

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Oceanografía, Pesquería y Ciencias Alimentarias

Escuela Profesional de Ingeniería Pesquera



“Diseño e Implementación de una aplicación de Sistema de Información Geográfica
para Estudios Paleoceanográficos frente a la Costa Central-Sur del Perú”

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Pesquero
con mención en Geología Marina y Oceanografía Geológica

Presentada por:

Gerardo Manuel Herbozo Jiménez

Lima – Perú

2006

*A mi Padre, por apoyarme y haberme brindado
el mejor regalo del mundo: Mi Madre.*

*A mi hermosa Madre y su constante apoyo
que me formaron, educaron y mantuvieron
constante y enormemente bajo un manto
de cariño y querer.*

*A mis hermanos Coco y Peque,
por su enorme paciencia, entendimiento
y haberme comprendido en todo momento.*

*A mis abuelos Cesareo, Luz, Jorge y Ana,
por sus conocimientos, cariños y atenciones
en todo momento. A mi familia.*

*A mi fabuloso Perú, donde “el mendigo
debería ponerse de pie, lustrar su asiento de oro
y mostrar su brillo al mundo entero”.*

*A mis “Hermanos de la VITA”, mis buenos amigos
“El Fato” Renato Miranda Arteaga y “El Calito” Guillermo Sánchez Herrera;
por mas que se encuentren lejos, tenemos los mismos deseos de
mejorar este gran país y “nunca frenar” en el intento.*

Agradecimientos

Al Dr. Néstor Teves, Decano de la Facultad de Oceanografía, Pesquería y Ciencias Alimentarias (FOPCA – UNFV); e Ing. Ignacio Hinojoza, Jefe del Instituto de Investigación (FOPCA – UNFV), por aceptar ser mis asesores principales. Al proyecto “Investigaciones Paleoceanográficas en el Margen Continental Peruano”, llevado en el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) con el apoyo de la cooperación internacional del Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD), que fue el marco científico para el desarrollo de este trabajo de tesis. Al Dr. Dimitri Gutiérrez (Dirección de Investigaciones Oceanográficas – IMARPE), Investigador Principal y encargado interno del proyecto “Investigaciones Paleoceanográficas en el Margen Continental Peruano”; al Ing. Federico Velazco por ser mi asesor externo en Geología Marina y al Area de Geología Marina (AGM – IMARPE), al Ing. Mariano Gutiérrez y la Unidad de Tecnologías de Detección (UTD – IMARPE) que brindó los registros digitales hidroacústicos de 35 cruceros de prospección pesquera. Al Dr. Pierre Soler, Representante del Instituto de Investigación para el Desarrollo en el Perú (IRD, Francia) el cual me brindó una subvención para poder realizar este trabajo de tesis. Agradecimiento especial al Biólogo Piero Villegas, Especialista en SIG de la Unidad de Monitoreo y Gestión Marina Costera (IMARPE); por su desinteresada e invaluable contribución con conocimientos SIG y, además, el programa *ArcGis v. 8.3* (y su licencia), que fue necesario para el procesamiento, modelado y análisis de todos los mapas e imágenes en 2D y 3D.

Agradecimientos al Ing. Ricardo Zubieta, Especialista en SIG del Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima del Instituto Geofísico del Perú (IGP), al Magíster Javier León, Especialista Analista/Operador de Tecnologías SIG de la consultora ERM Perú y al Magíster Eduardo Angulo, Especialista en SIG del Area de Medio Ambiente de la Empresa

Pluspetrol (Lima, Perú); por sus desinteresados e invaluable contribuciones con conocimientos, comentarios, consejos y guías acerca del manejo del programa *ArxGis* y fructíferas discusiones acerca de temas SIG.

Agradecimientos al Dr. Edmundo Norabuena, Investigador Científico Superior del Instituto Geofísico del Perú (IGP – Perú); Dr. Nina Kukowski, Especialista del Departamento de Geofísica y Geología del Geoforschungszentrum Postdam (GFZ – Alemania); Dr. Andrea Hampel, Investigador Postdoctoral en el Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad de Bern (Suiza); Dr. Jens Greinert, Científico Superior del Departamento de Geología Marina del Centro de Investigación GEOMAR (IFM-GEOMAR, Kiel, Alemania); y al Dr. Cristhian Huebscher, Especialista en Geofísica Marina del Centro para la Investigación Marina y del Clima (ZMK), Instituto de Geofísica, Universidad de Hamburgo (Hamburgo, Alemania); por sus invaluable contribuciones sobre conocimientos en el campo de Geología Marina y Geoacústica, y además, comentarios acerca de mi trabajo que mejoraron mi investigación.

Resumen

El diseño y la implementación de una aplicación del Sistema de Información Geográfica, como es este caso, la necesidad del programa *ArxGis v.8.3* como programa base; y de una misma importancia y necesaria para administrar, gestionar, almacenar, manipular, recuperar, mapear y analizar la información geológica obtenida, la cual fue posible alcanzar estudios reales en el ambiente marino frente a las costas de la zona central-sur de la plataforma y el talud continental superior del margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S); con el fin de lograr aproximarse a representar y crear Modelos del Mundo Real (*Digital Terrain Models - DTM*), integrar estos *DTM* con la base de datos geológica con los cuales se pudo plantear una primera solución acerca de los problemas de planificación y gestión ocurridos al momento de preparar estudios e investigaciones en paleoceanografía, como también ser, la ubicación de zonas en el suelo marino adecuadas para realizar exploraciones paleoceanográficas.

La representación del medio ambiente geológico marino utilizando Tecnología SIG e información hidroacústica, con los cuales se representó el ambiente geológico marino en la zona central-sur de la plataforma y el talud continental superior del margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S) fue necesario en la investigación de zonas del suelo marino adecuadas para realizar exploraciones paleoceanográficas; y mientras tanto, permitió avances limitados en el desarrollo del campo de la geoacústica y geología marina.

Abstract

Design and Implementation of a Geographic Information System (GIS) application, in this case, software *ArcGis v. 8.3* as base program, was necessary and very important to administrate, acquire, store, manipulate, retrieve, map and analyze available geologic data obtained from several surveys made on the continental shelf and upper slope offshore Peru (11°S - 15°S) to create Digital Terrain Models (DTM), give an approach of the real geologic-marine environment and, integrate these DTMs with the geologic database created, in which case, could to put forward a first solution about planification problems regarding paleoceanographic investigations and surveys, as well as, the location of suitable seafloor zones for paleoceanographic explorations.

The representation of the geologic-marine environment on the continental shelf and upper slope offshore Peru (11°S - 15°S) through DTMs using GIS Technology and hidroacoustic data, was necessary on the searching of suitable seafloor zones for paleoceanographic explorations, and while, let limiteded advances on geoacoustic and marine geology field development.

Índice	Páginas
Dedicatorias	2
Agradecimientos	4
Resumen	6
Abstract	7
Índice	8
Figuras	16
Tablas	22
Diagramas	24
I. Proyecto de Tesis	23
1.1. Introducción	23
1.2. Formulación del problema	24
1.3. Justificación e importancia del estudio	25
1.4. Hipótesis	25
1.5. Variables de estudio	26
1.5.1. Variable independiente	26
1.5.2. Variable dependiente	26
1.6. Objetivos	26
1.6.1. Objetivo general	26
1.6.2. Objetivos específicos	27
1.7. Marco teórico	27
1.8. Antecedentes	30
1.9. Tipo de Investigación	31
1.9.1. Según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registros de la	

información	31
1.9.2. Según el periodo y secuencia del estudio	31
1.9.3. Según análisis y alcance de resultados	31
1.10. Metodología	32
1.11. Aspectos administrativos	33
1.11.1. Recursos materiales	33
1.12. Presupuesto por partida específica	33
II. Investigaciones Paleoc oceanográficas en el Margen Continental Peruano (Paleomap)	34
2.1. Introducción	34
III. Batimetría y morfología de los primeros 1500 metros del margen continental peruano entre la latitud 11°S y 15°S	37
3.1. Introducción	37
3.2. Antecedentes	38
3.3. Descripción del área de estudio – ambiente geológico	40
3.3.1. Margen Continental Peruano	41
3.3.1.1. <i>Plataforma Continental</i>	43
3.3.1.2. <i>Talud Continental</i>	44
– <i>Provincia A</i>	45
– <i>Provincia B</i>	45
– <i>Provincia C</i>	46
– <i>Provincia D</i>	47
3.3.1.3. <i>Fosa</i>	48
3.4. Estructuras geológicas a lo largo del margen continental peruano	50

3.5. Estudio batimétrico y morfológico entre la latitud 11°S y 15°S	52
3.5.1. ¿Porqué entre la latitud 11°S y 15°S?	52
3.6. Resultados	56
3.6.1. Mapas	66
3.6.2. Análisis	77
3.6.3. Conclusiones	91
IV. Distribución teórica-espacial de sedimentos superficiales en la plataforma continental peruana entre la latitud 11°S y 15°S	94
4.1. Introducción	94
4.2. Antecedentes	95
4.3. Descripción del área de estudio – ambiente geológico	98
4.4. Distribución teórica-espacial de sedimentos con potencial paleoceanográfico utilizando valores de retrodispersión acústica (S_v) entre la latitud 11°S y 15°S	102
4.5. Casos de detección hidroacústica – Pluma de Gas	104
4.5.1. Posible <i>gas seep</i> en las afueras de la costa de Chimbote	108
4.5.1.1. Características del posible <i>gas seep</i>	111
4.6. Resultados	117
4.6.1. Análisis	124
4.6.2. Mapas	152
4.6.3. Conclusiones	153
V. Diseño e Implementación de una aplicación de Sistema de Información Geográfica para Estudios Paleoceanográficos	155
5.1. Introducción	155

5.2. Antecedentes	156
5.3. Generalidades	157
5.4. Elementos geográficos	158
5.5. Mapas e información espacial	158
5.6. Errores de escala	159
5.7. Principales componentes de un SIG	160
5.8. Componentes físicos de un SIG	161
5.8.1. Hardware	161
5.8.2. Software	162
5.8.3. Contexto institucional de la organización que contiene el SIG	162
5.9. Tipo de datos de un SIG	162
5.9.1. Datos geográficos	162
5.9.1.1. Modelo de dato celular	163
– Estructura “ <i>raster</i> ” o matriz de espacios regulares	163
– Estructura “ <i>quadrees</i> ”	163
5.9.1.2. Modelo de dato vectorial	164
5.9.2. Datos no gráficos	164
5.9.2.1. Modelo tabular	164
5.9.2.2. Modelo jerárquico	165
5.9.2.3. Modelo de red	165
5.9.2.4. Modelo relacional	165
5.9.2.5. Modelo orientado a objetos	165
5.10. Aplicaciones de los SIG	166
5.11. Métodos utilizados para la evaluación de estudios paleoceanográficos	169
5.11.1. <i>Método de Unidades Integradas de Territorio (UIT)</i>	169
5.11.2. <i>Método de análisis geoestadístico</i>	169

5.11.3. <i>Método de análisis espacial</i>	170
5.12. Procedimientos en la aplicación SIG para creación espacial	170
5.12.1. <i>Conceptualización y diseño de los diferentes modelos de un SIG</i>	170
5.12.2. <i>Diseño de la base de datos</i>	171
5.12.3. <i>Automatización de los datos</i>	171
5.12.4. <i>Análisis espacial</i>	171
5.12.5. <i>Producción cartográfica</i>	171
5.12.6. <i>Preparación de un sistema automatizado</i>	172
5.12.7. <i>Auditoria del trabajo SIG</i>	172
5.13. Conceptualización y diseño de los diferentes modelos de un SIG para estudios paleoceanográficos	172
5.13.1. <i>Modelo Conceptual</i>	172
5.13.2. <i>Modelo Entidad – Relación (E/R)</i>	176
5.13.2.1. <i>Entidad</i>	176
5.13.2.2. <i>Relación</i>	176
5.13.2.3. <i>Atributos</i>	177
5.13.3. <i>Modelo Lógico</i>	177
5.14. Resultados	179
5.14.1. Análisis	180
5.14.2. Mapas	183
5.14.3. Conclusiones	184
VI. Recomendaciones y sugerencias	186
VII. Referencias Bibliográficas	188

VIII.	Glosario Geológico	202
IX.	Glosario Acústico	207
X.	Glosario SIG	213
XI.	Anexos	219
XII.	Apéndices	224
XIII.	Vita	282

Figuras**Páginas**

Figura 1. Provincias fisiográficas del margen continental peruano (Masías, 1976)	42
Figura 2. Vista completa de las provincias fisiográficas del talud continental (Masías, 1976)	44
Figura 3. Provincias fisiográficas y perfiles batimétricos. Nótese las locaciones de la meseta submarina de Lima (<i>Lima Plateau</i>) y la meseta submarina de Arequipa (<i>Arequipa Plateau</i>)	49
Figura 4. Distribución de los puntos batimétricos obtenidos de los 35 cruceros hidroacústicos de prospección pesquera. Mapa base de contornos cada 100 metros (GEBCO)	57
Figura 5. Zonificación del área de estudio (primera parte desde 11°S hasta 13°S). Mapa de contornos batimétricos en 2D creado con <i>Golden Software Surfer</i> a una resolución de 500 metros	60
Figura 6. Zonificación del área de estudio (segunda parte desde 13°S hasta 15°S). Mapa de contornos batimétricos en 2D creado con <i>Golden Software Surfer</i> a una resolución de 500 metros	61
Figura 7. Mapa batimétrico de la plataforma y talud superior de la costa central-sur del margen continental peruano (desde 11°S hasta 15°S). Contornos de 0 a 1500 metros de profundidad de columna de agua con intervalos de separación de 50 metros	67
Figura 8. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 1	68
Figura 9. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 2 (alrededores de las Islas Hormigas)	68
Figura 10. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 3 (alrededores de la Meseta Submarina de Lima – <i>Lima Plateau</i>)	

(Masías, 1976)	69
Figura 11. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 4	69
Figura 12. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 5	70
Figura 13. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 6	70
Figura 14. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 7	71
Figura 15. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 8	71
Figura 16. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 1	72
Figura 17. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 2 (alrededores de las Islas Hormigas)	72
Figura 18. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 3 (alrededores de la Meseta Submarina de Lima – <i>Lima Plateau</i>) (Masías, 1976)	73
Figura 19. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 4	73
Figura 20. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 5	74
Figura 21. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 6	74
Figura 22. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 7	75
Figura 23. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 8	75
Figura 24. Vista noreste de la imagen completa en 3D de la morfología del suelo marino de la plataforma y talud superior continental de la zona de estudio (desde 11°S hasta 15°S)	76
Figura 25. Distribución de los cortes batimétricos transversales (transeptos) entre el grado 11°S y 15°S	81

Figura 26. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 11°S (Transepto 11°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (Shelf break): ~21.98 km	82
Figura 27. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 11°30'S (Transepto 11°30'S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (Shelf break): ~67.5 km	83
Figura 28. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 12°S (Transepto 12°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (Shelf break): ~68.18 km	84
Figura 29. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 12°30'S (Transepto 12°30'S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (Shelf break): ~28.3 km	85
Figura 30. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 13°S (Transepto 13°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (Shelf break): ~29.77 km	86
Figura 31. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 13°30'S (Transepto 13°30'S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (Shelf break): ~40.06 km	87
Figura 32. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 14°S (Transepto 14°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (Shelf break): ~16.24 km	88
Figura 33. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 14°30'S (Transepto 14°30'S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (Shelf break): ~36.54 km	89
Figura 34. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 15°S (Transepto 15°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma	

(Shelf break): ~24.4 km 90

Figura 35. Principal sistema de corrientes marinas con proximidad a la superficie a las afueras de la costa oeste de Sudamérica (Pacífico Sureste Oriental).

PC = La Corriente de Perú (*Peru Current*), también conocida como

La Corriente de Humboldt (*Humboldt Current*) ó La Corriente Perú – Chile

(*Peru – Chile Current*). PCCC = La Contracorriente Perú – Chile

(*Peru – Chile Counter Current*), PUC = La Corriente Submarina de Perú

(*Peru Undercurrent*), también conocida como La Corriente Submarina Perú – Chile

(*Peru – Chile Undercurrent*), La Corriente Submarina de Gunther (*Gunther Undercurrent*)

ó La Corriente Submarina *Poleward* (*Poleward Undercurrent*), PCC = La Corriente

Costera Peruana (*Peru Coastal Current*), SEC = La Corriente Ecuatorial Sur

(*South Equatorial Current*), EUC = La Corriente Submarina Pacifico Ecuatorial

(*Equatorial Undercurrent*). (Mix y Tiedemann, 2003)100

Figura 36. Ilustración de la compleja relación biogeoquímica esperada cerca

de la cima sur de la Dorsal del Hidrato (Bohrmann et al., 2002;

citado por Tréhu y Bohrmann, 2003) 106

Figura 37. Registros de ecosonda de alta resolución (12 kHz) de la región

de la Dorsal del Hidrato mostrando burbujas de gas en la columna de agua

(Torres et al., 1999; Tréhu y Bangs, 2001; citado por Tréhu y Bohrmann, 2003) 107

Figura 38. Ecograma mostrando un doble seep descubierto recién en Julio del 2001

con un ecosonda *SIMRAD EK-500* del R/V Professor Vodyanitskiy a una

profundidad de 593,5 metros denominado “*Two Captains*” al noroeste del Mar Negro.

