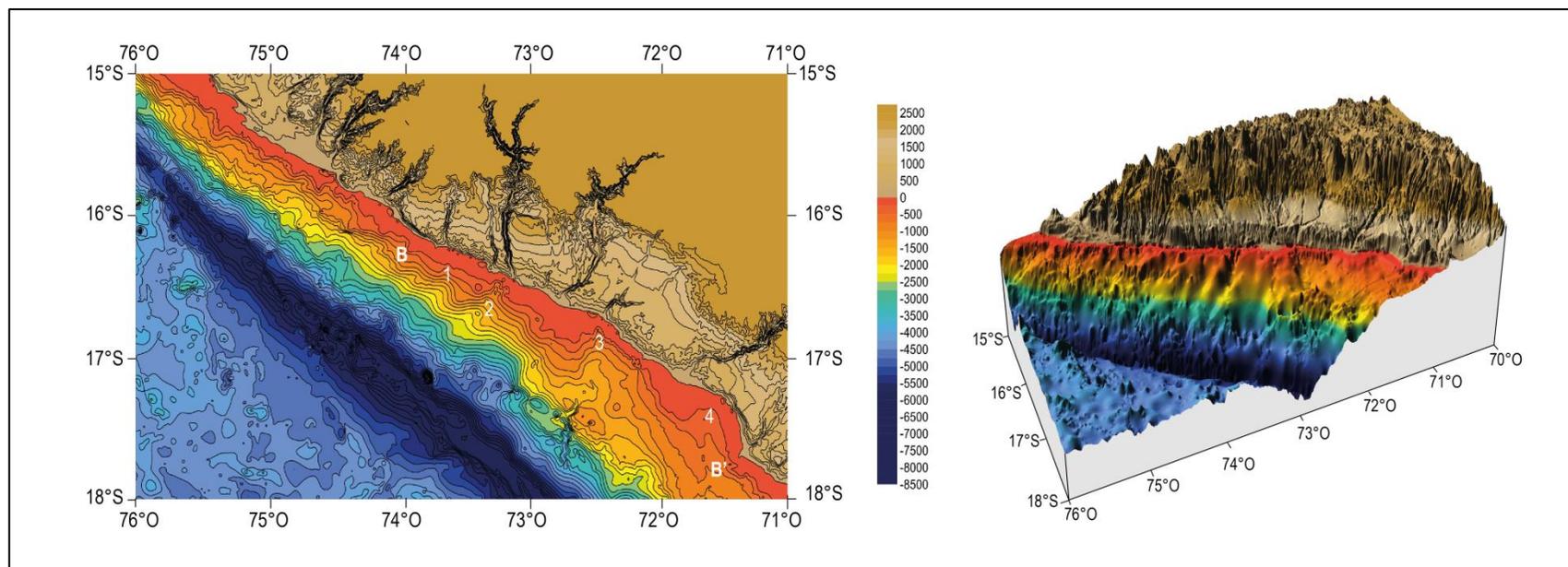
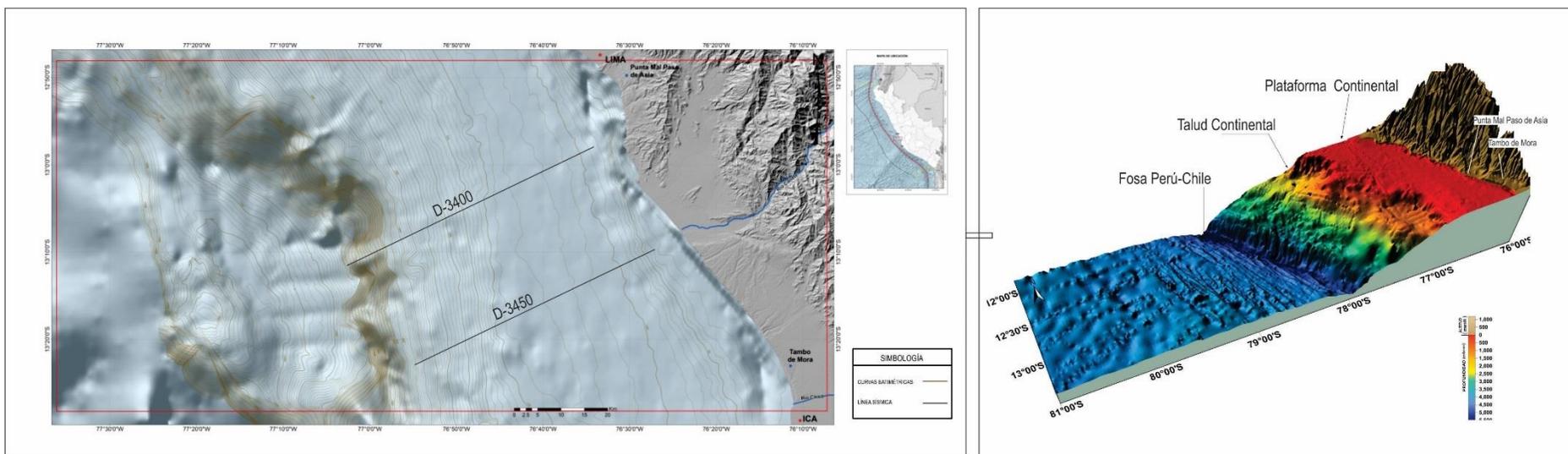
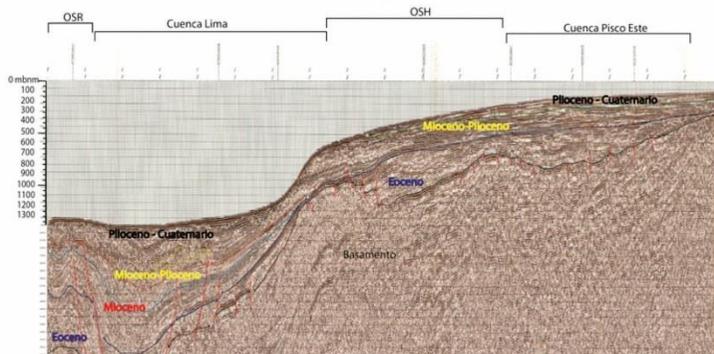


Figura 5.7. Cañones de la margen continental peruana sector sur.



Línea sísmica D 3400 (PeruPetro, 2003)



Línea sísmica D 3450 (PeruPetro, 2003)

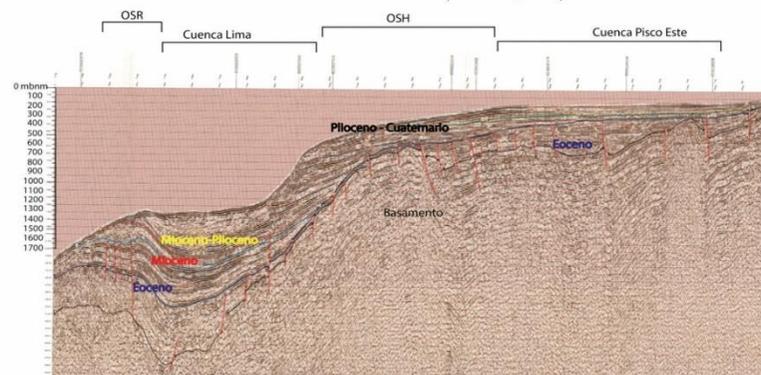


Figura 5.8. Mapa Batimétrico de Punta Mal Paso de Asia a Tambo de Mora. Las secciones sísmicas son de PeruPetro (2003)

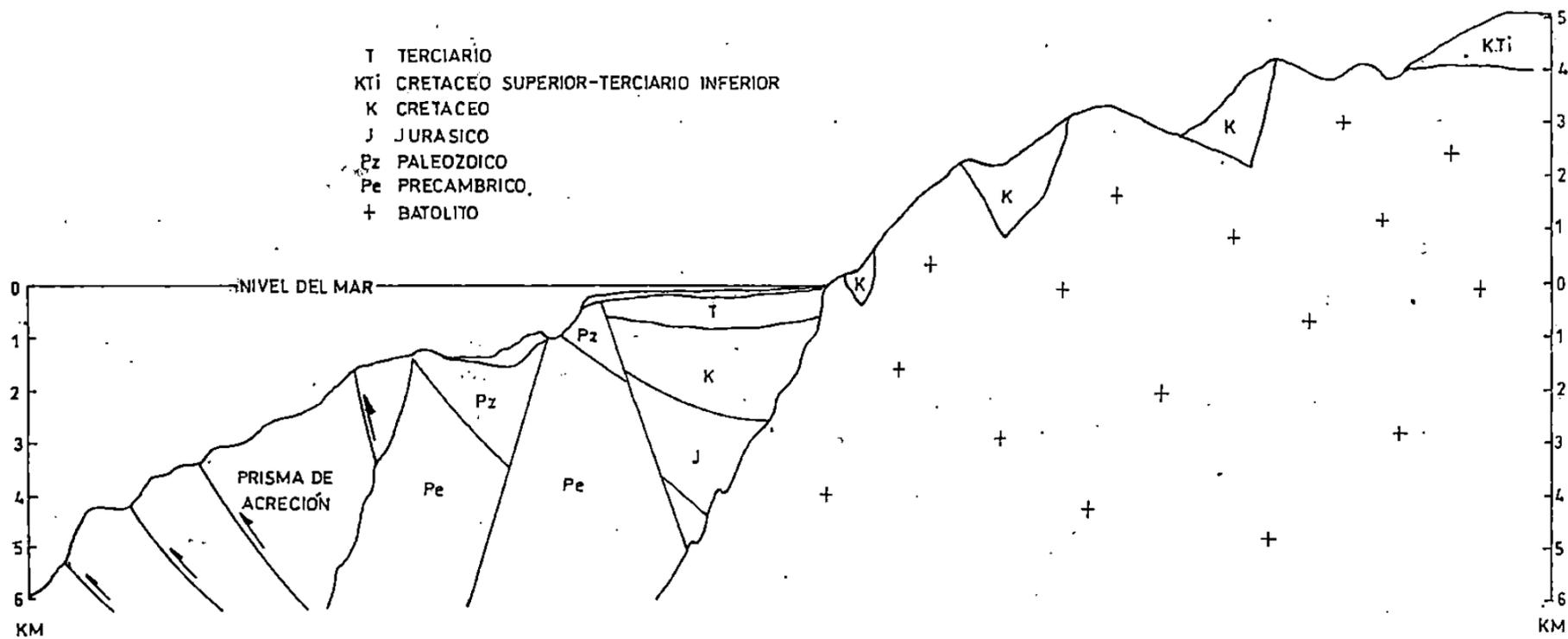


Figura 5.9 Sección geológica generalizada del margen continental en la latitud de Lima. Inferida de la geología continental y datos de perfiles sísmicos (Masías, 1976).

CAPÍTULO VI

SEDIMENTOS HOLOCÉNICOS DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL

6.1 GENERALIDADES

Los sedimentos holocénicos de la margen continental del Perú, se encuentran ampliamente distribuidos en la plataforma y talud continental. Se pueden clasificar según su origen en: detríticos, biogénicos, hidrogénicos, y anemogénicos. Es en los sedimentos detríticos donde podemos encontrar las claves de su procedencia con respecto al contexto y evolución geológica de la margen y costas durante el holoceno, debido a que muestran características sedimentológicas, mineralógicas, geoquímicas y biogénicas que reflejan la naturaleza y proximidad de la fuente de sedimentos continentales, además de la influencia de las corrientes de fondo y subsuperficiales, cambios latitudinales y relaciones de la sedimentación versus la morfología de fondo, entre otras.

El estudio de caracterización de sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú introduce el conocimiento de las facies mineralógicas, fraccionometría y su distribución, permitiendo la evaluación de su distribución con respecto a las áreas de aporte y transporte de sedimentos fluviales y eólicos. Constituyendo una base de datos, para la planificación de programas que tengan como objetivo la prospección de recursos de fondo marino.

6.2 GEOQUÍMICA MARINA

Las condiciones biogeoquímicas de la mayor parte de la margen continental peruana se caracterizan por la deficiencia de oxígeno de las aguas de fondo y las condiciones reductoras de los sedimentos. Una capa deficiente de oxígeno ($< 0.5 \text{ ml L}^{-1}$) conocida como Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO), se ensancha, engrosa y es más intensa de norte a sur frente a la costa del Perú (Wooster & Gilmartin, 1961). Frente a los 5° S , el borde superior de la capa de mínima tiende a situarse debajo de los 100 m de profundidad, mientras que frente a Callao (12° S), la mínima de oxígeno puede extenderse hasta los 30-40 m debajo de la superficie (Sánchez et al., 2000).

6.3 SEDIMENTACIÓN

La dinámica de los sedimentos y la distribución del material particulado en la columna de agua en los márgenes continentales, están controlados por la estructura hidrográfica, la circulación y los procesos hidrodinámicos asociados (Puig & Palanques, 1998). Las características del sistema sedimentario durante el Cenozoico indica que la sedimentación en las cuencas de antearco fue controlada por los siguientes procesos: Un fuerte afloramiento costero debido al transporte de Ekman resultando en una alta productividad. Por la corriente submarina ubicada actualmente entre los 50 y 300 mbnm. Finalmente, por los cambios climáticos interanuales tales como El Niño y los cambios de mayor escala de tiempo como las épocas glaciares e interglaciares que influenciaron sobre el afloramiento costero, el sistema de corrientes y el aporte de material terrígeno. Todos estos procesos determinaron los principales ambientes de deposición de fondo (Cruise Report SO 147, 2000). En la actualidad contracorriente peruano-chilena juega un papel importante sobre la amplia plataforma frente a Chimbote, la erosiona generando fondos de relieves irregulares, selecciona fracciones, y deja al descubierto depósitos infrayacentes de costras o gravas fosfóricas (Saalisbury et al, 1986; Reinhardt et al. 2002).

6.4. COMPOSICIÓN DEL FONDO

Estudios realizados por INGEMMET en la plataforma continental peruana muestra variaciones granulométricas en los sectores norte y centro. Desde Tumbes hasta Supe y Huarney presentan arenas medias a muy finas las que

varian, incrementando de tamaño, desde la línea de costa hacia la plataforma externa. Hacia la zona central entre Chancay y Callao los sedimentos de la plataforma son mas finos hasta fangosos (Cornejo, et al, 2009) (Figuras 6.1, 6.2 y 6.3).

Sin embargo variaciones locales relacionadas a las dinámicas fluviales y eólicas las encontramos en toda su extensión. En la plataforma frente a Negritos hasta Huanchaco las arcillas cubren la plataforma desde los 37 a 300 m bnm. En el borde litoral frente a Chicama y Pimentel, sedimentos de arcilla y limo están presentes en zonas mas restringidas (Figura 6.2), esta distribución fina, está relacionada a la desembocadura de los ríos Chicama y Moche, mostrándose un aumento en la granulometría hacia la plataforma externa. Frente a la bahía de Salaverry, los ríos Virú, Chao y Santa, aportan materiales arenosos en mayor cantidad (Figura 6.3), los cuales están distribuidos desde la plataforma interna hacia la plataforma externa. Entre Chimbote y Culebras, los ríos Samanco, Sechin y Culebras, transportan material mas fino, depositándose en esta zona de la plataforma y cercanos a la línea litoral, arcillas, aumentando su granulometría mar adentro progresivamente, sedimentando arcillas arenosas y arenas en la parte externa de la plataforma (Figuras 6.1, 6.2). Los ríos Huarmey y Pativilca aportan a la plataforma una considerable cantidad de sedimentos arenosos, extendiéndose hasta la plataforma externa. Hacia el Sur, los ríos Supe y Huaura aportan principalmente material limoso.

En la plataforma frente a Callao y Pisco dos testigos de sedimentos holocénicos de 80 cm de longitud, analizados en el marco de las investigaciones de reconstrucciones paleoceanográficas realizadas por el IMARPE-INGEMMET-IRD, mostraron secuencias sedimentarias arcillo limosas, de interlaminaciones milimétricas, color verde olivo y gris, bien preservadas y sin evidencias de bioturbación o retrabajo, depositadas bajo condiciones anóxicas (Figura 6.4).

El análisis de los testigos, a través de radiografía analógica de Rayos X, radioscopia digital de Rayos X, Grey Level y Dry bulk density, revelaron del tope a la base laminaciones gruesas constituidas por altas concentraciones de carbono orgánico total (TOC), ocurriendo a los 35.50 cm una variación en la sedimentación que consistió de laminaciones finas de sílice biogénica y material detrítico terrígeno (Gutiérrez et al., 2006). En ambos testigos una estructura slump corta los sedimentos. Estimaciones cronológicas en base a Plomo 210 estiman una edad de 695 años para el testigo de Callao y 450 años para el de Pisco. El slump se relaciono con la ocurrencia del violento tsunami ocurrido en 1746. Cálculos del *ratio* de sedimentación mostraron una velocidad de sedimentación de 2 mm por año en la costa central del Perú. Las secuencias sedimentarias laminadas están presentes frente a la costa central peruana (Gutiérrez et al., 2009; Sifedinne et al., 2008).

6.4.1 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

Los sedimentos limoarcillosos de la plataforma continental interna y externa contienen aproximadamente 57 especies minerales. Los principales constituyentes son cuarzo, albita, clorita, moscovita, microclina, andalucita, calcita, augita y riebeckita; también ocurren silicatos (inosilicatos, filosilicatos y tectosilicatos) (Figura 6.5), sulfuros (Figura 6.6), óxidos (Figura 6.7) y haluros (Figura 6.8), carbonatos y sulfatos (Figura 6.9)

Las concentraciones muestran que la albita, moscovita, augita y clorita ocurren con concentraciones mayores a 65%. La riebeckita, andalusita, calcita, microclina, anortoclasa, cordierita, fluorapatita, hidroxilapatita, actinolita, rodonita, fayalita, ortoclasa, anortita, cloromagnesita, molibdenita, indialita, caolinita, rodocrosita, marialita, halita, beidelita y clorapatita, con concentraciones de 20%. Un último grupo constituido por nyereita, uvarovita, pirofilita, pirofanita, caldereita, ankerita, almandino, clinoenstatita, tridimita, dolomita, langita, dreyerita, magnesiohorblenda, flogopita, anhidrita, todorokita, annabergita, sursassita y ramsdellita, tienen concentraciones menores a 15%. Los principales constituyentes de las fracciones arenosas son: Cuarzo, albita, grupo de las micas, caolinita, montmorillonita, beidelita, anfíboles y bioclásticos (testas de foraminíferos, fragmentos de conchas de moluscos) (Cornejo, 2011; Girón, 2009).

En la Cuenca submarina Chancay, se identificaron: del grupo de los sulfuros: molibdenita y pirita, del grupo de los halogenuros: cloromagnesita, del grupo de los carbonatos rodocrosita, del grupo de los sulfatos: natrojarosita y yeso, del grupo de los anfíboles: hastingsita, del grupo de las zeolitas: natrolita y clinoptilolita, del grupo de los

inosilicatos: rodonita, jarosita y actinolita, del grupo de los filosilicatos: pirofilita y talco, del grupo de los ciclosilicatos: cordierita, del grupo de los tectosilicatos: cristobalita, anortoclasa y ortoclasa.