La pluma de gas se eleva alrededor de 400 metros dentro de la columna de agua

(cortesía de V. N. Egorov/Yu. G. Artemov/S. B. Gulín, Sevastopol, Ucrania;

citado por Klerkx, 2003) 113

Figura 39. Esta figura combina una imagen acústica mostrando una pluma de gas

dentro de la columna de agua y, por debajo, un perfil sísmico de alta resolución donde el ascenso vertical del gas a través de los estratos sedimentarios y fallas se visualiza claramente (cortesía del Dr. Lyobomir Dimitrov, Instituto de Oceanografía, Varna, Bulgaria; citado por Klerkx, 2003)	115
Figura 40. Posible pluma de gas (única estructura vertical en el lado derecho de la figura) descubierta a las afueras de las costas de Chimbote (cercana al área de la Cuenca Yaquina)	116
Figura 41. Distribución de los valores Sv obtenidos de los 35 cruceros hidroacústicos de prospección pesquera. Mapa base de contornos cada 100 metros (GEBCO)	118
Figura 42. Zonificación del área de estudio (primera parte desde 11°S hasta 13°S). Mapa de contornos batimétricos en 2D creado con <i>Golden Software Surfer</i> a una resolución de 500 metros	121
Figura 43. Zonificación del área de estudio (segunda parte desde 13°S hasta 15°S). Mapa de contornos batimétricos en 2D creado con <i>Golden Software Surfer</i> a una resolución de 500 metros	122
Figura 44. Características sedimentarias del testigo 0405-06 (Boxcore). (a) Radiografía digital (<i>SCOPIX</i>), (b) Fotografía digital, (c) Distribución de la densidad del volumen seco (ρ), (d) Escala de grises (<i>X-ray gray level</i>) (unidades arbitrarias), (e) Porcentaje total de carbón orgánico (<i>TOC</i>) (D. Gutierrez <i>et al.</i> , 2006)	134
Figura 45. Características sedimentarias del testigo 0405-13 (Boxcore). (B) Radiografía digital (<i>SCOPIX</i>), (<i>Gray Level</i>) Escala de grises (<i>X-ray gray level</i>) (unidades arbitrarias)	135
Figura 46. Testigo 679A-1H (0 a 7 metros por debajo del suelo marino)	136
Figura 47. Testigo 679B-1H (0 a 6.5 metros por debajo del suelo marino)	137
Figura 48. Testigo 679B-2H (6.5 a 16 metros por debajo del suelo marino)	138
Figura 49. Testigo 679D-1H (0 a 7.9 metros por debajo del suelo marino)	139

Figura 50. Testigo 679D-2H (7.9 a 17.4 metros por debajo del suelo marino)	140
Figura 51. Testigo 680A-1H (0 a 8.3 metros por debajo del suelo marino)	141
Figura 52. Testigo 680A-2H (8.3 a 17.8 metros por debajo del suelo marino)	142
Figura 53. Testigo 680B-1H (0 a 5.5 metros por debajo del suelo marino)	143
Figura 54. Testigo 680B-2H (5.5 a 15 metros por debajo del suelo marino)	144
Figura 55. Testigo 686A-1H (0 a 5.1 metros por debajo del suelo marino)	145
Figura 56. Testigo 686A-2H (5.1 a 14.6 metros por debajo del suelo marino)	146
Figura 57. Testigo 686B-1H (0 a 8.5 metros por debajo del suelo marino)	147
Figura 58. Testigo 686B-2H (8.5 a 18 metros por debajo del suelo marino)	148
Figura 59. Testigo 687A-1H (0 a 7.5 metros por debajo del suelo marino)	149
Figura 60. Testigo 687A-2H (7.5 a 17 metros por debajo del suelo marino)	150
Figura 61. Testigo 687B-1H (0 a 5.2 metros por debajo del suelo marino)	151
Figura 62. Mapa de distribución de sedimentos con potencial paleoceanográficas en el suelo marino de la zona de estudio (desde 11°S hasta 15°S) basándose en la relación determinada entre las tres señales S_v ($S_v \max$, $S_v \text{mean}$, $S_v \min$) y los testigos 0405-06, 679B, 679D, 687A y 687B. Contornos del suelo marino cada 50 metros	152
Figura 63. Posibles zonas en el suelo marino donde encontrar sedimentos adecuados para realizar reconstrucciones paleoceanográficas a una alta resolución. Contornos del suelo marino cada 50 metros	183
Figura 64. Parámetros del semivariograma (Fuente: ESRI, 2002)	279
Figura 65. Ejemplo de evaluación geoestadística de un conjunto de datos (Fuente: ESRI, 2004)	281

Tablas**Páginas**

Tabla 1. Valores S_v y descripción del sedimento recuperado para cada testigo	130
Tabla 2. Rango de valores por categoría usada para clasificar las variables con las cuales se definirán las posibles zonas en el suelo marino (desde 11°S hasta 15°S) donde encontrar sedimento con características paleoceanográficas para reconstrucciones a una alta resolución	180
Tabla 3. Número de puntos batimétricos “sucios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (<i>Spherical Model</i>) por cada zona de estudio	219
Tabla 4. Número de puntos batimétricos “sucios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (<i>Exponential Model</i>) por cada zona de estudio	219
Tabla 5. Número de puntos batimétricos “sucios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Gausiano (<i>Gaussian Model</i>) por cada zona de estudio	219
Tabla 6. Número de puntos batimétricos “limpios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (<i>Spherical Model</i>) por cada zona de estudio	220
Tabla 7. Número de puntos batimétricos “limpios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (<i>Exponential Model</i>) por cada zona de estudio	220
Tabla 8. Número de puntos batimétricos “limpios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Gausiano (<i>Gaussian Model</i>) por cada zona de estudio	220
Tabla 9. Número de valores S_v <i>max</i> evaluados y valores geoestadísticos	

obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (<i>Spherical Model</i>)	
por cada zona de estudio	221
Tabla 10. Número de valores $Sv\ max$ evaluados y valores geoestadísticos	
obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (<i>Exponential Model</i>)	
por cada zona de estudio	221
Tabla 11. Número de valores $Sv\ max$ evaluados y valores geoestadísticos	
obtenidos de la evaluación con el modelo Gausiano (<i>Gaussian Model</i>)	
por cada zona de estudio	221
Tabla 12. Número de valores $Sv\ mean$ evaluados y valores geoestadísticos	
obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (<i>Spherical Model</i>)	
por cada zona de estudio	222
Tabla 13. Número de valores $Sv\ mean$ evaluados y valores geoestadísticos	
obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (<i>Exponential Model</i>)	
por cada zona de estudio	222
Tabla 14. Número de valores $Sv\ mean$ evaluados y valores geoestadísticos	
obtenidos de la evaluación con el modelo Gausiano (<i>Gaussian Model</i>)	
por cada zona de estudio	222
Tabla 15. Número de valores $Sv\ min$ evaluados y valores geoestadísticos	
obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (<i>Spherical Model</i>)	
por cada zona de estudio	223
Tabla 16. Número de valores $Sv\ min$ evaluados y valores geoestadísticos	
obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (<i>Exponential Model</i>)	
por cada zona de estudio	223
Tabla 17. Número de valores $Sv\ min$ evaluados y valores geoestadísticos	
obtenidos de la evaluación con el modelo Gausiano (<i>Gaussian Model</i>)	
por cada zona de estudio	223

Diagramas	Páginas
Diagrama 1. Modelo Conceptual de Datos para Estudios Paleoceanográficos	174
Diagrama 2. Diseño y Conceptualización del SIG para Estudios Paleoceanográficos	175
Diagrama 3. Creación de las primeras entidades que se van a utilizar por la base de datos para estudios paleoceanográficos	253

I. Proyecto de Tesis

1.1. Introducción

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) comienza en los años 60. Sin embargo hasta principios de los años 80 se mantuvieron como campo de investigación. El desarrollo de soporte tecnológico informático adecuado fomentó la aparición de productos SIG en el mercado, los cuales se han venido aplicando fundamentalmente en organismos productores de información en la administración pública y empresas privadas. (Velasco, 2003).

Diversas instituciones alrededor del mundo utilizan los SIG como una herramienta principal para resolver complejos problemas de planificación y gestión (Bosque, 1992), entre las cuales las más conocidas son las compañías dedicadas a la extracción de Petróleo y Gas, Departamentos de transporte y vigilancia de carreteras, Instituciones dedicadas al control y vigilancia por medio de información satelital, Instituciones dedicadas a la Salud, Instituciones dedicadas al manejo forestal y preservación del ambiente. Estas instituciones tomaron la iniciativa y decisión de dar un paso hacia el futuro e invirtieron en tecnología SIG para lograr que sus decisiones puedan resolver diferentes problemas cotidianos. La implementación de tecnologías SIG lograron que la toma de sus decisiones fueran las más apropiadas.

Es por eso que la implementación de un SIG para realizar estudios paleoceanográficos sugerirá las mejores decisiones cuando se efectúe la búsqueda de zonas apropiadas para la ejecución de prospecciones paleoceanográficas frente a la costa central-sur del Perú (entre la latitud 11°S y 15°S).

1.2. Formulación del problema

¿El diseño e implementación de una aplicación de Sistema de Información Geográfica para administrar, gestionar, manipular, analizar, modelar y actualizar información geológica frente a las costas de la parte central-sur del margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S) brindará un buen soporte en la toma de decisiones para ubicar zonas apropiadas donde ejecutar prospecciones paleoceanográficas?

La administración, gestión, manipulación, análisis, actualización y creación de modelos utilizando información geológica para encontrar zonas adecuadas donde obtener sedimentos que contengan características paleoceanográficas que permitan una reconstrucción de condiciones oceanográficas del pasado con una alta resolución frente a las costas de la parte central-sur del margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S) estuvo basado inicialmente, en estudios y resultados obtenidos por diferentes instituciones alrededor del mundo e información producida por el área de Geología Marina en IMARPE. Es por tal razón, que los primeros esfuerzos (cruceros paleoceanográficos 2003 y 2004) realizados por el Instituto del Mar del Perú (IMARPE), en conjunto con la cooperación internacional (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada – CICESE México, Instituto de Investigación para el Desarrollo – IRD Francia) en la búsqueda de zonas con sedimento apropiado para reconstrucciones paleoceanográficas de alta resolución resultó parcialmente imprecisa.

Ahora, con el diseño e implementación de una aplicación de Sistema de Información Geográfica (SIG), la ubicación de estas zonas se va a realizar de una manera más precisa, ya que esta tecnología permite una óptima administración, gestión, análisis y modelado de toda la información geológica, la cual permitirá que la toma de decisiones sean las más

precisas al momento de ubicar las mejores zonas donde ejecutar prospecciones paleoceanográficas.

1.3. Justificación e importancia del estudio

La importancia de diseñar una implementación para la aplicación de un Sistema de Información Geográfica para realizar estudios paleoceanográficos frente a las costas de la parte central-sur del margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S) es con el fin de gestionar, administrar, analizar y modelar información geológica con el propósito de encontrar zonas en el suelo marino que contengan sedimentos con particulares estructuras geológicas (sedimentos con laminaciones) y que estos lleven en su composición sedimentológica registros paleo-ambientales y paleo-ecológicos de alta resolución con los que se pueda reconstruir eventos ocurridos en el pasado durante el Holoceno Tardío.

Los beneficios que brinda este trabajo de investigación es la de encontrar, con anterioridad a los cruceros de prospección paleoceanográfica, zonas que contengan sedimentos con laminaciones con los que se puedan realizar reconstrucciones paleoceanográficas de alta resolución y, diferenciarlas de zonas que no contengan este tipo de sedimento. Esto producirá una disminución en la inversión de dinero y del esfuerzo humano cuando se programen cruceros de prospección paleoceanográfica, y así, poder invertir esos esfuerzos para la investigación en otros campos relacionados a estudios en paleoceanografía.

1.4. Hipótesis

La implementación de una aplicación de Sistema de Información Geográfica para la gestión y administración de información geológica frente a las costas de la parte central-sur del

margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S), permitirá mejorar la toma de decisiones al momento de ubicar zonas en el suelo marino apropiadas donde realizar prospecciones paleoceanográficas con el fin de obtener sedimentos donde se puedan hacer reconstrucciones paleoceanográficas con una alta resolución (eventos durante el Holoceno Tardío).

1.5. Variables de estudio

1.5.1. Variable independiente: Sistema de Información Geográfico (SIG).

1.5.2. Variables dependiente: Prospecciones Paleoceanográficas.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Diseñar e implementar una aplicación de Sistema de Información Geográfica (SIG) para realizar estudios paleoceanográficos frente a las costas de la parte central-sur del margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S), la cual permita administrar, gestionar, manipular, analizar y modelar información geológica obtenida de diversos estudios frente a esta área, y a su vez; esto sugiera tomar las mejores decisiones en la búsqueda de zonas en el suelo marino con condiciones apropiadas para realizar prospecciones paleoceanográficas (que contengan sedimentos con los que se puedan realizar reconstrucciones paleoceanográficas a una alta resolución).

1.6.2. Objetivos específicos

Aplicar el *software ArcGis* como programa base para el manejo de información geológica orientado a investigaciones paleoceanográficas.

Analizar, procesar y modelar información batimétrica usando el *software ArcGis* con el fin de crear mapas batimétricos y figuras morfológicas del suelo marino de la parte central-sur del margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S).

Establecer la relación teórica que existe entre valores de retrodispersión acústica (S_v) con información de muestras geológicas recuperadas del suelo marino frente a las costas de la parte central-sur del margen continental peruano (entre la latitud 11°S y 15°S).

1.7. Marco teórico

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) empieza en los años 60, principalmente como programas de cartografía asistidos por ordenadores; pero no fue hasta comienzos de 1980 que se creó el primer y ya verdadero Sistema de Información Geográfica de tipo vectorial en el laboratorio de *Harvard*, el programa *ODYSSEY*. (Bosque, 1992).

Existe una amplia gama de definiciones para describir lo que es un SIG, por ejemplo se puede definir como: “Base de datos computarizada que contiene información espacial” (Cebrián y Mark, 1986; citada por Bosque 1992), o también como: “Una tecnología

informática para gestionar y analizar información espacial”. Otra definición más amplia sería: “Un conjunto de herramientas para reunir, introducir (en el ordenador), almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos” (Burrough, 1988; citado por Bosque 1992).

Otros autores insisten más en su aspecto informático: “Un Sistema de Información Geográfica es un tipo especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, es decir, espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes” (Bracken y Webster, 1990; citado por Bosque 1992).

Es importante señalar la definición realizada en el manual sobre SIG redactado por el *NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis)* de USA; la cual es la más apropiada para describir sus propiedades y características y que también la da Singh (1985) (citada por Dunin-Borkowski, 1998) que define: “Un SIG como un sistema de “*hardware*”, “*software*” y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión” (NCGIA, 1990; citado por Bosque, 1992).

Dunin-Borkowski (1998) señala que el SIG es un tipo especializado de base de datos, caracterizado por su capacidad de manejar datos espacialmente referenciados que pueden ser representados gráficamente como imágenes, y que actualmente es amplia su difusión en nuestro medio debido a la versatilidad y posibilidad que ofrecen para el mantenimiento y actualización en el tiempo.

Quispe (2004) señala que el SIG esta caracterizado por su finalidad del manejo del espacio geográfico como una herramienta de especialización, análisis y modelamiento en la toma de decisiones permitiendo así el tratamiento de la información mediante el uso de base de datos y la ubicación de estas en el espacio geográfico. Según Arnoff (1989) (citado por Quispe, 2004) define el SIG como una base de datos computarizada de información geográfica que tiene cuatro formas de manejar los datos: el ingreso, manejo (almacenamiento y recuperación), análisis y presentación de datos, en donde los datos se representan en forma de capas, cada uno con un tema en particular que describen el ambiente bajo estudio. Según Thériault (1992) (citado por Quispe, 2004) el SIG es el “conjunto de principios, de métodos, de instrumentos y de datos georeferenciados utilizados para obtener, conservar, extraer, medir, transformar, analizar, modelar, simular y cartografiar los fenómenos y los procesos distribuidos sobre el espacio geográfico”.

Es así que un SIG se puede considerar esencialmente como una tecnología aplicada a la resolución de problemas territoriales. (Bosque, 1992).