En dirección al río Chancay se encontraron: molibdenita, pirita, natrojarosita, clinoptilolita, odonita y pirofilita. En dirección al Río Chillón: molibdenita, pirita, cloromagnesita, rodocrosita, yeso, natrolita, odonita, jarosita, anortoclasa, talco, namuwita, actinolita y cordierita. En dirección al río Rímac: molibdenita, pirita, cloromagnesita, rodocrosita, natrojarosita, natrolita, odonita, actinolita, cristobalita, anortoclasa, namuwita, actinolita y la cordierita. En dirección al río Mala: hastingsita y en dirección al río Pisco pirofilita (Figura 6.10).

Se encontró que la distribución mineralógica guarda relación con las rocas volcánicas sedimentarias de los afloramientos costeros y del Batolito de la costa. La molibdenita, natrojarosita, hastingsita, namuwita, cordierita y minerales de arcillas como el talco y la pirofilita, son constituyentes de las rocas andesíticas, areniscas de la Formación Quilmaná, Formación Morro Solar (areniscas) y el Batolito de la Costa respectivamente.

Entre los sulfatos la anhidrita se encuentra en dirección de los ríos Matagente y Pisco procedentes probablemente de los depósitos evaporíticos que se encuentran próximos al curso fluvial de los mismos. La cristobalita, natrolita y clinoptilolita del grupo de las zeolitas, ocurren por alteración de minerales autógenos relacionados a las rocas andesíticas del Grupo Casma y Grupo Calipuy. La anatasa, dolomita, lizardita, magnesita y laumontita se relacionan con yacimientos de alteración hidrotermal. También se encuentran hematina y motmorillonita producto de la alteración química de feldespatos en rocas básicas. Los carbonatos como la rodocrosita y magnesita y están relacionados a alteraciones del Batolito de la Costa. En el talud, ocurren minerales que por su bajo peso específico pueden ser transportados por los cursos fluviales a mayores profundidades; se encuentran la aliettita (arcilla), anortita (plagioclasa) e illita (Girón, 2009).

Los mapas de isovalores muestran que las concentraciones de cuarzo se incrementan hacia el oeste, distribuyéndose de manera uniforme en la plataforma externa (Figura 6.5). Mientras la concentración de albita es mayor en el complejo Rímac - Chillón y decrece al Oeste de la línea de costa. La augita disminuye al Oeste de la línea de costa. Hacia los 13° 30'S. La clorita alcanza el borde del talud superior, lo que guarda relación con la mayor extensión de las secuencias volcánico sedimentarias del Grupo Casma. La concentración de riebeckita es mayor en la zona de la plataforma interna.

En la Cuenca submarina Mala, se identificaron: del grupo de los sulfuros: mackinawita, pirita y tungstenita, del grupo de los óxidos: bixbyita, hematita, ilmenita, braunita y anatasa, del grupo de los hidróxidos: behoita, del grupo de los carbonatos: magnesita, rodocrosita, termonatrita, dolomita, del grupo de los sulfatos: starkeyita, anhidrita, yeso, jarosita, de grupo de los fosfatos: amblygonita, woodhouseita, del grupo de los inosilicatos: magnesiohornblenda (anfíbol), antofilita, todoroquita, laumontita, grunerita, ofosita, rodonita, bustamita y actinolita, del grupo de los filosilicatos: lizardita (serpentina), motmorillonita, illita, pirofilita y aliettita, del grupo de los tectosilicatos: microclina y anortita (feldespatos), heulandita (zeolita), y otros como; gorstekita, manganaxinita, hidromolisita, y faircheldita.

En dirección al río Matagente se encontró: mackinawita y tungstenita hematita termonatrita y dolomita, yeso, grunerita, motmorillonita, pirofilita y microclina. En dirección al río Lurín: pirita, óxidos. En dirección al río Mala: pirofilita, pirita, magnesita, magnesiohornblenda y la todorokita. En dirección al río Cañete: pirita, hematita, yeso, jarosita, amblygonita, antofilita, actinolita, laumontita, ofosita, motmorillonita, bustamita, rodonita, lizardita (serpentina), gorstekita y manganaxinita. En dirección al río Lurín: hematita, anatasa, jarosita motmorillonita y hidromolisita. En dirección al río Pisco hematita Pirofilita. En dirección a la quebrada Cansa Caballo: Aliettita (smectita), illita, anortita y heulandita (zeolita). En dirección a la quebrada Del Hueso: ilmenita, braunita, anhidrita, starkeyita, woodhouseita y faircheldita (Figura 6.11).

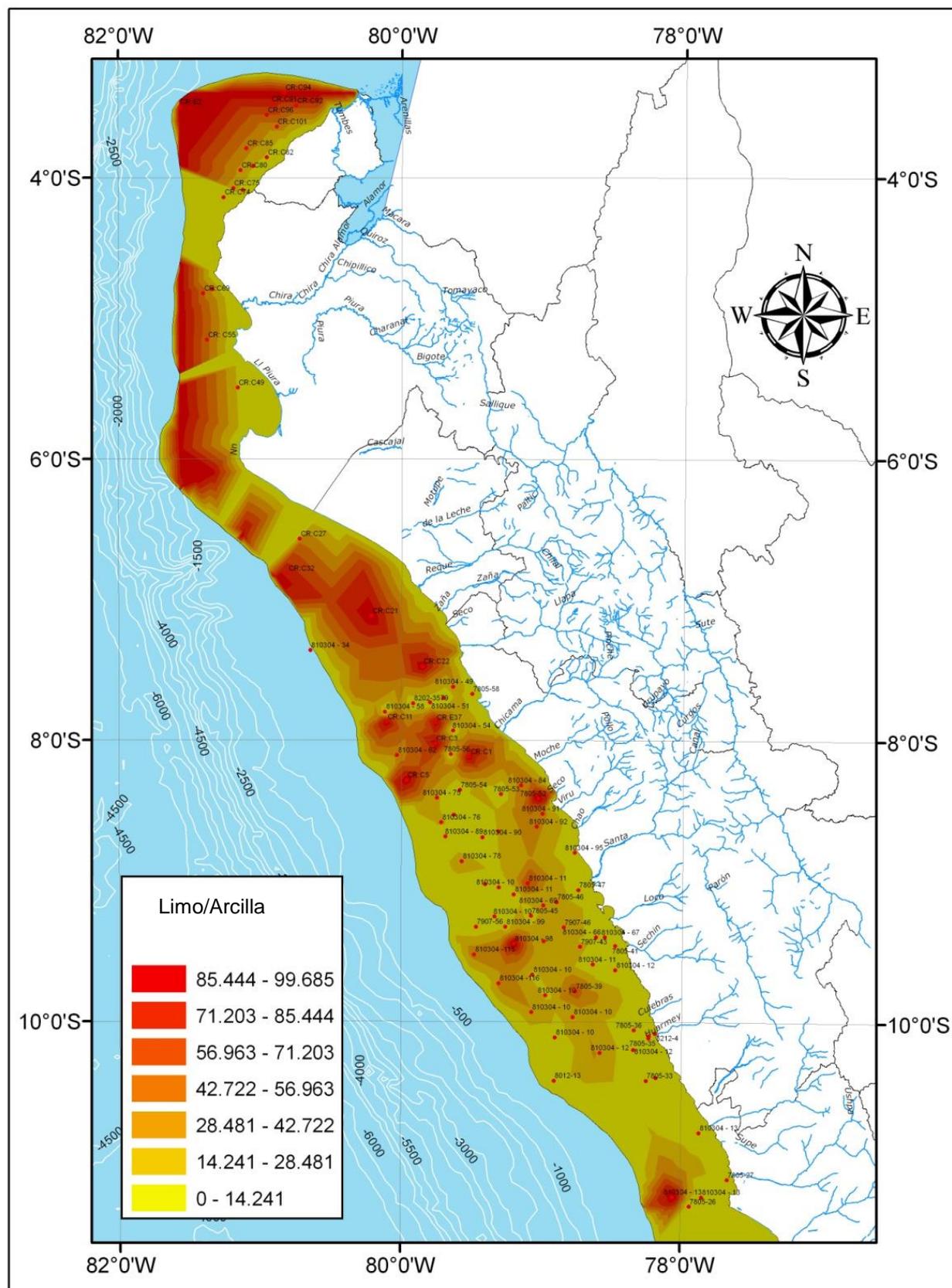


Figura 6.1. Mapa de caracterización de sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Distribución de arcillas, ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental y sus concentraciones relativas con respecto a las concentraciones de arena fina y media.

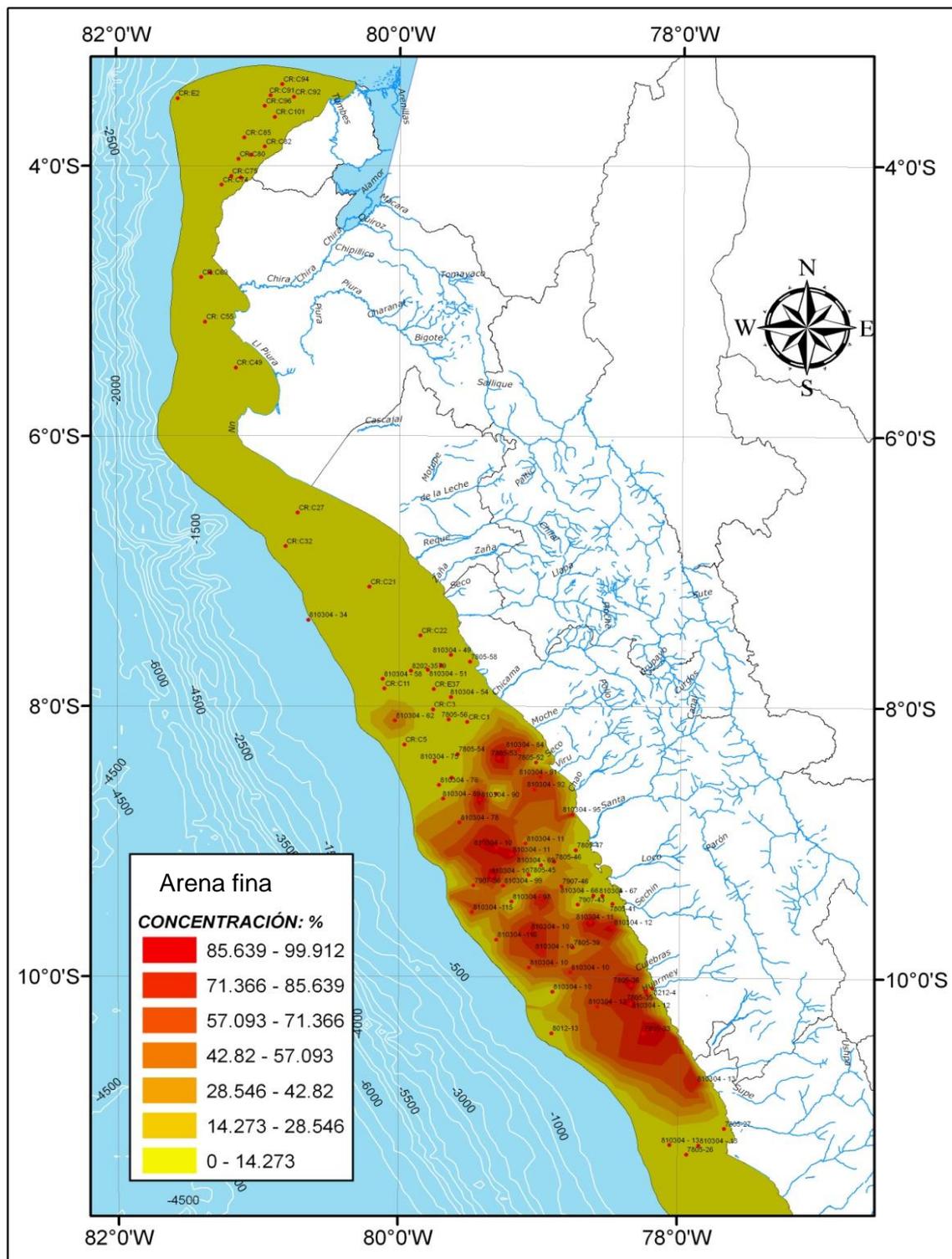


Figura 6.2. Mapa de caracterización de sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Distribución de Arena fina, ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental y sus concentraciones relativas con respecto a las concentraciones de Limo-arcillas y arena media.

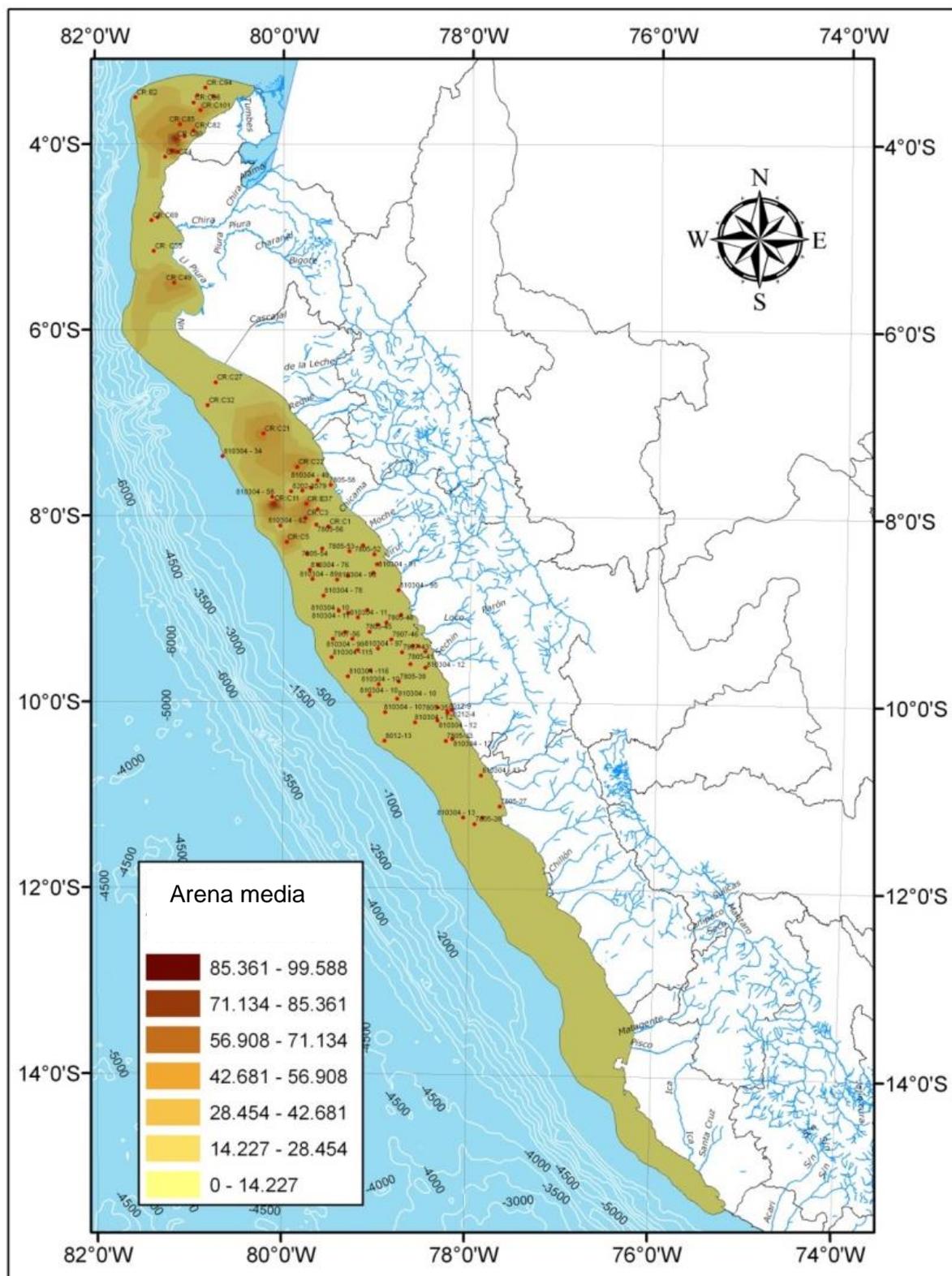


Figura 6.3. Mapa de caracterización de sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Distribución de arena media, ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental y sus concentraciones relativas con respecto a las concentraciones de limos- arcillas y arena fina.

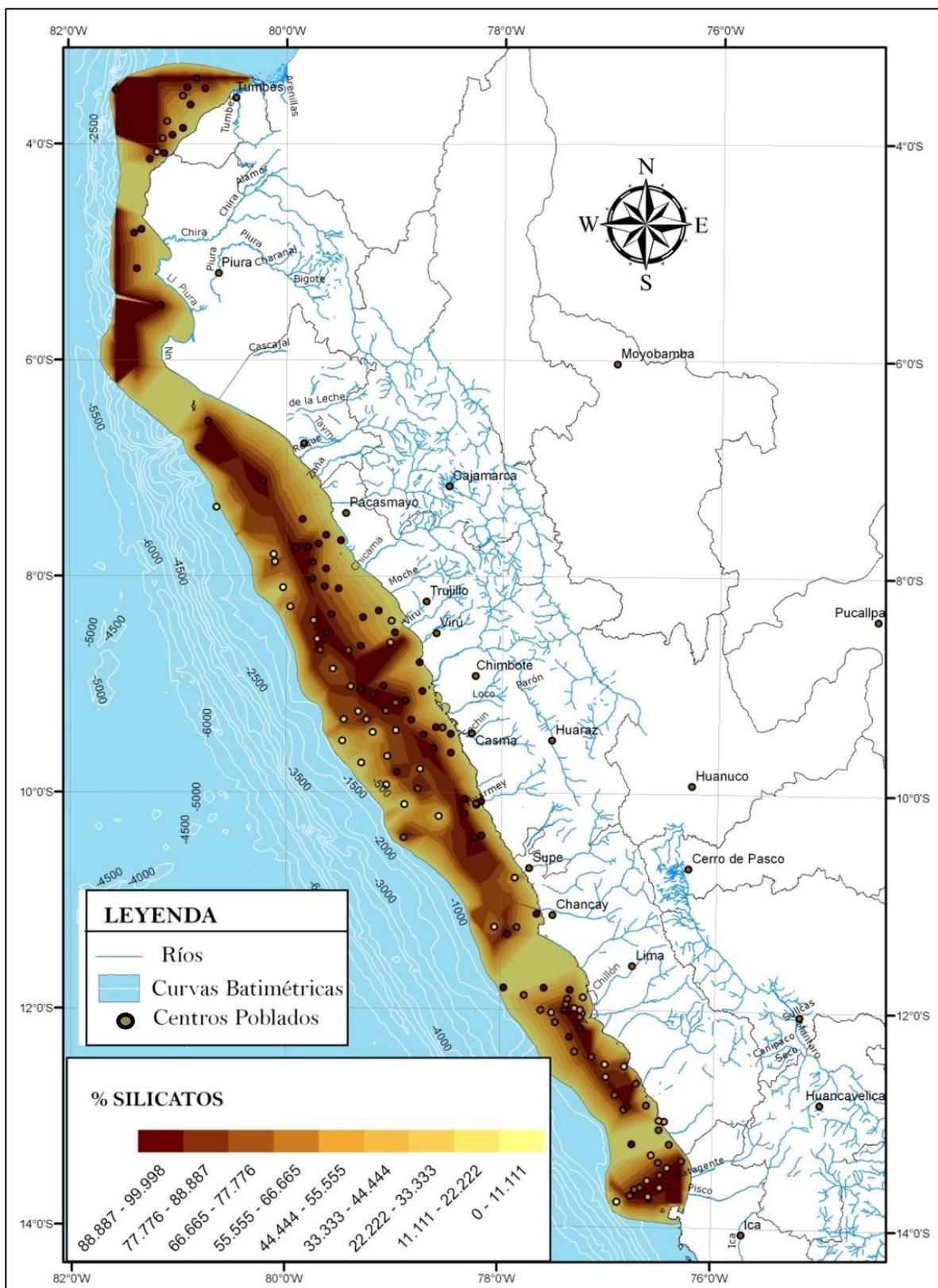


Figura 6.5. Mapa de isovalores de silicatos en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Distribución de los principales grupos: Olivino (fayalita), granate (uvarovita, almandino), aluminosilicatos (andalucita), piroxenos (augita, enstatita, rodonita, etc) y anfíboles (actinolita, riebeckita, etc).