La morfología del suelo marino de la plataforma continental y del talud continental superior frente a la costa central del Perú (11°S – 15°S) está constituida por varias cuencas, las cuales son de norte a sur: Cuenca Huacho, Cuenca Lima, Cuenca Pisco, Cuenca Paracas, Cuenca Pisco (Este y Oeste) y Cuenca Caballas (citado por Couch y Whitsett, 1972). La Cuenca Huacho, Cuenca Pisco y Cuenca Caballas son cuencas costeras y se encuentran situadas sobre la plataforma continental entre la línea de costa y la denominada Dorsal Interior (*Inner Ridge*). La Dorsal Interior está situada hacia la costa y cerca de la misma, y sigue el borde de la plataforma continental (aproximadamente sobre la isóbata de los 200 metros). Además, ésta Dorsal Interior es el límite este de la Cuenca Lima y la Cuenca Paracas (las cuales están situadas sobre la plataforma continental y el talud continental

superior) y están delimitadas hacia el oeste por la denominada Dorsal Exterior (*Outer Ridge*). La Dorsal Exterior está situada hacia el mar y separa el talud continental superior del talud continental medio. (Reinhardt *et al.*, 2002).

Estas cuencas son centros deposicionales que tienen gruesos “lentes” de sedimento que están compuestos de fango característico rico en carbono orgánico y que fueron denominados como “lentes de la plataforma superior”. (Suess *et al.*, 1987; citado por Reinhardt *et al.*, 2002).

1.8. Antecedentes

En el año 1989, la compañía petrolera *Dun & Bradstreet* en Colorado (USA) implementó un sistema de información geográfica (software *ARC/INFO GIS*) para proveer dentro de sus proyectos de exploración, información geológica obtenida durante varios años de investigación. Antes de esta implementación, el manejo de mapas para exploraciones petroleras era muy difícil y costoso. (The *ARC/INFO IBM*, 1989).

En 1988, el Departamento de Transporte y Carreteras de Missouri (*MHTD*) fue uno de los primeros estados en USA en implementar esta tecnología (software *ARC/INFO GIS*), la cual sirve para la vigilancia y el cuidado de las mismas (The *ARC/INFO IBM*, 1989).

En el año 2003, la Unidad de Información Geográfico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – *INGEMMET*, implementó un sistema geográfico de información (software *Mapserver*) para la manipulación y actualización de mapas dinámicos a través de la Internet (Velasco, 2003).

En el año 2003, la Comisión de Investigaciones de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) y un conjunto de instituciones dedicadas al manejo de campos forestales implementó un sistema de información geográfico (software *ArView GIS*) para ubicar y cuantificar las plantaciones forestales utilizando información satelital (Turno, 2003).

En el año 2003, se diseñó e implementó una aplicación del sistema de información geográfica (software *ArView GIS*) en el centro de salud del departamento de Tumbes para la vigilancia epidemiológica del Dengue, con información recopilada durante los años 2001 y 2002 (Santa Cruz, 2003).

En el año 2004, se diseñó e implementó un sistema de información geográfico (software *Arview*) para evaluar el brote de la actividad minera en la población de mineros y zonas de explotación minera en el departamento de Huancavelica; hecho observado por el Instituto Nacional de Concesiones y Catastro Minero (Quispe, 2004).

En el año 1998, la Unidad de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica del Instituto del Mar del Perú (UPRSIG – IMARPE) adquirió una implementación del software *MapInfo* para el manejo de la información satelital (Sistemas *ARGOS*) proveniente de las embarcaciones pesqueras posicionadas dentro de las 200 millas del Mar peruano (Atiquipa 2005, comunicación personal).

1.9. Tipo de investigación

1.9.1. Según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registros de la información:

Retroprospectiva (Registro de información según hechos ocurridos con anterioridad al diseño del estudio y el registro continúa según los hechos van ocurriendo)

1.9.2. Según el periodo y secuencia del estudio:

Transversal (Estudia las variables simultáneamente en determinado momento)

1.9.3. Según análisis y alcance de resultados:

Analítico o explicativo (Busca la asociación o correlación entre variables)

1.10. Metodología

Sistemas de Información Geográfica:

Diseñar e implementar una aplicación del software *ArxGis* versión 8.3 para administrar y gestionar información geológica. Creación de modelos y evaluación de información hidroacústica (batimétrica y valores de retrodispersión acústica).

Datos hidroacústicos digitales:

Información batimétrica obtenida con un ecosonda científico *SIMRAD EK-500/EY-500/EK-60* tipo *Split beam* con dos diferentes frecuencias (120 kHz / 38 kHz). Se procesa la información obtenida con el software *Sonar Data Echoview* versión 3, el cual graba toda la

información de rastreo batimétrico para su posterior análisis con la aplicación del software *ArcGis* versión 8.3.

La información procesada es específicamente batimétrica y será corregida con información de salinidad (‰) y temperatura corregida por la presión (°C) obtenida durante el crucero *Panorama Leg 3a* durante el evento El Niño 1997-98 (se explicará de forma detallada más adelante). Se trabajó datos batimétricos digitales de 35 cruceros hidroacústicos.

Se procesa la información de retrodispersión acústica (S_v) para correlacionarla con información sedimentológica y observaciones realizadas del suelo marino.

1.11. Aspectos administrativos

1.11.1. Recursos materiales

Unidad de Investigaciones Oceanográficas, Área de Geología Marina - IMARPE

Información geológica y oceanográfica.

Unidad de Tecnologías de Detección - IMARPE

Registros hidroacústicos digitales.

1.12. Presupuesto por partida específica

El desarrollo de toda la Tesis será subvencionada por el Instituto de Investigación para el Desarrollo – IRD (Francia) y recibirá el apoyo del Instituto del Mar del Perú – IMARPE, con toda el soporte tecnológico e información necesaria para desarrollar la investigación.

II. Investigaciones Paleoceanográficas en el Margen Continental Peruano (Paleomap)

2.1. Introducción

En los sedimentos marinos frente a nuestras costas pueden quedar reflejadas las diferentes propiedades físicas, químicas o biológicas de las masas de agua superficiales, intermedias o profundas; las cuales son también en cierta medida dependientes del clima. También se pueden estudiar las variaciones eustáticas del nivel del mar a través del tiempo, el afloramiento costero y la productividad biológica entre otros, siempre y cuando se den las condiciones para la preservación de sus registros fósiles.

En nuestra región, ciertos aspectos característicos del ecosistema influenciado por la corriente de Humboldt como el afloramiento costero y la productividad biológica en el margen continental peruano han sido identificados a través de las características texturales y geoquímicas (p.e., como carbono orgánico y carbonatos) presentes en los sedimentos, el cual actúa como matriz integradora de estos procesos. Las condiciones ocurridas en el pasado también se han estudiado a través de las asociaciones fósiles de organismos planctónicas o bentónicas (p.e., la variación en el nivel del mar durante el cuaternario), así como el estudio de las características biogeoquímicas de los caparzones de estos organismos o del total del sedimento organógeno (isótopos estables de C y O; así como de elementos traza); y también a través de la estructura sedimentaria, grado de alteración de los micro y nanofósiles calcáreos, etc.

Las condiciones particulares para la preservación de los registros sedimentarios tanto en la plataforma como en el talud continental frente a nuestras costas y su aplicación en la

paleoceanografía han sido identificadas, algunas de ellas, a la fecha mediante esfuerzos institucionales con apoyo de la cooperación internacional.

En especial, estas condiciones son muy importantes (además de las mencionadas anteriormente) para el estudio de la fluctuación de las poblaciones de anchoveta, sardina u otras especies características de este ecosistema, basadas en el estudio del registro fósil de sus escamas. Algunos de los testigos colectados con sedimento marino (p.e., testigos de gravedad, testigos de caja, testigo de pistón) en el margen continental peruano confirman la presencia de laminaciones y la posibilidad de desarrollar estudios con alta resolución.

Las condiciones que favorecen la preservación de los registros fósiles hacen que Perú por su ubicación geográfica y características oceanográficas-geológicas podrían también conservar registros de la ocurrencia de eventos El Niño. El aporte de material terrígeno, de origen fluvial o de procedencia eólica al fondo marino relacionados con la ocurrencia de este evento, en determinadas zonas de la costa, sería otra potencial fuente de información de la ocurrencia de este evento a lo largo de la historia.

Las investigaciones paleoceanográficas se iniciaron en el año 2003 en el Instituto del Mar del Perú (IMARPE), permitiendo encontrar zonas con condiciones propicias para la reconstrucción paleoceanográfica. Un crucero exploratorio en búsqueda de sedimentos con estructuras (laminaciones) fue realizado en Mayo del 2003 en parte de la costa central peruana, las mejores zonas halladas para este tipo de investigación se hallaron en la plataforma externa y talud superior frente a Callao (12°S) y el lado sur de Pisco (13°40'S), los registros obtenidos presentan un gran potencial para la reconstrucción paleoceanográfica así como se ha encontrado que existen zonas promisorias al sur de las

áreas estudiadas hasta el momento, que es preciso seguir estudiando en nuevos esfuerzos de investigación en este campo (Velazco, 2005).

III. Batimetría y morfología de los primeros 1500 metros del margen continental peruano entre la latitud 11°S y 15°S

3.1. Introducción

Los márgenes continentales son áreas claves en la estructura de la geodinámica global. Las estructuras superficiales de los márgenes continentales convergentes son importantes indicadores del movimiento tectónico en el pasado y dan pistas acerca de los procesos ocurridos tales como levantamiento (*uplift*), erosión, deposición y fallamientos; esto debido a la convergencia entre la placa oceánica y la placa continental (Johnson y Ness, 1981).

Las placas oceánicas están formadas por dos eventos generales; el primero consiste en la elevación del manto oceánico en las dorsales del océano medio y luego, su movimiento hacia los continentes por fuerzas convectivas internas. En los márgenes continentales activos; según la teoría de placas, el proceso es ocasionado por la colisión entre sí de dos placas tectónicas (placa oceánica y placa continental); donde la placa oceánica (la cual es más densa) desciende por debajo de la placa continental. El proceso de subducción está acompañado por varios y violentos procesos geológicos tales como los terremotos, deformaciones, erupciones volcánicas, deslizamientos submarinos y tsunamis.

Además, la velocidad del movimiento de las placas oceánicas hacia los continentes y sus subducciones se encuentra en el orden de varios centímetros por año. Esto es extremadamente rápido en una escala geológica de tiempo. Sin embargo, estos procesos son extremadamente lentos a una escala humana de tiempo, muy lento para ser observado directamente. Estos procesos aún modelan la superficie del suelo marino y, la morfología submarina registra estas fuerzas que actúan sobre el mismo. Por lo tanto, representar en

forma de imagen 2D y/o 3D la morfología ayuda a reconocer y comprender la acción de estos procesos geológicos y ayuda a visualizar la historia dinámica del suelo marino. (Weinrebe y Greinert, 2000).

3.2. Antecedentes

Numerosos estudios acerca de las estructuras geológicas, batimetría y morfología del margen continental peruano han contribuido considerablemente en el conocimiento de los procesos de subducción y tectonismo ocurridos en eras pasadas. El estudio más importante realizado en el margen continental peruano con relación a procesos tectónicos y de subducción fue realizado en el año 1973 por el proyecto “Placa de Nazca”. Este estudio buscó correlacionar las estructuras geológicas y estratigráficas del suelo marino en el margen continental con las estructuras encontradas en cordillera de la costa; y describir las características morfológicas del suelo marino en el margen continental (Kulm y Thornburg, 1981; Johnson y Ness, 1981; Masías, 1976; Teves, 1973, 1975). Este estudio también proporcionó el primer cuadro de perfiles batimétricos a lo largo del margen continental utilizando métodos sísmicos.

En el año 1990, un estudio de exploración sísmica en 2D realizado por la industria petrolera (Zúñiga-Rivero *et al.*, 1988a) refinó el estudio realizado por el Proyecto “Placa de Nazca” (citado por Reinhardt *et al.*, 2002).

En el año 1986, a bordo del buque *JOIDES Resolution* se realizó el *Leg 112* del Programa de Perforación en el Océano (*Ocean Drilling Program - ODP*) que basó su investigación en procesos geológicos-tectónicos, climatológicos y paleoceanográficos en el margen continental peruano. Este estudio proporcionó valiosa información sedimentológica,

batimétrica y morfológica de grandes estructuras por debajo del suelo marino en varias zonas del margen continental utilizando diversos equipos sísmicos y acústicos de alta resolución (p. e., *Sonar SideScan SeaMARC II*) (Hussong *et al.*, 1990; en Suess y von Huene, 1990).

Solamente pocos perfiles de una ecosonda sedimentológica de alta resolución fueron publicados en el estudio realizado por Kriisek *et al.*, 1980; y Suess *et al.*, 1987; complementados por varios perfiles obtenidos con el *software PARASOUND* por Suess en 1992. Estos perfiles indicaron la morfología general de la plataforma por debajo de los 600 metros de profundidad (citado por Reinhardt *et al.*, 2002).

En el año 2000, el Proyecto *GEOPECO* realizó el crucero *RV SONNE* (SO-146) en el margen continental peruano obteniéndose importante información sísmica, batimétrica y morfológica con diversos equipos, siendo el de uso principal la ecosonda *Multibeam HYDROSWEEP DS-3*. Esta investigación evaluó los procesos de subducción, tectonismo e hidratos de gas ocurridos en dos zonas; en el norte del margen peruano (8°S – 9°S) principalmente en la Cuenca Yaquina; y en el centro del margen peruano (11°S – 16°S) enfocado en la Cuenca Lima y el proceso de subducción de la Dorsal Submarina de Nazca (zona de colisión con el margen continental) en los 15°S (Kukowski y Bialas, 2000).

En el año 2000, también se desarrolló el crucero *RV SONNE* (SO-147 “*Peru Upwelling*”) que estudió rasgos morfológicos del suelo marino, tectonismo, estructuras y ambientes sedimentarios, cambios climatológicos, actividad de la contracorriente Polar Antártica (*Poleward undercurrent*) y procesos paleoceanográficos ocurridos en las estructuras superficiales del margen continental peruano. Este estudio además de utilizar equipos de perforación superficial, utilizó dos ecosondas sedimentológicas de alta resolución (*SEL-96*

y *SES-2000DS*) y la ecosonda *Multibeam HYDROSWEEP DS-3* para evaluar toda la superficie del suelo marino con aproximadamente 6000 Km. de perfiles acústicos (Kudrass *et al.*, 2000).

El presente estudio basa su investigación en los primeros 1500 metros del margen continental entre los 11°S y 15°S grados, los cuales abarcan las zonas de la plataforma continental y talud superior continental. Esta investigación busca determinar la batimetría, morfología y estructuras geológicas superficiales en zonas someras y relativamente someras del margen continental, debido a que estas áreas no se han estudiado a profundidad (desde el punto de vista geológico); o al menos no se han publicado documentos y mapas caracterizando estas estructuras geológicas de forma detallada y con buena precisión. Reinhardt y Kudrass (2002) también señalan que se conoce muy poco de las estructuras superficiales y por debajo de la superficie en esta zona.

3.3. Descripción del área de estudio – ambiente geológico

La descripción realizada a continuación del margen continental peruano muestra algunos de los perfiles batimétricos y características morfológicas determinadas por el Proyecto “Placa de Nazca”, el cual es el más adecuado y da más importancia a esta presente investigación. Estos resultados han sido extraídos del trabajo de Masías realizado en el año 1976. Además, en el compendio del Proyecto “Placa de Nazca” se pueden observar otros perfiles batimétricos; por ejemplo, de zonas más someras que las presentadas por Masías en el año 1976 (ver Jonson y Ness, 1981; Kulm y Thornburg, 1981).

Sólo una parte del margen continental peruano va a ser evaluado en la presente investigación (desde los 11°S hasta 15°S), pero hay que tener en cuenta que todas las

estructuras geológicas tienen una secuencia a lo largo del margen continental y se encuentran completamente relacionadas intrínsecamente.

3.3.1. Margen Continental Peruano

El margen continental peruano se encuentra localizado a lo largo de la parte oeste del continente Sudamericano entre las latitudes 3°30'S y 18°S. Está limitado por el oeste por la Placa de Nazca y por el este por la costa Peruana, las elevaciones de la costa y las montañas de la cordillera de los Andes (Masías, 1976).

De acuerdo con el concepto de la tectónica de placas, el margen oeste de Sudamérica es uno de los mejores ejemplos de la colisión de la placa continental con la placa oceánica. Por consecuencia, la Cordillera de los Andes se ha convertido en el ejemplo típico de deformación que se desarrolla en el borde de la placa continental por los procesos de subducción. Variaciones en la estructura, distribución de sedimentos, vulcanismo, sismicidad en la cuesta continental y en la fosa; y además, orogénesis de la Cordillera de los Andes, son interpretadas de ser probablemente consecuencias de esta colisión (Masías, 1976).

La historia geológica del margen continental peruano ha sido también influenciada por la subducción oblicua de la Dorsal Submarina de Nazca, la cual se sitúa aproximadamente a los 15°S en la actualidad. En el pasado, su cresta hizo un barrido a lo largo del margen continental peruano de norte a sur, primero levantándola y luego ocasionándole una fuerte subsidencia (Pecher, 1996; Pecher *et al.*, 2001; Hampel, 2002; Hampel *et al.*, 2004). Esta dorsal también ocasionó un fuerte cambio en las características geológicas del margen

continental entre las latitudes 11°S y 15°S, hecho que fue re-evaluado por Hampel *et al.*, 2004.

El margen continental peruano fue dividido en 3 partes en el estudio realizado por Masías en el año 1976; estudio que se derivó de la investigación hecha en el margen continental peruano por el Proyecto “Placa de Nazca” en el año 1973; las cuales son:

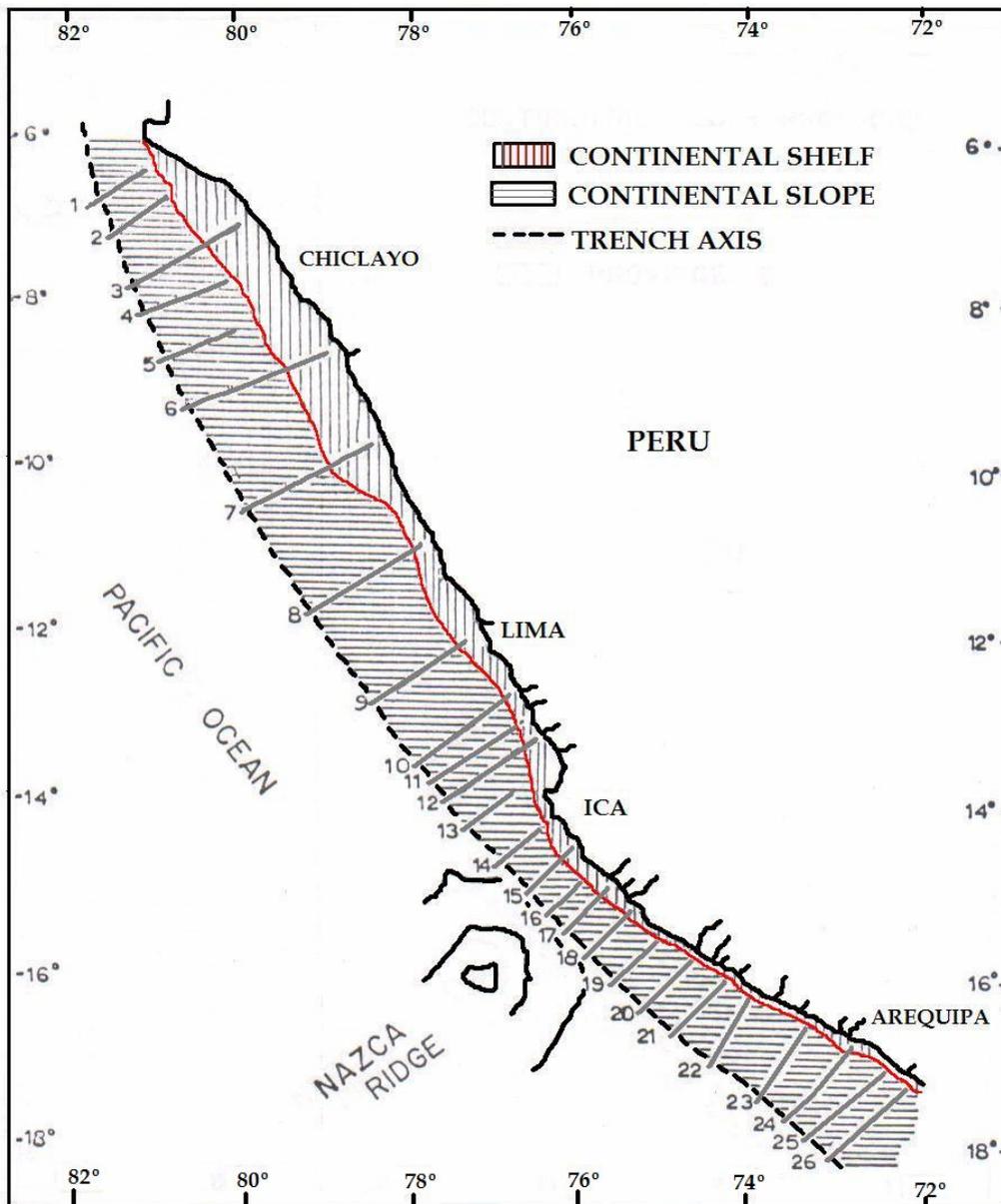


Figura 1. Provincias fisiográficas del margen continental peruano (Masías, 1976).

3.3.1.1. *Plataforma continental*

La plataforma continental se extiende desde la línea de costa peruana hacia el quiebre de la plataforma, el cual ocurre entre las isóbatas de 100 m y 200 m. En general, la plataforma continental exhibe una planicie de superficie casi horizontal. Suaves cambios en el relieve del fondo son observados localmente, cerca de algunas cadenas de islas que están alineadas cerca al borde de la plataforma continental en el norte de la plataforma ($6^{\circ}\text{S} - 7^{\circ}\text{S}$) y opuesto a Lima (12°S). La plataforma continental esta desprovista de cañones submarinos o bancos submarinos.

A las afueras del norte del Perú, la parte más estrecha de la plataforma se encuentra en la vecindad de los 6°S (Fig. 1). Su ancho en promedio es de 98 Km. (aproximadamente 53 millas náuticas) entre los $6^{\circ}40'\text{S}$ y $10^{\circ}30'\text{S}$. A las afueras de Trujillo y Salaverry, esta alcanza un ancho máximo de 126 Km. (aproximadamente 68 millas náuticas) (Fig.1, línea 6). Entre los $10^{\circ}30'\text{S}$ hasta $14^{\circ}40'\text{S}$, el ancho promedio de la plataforma disminuye a 32 Km. (aproximadamente 17.5 millas náuticas) con la excepción de la región cerca de la Bahía Paracas, donde su ancho es de 80 Km. (aproximadamente 43.2 millas náuticas) (Fig. 1, línea 13).

Al Sur de los $14^{\circ}40'\text{S}$ hasta el borde de Chile, la plataforma es alrededor de los 19 Km. de ancho (aproximadamente 10.3 millas náuticas). Sin embargo, la plataforma casi desaparece en la vecindad de los 16°S (Fig. 1, línea 23), donde esta es solo de 5 Km. de ancho (aproximadamente 2.7 millas náuticas). Regionalmente, la parte más profunda del quiebre de la plataforma (alrededor de los 200 metros) ocurre entre los 14°S hasta los 16°S .

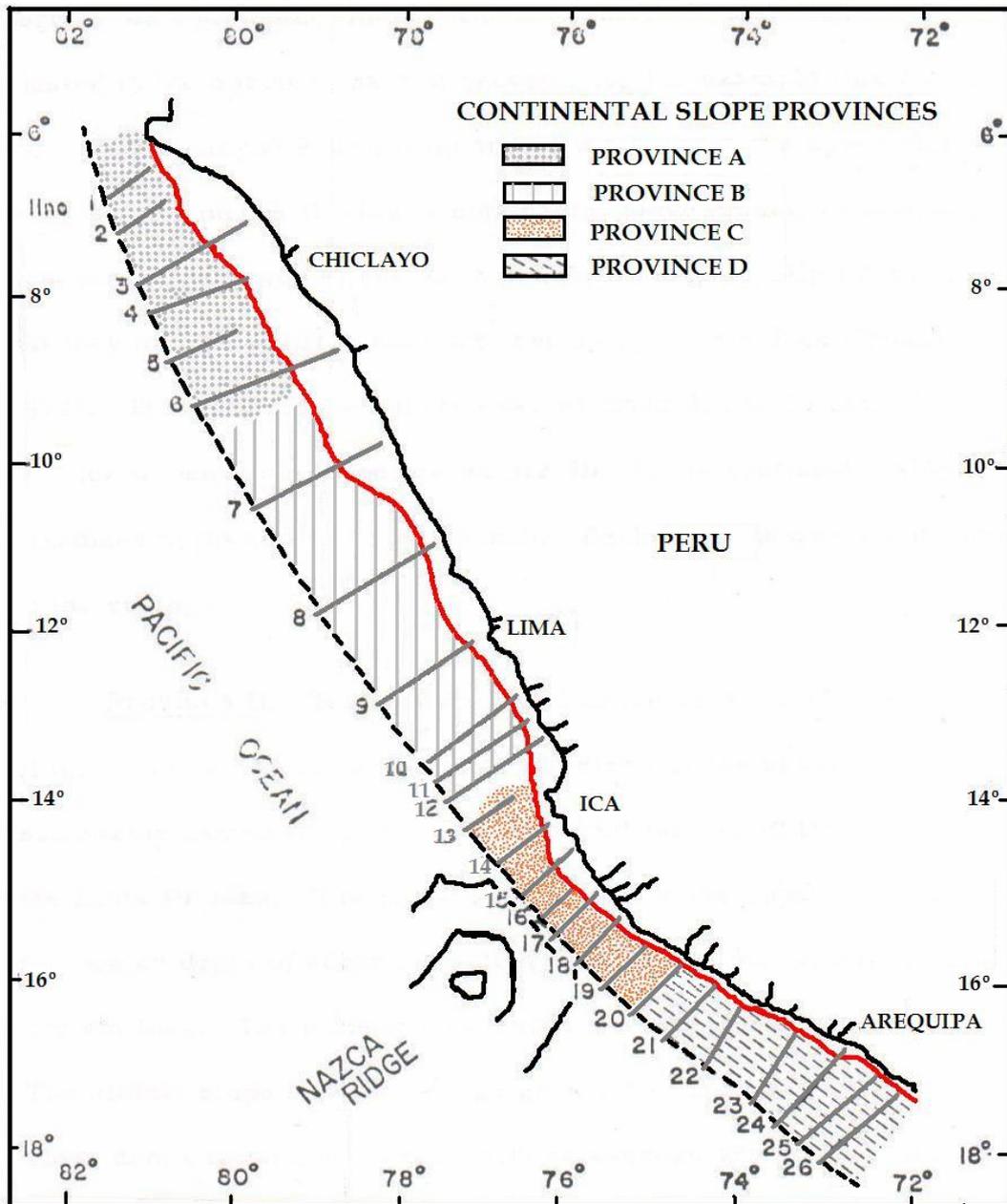


Figura 2. Vista completa de las provincias fisiográficas del talud continental (Masías, 1976).

3.3.1.2. Talud continental

En la actualidad, el talud continental esta dividida en tres secciones: talud superior, talud medio y talud inferior. El talud continental fue dividida por Masías en 1976, en cuatro provincias fisiográficas diferentes (A, B, C y D) (Fig. 2). Aunque los límites entre las

provincias no están siempre bien definidas, estas provincias son áreas con características fisiográficas comunes.

- *Provincia A*

Es la parte de estudio situada más al norte y esta localizada entre los 6°S hasta los 9°30'S (Fig. 2, líneas 1 a 6). Tiene un ancho promedio de 90 Km. (aproximadamente 48.6 millas náuticas) y un suelo marino extremadamente irregular. Las gradientes en el talud continental superior va desde 1:45 hasta 1:35 (Prince, 1974; citado por Masías, 1976). El promedio del talud continental medio es de 1:16 mientras que el talud continental inferior cae en escarpado hacia la fosa con una gradiente promedio de 1:6. Esta región tiene varios cañones submarinos prominentes los cuales tienen sus cabezas cerca del borde exterior de la plataforma continental. El más llamativo y más profundo cañón localizado en la parte norte de la provincia A, por ejemplo la línea 2 (Fig. 3), muestra un cañón de 900 metros de profundidad y 14 Km. de ancho en la cuesta superior.

En la provincia A, el talud continental inferior exhibe numerosos bancos que interrumpen (rompe) la continuidad del talud inferior. Las gradientes entre los bancos son generalmente de 1:8 hasta 1:7, pero ellos pueden ser más grandes cerca de la interfase talud continental – fosa (Prince, 1974; citado por Masías, 1976). El ancho de los bancos varían de 0.5 hasta 10 Km. Un número de bancos pueden ser trazados de forma paralela al talud continental por distancias mayores a 60 Km. Algunos bancos declinan hacia el norte y algunos hacia el sur.

- *Provincia B*

Esta provincia esta localizada entre los 9°30'S hasta 13°S (Fig. 2, línea 7 a 12) y esta caracterizada por la ausencia de grandes cañones submarinos. La característica más prominente en esta provincia es la de la meseta submarina de Lima (*Lima Plateau*). La

meseta Lima esta localizado en el talud superior y se encuentra a profundidades de columna de agua alrededor de 1500 y 2000 metros. Tiene 30 Km. de ancho y alrededor de 250 Km. de largo. El ángulo que hace con la horizontal hacia el oeste de la meseta submarina de Lima contiene gradientes mayores a 1:65. El talud continental medio tiene una gradiente promedio de 1:15 mientras que el talud inferior cae hacia la fosa con una gradiente promedio de 1:8.

Los bancos (*benches*) son menos prominentes y, en general, el relieve del talud es más suave que en la provincia A. Un prominente banco ocurre en el talud inferior, desde los 12°30'S hasta 14°30'S. Tiene 10 Km. de ancho, se encuentra a profundidades alrededor de 4000 m, y puede ser seguido a lo largo del talud continental por una distancia mayor a 160 Km. Este rasgo esta caracterizado por una superficie algo suave.

- *Provincia C*

Esta provincia está situada entre los 14°S hasta 16°S (Fig. 2, líneas 13 a 20) y esta asociado con la Dorsal submarina de Nazca. El talud continental es estrecho aquí (ancho promedio de 68 Km. ó 36.7 millas náuticas) con el punto más estrecho (54 Km. ó 29.1 millas náuticas) que fue localizado aproximadamente en los 14.5°S. El quiebre de la plataforma se profundiza abruptamente en esta provincia y ocurre a una profundidad promedio de 200 metros. El quiebre regional más profundo de la plataforma ocurre en esta provincia. El quiebre de la plataforma tiene una gradiente algo escarpada de 1:13. El gradiente promedio para el talud medio e inferior son de 1:9 y 1:8, respectivamente. Estos gradientes son más escarpados que las observadas en las provincias A, B y D.

Un rasgo de 5 Km. de ancho parecido a un banco se encuentra presente en el talud continental medio a profundidades de 2300 metros (Fig. 3, línea 16). Otro rasgo parecido a

un banco ocurre en el talud inferior entre los 14.5°S y 16.5°S (Fig. 3, líneas 15 a 19); donde su superficie declina desde una profundidad de 3600 metros (línea 15) hasta 5200 metros (línea 19). Este rasgo es 5 a 10 Km. de ancho y puede ser trazada por una distancia mayor a 200 Km. a lo largo del talud continental.

- *Provincia D*

En esta provincia el talud continental tiene un promedio de 104 Km. (aproximadamente 56.1 millas náuticas) de ancho. La topografía mostrada en las líneas 20 hasta 22 (Fig. 2) en la provincia D, parece ser una transición entre las provincias C y D. En esta provincia (16°S hasta 18°S), el talud superior tiene una gradiente promedio de 1:28, el talud medio tiene una gradiente de 1:12 y el talud continental inferior es alrededor de 1:6 (Fig. 3, líneas 20 a 26).

El rasgo más prominente en esta provincia es la meseta submarina de Arequipa (*Arequipa Plateau*) (Fig. 3, líneas 25 a 26). Esta meseta submarina tiene una profundidad entre 500 y 1300 metros, alrededor de 50 Km. de ancho y parece extenderse dentro del norte de Chile. Los cañones son generalmente pequeños o ausentes. Un cañón de 2 Km. de ancho y 200 metros de profundidad en la parte superior a una profundidad de 1000 metros (línea 26). Esta es más profundo en el norte y puede ser seguido a lo largo de la línea 25 (1500 metros), líneas 24 y 23 (Fig. 3) para una distancia mayor a 150 Km.

El talud continental medio (Fig. 3, líneas 23 a 26) representa una topografía irregular, varios cañones submarinos, bancos y un aparente *plateau* cuya continuidad es difícil de seguir. Estos rasgos no pueden ser correlacionados a lo largo del talud debido a los cambios topográficos laterales y abruptos entre las líneas.

En la provincia D, la topografía del talud continental inferior parece ser más uniforme y un gran banco declina hacia la fosa con una gradiente de 1:6.

3.3.1.3. *Fosa*

La Fosa del Perú es una depresión llamativa y se encuentra en la articulación del bloque sudamericano y la Placa de Nazca. Es arqueada, un rasgo cóncavo el cual se extiende a lo largo del margen continental. Su bajío va gradualmente desde profundidades de 7415 metros en el sur a 5780 metros en el norte.

En el estudio realizado por Couch y Whitsett en 1981 se determinó que el punto más somero del eje de la Fosa del Perú se encuentra a una profundidad aproximadamente de 4800 metros, alrededor de los 15°15'S y 76°W (casi frente a San Juan, donde actualmente se encuentra la Dorsal Submarina de Nazca).