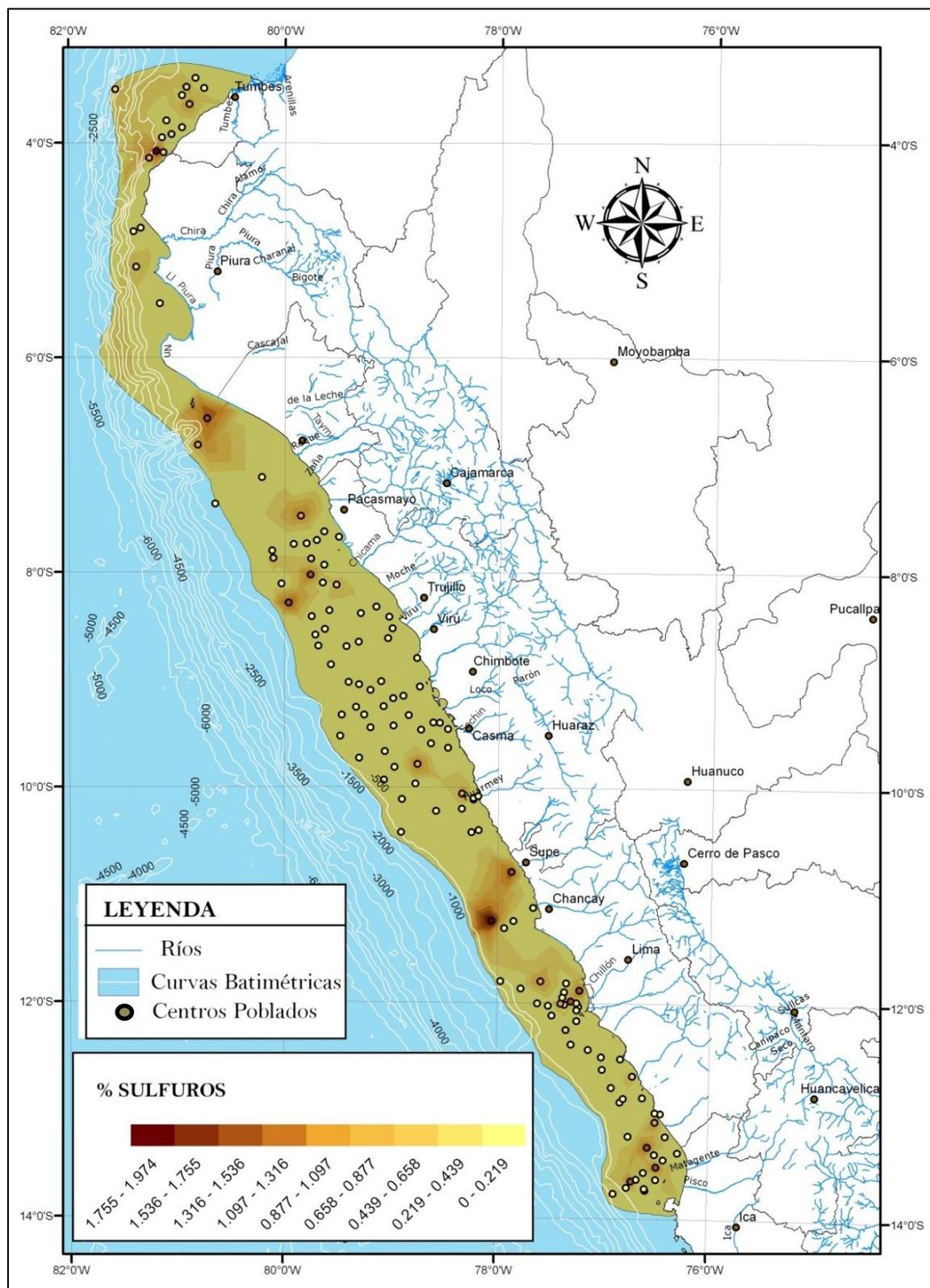


Figura 6.6. Mapa de isovalores de sulfuros en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental, concentraciones relativas de annabergita y molibdenita.

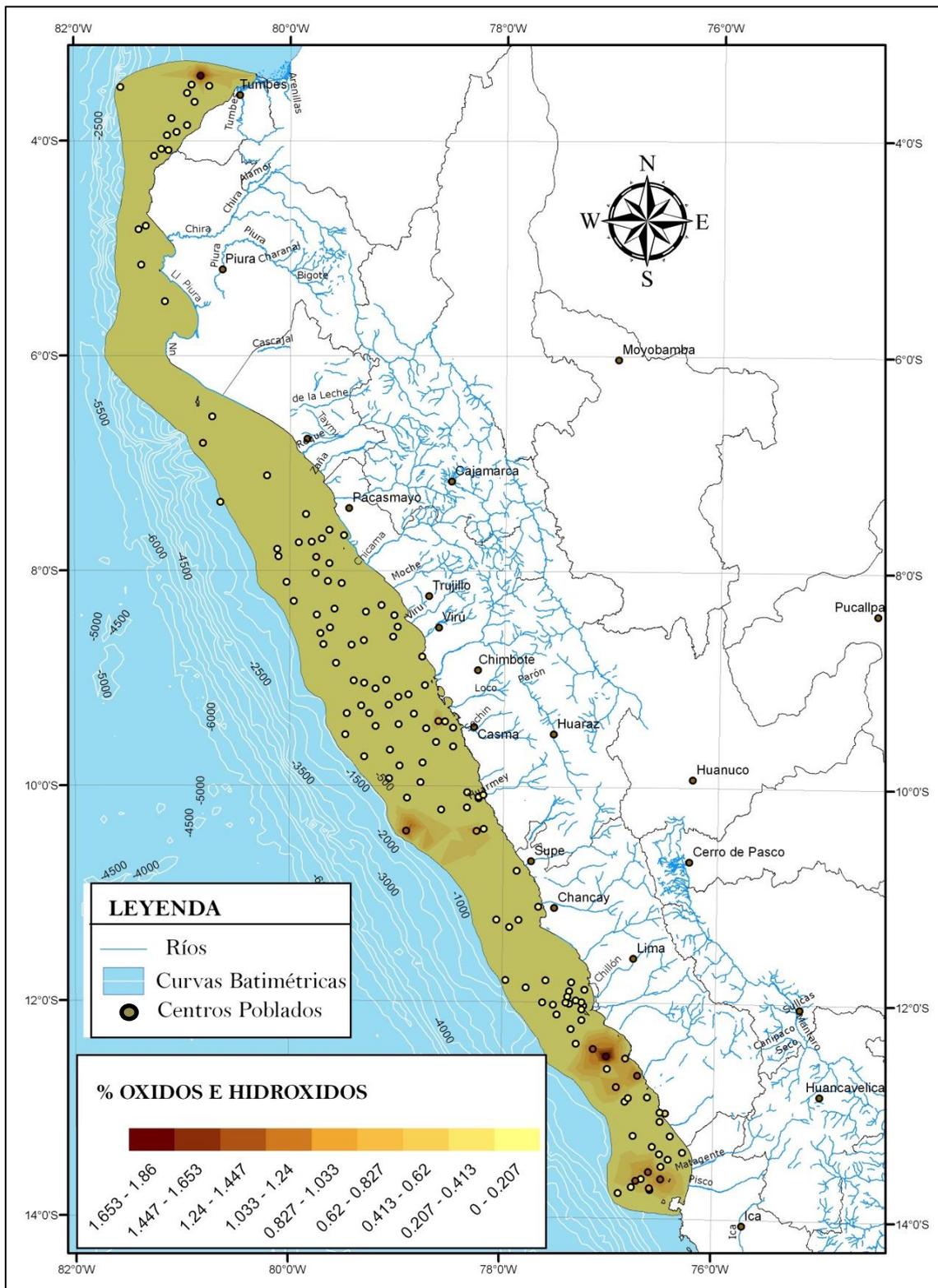


Figura 6.7. Mapa de isovalores de óxidos e hidróxidos en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental, concentración relativa de ilmenita, ramsdellita y todorokita.

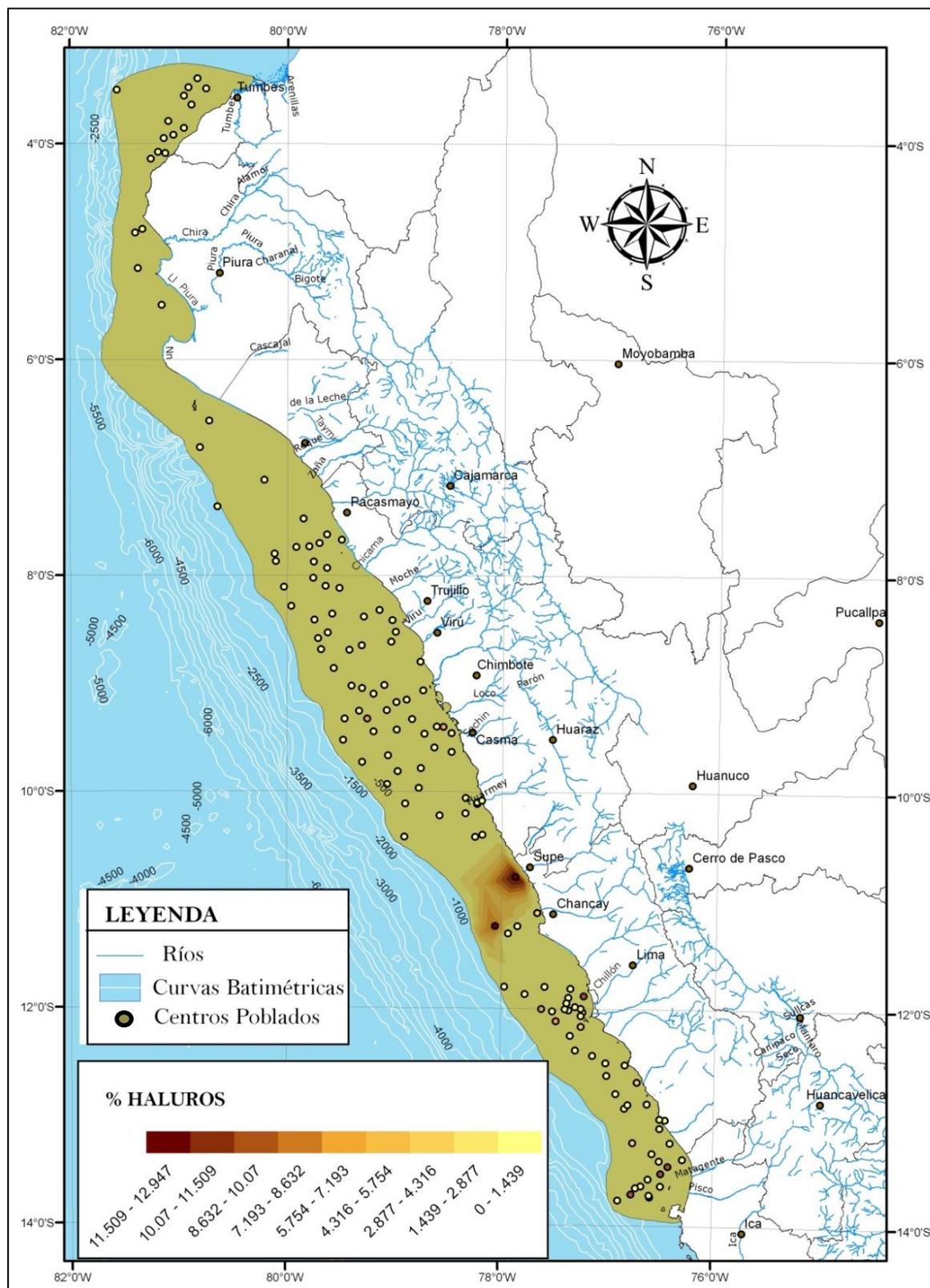


Figura 6.8. Mapa de isovalores de haluros en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental, concentración relativa de halita.

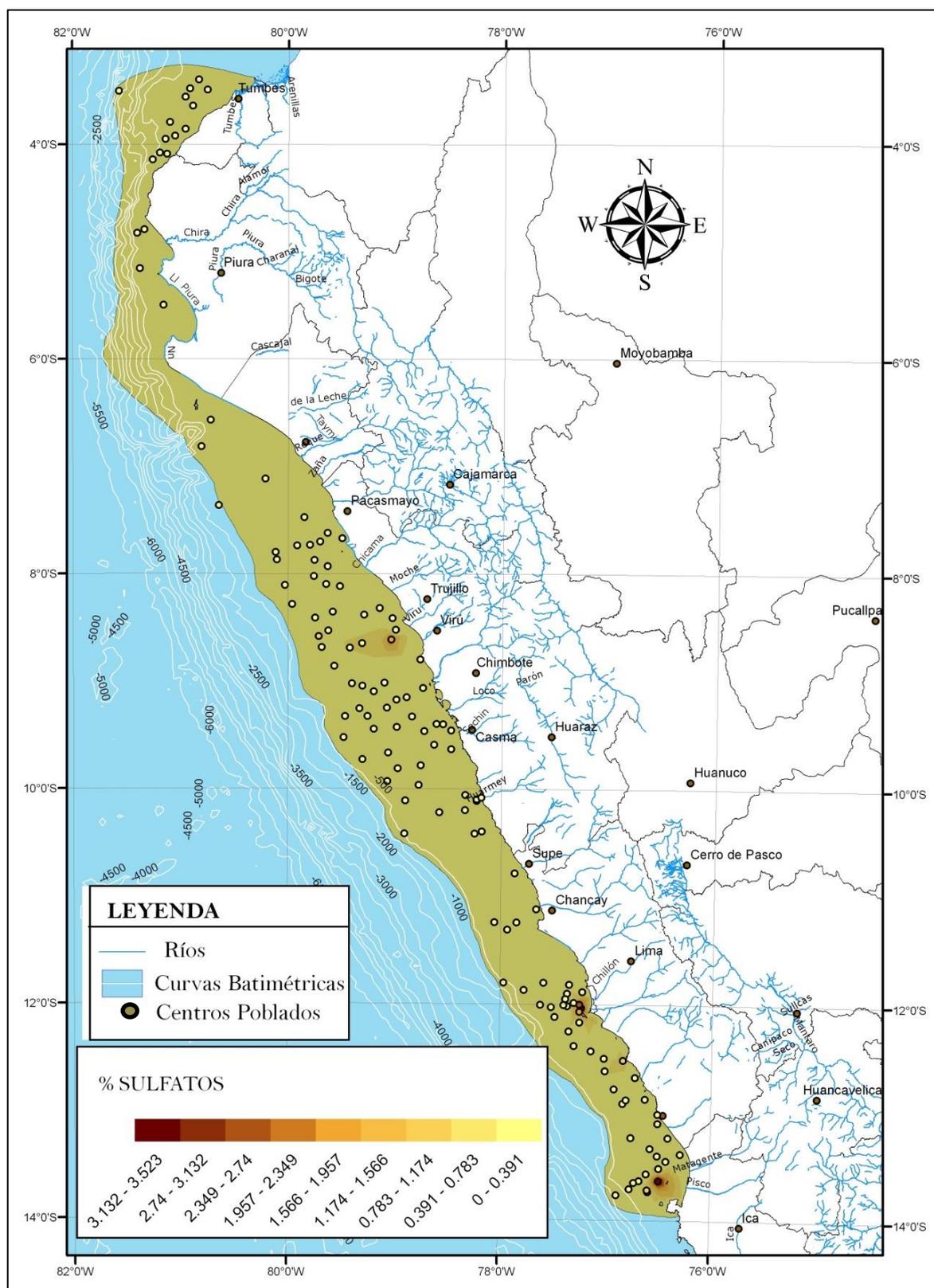


Figura 6.9. Mapa de isovalores de sulfatos en los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú. Ocurrencia espacial desde la zona litoral hacia la plataforma continental, concentración relativa de anhidrita.