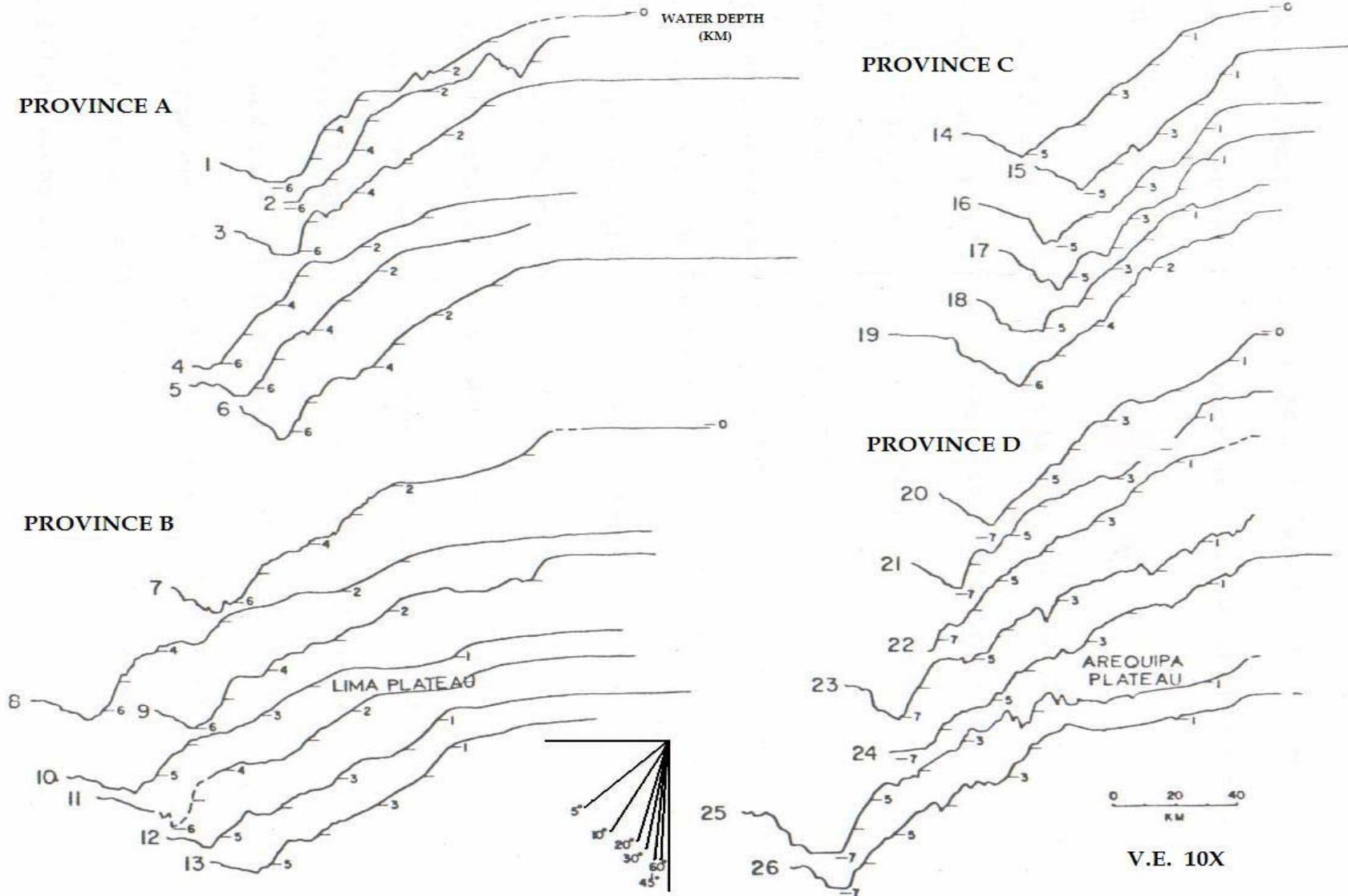


Figura 3. Provincias fisiográficas y perfiles batimétricos. Nótese las locaciones de la meseta submarina de Lima (*Lima Plateau*) y la meseta submarina de Arequipa (*Arequipa Plateau*).

3.4. Estructuras geológicas a lo largo del margen continental peruano

Las estructuras geológicas a lo largo del margen continental peruano están constituidas por varias formaciones y/o estructuras como son los cañones submarinos, el Alto del Borde de la Plataforma (*Outer Shelf High - OSH*) que separa las cuencas de antearco externas e internas; las cuencas sedimentarias del antearco interno, las cuencas sedimentarias del antearco externo y el Umbral del Talud Superior (*Upper Slope Ridge - USR*). La región del antearco propiamente dicho se extiende entre la fosa y el arco magmático (Cordillera Occidental) (Macharé *et al.*, 1986). Los cañones submarinos principalmente se encuentran en el norte del margen continental entre las latitudes de 6°S y 7.5°S. Por otro lado, las cuencas sedimentarias se encuentran a lo largo del margen continental peruano rodeadas de este a oeste por el Alto del Borde de la Plataforma (*OSH*) y el Umbral del Talud Superior (*USR*).

Estas dos estructuras proveen un esqueleto que moldea la geometría y la distribución de las cuencas sedimentarias de la plataforma y el talud superior a lo largo del margen continental peruano (Kulm y Thornburg, 1981).

Las composiciones de estas estructuras han sido determinadas por el grupo científico Proyecto “Placa Nazca” en el año 1973 donde se realizaron estudios geofísicos (refracción y reflexión sísmica) y estudios geológicos. En este estudio propusieron que la composición de la *OSH* puede ser inferida de las litologías de las estructuras de la costa: rocas cristalinas y metasedimentos del Paleozoico y Precámbrico cortadas por Intrusitas del Mesozoico (Travis *et al.*, 1976; citado por Kulm y Thornburg, 1981). Esta inferencia esta bien sustentada por la exposición de islas en varias zonas del margen continental (Masías, 1976; de Almeida *et al.*, 1978; Kulm *et al.*, 1981b; Kulm y Thornburg, 1981). Importante evidencia

también soportó la inferencia de la composición de la *USR*, la cual indicó que los sedimentos deformados de las cuencas la pueden constituir. Además se sospechó que la *USR* es lateralmente heterogénea con los sedimentos de varias eras que han sido deformados durante varias orogénesis de la cuesta superior, la cual define su composición (Kulm y Thornburg, 1981).

El Alto del Borde de la Plataforma (*OSH*) se encuentra relativamente cerca de la costa y termina aproximadamente a los 200 metros que en la mayoría de las partes de la plataforma es el borde y el quiebre que limita la plataforma con el talud continental superior (*Shelf break*). Esta elevación contiene las principales islas que sobresalen sobre el nivel del mar en la actualidad y hace muchos millones de años en el pasado se encontraban por debajo del nivel del mar.

Las cuencas sedimentarias de la plataforma continental de norte a sur son Cuenca Sechura, Cuenca Salaverry, Cuenca Huacho, Cuenca Pisco Este y Cuenca Caballas¹. Las cuencas sedimentarias del talud continental superior de norte a sur son Cuenca Trujillo, Cuenca Lima, Cuenca Pisco Oeste, Cuenca Mollendo¹ y Cuenca Arequipa. La Cuenca Yaquina (denominada así en el estudio hecho por el Proyecto “Placa de Nazca”) se encuentra dentro de dos brazos divergentes de la *USR*. Todas estas cuencas se encuentran distribuidas y limitadas por la *OSH* y *USR* (Kulm y Thornburg, 1981).

¹ Estas dos cuencas sedimentarias fueron presentadas en el margen continental peruano por Couch y Whitsett en 1981 (Proyecto “Placa de Nazca”). Se desconoce si estas se encuentran en la plataforma o talud superior continental, pero por su ubicación en el gráfico (ver Couch y Whitsett, 1981) se asume que la Cuenca Caballas se encuentra en la plataforma continental y la Cuenca Mollendo esta en el talud continental superior.

3.5. Estudio batimétrico y morfológico entre la latitud 11°S y 15°S

3.5.1. ¿Porqué entre la latitud 11°S y 15°S?

La presente investigación se enfoca principalmente en contribuir con el conocimiento de batimetría buena y rasgos morfológicos entre la latitud 11°S y 15°S de los primeros 1500 metros del margen continental peruano que abarca la plataforma continental y el talud continental superior.

El primer motivo de este estudio se debe, a que en la actualidad, se están llevando a cabo estudios paleoceanográficos en el margen continental peruano gracias al proyecto “Investigaciones Paleoceanográficas en el Margen Continental Peruano” realizado en el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y es necesario contar con una batimetría y morfología buena en las zonas donde se realizan este tipo de prospecciones (desde 11°S hasta 15°S). Gracias a este proyecto se pudo realizar el estudio batimétrico y morfológico en esta zona (en los alrededores de Callao y Pisco), debido a que es muy probable que las condiciones morfológicas del suelo marino en esta parte del margen influyan en gran medida en el proceso de sedimentación y los diferentes tipos de sustratos que se depositen en el fondo marino (p. e.; fango, arcillas, arenas, cantos rodados, costras de fosforita, arenas fosfáticas, etc.). Estas características del suelo marino pueden también contribuir en las condiciones hidrodinámicas y procesos de afloramientos en la columna de agua, debido a que en previos estudios se ha determinado que en eras pasadas existió un fuerte proceso de erosión en el suelo marino por estas condiciones (p. e., en el Plioceno y Eoceno) (Kulm y Thornburg, 1981; Suess y von Huene, 1990; Cliff *et al.*, 2003; Hampel et al., 2004). Esto quiere decir que los procesos de erosión fueron provocados por el flujo de masas de agua existentes en las corrientes y en los procesos de afloramiento; los cuales tuvieron gran

variabilidad e incrementaron en gran medida sus condiciones en el pasado (Kulm y Thornburg, 1981; Suess y von Huene, 1990; Reinhardt *et al.*, 2002). Es por eso que si existe una morfología muy variante en el suelo marino en estas zonas, estas condiciones hidrodinámicas y de afloramientos en la columna de agua tal vez no “perturben” de manera importante la acumulación y preservación de sedimentos laminados en el fondo marino, los cuales son la principal fuente de investigación en estos estudios.

El segundo motivo por el cual se escogió el área comprendida entre estas latitudes se debe a que en el estudio realizado por Hampel en el año 2002 y 2004 (Proyecto GEOPECO) se señala que ocurrió un cambio en la morfología del suelo marino desde los 11.2°S hasta los 15°S, debido al proceso de subducción causado por la Dorsal Submarina de Nazca. Este estudio señala que hace 11 millones de años empezó el proceso de subducción de la Dorsal Submarina de Nazca en el grado 11.2°S, la cual migró hacia el sur barriendo todo el margen continental hasta su posición actual en los 15°S (Hampel, 2002; Hampel *et al.*, 2004; Cliff *et al.*, 2003; Pecher *et al.*, 2001; Pecher, 1996). Esto ocasionó que existiera a largo plazo un realce del régimen erosivo (primero un importante levantamiento y luego una subsidencia muy fuerte), causando un levantamiento significativo del antearco que acompañó el paso de la Dorsal de Nazca (von Huene *et al.*, 1990; en Suess y von Huene, 1990; Macharé y Ortlieb, 1992, le Roux *et al.*, 2000; citado por Hampel *et al.*, 2004; Hampel, 2002, Cliff *et al.*, 2004). Este barrido originado por la migración de la Dorsal Submarina de Nazca en toda esta área ha podido influir de manera importante en la morfología actual y la distribución de los sedimentos superficiales del suelo marino en esta parte del margen, pero esto no puede ser probado únicamente con la construcción de un mapa morfológico y batimétrico; ya que es necesario comparar las zonas que han sufrido subsidencia (erosión) ó acreción con estudios de cronología realizados en la estructura estratigráfica de los sedimentos de cada zona (Hampel, 2005; comunicación personal). Por otro lado, Hampel en el año 2003

(Hampel *et al.*, 2004) demuestra y sugiere con dos experimentos análogos en 3D (*two three-dimensional sandbox experiments*) y con un modelo de caja de arena (*sandbox model*); que el paso de la dorsal indujo a un cambio significativo en la morfología de la plataforma y el talud continental debido a que realiza la erosión; y esto es evidenciado por la presencia de fallas oblicuas normales en la plataforma y superficie del continente. Teves en el año 1975, así como en Macharé y Ortlieb, 1992; también observaron presencia de fallas normales sobre la superficie del continente en el estudio realizado sobre las terrazas marinas de San Juan de Marcona, además del levantamiento de las terrazas que esta posiblemente asociado a la subducción de la Dorsal Submarina de Nazca pero que no fue determinado en sus estudios. Cuando Hampel *et al.*, en el año 2004 comparan los resultados de los experimentos realizados con la naturaleza del suelo marino de esa zona pueden concluir que efectivamente existe una relación real debido a la erosión observada en la morfología y varias secciones sísmicas realizadas en esta zona (presencia de cañones, guyots y deslizamientos) pero es poca la información morfológica disponible en zonas aledañas (plataforma y talud) y en la superficie del continente, así como su edad (ya que se necesita conocer la edad de las estructuras para determinar en que época ocurrieron estos eventos geológicos y rasgos morfológicos).

El tercer motivo por el cual se escogió el área entre estas latitudes es observada en el estudio realizado por el proyecto “Placa de Nazca” en el año 1973 y señalado por Masías en el año 1976. Masías (1976) en su estudio solamente muestra tres perfiles batimétricos entre las latitudes 11°S y 15°S (ver Masías, 1976), las cuales no muestran de forma clara cuales son los rasgos morfológicos completos de un área muy extensa. Además, durante la obtención de información batimétrica en el desarrollo del proyecto “Placa de Nazca” sólo se obtuvieron pocos perfiles en esta área (Kulm y Thornburg, 1981).

Los cuatro objetivos de este estudio son:

- Mejorar la batimetría existente de los primeros 1500 metros del margen continental peruano entre la latitud 11°S y 15°S (plataforma y talud superior de zona central-sur).
- Determinar de forma precisa (10 transeptos) la distancia existente desde el borde actual de la costa hasta el quiebre de la plataforma entre los 11°S y 15°S (*Shelf-edge*).
- Dilucidar y mostrar imagen 3D las estructuras superficiales existentes en el suelo marino entre estas latitudes a diferentes profundidades en la plataforma continental y talud continental superior (0 a 1500 metros de profundidad).
- Calcular los valores de pendiente en los puntos de quiebre de la plataforma (10 transeptos).

3.6. Resultados

La cantidad de datos batimétricos provenientes de registros hidroacústicos digitales de 35 cruceros de prospección pesquera (IMARPE), con los cuales se quiere representar en forma de mapas de contornos batimétricos e imágenes la morfología del suelo marino de la zona central-sur de la plataforma continental y talud superior continental (desde 11°S hasta 15°S) utilizando Tecnología SIG; fue de aproximadamente 6.2 millones.

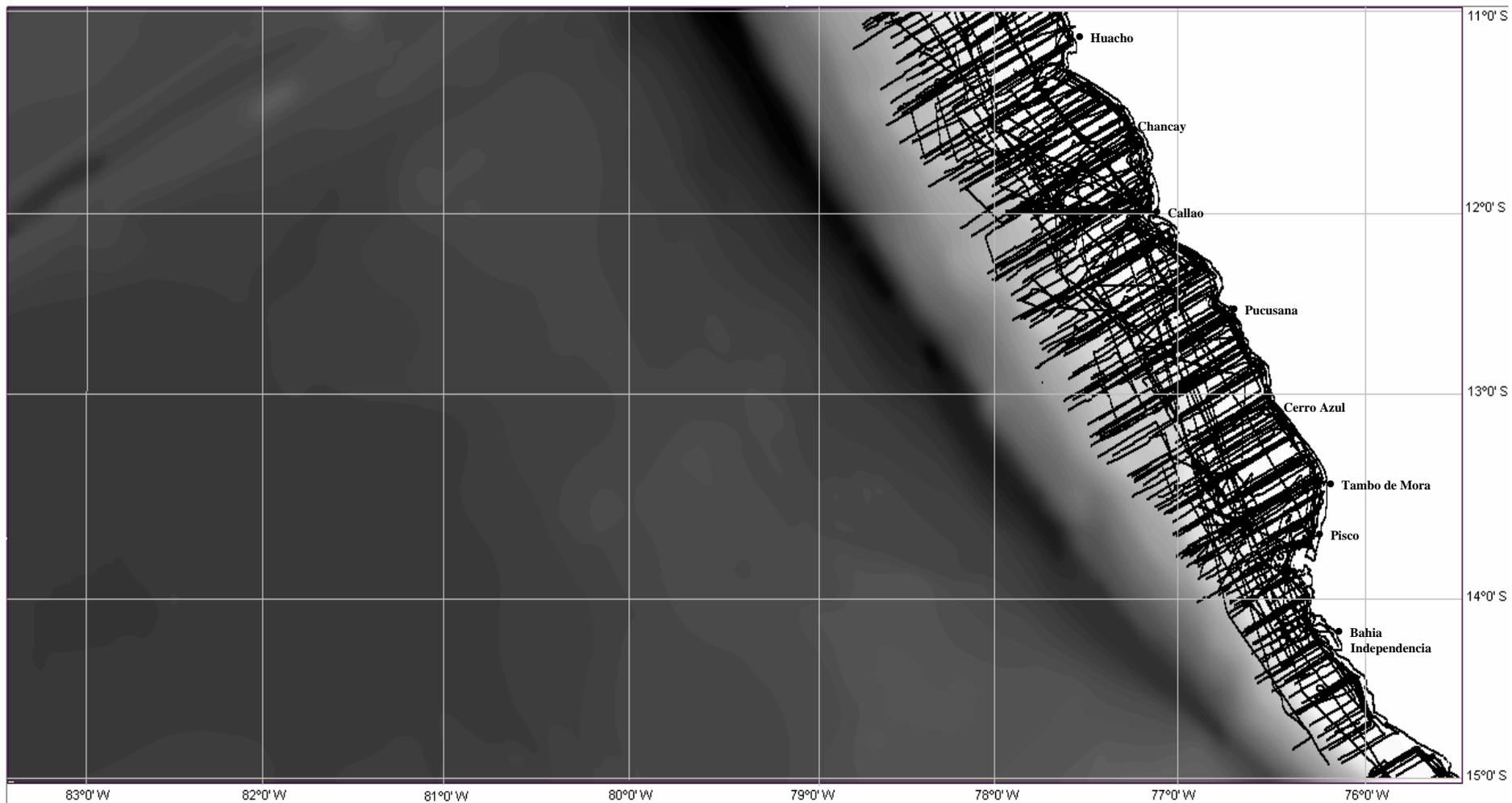


Figura 4. Distribución de los puntos batimétricos obtenidos de los 35 cruceros hidroacústicos de prospección pesquera. Mapa base de contornos cada 100 metros (GEBCO).