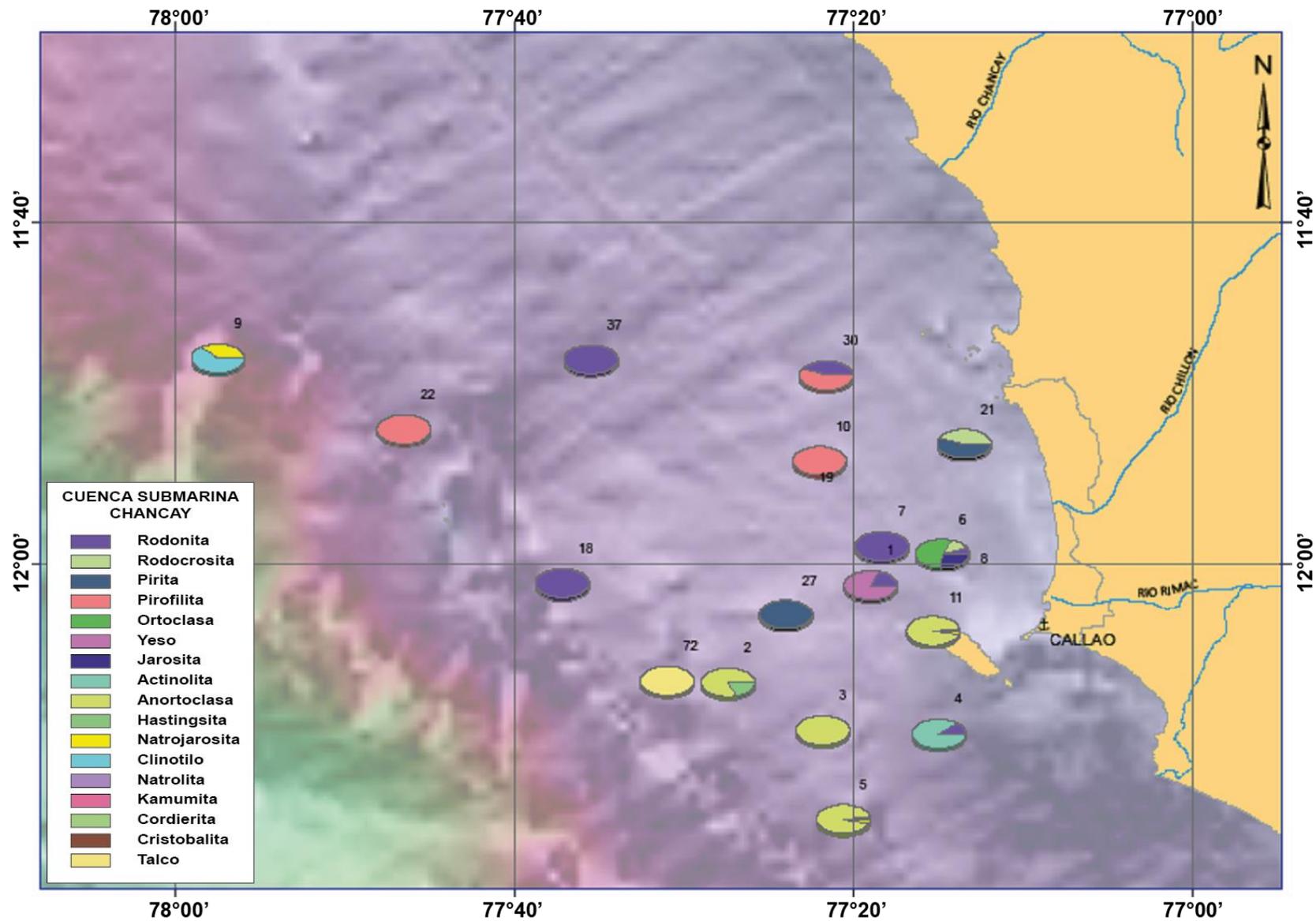


Figura 6.10. Distribución de minerales en la subcuenca marina Chancaay (Girón, 2009)

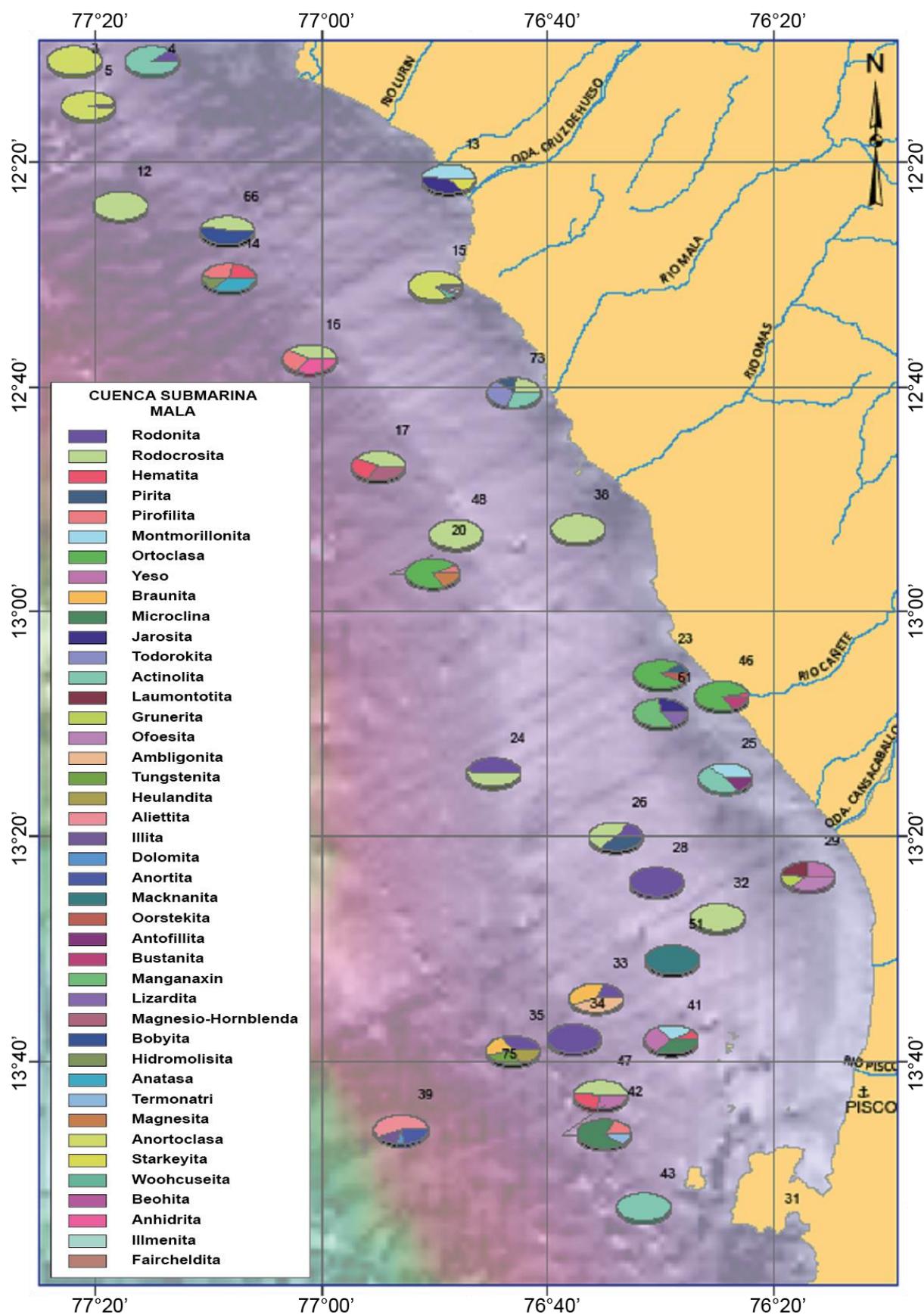


Figura 6.11. Mapas de distribución de minerales en la subcuenca marina Mala (Girón, 2009)

CAPÍTULO VII

REGISTROS DE CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL

7.1 GENERALIDADES

Hace unos 10,000 años, al finalizar el episodio frío conocido como *Dryas Reciente*, el mundo se tornó más cálido y húmedo, los glaciares se descongelaron, aumentó el caudal de los ríos que descendían hacia la costa, y el nivel del mar subió. Sin embargo, cambios climáticos conocidos como la Pequeña Edad de Hielo interrumpieron con un periodo frío que abarcó desde comienzos del siglo XIV hasta mediados del XIX, y que resultaron en la expansión de glaciares en el norte de Europa y Norte América; Los pueblos alpinos fueron arrasados por el avance de los glaciares y en Londres la gente podía patinar sobre el río Támesis. Pero, afectaron estos cambios lugares tan lejanos como América del Sur. La vida microscópica marina también se vio afectada por estos cambios, estudios micropaleontológicos de foraminíferos en la margen continental peruana muestran importantes variaciones en su distribución, composición isotópica y abundancia en esta época, reflejando cambios en la oxigenación, temperatura y productividad de las aguas y sedimentos de fondo.

7.2 FORAMINÍFEROS COMO BIOINDICADORES DE CAMBIOS CLIMÁTICOS

Desde la década de 1920 y después de la segunda guerra mundial el uso de los microfósiles en la industria petrolera mostró la importancia de sus aplicaciones en la estratigrafía, en particular se develó el gran potencial que representaba el uso de los foraminíferos en las investigaciones. Sus características ecológicas, metabólicas y evolutivas, así como su preservación en los sedimentos marinos, los convertía en una herramienta fundamental en cronología y en el desarrollo de modelos climáticos predictivos y ecológicos.

Los foraminíferos son organismos unicelulares, zooplanctónicos los que se caracterizan por presentar una pared celular endurecida o testa constituida por carbonato de calcio (CO_3Ca), la cual protege el citoplasma, otros construyen sus testas agregando granos de sedimento y restos biogénicos (Figura 7.1). Presentan formas de vida bentónica y planctónica, son un eslabón fundamental en las redes tróficas y ambientales de los océanos (Figura 7.2, 7.3). La temperatura, la profundidad, la salinidad, nutrientes y oxigenación del medio son factores determinantes en su metabolismo y ecología. Las diferentes especies, muestran tolerancia restringida a determinados rangos de estos factores. Su distribución biogeográfica, por tanto, estará en relación a las regiones marinas y latitudes que aportan las condiciones ambientales necesarias para su existencia. Esta íntima relación con su hábitat, se ve reflejado en un conjunto de caracteres funcionales, de su testa; tamaño, composición, forma, color, pared, dirección de enrollamiento, entre otros, los que sumados a sus patrones de distribución espacial y temporal brindan información para las reconstrucciones de los océanos del pasado.

Los foraminíferos han resistido implacables acontecimientos geológicos como las grandes extinciones del Cámbrico-Ordovícico, Ordovícico-Silúrico, Silúrico-Devónico, Pérmico- Triásico, Triásico-Jurásico y Cretácico-Paleógeno, sobreviviendo condiciones de estrés y logrando una gradual adaptación y recuperación. El registro de especies generalistas, especialistas y oportunistas a través de este registro geológico muestran estas crisis bióticas.

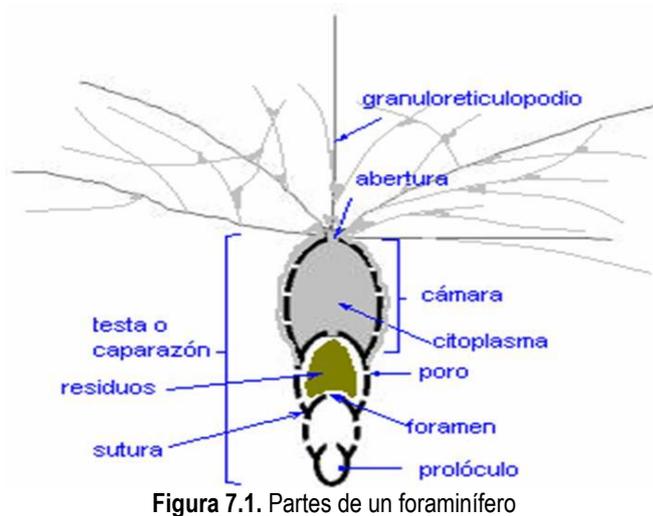


Figura 7.1. Partes de un foraminífero

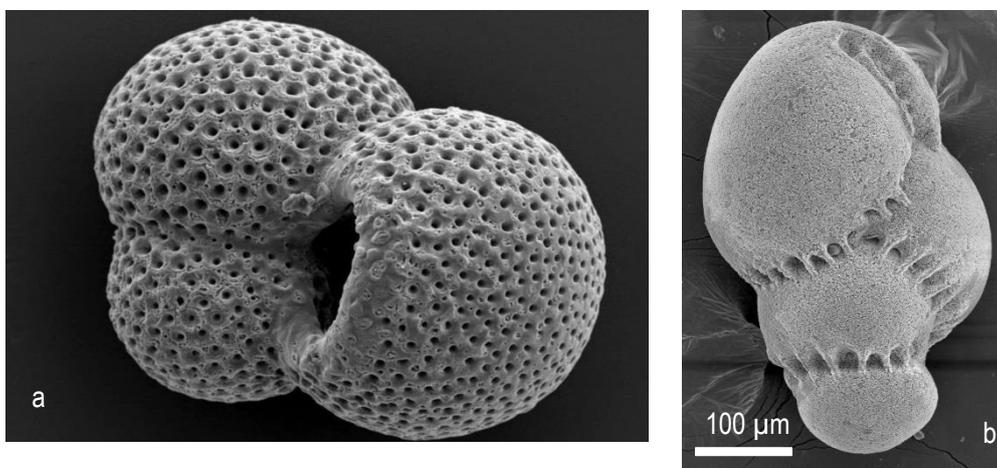


Figura 7.2. a). Foraminífero planctónico, viven y brindan información de la columna de agua (imagen tomada de Centro de instrumentación). b). *Virgulinitella fragilis branca*, foraminífero bentónico infaunal, viven introducidos algunos centímetros por debajo de la superficie, en los sedimentos. Brindan información de las condiciones biogeoquímicas de los sedimentos de fondo marino (Colectado de la plataforma continental peruana frente a Pisco, proyecto PALEOPECES).

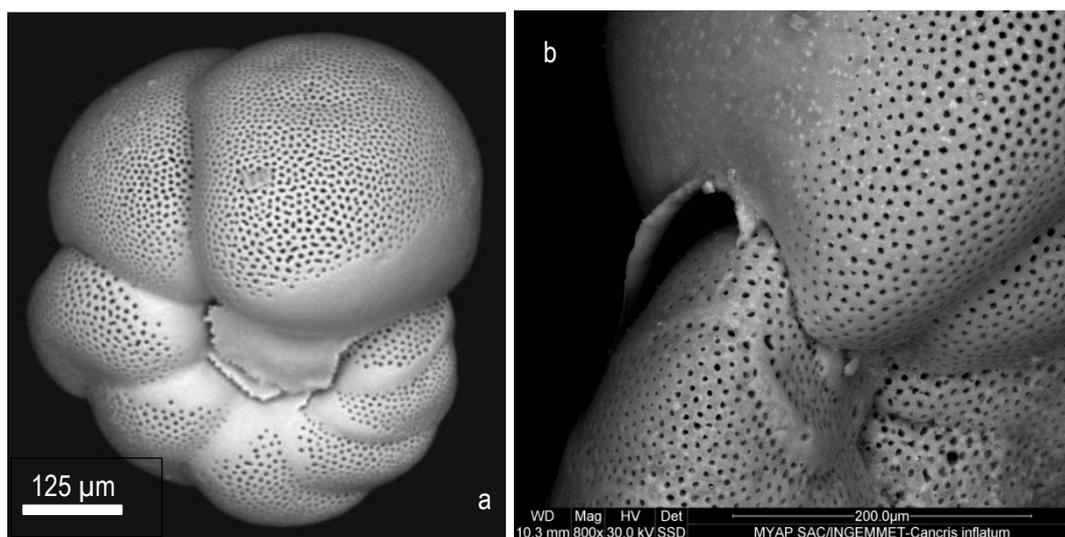


Figura 7.3. Foraminíferos bentónicos epifaunales, viven sobre la superficie del fondo brindan información de las condiciones biogeoquímicas de la interface agua-sedimento y sedimentos superficiales de fondo marino. A. *Cancris auriculus* (Fitchel & Moll) colectado de la plataforma continental peruana frente a Pisco, proyecto PALEOPECES. b. Vista de su abertura y pared perforada.

7.3 LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL PERÚ, HACE 700 AÑOS

En las reconstrucciones paleoceanográficas de sedimentos holocénicos, de la margen continental peruana, el uso de foraminíferos como bioindicadores, resulta de amplia aplicación. En el mar peruano, los sistemas de surgencia y productividad primaria han desarrollado una zona de mínimo oxígeno (ZMO), entre los 200 y 1200 m de profundidad, que inhibe la bioturbación en los sedimentos al impedir el desarrollo de macrofauna, constituyendo, los sedimentos un registro temporal continuo y a alta resolución. Los cambios comunitarios quedan impresos en el registro de foraminíferos constituyéndose en una herramienta útil para descifrar cambios en la circulación oceánica y su biogeoquímica y poder realizar reconstrucciones paleoceanográficas.

En la plataforma continental externa, y cerca al talud superior, entre los 299 a 400 metros bajo el nivel del mar, frente a Pisco y Callao, los depósitos sedimentarios holocénicos, están constituidos hacia la base por sedimentos detríticos-terrestres finamente laminados y hacia el techo por sedimentos diatomáceos/silíceos y altas concentraciones de materia orgánica con laminaciones gruesas (Gutiérrez et al., 2009). La mayor parte del registro contiene abundantes caparazones de foraminíferos fósiles (Morales et al, 2006).

Estudios micropaleontológicos realizados en estos sedimentos, en el marco del Proyecto Paleopeces: “Registros Paleoceanográficos de Alta Resolución en Sedimentos de la Zona de Mínimo Oxígeno del Perú Central” (IMARPE-IRD- INGEMMET, ISTO, UPCH, UR LOCEAN, entre otros), en los testigos B0405-13 y B0405-6 colectados en la zona de plataforma continental externa frente a Callao (12° 00'S y 72° 42'O) y cerca de la zona batial frente a Pisco (14°07.86' y 76°30.14'W, NW de Bahía Independencia), a 299 mbnm (Figura 7.4, 7.5), presentan una asociación de foraminíferos bentónicos con especies bioindicadores de los procesos de diagénesis temprana y oxigenación que actuaron hace 700 a 400 años (Datación Plomo 210) (Gutiérrez et al, 2009; Gutiérrez et al., 2006. Morales et al, 2006). 60 especies correspondientes a las familias: Bolivinidae (Figura 7.6 y Figura 7.7), Bolivinitidae, Buliminellidae (Figura 7.8), Bagginidae (Figura 7.9), Buliminidae (Figura 7.12), Cassidulinidae (Figura 7.10), Epistominidae, Fursenkoinidae, Hauerinidae, Nonionidae (Figura 7.13), Pseudoparrellidae (Figura 7.11) y 17 especies planctónicas de las familias Globigerinidae, Candeinidae, Globorotaliidae y Catapsydracidae, revelaron una alta abundancia y diversidad específica con especies características de zonas de mínima oxigenación destacando la especie *Bolivina seminuda*, oportunista que logra sobrevivir y dominar en este medio (Gutiérrez et al, 2006. Morales et al, 2007). Sin embargo, bioerosión en testas recalcificadas de foraminíferos, asociadas a briozoarios y granos de carbonato, evidencian variaciones geoquímicas del medio de mayor oxigenación.

Reconstruyendo este evento, hace 700 años la margen continental peruana sufrió un cambio abrupto en la línea base de parámetros biogeoquímicos, con gran cambio en las condiciones de óxido-reducción, hacia 1820, con una reducción del aporte terrígeno a la margen continental. Este cambio marca el paso de una fase de mayor oxigenación y menor productividad (~siglo XIV a 1820 AD) a una fase de menor oxigenación y mayor productividad (1820 AD - presente) (Gutiérrez, et al. (2007).

Al comparar estos registros a escala global en el Pacífico oriental y occidental se dan evidencias que nos permiten interpretar que el cambio de régimen biogeoquímico en el sistema de afloramiento de la corriente peruana fue inducido por cambios climáticos globales acontecidos al final de la Pequeña edad de Hielo “*Little Ice Age*” (LIA) evento climático acontecido entre los siglos XV y XIX, donde la intensa actividad volcánica y radiaciones solares bajas, resultaron en la expansión de glaciares en Europa y Norte América (Broecker, 2000), y condiciones áridas en los trópicos meridionales (Haug et al., 2001).