La preparación de todo el conjunto de datos para la creación de mapas e imágenes fue posible separando toda el área de estudio (desde 11°S hasta 15°S) en zonas con similares características morfológicas en el relieve del suelo marino. Antes de separar las zonas, se creó un mapa de referencia para averiguar que áreas del suelo marino tenían similares características morfológicas. Este mapa de contornos batimétricos en 2D fue creado con el *Golden Software Surfer v. 8*, utilizando el método de interpolación *Poder Inversa a la Distancia*, debido a que este mapa no presentó muescas simétricas. El área de estudio fue dividida en ocho (8) zonas:

► Zona 1

El área de esta zona esta delimitada desde 11°S hasta los 11°45'S en latitud y, desde 78°53'W hasta los 78°6'W en longitud.

► Zona 2

El área de esta zona esta delimitada desde 11°45'S hasta los 12°30'S en latitud y, desde 78°32'W hasta los 77°18'W en longitud.

► Zona 3

El área de esta zona esta delimitada desde 12°30'S hasta los 13°36'S en latitud y, desde 78°2'W hasta 76°48'W en longitud.

► Zona 4

El área de esta zona esta delimitada desde 11°S hasta los 11°45'S en latitud y, desde 78°6'S hasta la línea de costa en longitud.

► Zona 5

El área de esta zona esta delimitada desde 11°45'S hasta 12°30'S en latitud y, desde 77°18'W hasta la línea de costa en longitud.

► Zona 6

El área de esta zona esta delimitada desde 12°30'S hasta los 13°36'S en latitud y, desde 76°48'W hasta la línea de costa en longitud.

► Zona 7

El área de esta zona esta delimitada desde 13°36'S hasta los 14°6'S en latitud y, desde 77°6'W hasta la línea de costa en longitud.

► Zona 8

El área de esta zona esta delimitada desde 14°6'S hasta los 15°S en latitud y, desde 76°48'W hasta la línea de costa en longitud.

La separación del área de estudio en ocho (8) zonas permitió que las operaciones estadísticas y matemáticas llevadas a cabo por los métodos geoestadísticos y de interpolación en el SIG, necesarias para el modelado de las superficies en 2D y 3D en esta tesis; tengan mayor rapidez y sean operadas con facilidad durante sus procesos.

Se creó mapas de contornos batimétricos e imágenes en 3D para cada zona utilizando el método de interpolación *Kriging*. Para realizar la interpolación usando *Kriging*, fue necesario realizarle a cada zona una validación geoestadística con la finalidad de ajustar todos los valores a una tendencia, la cual proporcionará mayor exactitud y precisión en los mapas e imágenes. La validación por medio de métodos geoestadísticos también “pondrá al

descubierto” cuanto error existe en la creación del mapa y/o en los datos de entrada para la creación de estos.

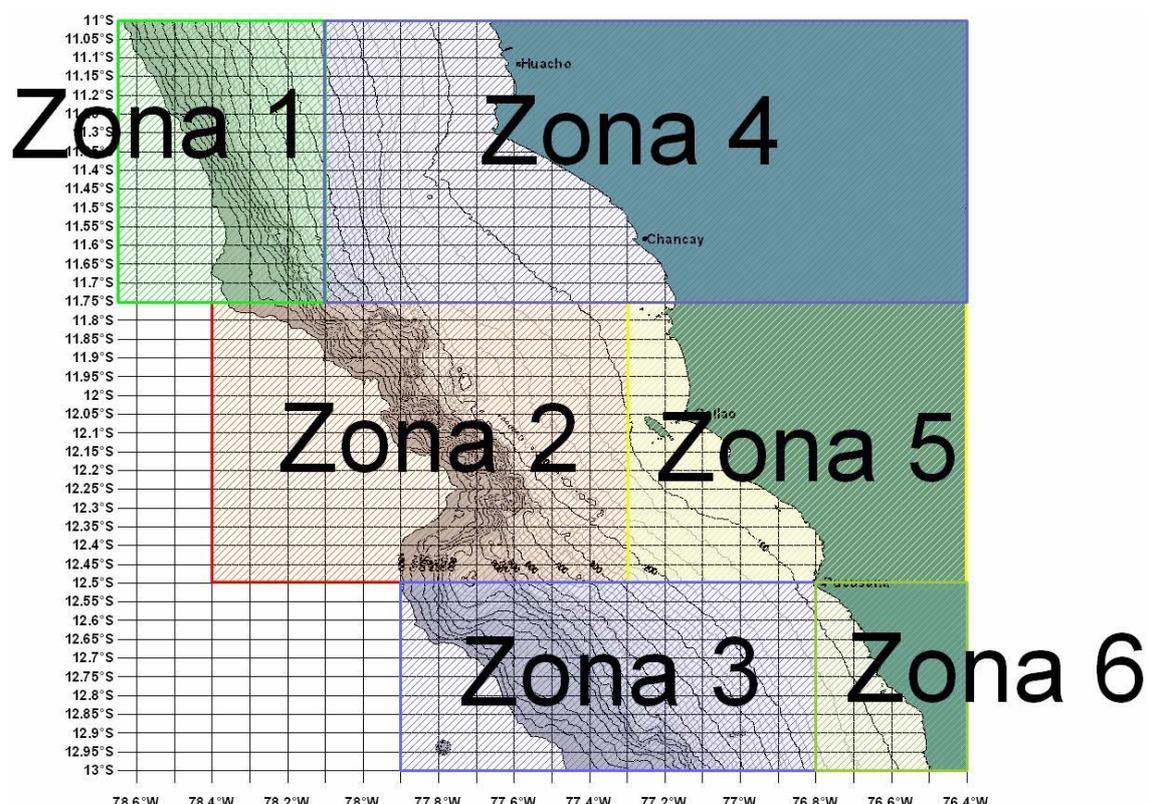


Figura 5. Zonificación del área de estudio (primera parte desde 11°S hasta 13°S). Mapa de contornos batimétricos en 2D creado con *Golden Software Surfer* a una resolución de 500 metros.

El método geoestadístico utilizado para validar las ocho (8) zonas fue el Método Kriging Ordinario para la Predicción de Mapas (*Geostatistical Method Ordinary Kriging with Prediction Map*). Además, se utilizaron tres modelos para modelar el semivariograma de los datos; estos modelos fueron el modelo Esférico (*Spherical model*), el modelo Exponencial (*Exponential model*) y el modelo Gaussiano (*Gaussian model*).

De los tres modelos mencionados anteriormente, se observó una tendencia muy similar entre el Exponencial y el Esférico cuando se crearon los semivariogramas, así como en los valores obtenidos de estos (*Lag Size, Major Range, Partial Sill* y *Nugget*). Por el contrario, el

modelo Gausiano mostró una tendencia con mayor ajuste a los datos evaluados. De forma general, estos modelos son representativos ante los demás modelos geoestadísticos, aparte de ser los de mayor uso y mayor estudio; es por eso que se usó solamente estos modelos, como primer paso, para observar la correlación geoestadística de los datos batimétricos. Los valores obtenidos de los modelos geoestadísticos, con los cuales se evaluaron los datos batimétricos en cada una de las 8 zonas, serán mostrados en el Anexo 1.

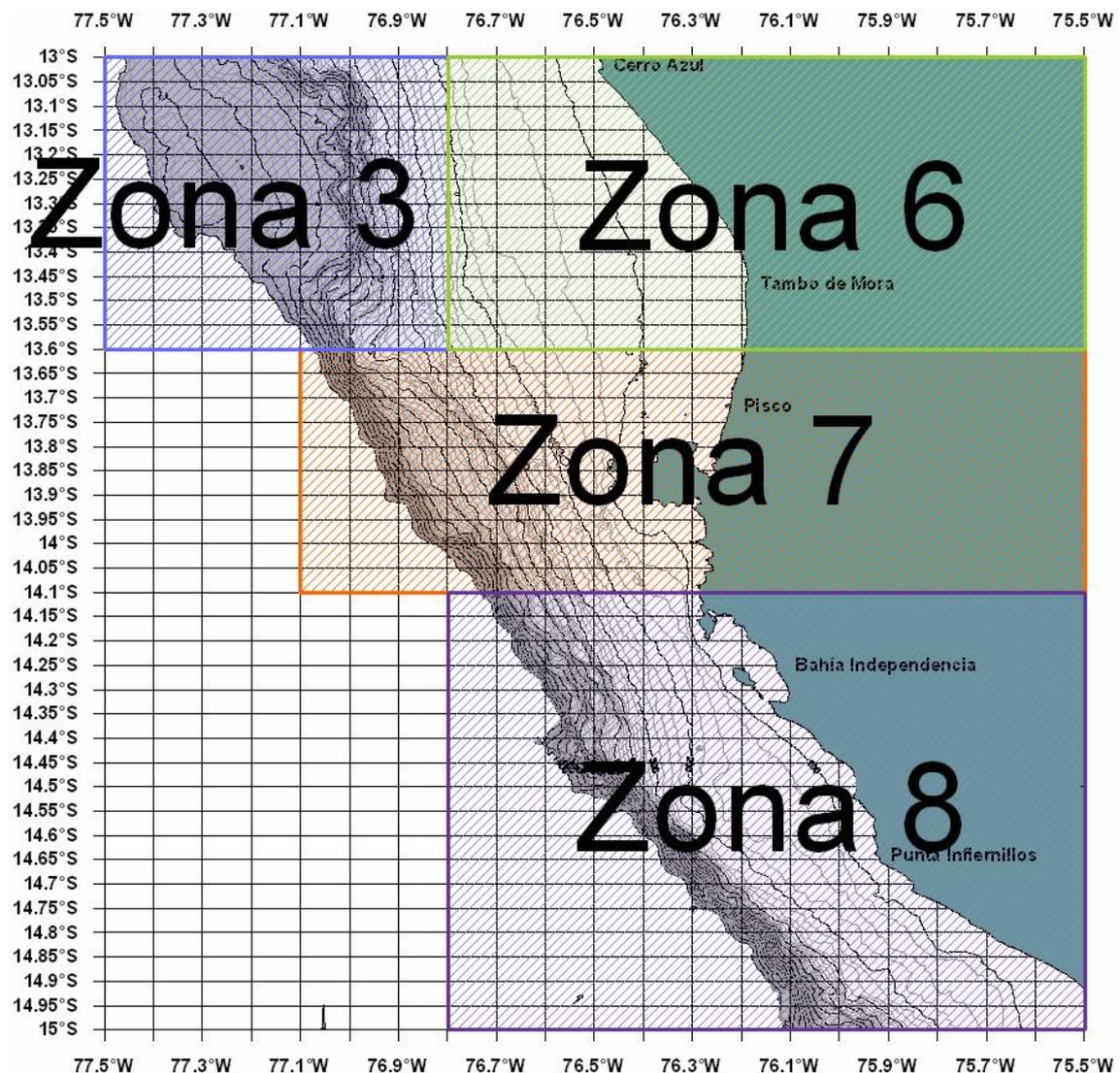


Figura 6. Zonificación del área de estudio (segunda parte desde 13°S hasta 15°S). Mapa de contornos batimétricos en 2D creado con *Golden Software Surfer* a una resolución de 500 metros.

Para la creación de los contornos batimétricos e imágenes del relieve de la superficie del suelo marino para las ocho zonas de estudio se probó varios tipos de interpolaciones (*Kriging*, *Spline*, *IDW*) con diferentes valores de interpolación (ya sean distancias de 10, 25, 50, 100, 500, 1000 y 5000 km de radio de interpolación con números de puntos para la interpolación en ese radio de 100, 1000, 10 000, 100 000, 500 000 y 1 000 000). Debido a que, definitivamente, estos valores tienen mucha variabilidad espacial (debido a estar dispersos) y, fue necesario modelar pequeñas y grandes áreas donde no se tienen valores de profundidad, se decidió utilizar el método *Kriging* con los valores geoestadísticos obtenidos del modelo Gaussiano y, los valores de interpolación de 1000 km como máxima distancia de radio, 1000 como la cantidad de número de puntos para la interpolación dentro de ese radio y 250 metros de tamaño de celda para el *raster*. Se observó, en todas las interpolaciones, que a partir de esta forma de crear las superficies se mantenía una constante en las imágenes, no existía mayor cambio en las características del relieve y, además, no demoraba mucho tiempo en su creación (en promedio de 30 a 1 hora para cada zona). Esto fue un gran avance y alivio en la creación de las imágenes ya que, en un principio se intentó crear la superficie del suelo marino utilizando todo el conjunto de datos (es decir, los 6.2 millones de datos batimétricos en un único *shapefile*). Esta forma de creación, para todos los métodos de interpolación, creó gran problema debido a que en tres oportunidades se esperó de 13 a 15 días de procesamiento continuo sin obtener resultados exitosos. Es por eso, que la separación del área de estudio, se convirtió en un gran alivio y rápida manipulación para la creación de estas superficies.

Además, se utilizó el método de triangulación *TIN* para obtener una observación general de toda el área de estudio y de las ocho zonas por separado. Este método, el cual es muy bueno para tener un panorama general de cómo se comporta el conjunto de datos; demoró en promedio dos horas para la creación de la superficie entera y 5 minutos para la creación

en cada zona, pero, ya que este método presenta muchas facciones angulosas por trabajar con la unión de valores reales por medio de triángulos, no se tomó en cuenta para observar el suelo marino. Lo rescatable de este método, es que origina los triángulos desde los puntos existentes observados en el conjunto de datos (valores reales), y no trabaja con datos promediados como lo hacen los demás métodos (p.e., *Kriging*, *IDW*).

Además, para la creación de los mapas e imágenes del relieve del suelo marino, sólo se mostrarán las superficies que fueron modeladas con el conjunto de datos al cual no se le aplicó la corrección oceanográfica. Esto se debe a que, al momento de crear las superficies con los datos batimétricos “limpios” (ó corregidos con información oceanográfica); luego de la interpolación y el modelado de las superficies se observaron en las áreas (ó “huecos”) que carecen de puntos batimétricos gran cantidad de “artefactos”. Estos “artefactos” son comunes en áreas donde el método de interpolación no pudo suavizar la superficie.