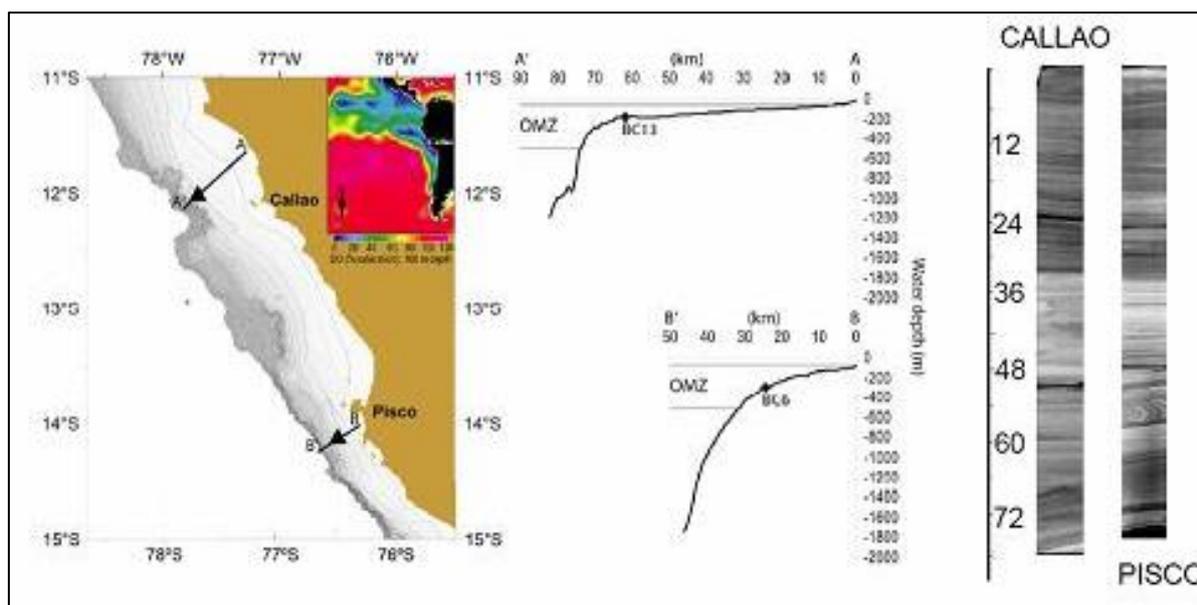


Figura 7.4. Perfil batimétrico A-A' mostrando la Zona de Mínimo Oxígeno (OMZ) y el punto de muestreo del testigo B0405-13 a 199 mbnm en la zona de la plataforma externa y el punto de muestreo del testigo B0405-6 Perfil batimétrico B-B' colectado a 299 mbnm en la Zona batial superior.



Figura 7.5. La identificación taxonómica y el análisis de las comunidades (diversidad y equidad), es el primer paso que da el investigador, para reconstruir las relaciones paleoecológicas, condiciones geoquímicas e identificar factores oceanográficos de la época. *Bolivina seminuda*, identificada en el testigo El testigo: B0405-6, es una especie oportunista, conocida por su capacidad para adaptarse a ambientes anóxicos, refleja las condiciones micróxicas en la plataforma continental peruana frente a Pisco y Callao.

BOLIVINA

Género:	BOLIVINA d'Orbigny 1839
Familia:	BOLIVINIDAE Glaessner, 1937 (Figura 7.6)
Descripción:	Testa cuneiforme, ligeramente deprimida con extremo basal aguzado y mayor diámetro cerca del borde oral; pared hialina calcárea; disposición de las cámaras biserial, bajas y anchas; Algunos géneros tienen cámaras y suturas parcialmente ocultas por costillas finas; abertura primaria terminal de forma ojival y sin labio. Tamaño: variable entre 200 y 300 μm .
Ambiente:	Vive en ambientes marinos de aguas frías a cálidas, desde la plataforma interna a batial. Introducidos en los primeros milímetros de sedimentos lodosos (organismo infaunal). Las variaciones morfológicas de la familia Bolivinidae responde a factores ambientales como oxigenación: <i>Bolivina spissa</i> en diferentes periodos de tiempo muestra fuertes diferencias en la densidad y forma de sus poros.

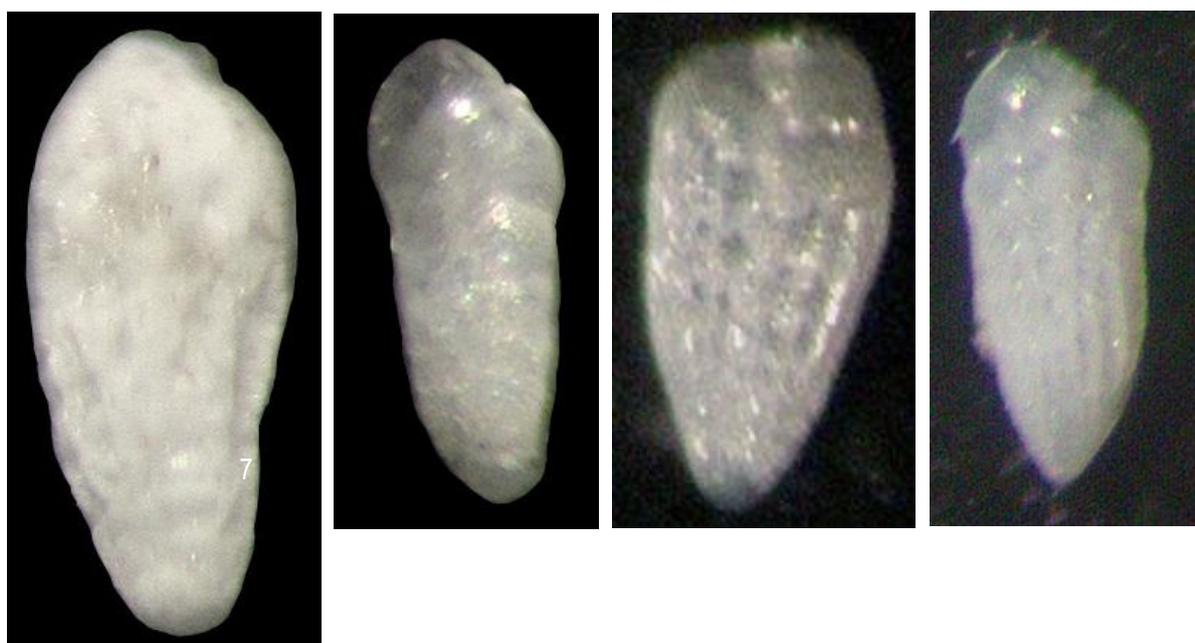


Figura 7.6. Especies del género *Bolivina* 1. *Bolivina seminuda* Cushman, 2. *Bolivina ordinaria* Phleger & Parker, 3, 4. *Bolivina plicata* d'Orbigny, 5. *Bolivina pacifica* Cushman & Mc Culloch, 6. *Bolivina costata* d'Orbigny, 7. *Bolivina striatula*.

BRIZALINA

Género:	BRIZALINA O. G. Costa, 1856
Familia:	BOLIVINIDAE Glaessner, 1937 (Figura 7.7)
Descripción:	Forma lanceolada, deprimida, extremo basal aguzado, extremo oral redondeado, vista lateral subaguda a subredondeada; pared hialina calcárea; cámaras biseriales, subglobulares, finamente perforadas: en la etapa temprana las cámaras son pequeñas, bajas y anchas, incrementándose rápidamente en tamaño hacia el extremo oral, alto igual al ancho; suturas profundas, curvadas, oblicuas a la periferia; abertura ojival grande, bordeada por un labio, diente interno. Altura entre 430µm a 690µm.
Ambiente:	Ambiente marino marginal a batial, de aguas frías a templadas. Modo de vida infaunal, libre, en sedimentos fangosos, detritívoros. Algunas especies son tolerantes a la disoxia.



Figura 7.7. *Brizalina pseudobeyrichi* (Cushman)

BULIMINELLA

Género:	BULIMINELLA Cushman, 1911
Familia:	BULIMINELLIDAE Hoefker, 1951 (Figura 7.8)
Descripción:	Conchilla alargada, globosa, extremo basal aguzado; enrollamiento trocospiral alto; pared calcárea, finamente perforada; cámaras globosas, anchas y bajas. Rápido crecimiento de las cámaras de la última vuelta, suturas profundas y suavemente curvadas. La abertura se ubica en la cámara final. Altura: 270µm a 430µm.
Ambiente:	Ambiente marino, zona de plataforma y batial superior, principalmente de aguas templadas. Infaunal, libre, detritívoro, de sedimentos lodosos.

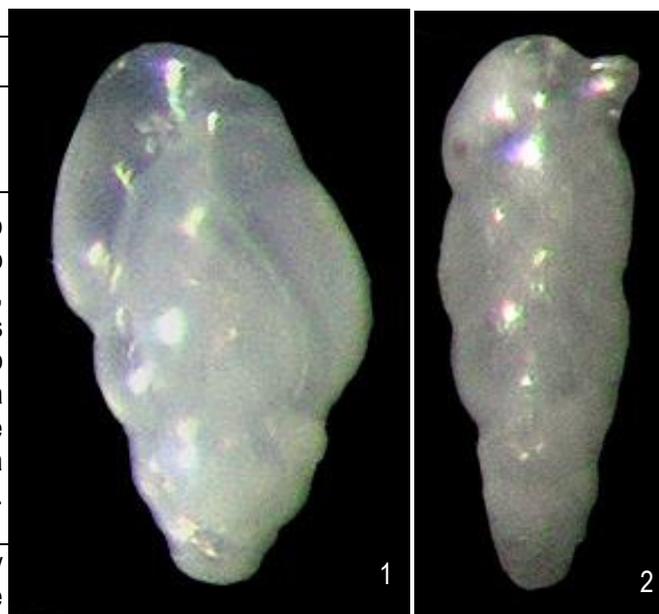


Figura 7.8. 1. *Buliminella curta* Cushman, 2. *Buliminella subfusiformis*.

CANCRIS

Género:	CANCRIS de Montfort, 1808
Familia:	BAGGINIDAE Cushman, 1927 (Figura 7.9)
Descripción:	Conchilla trocospiral baja, periferia subangulosa. Pared calcárea, finamente perforada, lado umbilical involuto, la última vuelta con cámaras, anchas, bajas e infladas. La última cámara es más alta que ancha, se extiende hacia el lóbulo cubriendo el ombligo. Lado espiral evoluta, lado umbilical con suturas profundas a ligeramente profundas y oblicuas hacia la periferia. Abertura interior marginal periférica hasta el ombligo. Altura: 670 μm a 290 μm .
Ambiente:	Ambiente marino, zona de plataforma (50 a 100 mbnm), de aguas templadas a subtropicales. Epifaunal, libre, detritívoro.

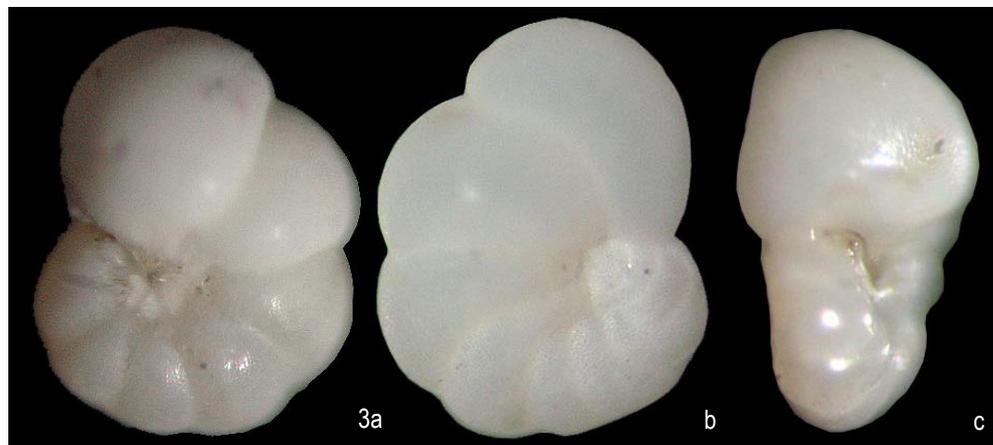
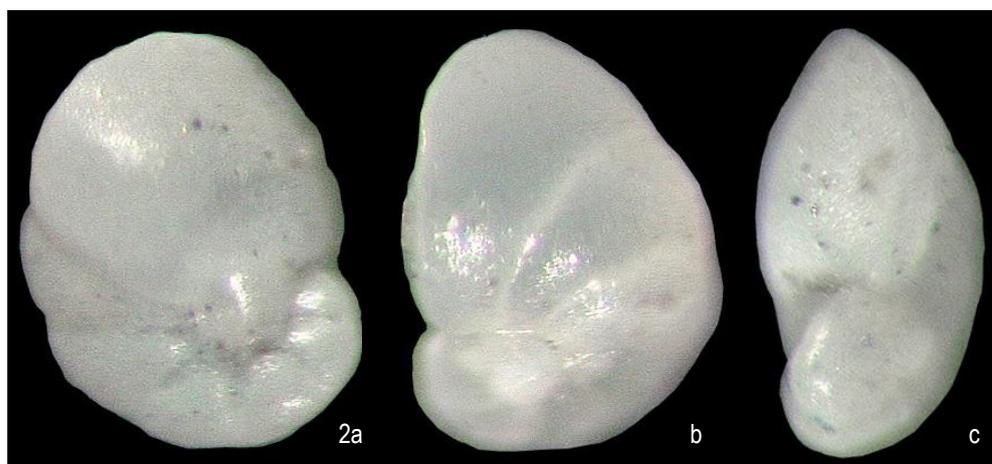
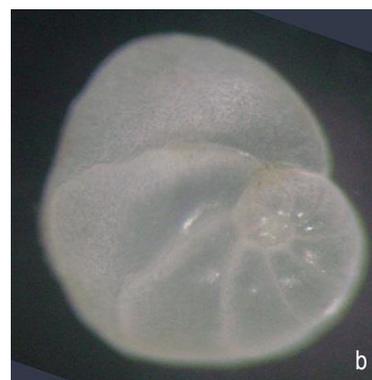
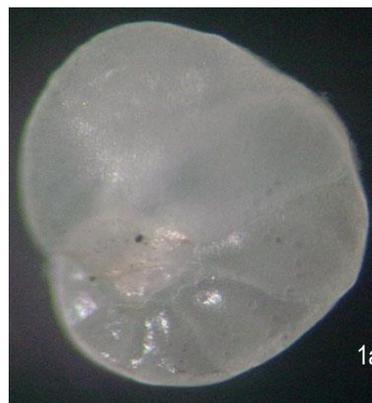


Figura 7.9. Especies de la Familia Bagginidae: 1. *Cancris carmenensis*, 2. *Cancris auriculus* (Fitchel & Moll), 3. *Cancris inflatus* (d'Orbigny). a). lado umbilical, b). lado espiral, c). lado lateral.

CASSIDULINA

Género:	CASSIDULINA d'Orbigny
Familia:	CASSIDULINIDAE d'Orbigny, 1839 Figura 7.10)
Descripción:	Conchilla de periferia lenticular, biumbonada, periferia subangular, pared calcárea; cámaras biserialmente dispuestas, con enrollamiento planoespiralado. De cada par de cámaras y de manera alterna una alcanza el umbo de un lado y se extiende hasta la mitad del otro lado antes de llegar al umbo opuesto. Cámaras bajas, anchas. Suturas profundas. Cara oral triangular con abertura tipo hendidura. El diámetro entre 360µm y 600µm.
Ambiente:	Ambiente marino, zona de plataforma (50 a 100 mbnm), de aguas templadas a subtropicales. Epifaunal, libre y detritívoro.



Figura 7.10. *Cassidulina limbata* Cushman & Hughes

EPISTOMINELLA

Género:	EPISTOMINELLA Husezima and Maruhasi, 1944
Familia:	PSEUDOPARRELLIDAE Voloshinova, 1952 (Figura 7.11)
Descripción:	Conchilla trocospiral, lado espiral aplanado, 2 a 2 ½ vueltas mostrando todas las cámaras, lado umbilical convexo, periferia subaguda; pared calcárea; cámaras anchas, muy bajas, planas, entre 8 y 10, poseen composición calcárea; suturas limbadas, superficiales, radiales, suavemente tangenciales a la periferia, en el lado espiral fuertemente curvadas y mas profundas; abertura cara oral triangular sobre la cual se encuentra la abertura en forma de hendidura. El diámetro de las testas varía entre 200µm y 370µm.
Ambiente:	Ambiente marino, de agua templada a fría, zona de plataforma a batial, en sedimentos fangosos. Epifaunal a infaunal somera, libre y detritívoro.

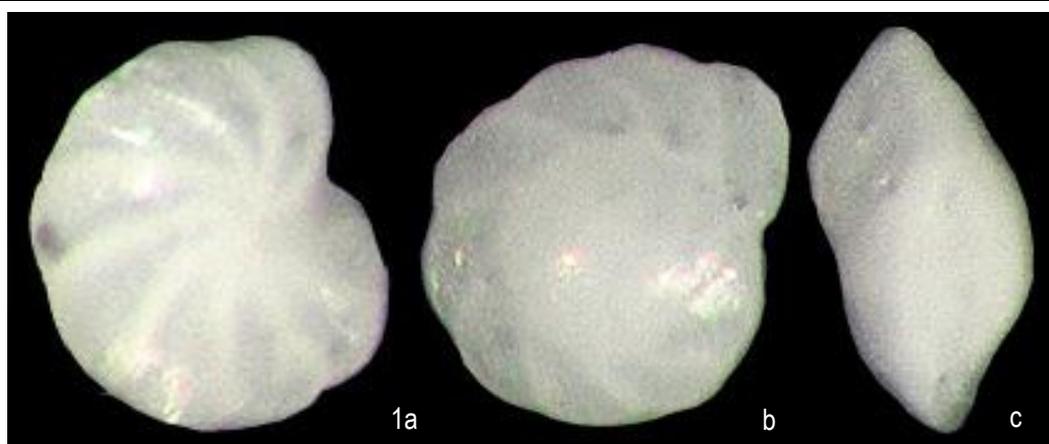


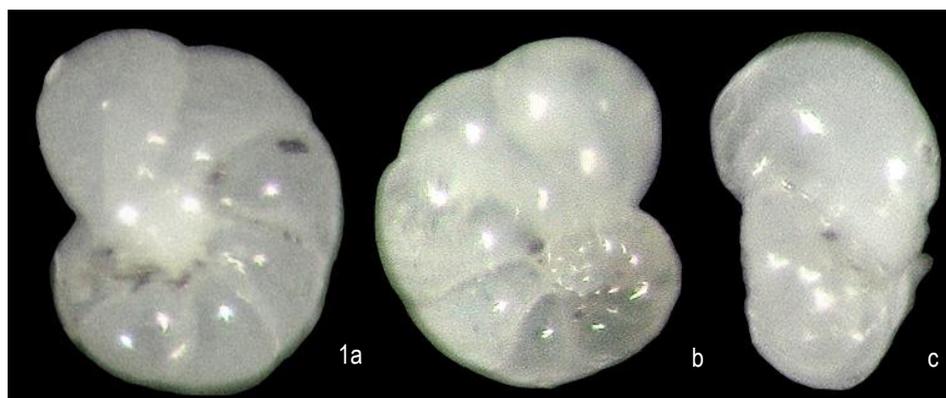
Figura 7.11. 1. *Epistominella pacifica* Cushman, a). lado umbilical, b). lado espiral, c). lado lateral.

GLOBOBULIMINA

Género:	GLOBOBULIMINA Cushman, 1927
Familia:	BULIMINIDAE Jones, 1875
Descripción:	Conchilla globular de sección subcircular, extremo basal aguzado, diámetro máximo en el extremo oral. Cámaras globulares con disposición triserial, cada una sobrelapada por la más joven, la última cámara engloba en gran parte a las anteriores. Pared hialina, calcárea, delgada, finamente perforada. Suturas profundas. Apertura ojival bordeada por una placa dentaria, fino labio, con proyección interna hacia la cámara anterior. Alto 394µm a 560µm.
Ambiente:	Ambiente marino de agua fría a templada, zona de plataforma a zona batial. Infaunal profundo, libre, sedimentos lodosos, tolera la disoxia, detritívoro.

Figura 7.12. *Globobulimina auriculata* (Bailey)**NONIONELLA**

Género:	NONIONELLA Cushman, 1926
Familia:	NONIONIDAE Schultze, 1854 (Figura 7.13)
Descripción:	Testa ligeramente compresionada con enrollamiento trocospiral bajo, periferia redondeada, lado espiralado parcialmente evolutivo alrededor de un ombligo, lado umbilical involuto. Cámaras numerosas, amplias y bajas, las vueltas se van alargando progresivamente. La última cámara presenta una proyección que sobresale del ombligo sobrelapando las sucesivas cámaras. Suturas curvadas, depresionadas, periferie redondeada. Abertura a modo de un pequeño arco ecuatorial interior marginal.
Ambiente:	Ambiente marino de aguas templadas a cálidas, zona de plataforma a zona batial superior (10–1000 m). Infaunal, libre, sedimentos lodosos. Algunas especies toleran la disoxia, detritívoro.

Figura 7.13. 1. *Nonionella stella* Cushman & Moyer. a). lado espiral, b). lado umbilical, c). lado lateral.

CAPÍTULO VIII

RECURSOS GEOLÓGICOS DE LA MARGEN CONTINENTAL PERUANA Y CUENCA PERÚ

8.1 GENERALIDADES

En las márgenes continentales y cuencas marinas se registran recursos minerales y energéticos cuyo origen está relacionado a tectonismo activo, procesos geoquímicos de fondo y afloramiento costero entre otros. Los más comunes son los nódulos polimetálicos ricos cobalto, cobre, hierro y níquel los cuales yacen en los mares abisales (Figura 8.1) (Rona, 2003). Las expediciones científicas como las del Challenger y Albatros realizadas durante los años 1872-1876, fueron las primeras en reportarlos en el piso oceánico (Figura 8.2). En el Perú se han encontrado depósitos de nódulos de manganeso con microconstituyentes a profundidades de 4,000 a 6,000 metros (Belousov, 1968).

Las fosforitas son otros de los recursos frecuentes, se forman en plataformas continentales con aguas enriquecidas con fósforo por procesos de afloramiento (*upwelling*), en el sector correspondiente a la plataforma continental peruana, desde la bahía de Sechura hasta Pimentel se han realizado operaciones de exploración de fosfatos. También se conocen los fangos metalíferos, se trata de sedimentos transportados mediante ríos y depositados en las márgenes continentales, de los cuales se extrae minerales pesados (rutilo, ilmenita, magnetita, tierras raras, zircón, granate), arenas auríferas y diamantes, existe un gran potencial de placeres metálicos en las costas de Sudamérica (Rona, 2003). En el Perú poco se conoce al respecto, sin embargo, se tienen playas y sedimentos de fondos someros con posibilidades de contener minerales pesados, deltas submarinos en los sectores de fuertes corrientes podrían contener depósitos minerales acarreados, en particular el delta del río Santa. Los hidratos de gas constituyen una forma alternativa de energía, se encuentran bajo condiciones de alta presión y temperatura (Collete et al., 2000).

8.2 HIDRATOS DE GAS

Los hidratos de gas son un grupo de sustancias químicas cristalinas, constituidas por agua y gases de poco peso molecular. Tienen una estructura clatrática o de jaula que incluyen moléculas de gas metano. Semejante al hielo, son conocidos también como hidratos de metano o clatratos. Se forman naturalmente al descomponerse la materia orgánica produciendo metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etano y propano (Figura 8.3). Estos hidratos se forman en los sedimentos de los fondos marinos y en tierra en las zonas de "permafrost" del Ártico (Figura 8.4) (Collett et al, 2000).

La exploración de hidratos de gas en sedimentos marinos se basa principalmente en la identificación de los denominados *bottom simulating reflector* (BSR) (Herbozo & Hubscher, 2013) en secciones sísmicas de reflexión, estos BSR se dan por el cambio en la impedancia acústica entre los sedimentos que contienen hidratos y los sedimentos con gas libre por debajo de la zona de estabilidad de hidratos; lo que origina una respuesta sísmica en la forma de un reflector paralelo al fondo marino, que en la mayoría de los casos coincide con la isoterma a la profundidad determinada y de polaridad inversa a la del reflector originado por el fondo marino (Tomasini et al., 2009).

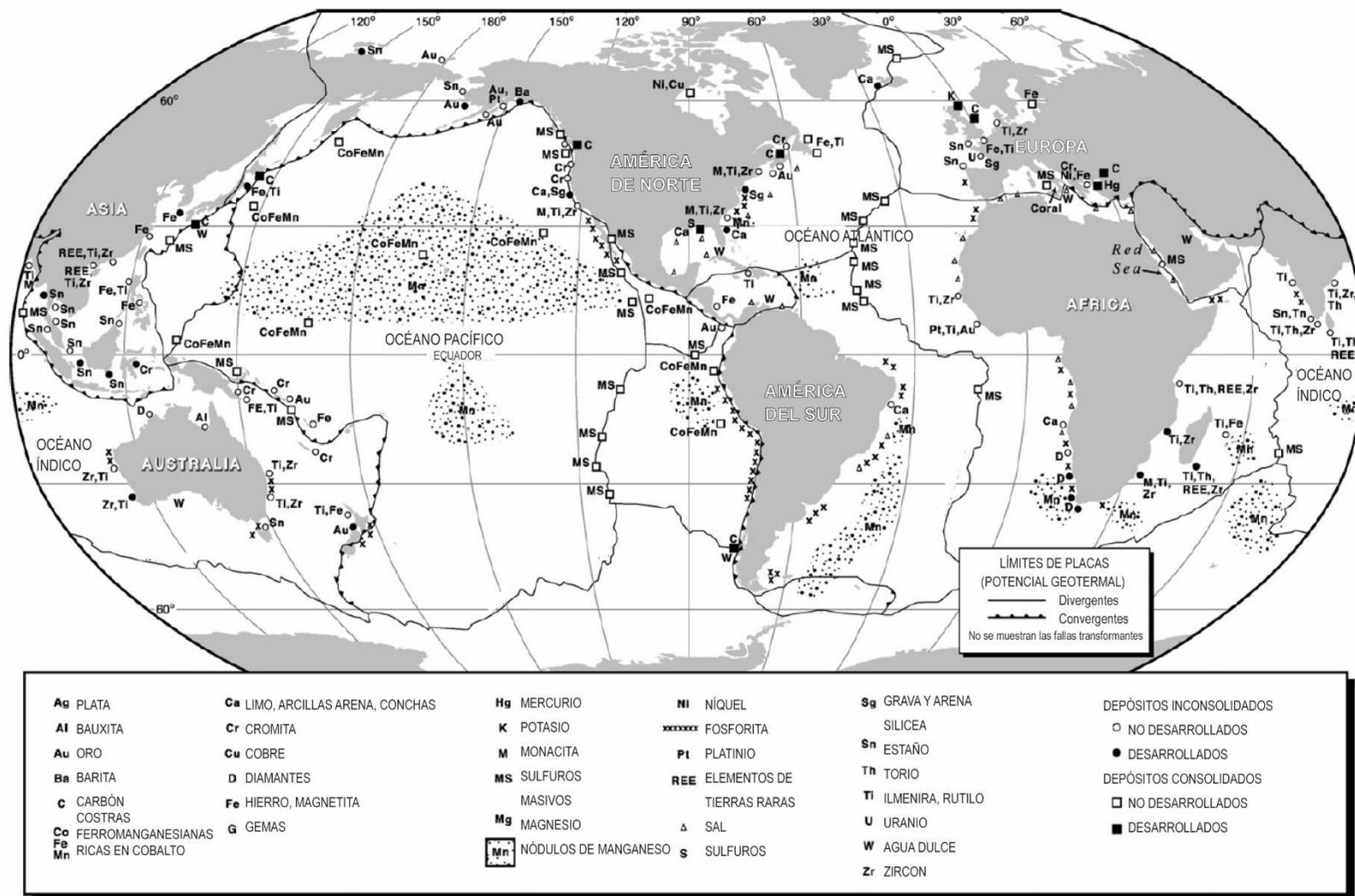


Figura 8.1 Distribución global de recursos minerales de fondo marino (Rona, 2008)

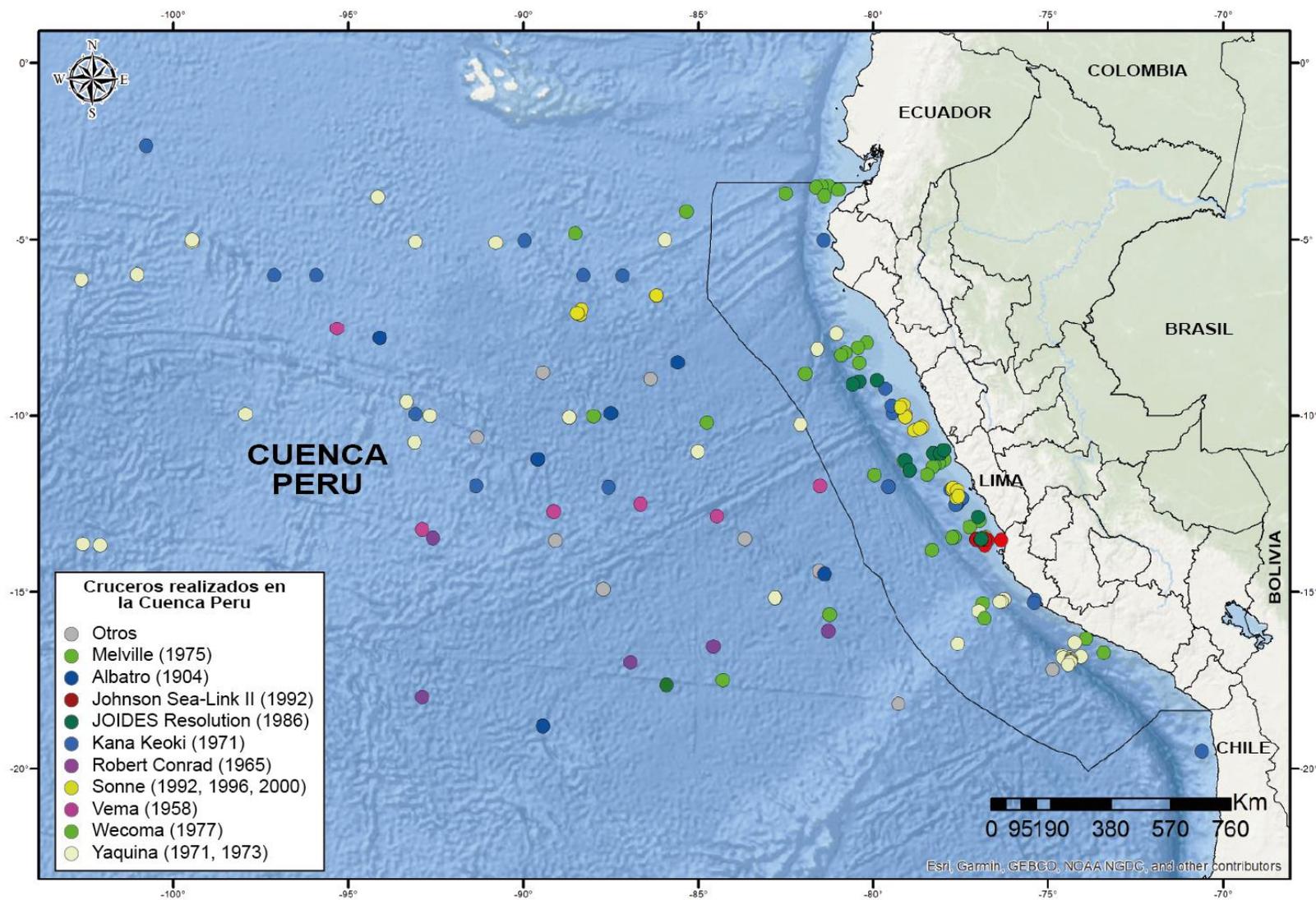


Figura 8.2. Área explorada y muestreada por proyectos de investigación internacionales para conocer el potencial de los recursos minerales en la margen continental peruana y cuenca Perú

En la margen peruana, se reportan hidratos de gas en la Cuenca Trujillo entre los $8^{\circ}00'$ y $8^{\circ}40'$, en el talud inferior relacionado a turbiditas y zonas con control tectónico extensional. Los BSRs se encuentran sobreyaciendo sedimentos del Mioceno y Plioceno e infrayaciendo turbiditas (Herbozo & Hubscher, 2013) (SONNE 149/2 (GEOPECO). El *Ocean Drilling Program* Leg 112 (ODP) recuperó hidratos de gas en los *sites* 685 y 688 en la margen continental externa entre los 9° y 11.5° S, en el talud inferior a profundidades de 5070 y 3820 m. respectivamente; en el Site 685 las muestras se tratan de lodos diatomáceos del Pleistoceno e hidratos a los 99 y 166 mbnm, mientras que en el Site 688 se encontró hidratos de gas mezclado con lodo negro a gris oscuro, a los 141 mbnm (Kvenvolden & Kastner, 1990). Los Hidratos de gas representan un recurso con gran potencial, se calcula que existen alrededor de 20,000 trillones de metros cúbicos a nivel mundial y sus mayores concentraciones se encontrarían costa afuera.



Figura 8.3. Hidratos de gas (tomado de Laboratorios de USGS)

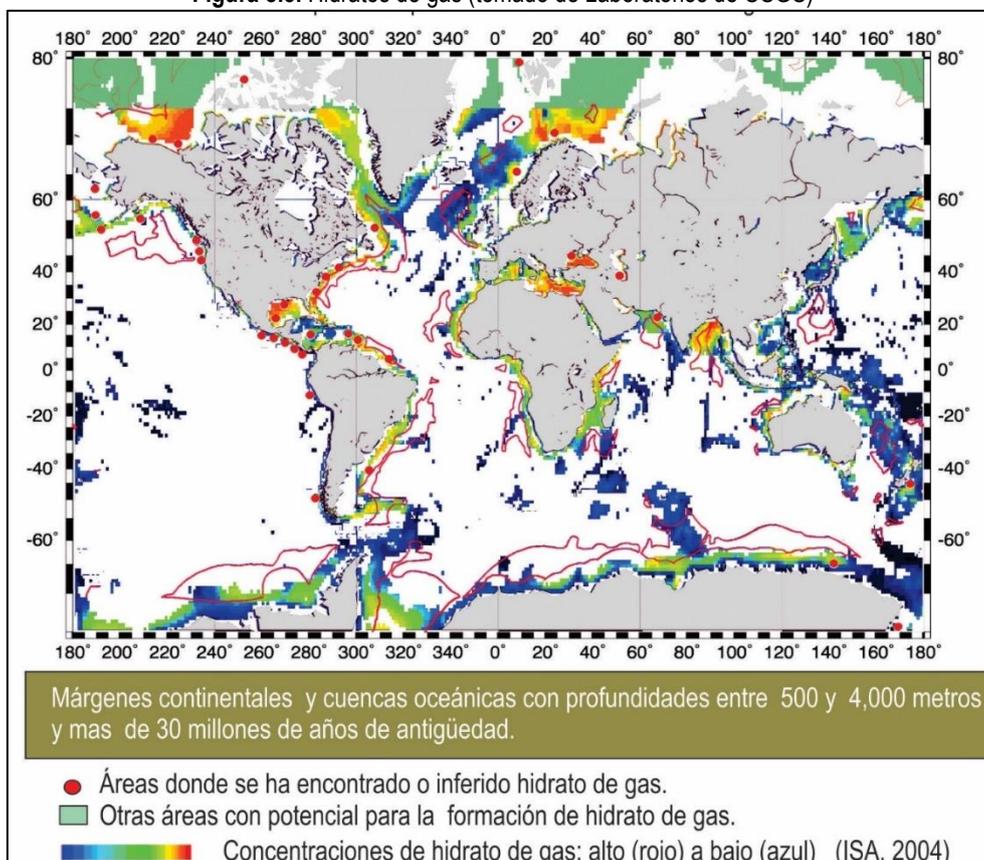


Figura 8.4. Áreas con potencial para la formación de hidratos de gas.

8.3. FOSFATOS MARINOS

El fósforo es el décimo elemento más abundante de la naturaleza, se sabe que los sedimentos continentales y suelos contienen alrededor de 0.15 % de P_2O_5 , las rocas ígneas un 0.07%, los sedimentos marinos 0.2% y los organismos marinos entre 0.3 -2.7 % de P_2O_5 . Existen alrededor de 200 minerales que contienen 1% o más de P_2O_5 sin embargo, la mayor parte del fósforo en la corteza terrestre ocurre en especies del grupo del apatito $Ca_5(PO_4)_3 (F, Cl, OH)$ (McKelvey, 1967). La fosforita es la roca sedimentaria no detrítica que contiene aproximadamente un 15 % de minerales fosfatados.

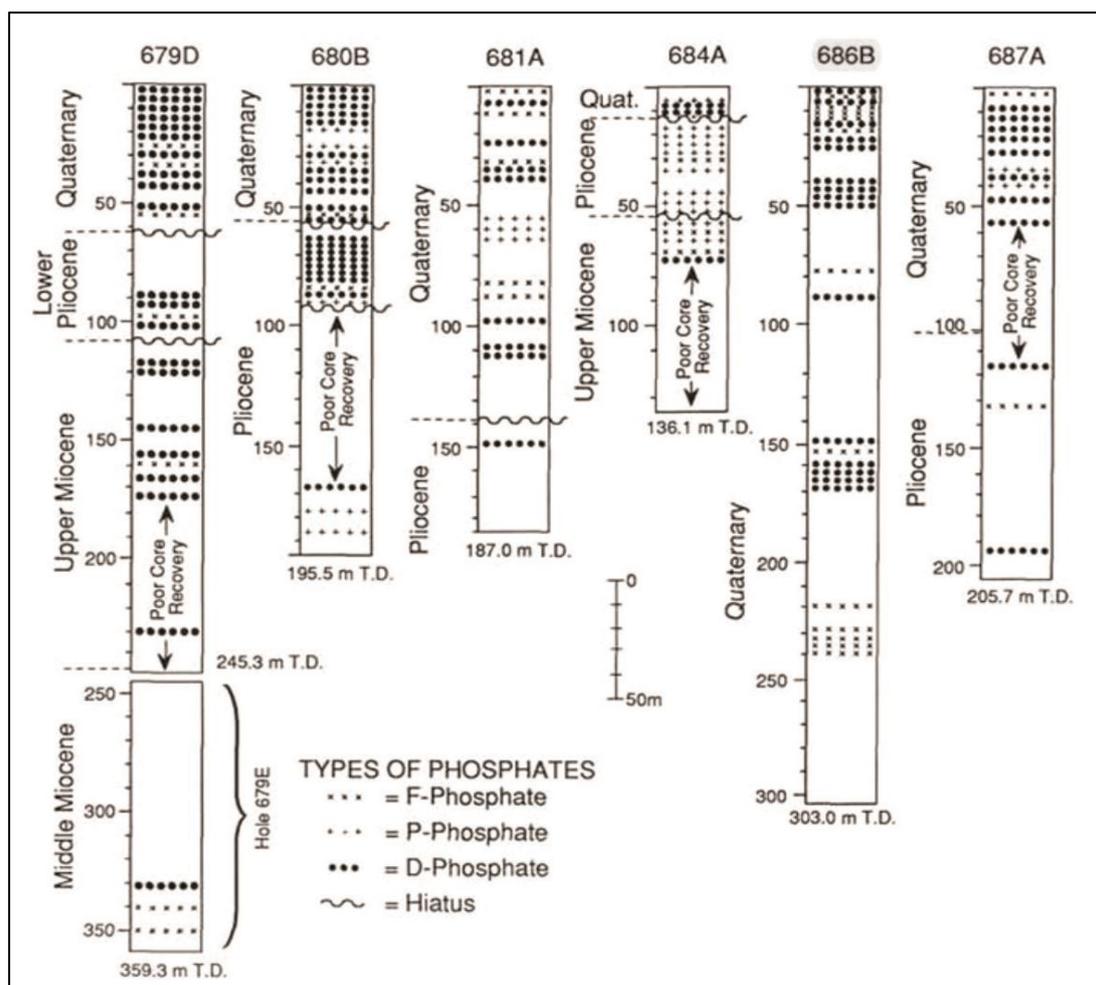
Depósitos marinos de fosfatos a lo largo de las márgenes continentales se presentan como: nódulos, masas irregulares, arenas y peloides asociados a procesos de *upwelling* y zonas de mínimo oxígeno. Las edades radiométricas de muchos depósitos de fosforitas alrededor del mundo indican edades pre Holocénicas, sin embargo, se conocen solo dos regiones en las que se tienen depósitos recientes de fosfatos, una frente a las costas de Sudáfrica y la otra frente a las costas de Perú – Chile (Burnett, 1977).