Es muy probable que la aparición de estos “artefactos” hayan sido consecuencia de dos hechos:

- ▶ La velocidad del sonido, determinada en la calibración del ecosonda científica antes del crucero y descrito por ICES (ICES, 1987), utilizada por cada uno de los 35 cruceros hidroacústicos de prospección pesquera evaluados para la obtención de información batimétrica varió en un amplio rango, el cual fue desde los 1500 m/seg (calibración por defecto) hasta los 1529.384 m/seg. Este amplio rango de velocidades de sonido, las cuales fueron utilizadas para recuperar información batimétrica de los registros hidroacústicos digitales, posiblemente proporcionó información batimétrica con diferencias en profundidad considerable (p.e., entre 10 a 50 metros) para lugares con similares profundidades de columna de agua. Este hecho pudo ser más importante en

profundidades mayores de columna de agua (entre 1000 a 3000 metros de profundidad de columna de agua), que son las áreas en las superficies modeladas donde se pueden apreciar estos “artefactos”. Por consecuencia, la aplicación de corrección oceanográfica a datos entre estas profundidades (corrección oceanográfica explicada en el capítulo de metodologías), y en general mayores a 800 y 900 metros de profundidad; sufrieron de una disminución importante en los valores de profundidad. Por ejemplo, datos sin corrección oceanográfica con una profundidad de 1400 metros y obtenido con la velocidad de sonido de 1529.384 m/seg, sufre una disminución aproximada de 160 metros (es decir, los datos corregidos utilizando esa velocidad del sonido tendrán aproximadamente 1240 metros). Utilizando el mismo ejemplo, datos sin corrección oceanográfica obtenido con la velocidad de 1500 m/seg (calibración por defecto) y con una profundidad de 1400 metros, sufre una disminución aproximada de 40 metros (es decir, los datos corregidos utilizando esa velocidad de sonido del sonido tendrán aproximadamente 1360 metros). Por tal razón, es muy probable que datos batimétricos con este tipo de problema y que tengan una relativa cercanía produzcan este tipo de “artefactos” en las superficies modeladas a partir de datos batimétricos corregidos con información oceanográfica (también llamados “datos limpios”). Este problema no escapa a los datos sin corrección oceanográfica, solamente que la aparición de “artefactos” es menor y son apreciables en lugares donde la distancia sin datos batimétricos es muy grande (p. e., 5 a 15 km de largo entre transeptos). Un ejemplo claro de esto se aprecia en las figuras de la zona 8 que se mostrarán en la sección “Mapas”.

- El otro hecho que puede ocasionar los “artefactos”, y es sin lugar a dudas el más importante a considerar cuando se modelan superficies de este tipo; es la inexistencia de datos batimétricos en sitios que poseen grandes extensiones de área. Ejemplos notables se dan en sitios donde hay considerable profundidad de columna de agua (p.e., a partir

de 1400 y/o 1500 metros de profundidad). Sin embargo, esto no sólo ocurre en sitios de considerable profundidad de columna de agua, sino que también ocurre en zonas donde la profundidad de columna de agua es relativamente poca (p.e., 50 a 300 metros). En el último caso, a pesar de que las distancias entre transepto y transepto están en el orden de 5 a 10 km (áreas de 350 km²); existen al menos uno ó dos transeptos de comprobación (se le dice así a los transeptos que cortan otros transeptos y son utilizados cuando se realizan estudios específicos de batimetría; pero, en este caso, sólo fue coincidencia cuando se separaron y seleccionaron los transeptos de cada crucero que ocasionó la presencia de transeptos de comprobación) que cortan estos transeptos (reducen el área a 150 km²) y proporcionan datos adicionales en estos sitios sin datos, los cuales mejoran la calidad de interpolación y disminuye la aparición de “artefactos”. Estos transeptos de comprobación no ocurren en lugares con considerable profundidad de agua, debido a que el diseño de transeptos en los cruceros de prospección pesquera se basa en la evaluación de recursos pelágicos, mesopelágicos y/ó bentónicos, y estos a su vez se encuentran, en la mayoría de casos, muy cerca o relativamente cerca de la costa.

Además, la información batimétrica que se obtuvo de los dos cruceros alemanes (*GEOPECO SO-146* y *Peru Upwelling SO-147*) sirvió para completar el trabajo realizado en los cruceros IMARPE, ya que es necesario tener un panorama completo de cómo se desarrolló la historia dinámica del suelo marino en esta área de estudio, lo cual es clave importante para muchos procesos desarrollados en la columna de agua, el suelo marino y por debajo de éste. El modelado de la superficie del suelo marino utilizando todo el conjunto de datos (el cual es aproximadamente de 38 millones de puntos batimétricos) no se realizó debido a que no se puede estimar con certeza cuanto tiempo demoraría y que tipo de equipo de cómputo se debería utilizar para su procesamiento. Se sugiere el uso de

un “servidor” (*Server*), equipo que posee, por ejemplo, las siguientes características: Pentium 4 CPU, 3.4 GHz con 1GB de memoria RAM y 150 GB de Disco Duro; lo cual permitirá efectuar, seguramente sin ningún problema, la creación de esta superficie.

3.6.1. Mapas

A continuación se presentarán los mapas e imágenes de la superficie del suelo marino de toda el área de estudio (desde 11°S a 15°S) procesadas y modeladas usando Tecnología SIG.

Los rangos de profundidad para todos los mapas e imágenes de la superficie del suelo marino en cada una de las zonas de estudio (desde la zona 1 hasta la zona 8) van desde 0 metros (nivel del mar) hasta 1500 metros de profundidad de columna de agua, con 50 metros de separación entre contorno y contorno.

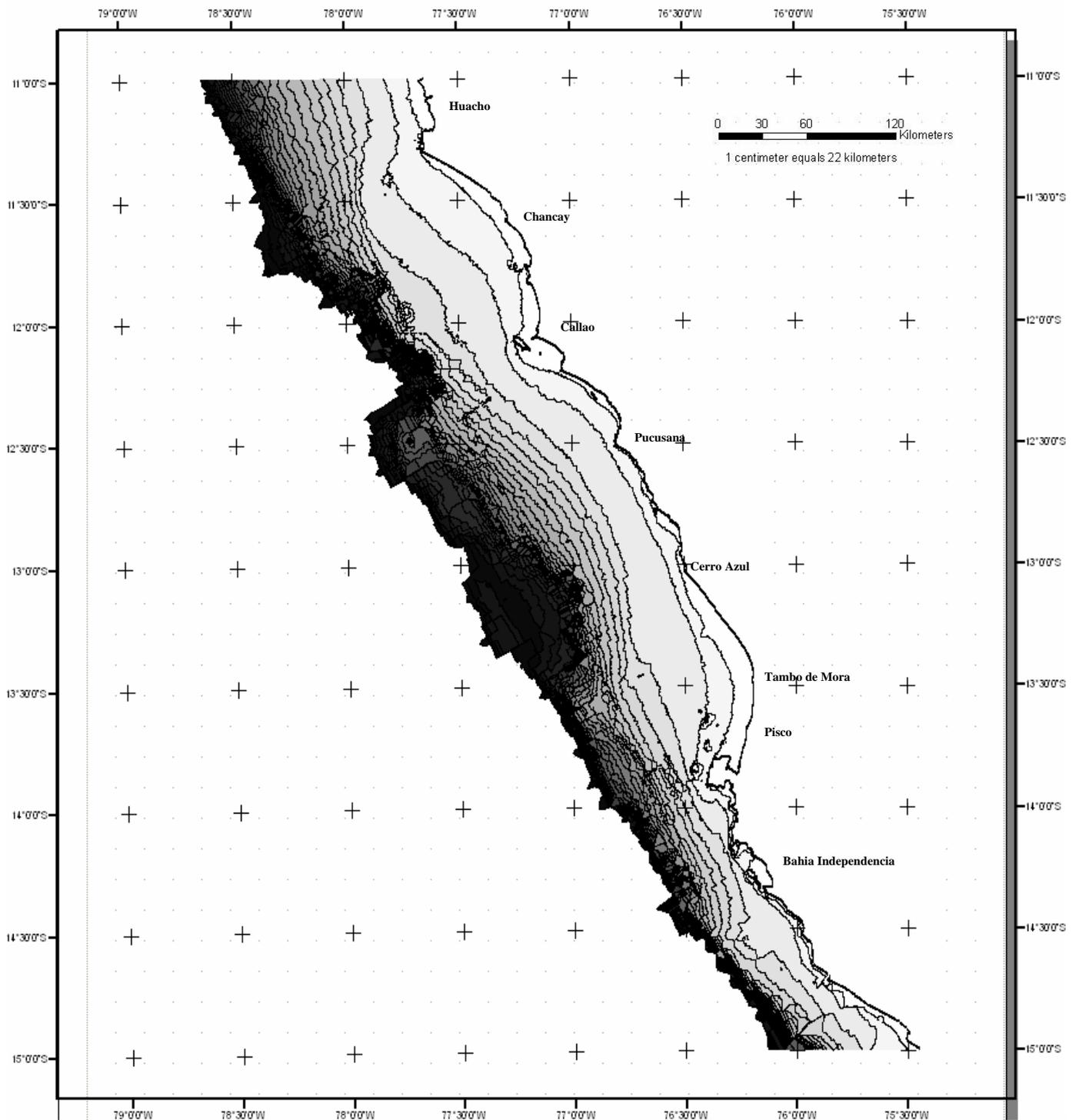


Figura 7. Mapa batimétrico de la plataforma y talud superior de la costa central-sur del margen continental peruano (desde 11°S hasta 15°S). Contornos de 0 a 1500 metros de profundidad de columna de agua con intervalos de separación de 50 metros.

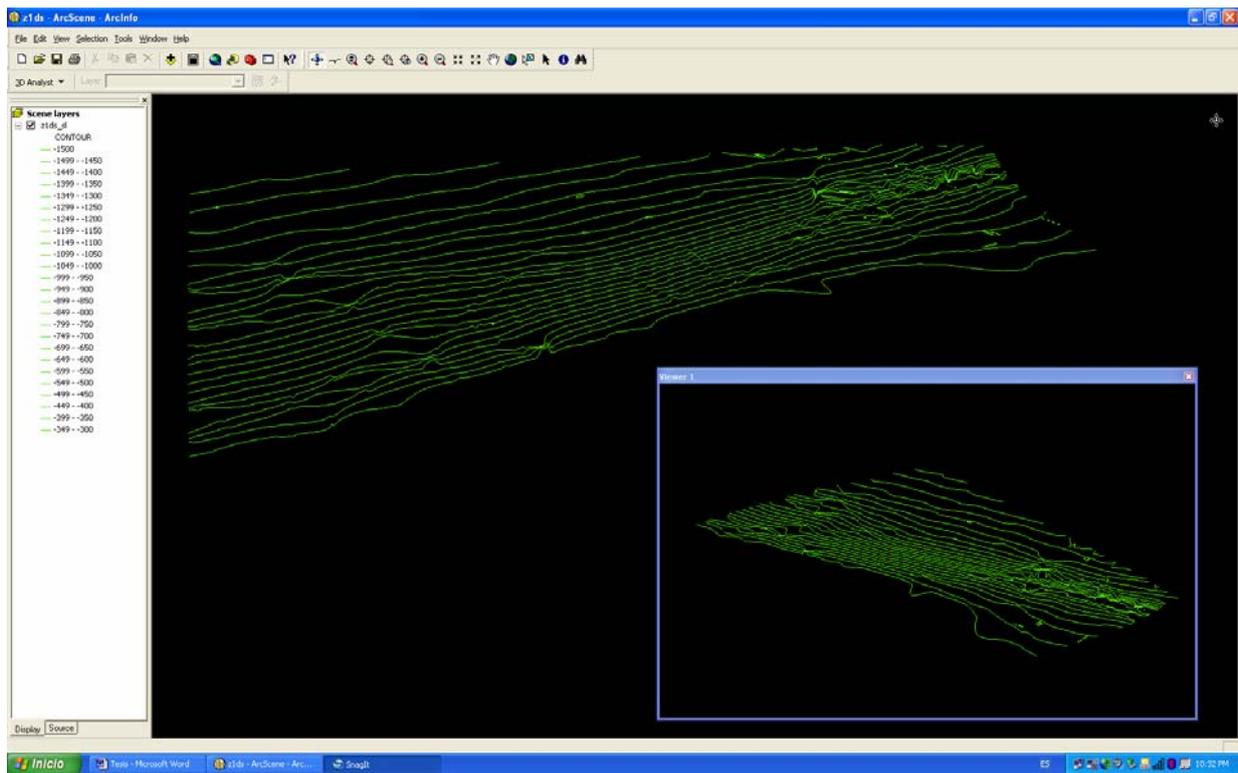


Figura 8. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 1.

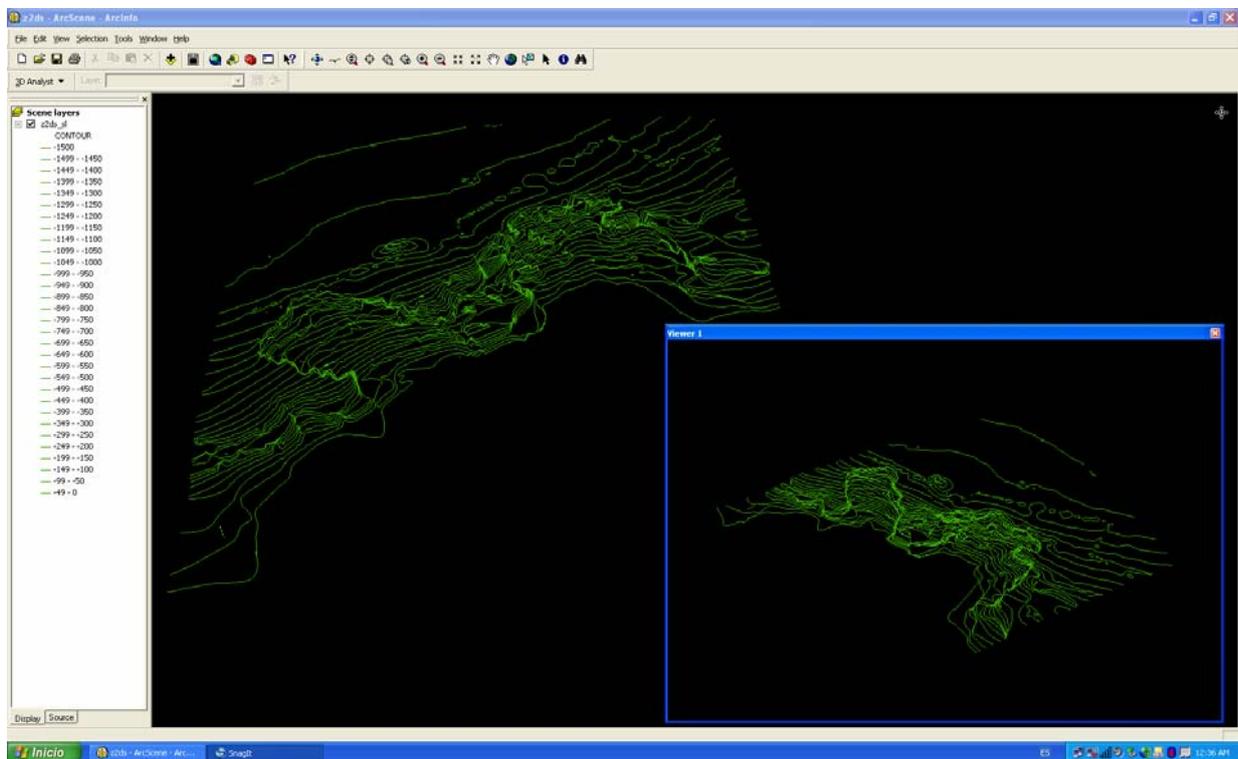


Figura 9. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 2 (alrededores de las Islas Hormigas).

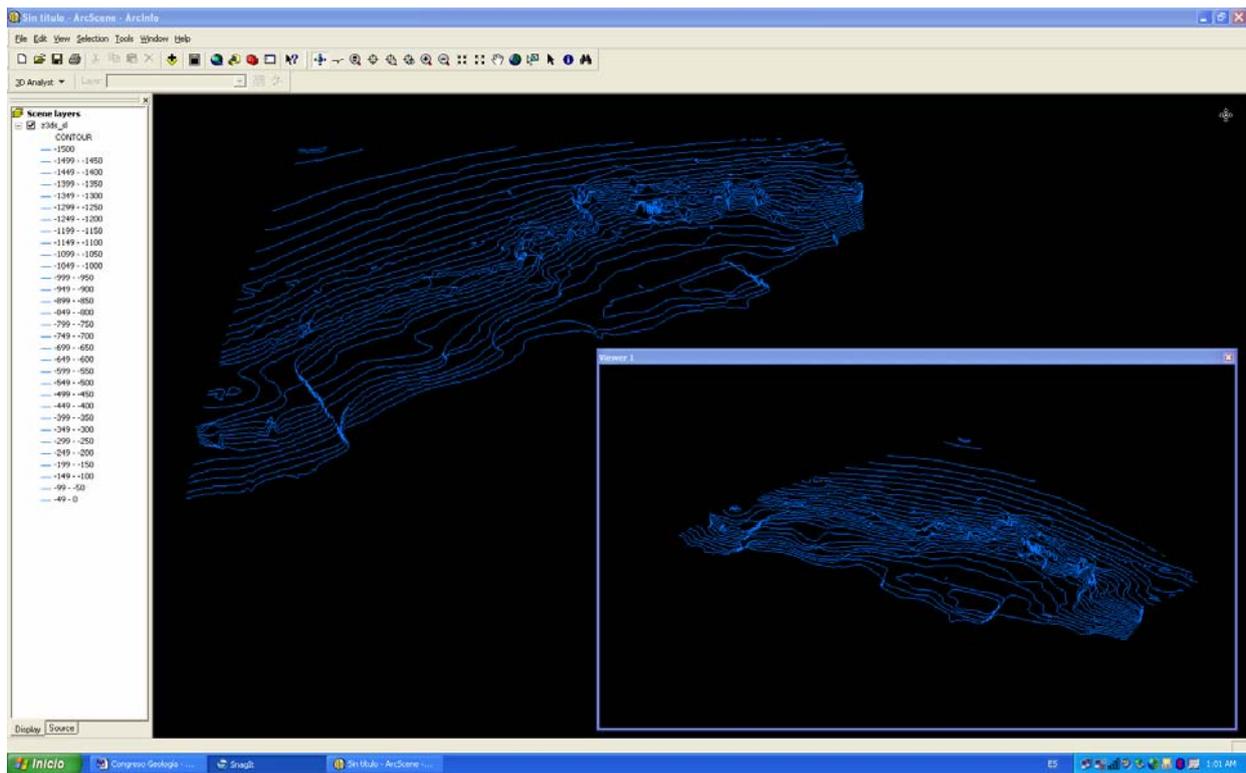


Figura 10. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 3 (alrededores de la Meseta Submarina de Lima – *Lima Plateau*) (Masías, 1976).