Las fosforitas se forman por el proceso denominado *fosfogénesis*, que se inicia con la supersaturación del agua poral con respecto al carbonato fluoroapatito (CFA) $[Ca, Na, Mg]_{10} [PO_4]_{6-x} [CO_3]_x F$ y $[F, OH]_2$ lo que concluye en su precipitación. Este proceso se cree toma lugar en la etapa temprana de diagénesis. En los sedimentos fosfogénicos, las condiciones subóxicas están establecidas justo debajo de la interface agua - sedimento, donde la materia orgánica es degradada, aquí los microbios juegan un papel crucial; tras este proceso la liberación de fosfatos de los óxidos e hidróxidos de hierro contribuyen a la concentración de fosfatos, seguidamente se forma la fosforita original (pristine phosphorite) la cual es enterrada o expuesta al re-trabajo de sedimentos y las corrientes (Arning et al., 2009).

En la margen continental peruana en el sector ubicado entre los 8° y 13° de Latitud Sur, estudios realizados sobre el origen de las fosforitas, y caracterización mineralógica (Burnett, 1974 y 1977; Garrison, 1990; Arning et al., 2009), muestran que, en la plataforma frente a Piura, Trujillo, Lima y Arequipa, las concentraciones promedio de P_2O_5 alcanzan el 25% Tabla 8.1. Muestras colectadas por el *Ocean Drilling Program* (ODP) Leg 112 en la plataforma y talud superior: Sites 679, 680, 681, 684, 686, y 687 contienen fosforitas en sedimentos del Mioceno medio, y Cuaternario (Garrison, 1990); los Sites 680, 681, 687, se encuentran en la plataforma interna a 150-300 mbnm cerca al borde superior de la zona de mínimo oxígeno actual; los sitios 679, 684, 687 se encuentran en la plataforma externa y talud superior en la zona de mínimo oxígeno a profundidades de 425 a 450 mbnm. Los depósitos de fosfatos reportan altas concentraciones, sobre todo las reportadas frente a las costas de La Libertad, Ancash, Lima e Ica. Las muestras colectadas por Leg 112 del ODP, reporta presencia de fosfatos cuaternarios y pliocénicos en los sitios 679, 680, 681, 684, 686, y 687 (Figura 8.5), siendo los más abundantes los de tipo D seguido por los de tipo F. (Tabla 8.1). Entre Punta Mal Paso de Asia y Tambo de Mora (12°48'S y 13°30'S), se reportan sedimentos con altas concentraciones de fosfatos de hasta 28%, a 60 km frente a las costas de Tambo de Mora a profundidades de 300 - 500 mbnm, estos fosfatos están asociados con glauconita.

FOSFATOS TIPO F (F-PHOSPHATES)	Pequeños nódulos, peloides, láminas de color claro y en arcillas diatomáceas. Color crema a amarillo claro, pardo. Consistencia de muy friable e inconsolidado a compacto. Son abundantes en aguas más profundas.
FOSFATOS TIPO P (P-PHOSPHATES)	Arenas fosforíticas dominadas por peloides fosfáticos, recubre granos, huesos y dientes de peces. Abundantes en el Site 684, cuenca Trujillo.
FOSFATOS TIPO D (D-PHOSPHATES)	Son fosfatos litificados, oscuros, nódulos densos y tierras duras. Forma irregular su tamaño varía entre 2-10 cm. De consistencia ligeramente porosa a compacto. Nódulos en capas delgadas junto con arenas fosfática tipo F. También en capas de gravas mayores a 1.5 m de grosor, concentrados en la porción gruesa, junto con fragmentos de huesos y conchas. Las tierras duras son la forma más abundante de Fosfatos D. Están presentes en secuencias del cuaternario y del Plioceno.

Tabla 8.1 Agrupación de fosforitas y sedimentos fosfóricos según características físicas (Garrison. 1990)



Fotografía 8.1 Nódulos y costras polimetálicas fueron colectadas del sector central de la margen continental peruana, por el Crucero SONNE SO-147(2000).

8.4. NÓDULOS Y COSTRAS POLIMETÁLICOS

La formación y abundancia de los nódulos polimetálicos en el océano depende de factores como las bajas tasas de sedimentación, disponibilidad de núcleos, zonas de alta productividad, la topografía del fondo marino y la proximidad a fuentes de suministro de metales. Se forman por precipitación de minerales de la columna de agua (hidrogenético) o precipitación de minerales contenidos en el agua poral de los sedimentos.

Su estructura interna suele consistir de capas concéntricas de crecimiento que rodean a un núcleo que puede ser hueso de ballena, diente de tiburón, un grano, fragmento de roca. Su diámetro varía entre 1-20 cm. Los más conocidos son los nódulos y costras de manganeso, están constituidos de manganeso, óxidos de hierro, rutilo, ópalo, nontronita, barita y alto contenido de metales de Cu, Ni, Co. Los minerales de manganeso predominantes en los nódulos son birnesita y todorokita.

Los nódulos ocurren sobre extensas áreas, cubierta por sedimento, en cuencas oceánicas profundas, desde el plano abisal de los océanos a profundidades entre 4,000 – 6,500 mbnm (Figura 8.6); mientras las costras se acumulan en los guyots y montes submarinos (*Secretariat of the Pacific Community, 2013*). Representan la mayor reserva de metales del mundo. Los nódulos polimetálicos de mayor interés científico y económico se encuentran en el Océano Índico, la Cuenca Perú y la Zona de Fractura Clarión Clipperton (costa occidental de México), esta última con la mayor cantidad de reservas terrestres de cobalto (Markussen, 1994). En la cuenca Perú se han registrado concentraciones promedio de 20% de manganeso (Tabla 8,2) (Rona, 2008).

Durante los años 1992, 1996 los cruceros SONNE 79, SONNE 106 y SONNE 147 colectaron nódulos y costras polimetálicas frente a la costa de Lima y en las áreas denominadas: SPN (Sediperu North=SO79) a los 7° S 91°O, SPS (Sediperu South=SO79) a los 8° S 91°O y D (Discol=SO106), a profundidades entre los 3,726 a 4,404 mbnm; encontrándose la mayor concentración de nódulos a los 4,000 mbnm.

Por otro lado, análisis de concentraciones de minerales en sedimentos de la margen muestran concentraciones de P2O5 con picos de 40% (Burnet, 1974). Entre Lima e Ica las concentraciones promedio alcanzan 30% a profundidades entre los 75 y 1000 mbnm. Los depósitos de manganeso están distribuidos a lo largo de la Cuenca Perú con altos valores de hasta 40 % de Mn y 2% de Cu. (Figuras 8.8 y 8.9).



Figura 8.6 Ambiente de formación de nódulos de manganeso (*Secretariat of the Pacific Community, 2013*)

Elemento	Atlántico	Pacífico	Indico	Todos los Océanos
Manganeso (Wt %)	13.25	20.1	15.25	18.6
Hierro (%)	16.97	11.4	14.23	12.4
Níquel (%)	0.32	0.76	0.43	0.66
Cobre (%)	0.13	0.54	0.25	0.45
Cobalto (%)	0.27	0.27	0.21	0.27
Zinc (%)	0.12	0.16	0.15	0.12
Plomo (%)	0.14	0.08	0.1	0.09
Indio (ppm)	9.32	6.64	3.48	
Uranio(ppm)	7.4	7.68	6.2	
Oro (ppb)	14.82	3.27	3.59	

Tabla 8.2 Promedio de concentraciones de metales en los nódulos de manganeso de diferentes océanos.

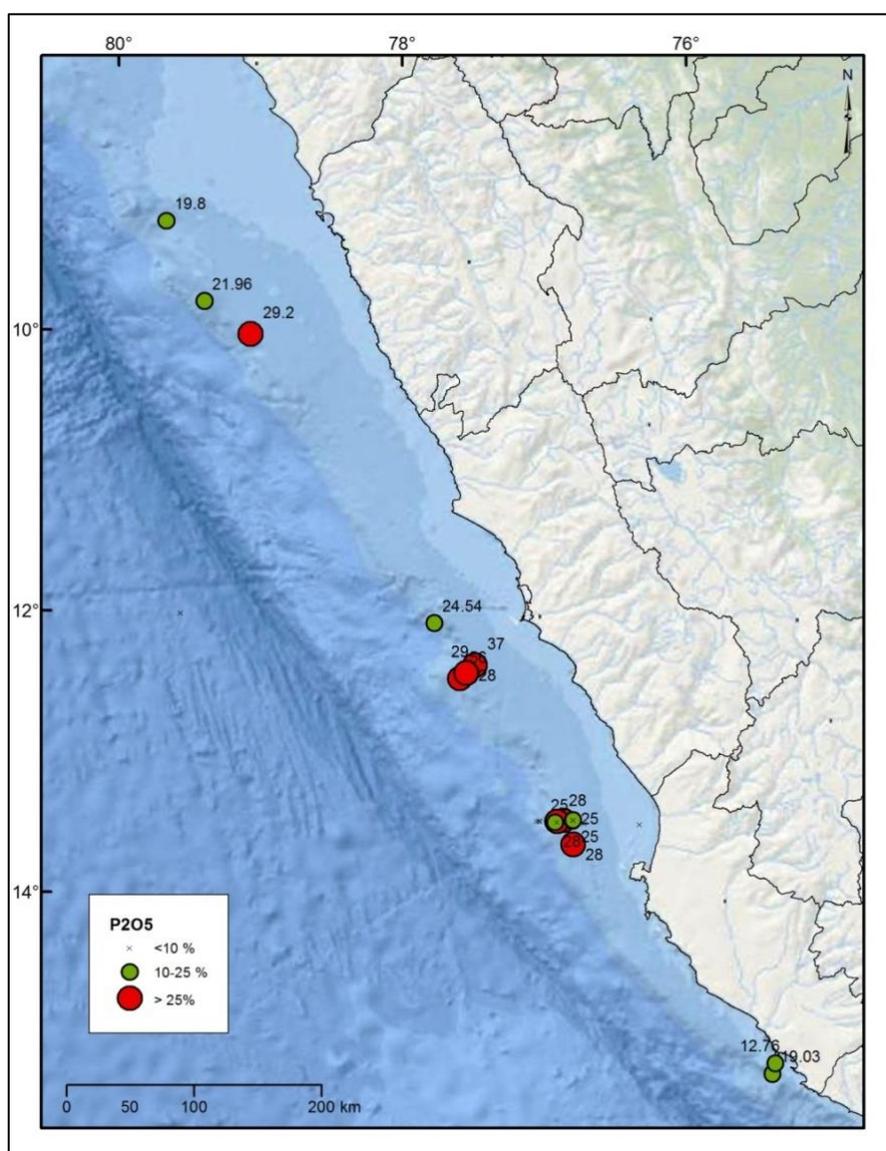


Figura 8.7 Distribución y concentraciones de fosfatos en la Margen Continental.

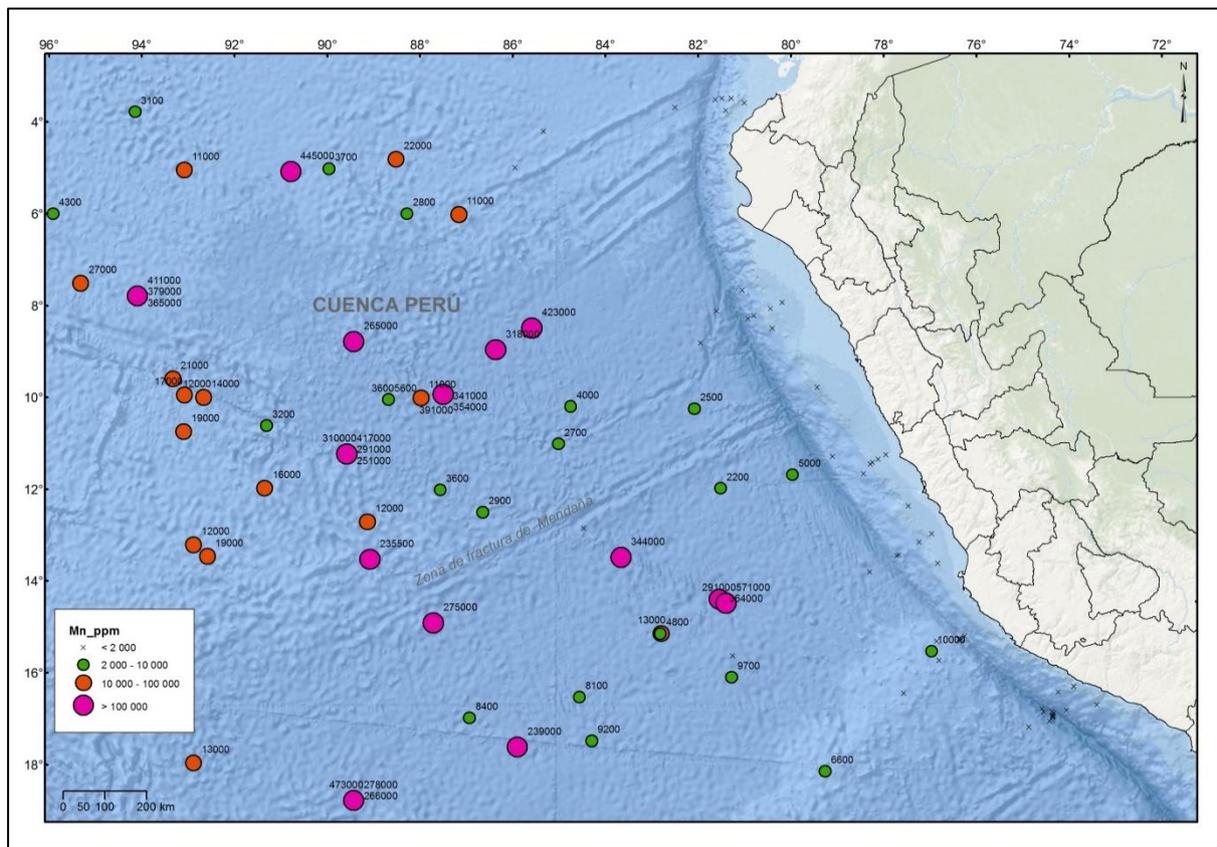


Figura 8.8. Concentraciones de Manganeso (ppm) en la Cuenca Perú

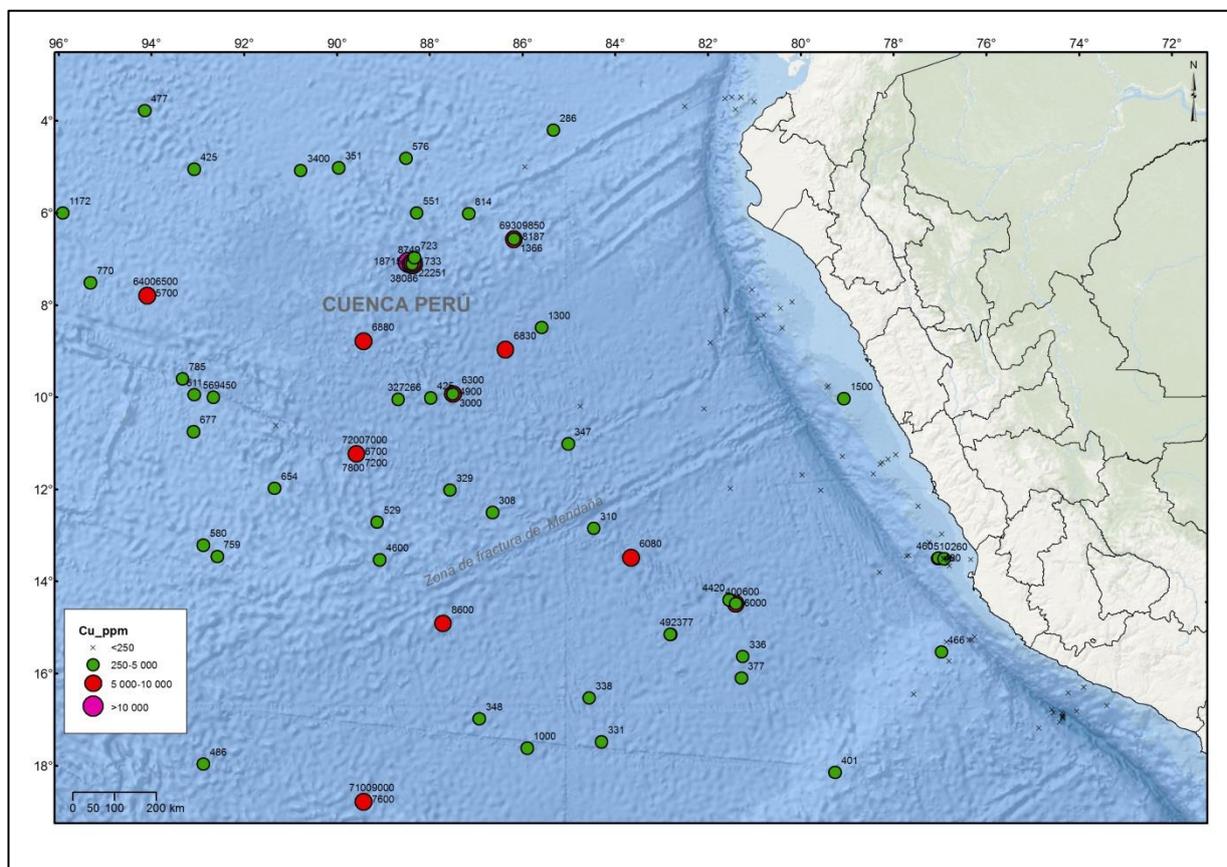


Figura 8.9. Concentraciones de Cobre (ppm) en la Cuenca Perú

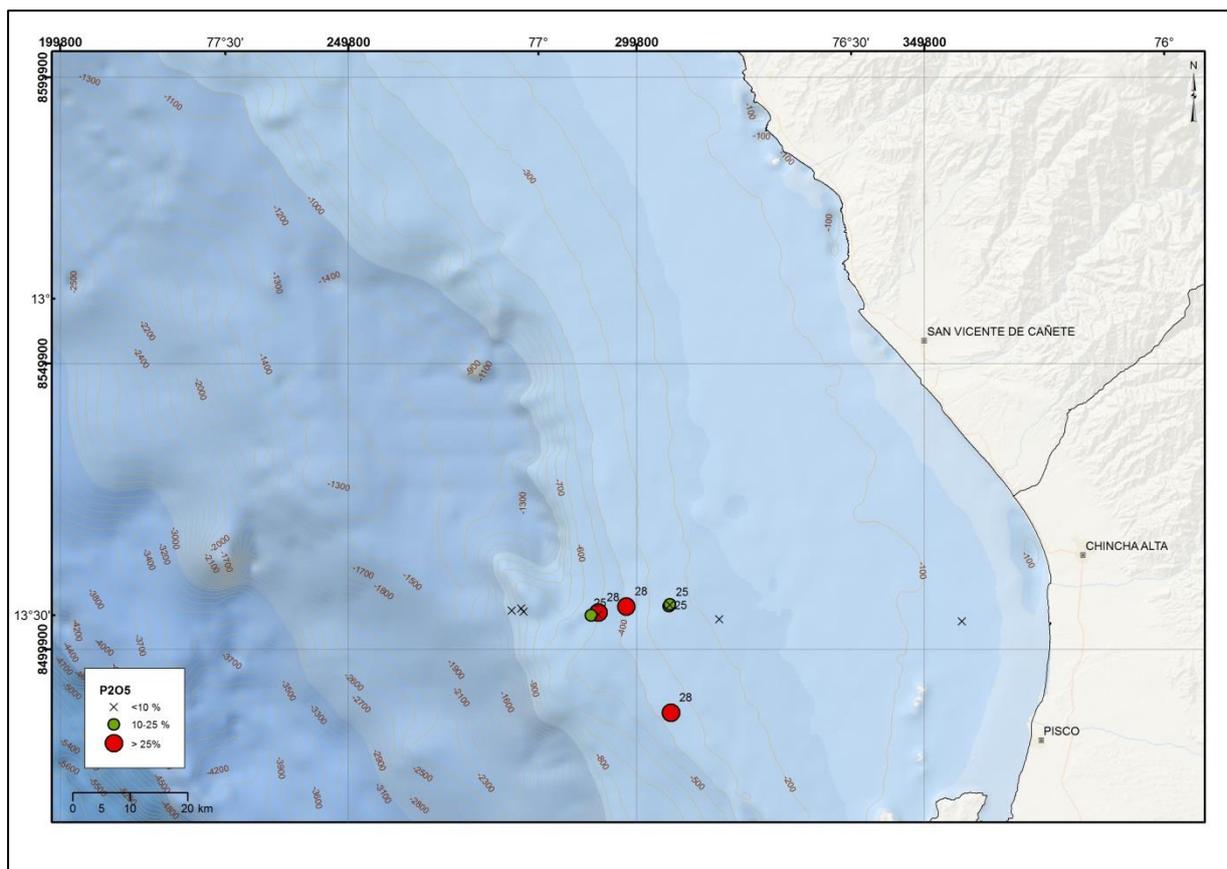


Figura 8.10. Área de estudio proyecto GR23, valores de P205 (Datos cruceros Johnson sea Link II, SONNE 147, Wecoma)

REFERENCIAS

- Arning, A.; Lückge, C.; Breuer, N.; Gussone, D.; Burgle, J. & Peckmann, (2009) - Genesis of phosphorite crusts off Peru. *Marine Geology*, 262: 68–8.
- Aspden, J.A.; Mccourt, W.J. & Brook, M. (1987) - Geometrical control of subduction-related magmatism: The Mesozoic and Cenozoic plutonic history of Western Colombia. *Journal of the Geological Society London*, vol. 144, p. 893–905.
- American Association of Petroleum Geologists (1982) - Plate Tectonic Map of the Circum-Pacific region: southeast quadrant.
- Barazangi, M. & Isacks, B. (1976) - Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4: 686-692.
- Bartolomé, R. (2002) - *Evolución tectónica del margen continental oeste de México: Fosa mesoamericana y Golfo de California* (CORTES P96). Tesis doctoral, Departamento de Geodinámica y Geofísica de la Universitat de Barcelona Programa de doctorado de tectónica y geofísica, bienio 9.
- Belousov, V.V. (1970) - Against the hypothesis of ocean-floor spreading. *Tectonophysics*, 9: 489-511.
- Blakey, R. (2014) - Global Paleogeography maps. (consulta: año 2016). Disponible en: URL <https://www2.nau.edu/rcb7/globaltext2.html>
- Broecker, W.S. (2000) - Abrupt climate change: causal constraints provided by the paleoclimate record. *Earth-Science Reviews*. 51(1-4):137-154.
- Burnett, W. (1974) - Phosphorite deposits from the sea floor off Peru and Chile: Radiochemical and geochemical investigations concerning their origin. HIG-74-3.
- Burnett, W. (1977) - Geochemistry and origin of phosphorite deposits from off Peru and Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 88(6): 813-823.
- Carlotto, V.; Quispe, J.; Acosta H.; Rodríguez, R.; Romero, D.; Cerpa, L.; Mamani, M.; Díaz, E.; Navarro, P.; Jaimes, F.; Velarde, T.; Lu, S. & Cueva, E. (2009) - Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú: Geotectonic domains as tool for metalogenetic mapping in Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica Perú*, 103: 1-89.
- Collett, T.; Lewis, R. & Uchida, T. (2000) - El creciente interes en los hidratos de gas, *Oilfield Review*. 12: 46-61. (consulta: año 2015). Disponible en: http://www.slb.com/resources/publications/industry_articles/oilfield_review/2000/or_2000_sp_aut04_hidratosdegas.aspx
- Constitución Política del Perú (1993)
- Couch, R., & Whitsett, R. M. (1981) - Structures of the Nazca Ridge and the continental shelf and slope of southern Peru, in Nazca Plate: Crustal Formation and Andean Convergence, edited by L. D. Kulm et al., Mem. Geol. Soc. Am., 154: 569-586.
- Coulbourn, W. T., & Moberly, R. (1977) - Structural evidence of the evolution of fore - arc basins off South America. *Canada Journal of Earth*. 1: 102-116.
- Cornejo, T.; Morales, M. & Chacaltana, C. (2009) - Distribución granulométrica y caracterización mineralógica de los sedimentos superficiales de la plataforma continental del Perú septentrional entre los paralelos 7°30' y 11°30' Sur. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 103: 265-269.
- Cornejo, T. (2011) - *Caracterización mineralógica de los sedimentos cuaternarios de la Plataforma Continental del norte del Perú*. Tesis de grado, Universidad Nacional San Agustín Arequipa. 185 p.
- Declaración conjunta sobre el reconocimiento Internacional del Golfo Guayaquil como Bahía Histórica, 23 de noviembre de 2012.
- Decreto Supremo N° 781, 1° de agosto de 1947.
- Decreto Supremo N° 035-2014-RE. Aprueban la Carta anexa que sustituye a la Carta que grafica el límite exterior - sector sur - del dominio marítimo del Perú.
- Duperret, A.; Burgois, J.; Lagabrielle, & Suess, E. (1995). Slope instabilities at an active continental margin: large-scale polyphase submarine slides along the northern Peruvian between 5°S and 6°S latitude. *Marine Geology*, 122: 303-328.
- Fisher R.L. (1956) - Preliminary report on Expedition Downwind, IGY General Report Ser., 2, IGY World Data Center A, Washington. 58p.

- Gálvez-Larach, M. (2009) - Montes submarinos de Nazca y Sala y Gómez: una revisión para el manejo y conservación. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 37(3): 479-500
- Garrison, R.; Kastner, M. (1990) - Phosphatic sediments and rocks recovered from The Peru margin during ODP leg 112. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, v. 112, chapter 8.
- Giron, I. (2009) - *Caracterización mineralógica de los sedimentos cuaternarios de la plataforma continental del Perú Central*. Tesis para optar el título profesional de ingeniero Geólogo, Abril 2009. Lima – Perú.
- Gutierrez, D. et al. (2007) - Regímenes biogeoquímicos seculares en el ecosistema de afloramiento peruano y cambios océano-climáticos durante los últimos 700 años. En: Congreso de Ciencias del Mar del Perú. Lambayeque, 2007. Resúmenes extendidos. Lambayeque.
- Gutierrez, D.; Sifeddine, A.; Reyss J.; Vargas, G.; Velazco, F.; Salvattecí, R.; Ferreira, V.; Ortlieb, L.; Field, D.; Baumgartner, T.; Boussafir, M.; Boucher, H.; Valdes, J.; Marinovic, L.; Soler, P. & Tapia, P. (2006) - Anoxic sediments off Central Peru record interannual to multidecadal changes of climate and upwelling ecosystem during the last two centuries. *Advances in Geosciences*, 6: 119–125.
- Gutierrez, D.; Sifeddine, A.; Field, D.; Ortlieb, L.; Vargas, G.; Chavez, P., Velazco, F., Ferreira, V.; Tapia, P.; Salvattecí, P., Boucher, H., Morales, M. del C., Valdes, J.; Reyss, L.; Campusano, A.; Boussafir, M., Mandeng-Yogo, M., Garcia, M. & Baumgartner, T. (2009) - Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age, *Biogeosciences*, 6: 835–848.
- Haase, K.M.; Stoffers, P. & Garbe-Schonberg, C.D. (1997) -The petrogenetic evolution of lavas from Easter Island and neighboring seamounts, near-ridge hotspot volcanoes in the SE Pacific. *Journal of Petrology*, 38(6): 785–813.
- Hagen, A. & Moberly, R. (1994) -Tectonic effects of a subducting aseismic ridge: The subduction of the Nazca Ridge at the Peru Trench. *Mar. Geophys. Res*, 16: 145– 161.
- Hampel, A. (2002) - The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: A re-evaluation. *Earth Planetary Science Letters*, 203: 665-679.
- Hampel, A., Kukowski, N., Bialas J., Huebscher C., Heinbockel, R., (2004). Ridge Subduction at an erosive margin: The collision zone of the Nazca Ridge in southern Peru. *Journal of Geophysical Research*, 109: 1-19.
- Hayes, D.E. (1966) - A geophysical investigation of the Peru-Chile Trench. *Journal Mar. Geol.*, 4:309-351
- Haug, G.H.; Hughen, K.; Sigman, D.M.; Peterson, L.C.; Rohl, U. (2001) – Southward migration of the interplation convergence zone through the Holocene, *Science*, 293:1304-1308.
- Herbozo, G. & Hubscher, (2013) - Influence of recent depositional and tectonic controls on marine gas hydrates in Trujillo Basin, Peru Margin. *Marine Geology*, 340: 30-48.
- Jaillard, E., (1990) - Evolución de la margen andina en el norte del Perú desde el Aptiano Superior hasta el Senoniano. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 81: 3-13.
- Kious, J. y Tilling, R. (2014) - This dynamic earth: the story of Plate Tectonics, online version 1.18; URL: <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html>
- Kvenvolden, K. & Kastner, M. (1990) - Gas hydrates of the Peruvian outer continental margin. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 112 (32).
- Kudrass, H.R. and Cruise Participants (2000) - Cruise Report SO-147 'Peru-Upwelling', Valparaíso 29.05.2000-Callao 03.07.2000, Federal Institute for Geoscience and Natural Resources, BGR Hannover. 238 p.
- Kukowski, N.; Hampel, A.; Hoth, S. & Bialas, J. (2008) - Morphotectonic and morphometric analysis of the Nazca plate and the adjacent offshore Peruvian continental slope - Implications for submarine landscape evolution, *Marine Geology*, 254 (1-2): 107–120.
- Kulm, L. D.; Dymond, J. & Scheidegger, K. F. (1983) - Nazca plate and Andean forearc studies. *Geodynamics series*, 9. 170 p.
- Kulm, L.; Thornburg, T.; Suess, E.; Resig, J.; Fryer, P. (1988) - Clastic, diagenetic, and metamorphic lithologies of a subsiding continental block: central Peru forearc. *In* Suess, E., von Huene, R., et al., Proc. ODP, Init. Repts., 112: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 91–107

- Li, C. (1995) - Forearc structures and tectonics in the southern Peru—northern Chile Continental Margin. *Marine Geophysical Researches*. 17(1):97-113
- Litherland, M.; Aspden, J. A. & Jemielita, R. A. (1994) - The Metamorphic Belts of Ecuador. *British Geological Survey, Overseas Memoir* 11, 147 p.
- Lonsdale, P. (2005) – Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*. 404: 237– 264.
- Macharé, J.; Sebrier, M.; Huaman, D. & Mercier, J. (1986) - Tectónica cenozoica de la margen continental peruana. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 76: 45-77.
- Markussen, J.M. (1994) – Deep seabed mining and the environment – Consequences, perceptions, and regulations. In Bergesen, H.O. & Parmann, G. Green Globe yearbook of international co-operation on environment and development. Oxford, United Kingdom, Oxford University Press, 31-39.
- Masías, J. (1976) - *Morphology, shallow structure and evolution of the Peruvian Continental margin, 6° to 18°S*. Tesis M.Sc., Corvallis, Oregon State University, 92 p.
- Megard, F. (1978) - Etude géologique des Andes du Pérou central contribution à l'étude géologique des Andes N°1. Paris, memoires ORSTOM, n°86, 310 p.
- McKelvey, V. E. (1967) - Phosphate deposits. *Geological Survey Bulletin* 1252-D.
- Morales, M.; Field, D.; Mayor S.; Gutiérrez D.; Sifeddine, A.; Ortlieb, L.; Ferreira, V.; Salvattecí, R. & Velazco, F. (2007). Variaciones de Foraminíferos de los últimos 460 años en sedimentos laminados de la Plataforma Continental Peruana. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 101: 5-18.
- Müller, R.D.; Sdrolias, M.; Gaina, C. & Roest, W.R. (2008) - Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. *Geochem Geophys Geosyst.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.
- Naar, D.F., K. Johnson, D. Pyle, P. Wessel, R.A. Duncan, J. Mahoney, (2001). RAPA NUI 2001: Cruise report for Leg 6 of the Drift expedition aboard the R/V Revelle. http://www.soest.hawaii.edu/wessel/drft06rr/drft_06rr.report.html.
- Pardo A., & Sanz, V. (1979) - Estratigrafía del curso medio del río la Leche. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 60: 251-266.
- Pecher, I.; Kukowski, N.; Hübscher, C.; Greinert, J.; Bialas, J. & el Grupo de trabajo GEOPECO (2001) - The link between bottom-simulating reflections and methane flux into the gas hydrate stability zone – new evidence from Lima Basin, Peru Margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 185: 343 – 354.
- Puig P. & Palanques A. (1998) - Temporal variability and composition of settling particle fluxes on the Barcelona continental margin (Northwestern Mediterranean). *Journal of Marine Research*, 56(3):639-654.
- Reinhardt, L., Kudrass, H.R., Lückge, A., Wiedicke, M., Wunderlich, J., Wendt, G., 2002. High-resolution sediment echosounding off Peru: Late Quaternary depositional sequences and sedimentary structures of a current-dominated shelf. *Mar. Geophys. Res.* 23: 335–351.
- Romero, D.; Valencia, K.; Alarcón, P.; Peña, D. & Ramos, V. (2013) - The offshore basement of Perú: Evidence for different igneous and metamorphic domains in the forearc. *Journal of South American Earth Sciences*, 42: 47-60.
- Romeuf N.; Soler P.; Jaillard É.; Aguirre L.; Feraud, G. & Ruffet, G., (1995) - Middle Jurassic volcanism in the northern and Central Andes. *Revista Geológica de Chile*, 22(2): 245-259.
- Rona, P. (2003) - Resources of the sea floor. *Science*, 299(5607): 673-674.
- Rona, P. (2008) - The changing vision of marine minerals, *Ore Geology Reviews*, 33: 618-666.
- Roperch, P. & Carlier, G. (1992) - Paleomagnetism of Mesozoic rocks from the central Andes of southern Peru: Importance of rotations in the development of the Bolivian orocline. *J. Geophys. Res.* 97(B12), 17233–17249.
- Secretariat of the Pacific Community (2013) - Deep Sea Minerals: Manganese Nodules, a physical, biological, environmental, and technical review. v. 1B, SPC.
- Salisbury, M.H., Scott, J.H., Auroux, C.A., et al., (1986) - Proc. ODP, Init. Repts., 102: College Station, TX (Ocean Drilling Program). doi:10.2973/odp.proc.ir.102 p.
- Samamé, M. (1985) - Peru: a mining country. Vol. IV, part 1: Ore deposits. Lima. 352 p.

- Sánchez, G., Calienes, R. & Zuta, S. (2000) - The 1997-98 El Niño and its effects on the coastal marine ecosystem off Peru. CALCOFI Rep., 41: 62-86.
- Schweigger, E. (1964) - El Litoral Peruano (Segunda edición). Universidad Federico Villareal, Lima, Perú 435 p.
- Sifeddine, A.; Gutiérrez, D.; Ortlieb, L.; Boucher, H.; Velazco, F.; Field, Vargas, G. & Boussafir, M. (2008) - Laminated sediments from the central peruvian continental slope: A 500-year record of upwelling system productivity, terrestrial runoff and redox conditions. *Progress in Oceanography*, 79(2008): 190–197.
- Teves, N. & Evangelista, E. (1976) - Las 200 millas de mar territorial peruano y sus fondos marinos. *Boletín de la sociedad geológica del Perú*. 53: 59-74.
- Tomasini J.; De Santa Ana, H. (2009) - ANCAP, Exploración y Producción; hidratos de gas natural: estado actual de la investigación regional y en Uruguay. Aspectos tecnológicos y tendencias futuras; Taller de Recursos Energéticos del Uruguay; 2009; Montevideo, Uruguay; *Revista de la Asociación de Ingenieros Químicos del Uruguay*; Separata noviembre 2009.
- Thornburg, T. M. & Kulm, L. D. (1981)- Sedimentary basins of the Perú continental margin: Structure, stratigraphy, and tectonics from 6°S to 16°S latitude. *Nazca Plate: Crustal formation and Andean convergence*. Soc. Am., 154: 393 - 422.
- Woods, M.T. & Okal, E. A. (1994) - The structure of the Nazca Ridge and Sala y Gómez seamount chain from the dispersion of Rayleigh waves. *Geophys. J. Int.*, 117(1): 205-222.
- Wooster, W.S. & Gilmartin, M. (1961) – The Peru-Chile Undercurrent. *J. Mar. Res.* 19(3):97-122