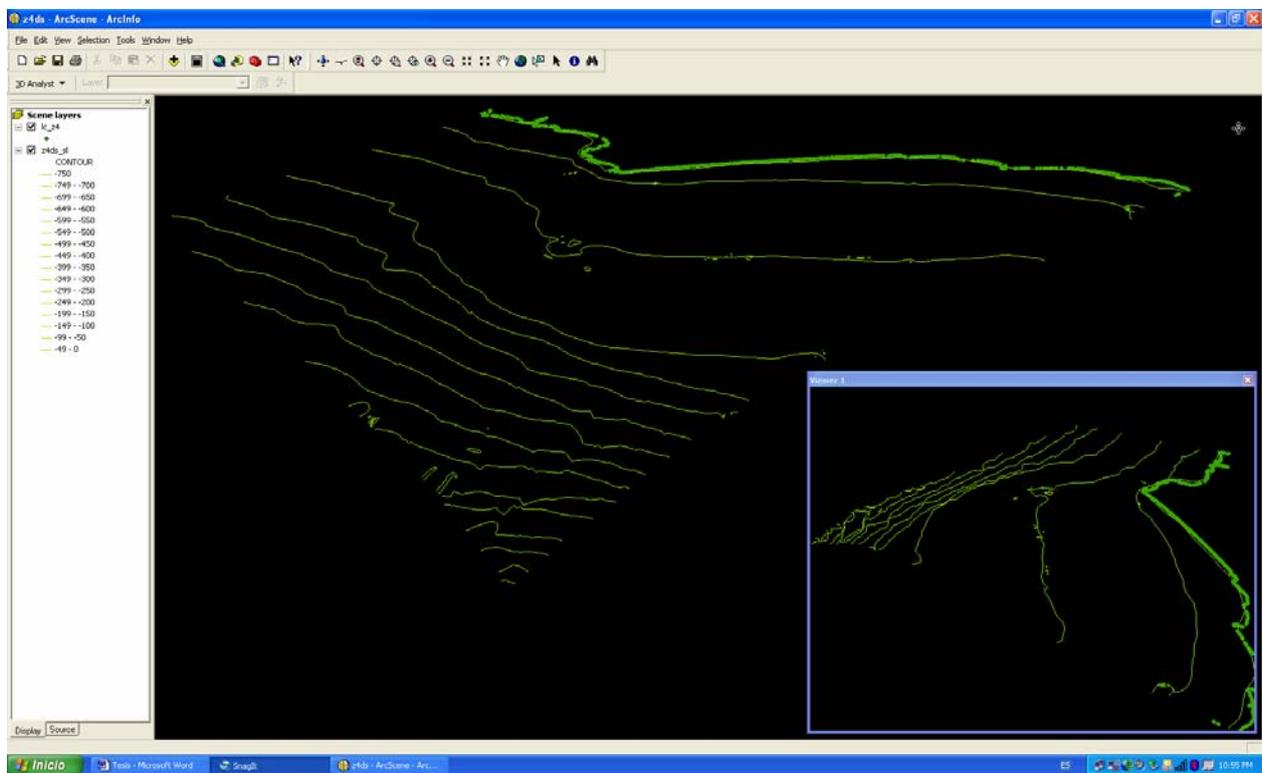


Figura 11. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 4.



Figura 12. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 5.

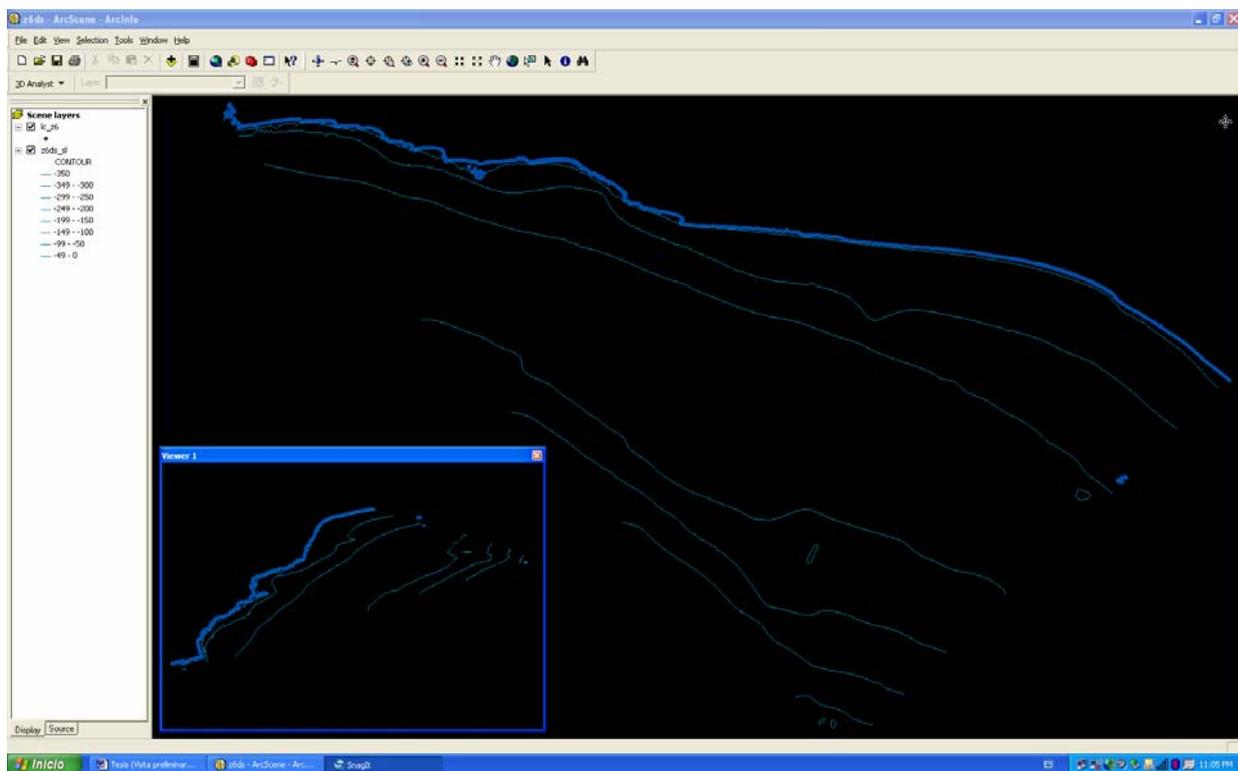


Figura 13. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 6.

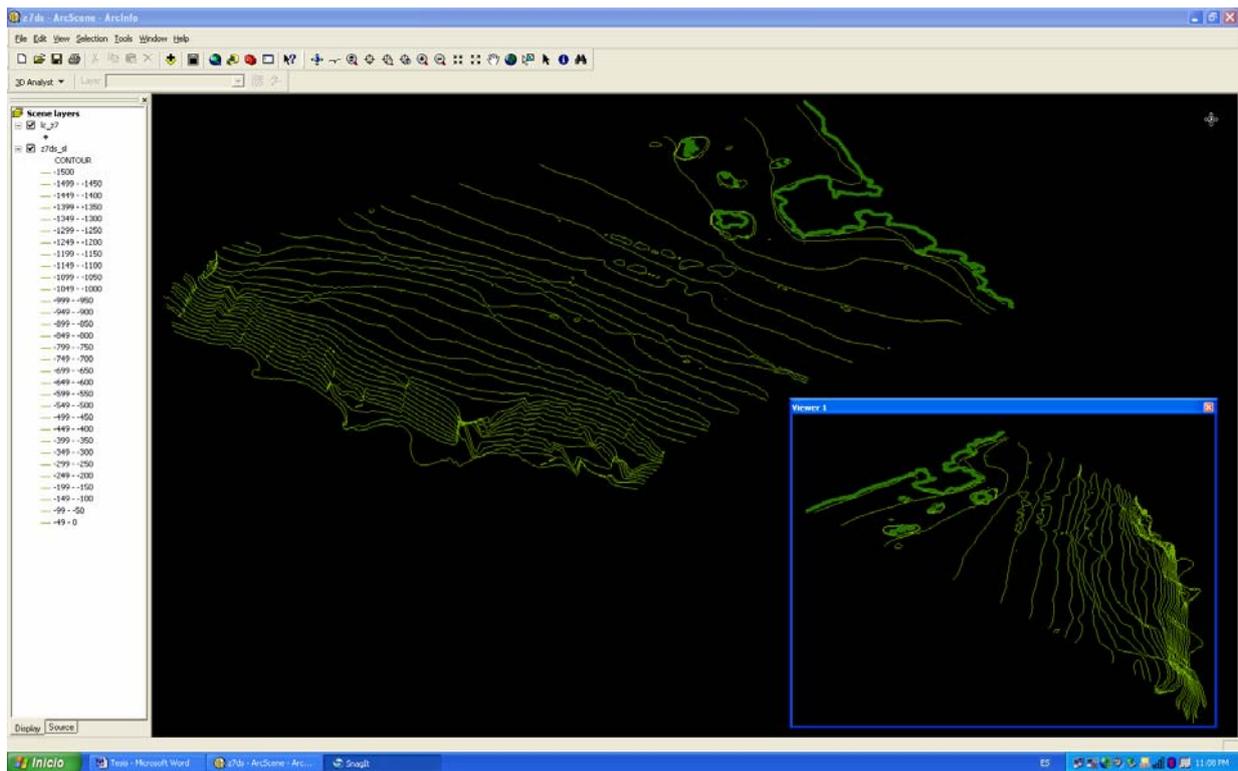


Figura 14. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 7.

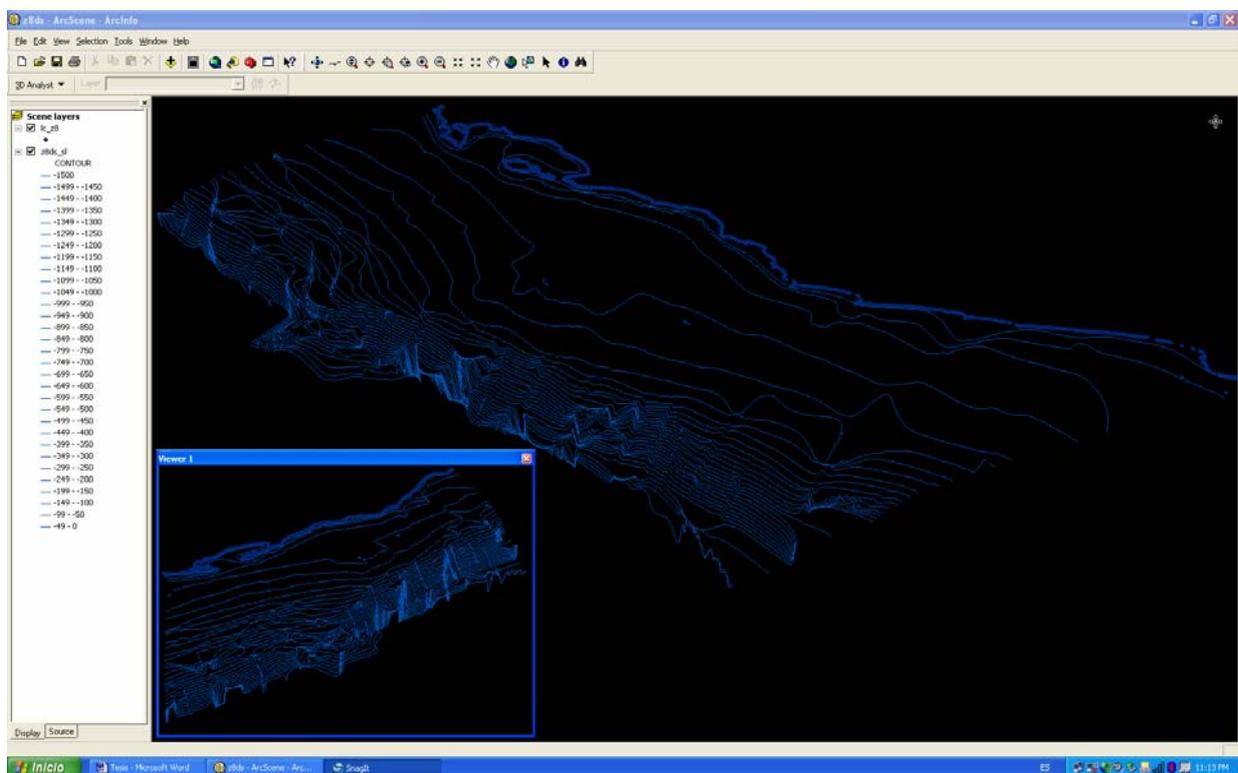


Figura 15. Contornos batimétricos en 3D de la superficie del suelo marino de la zona 8.

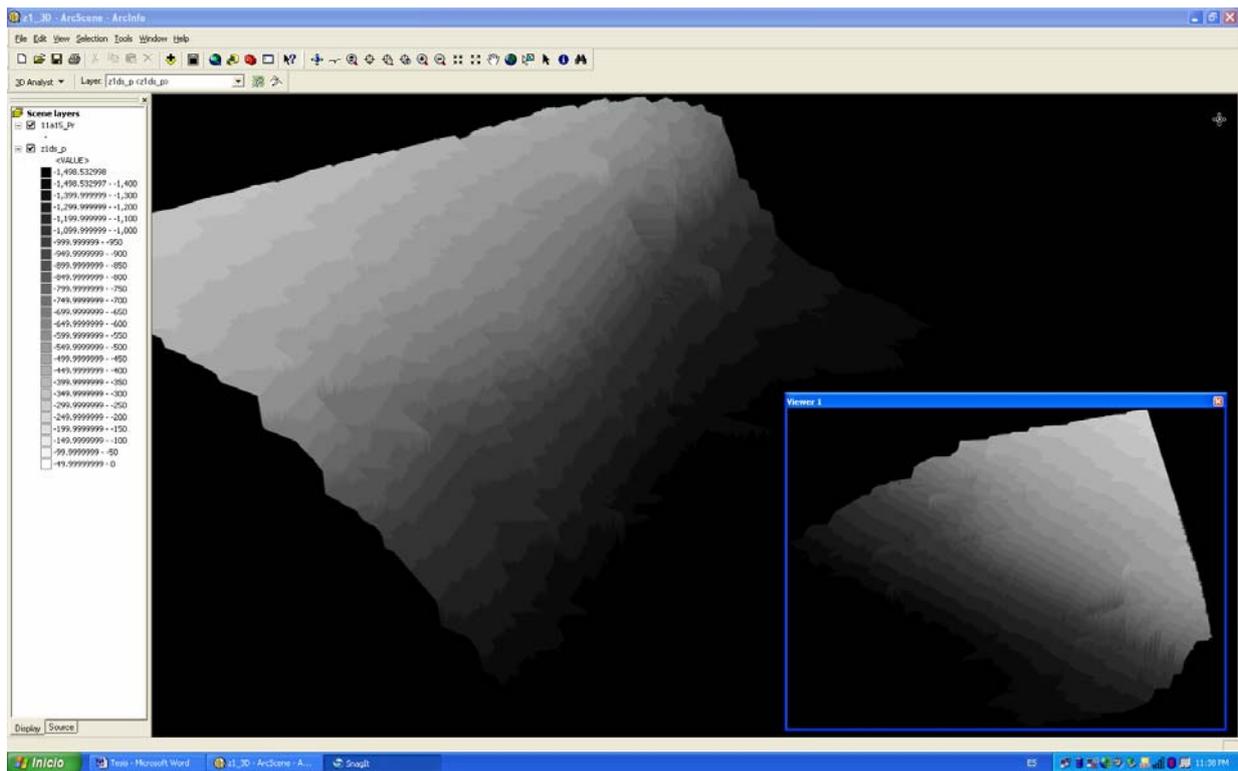


Figura 16. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 1.

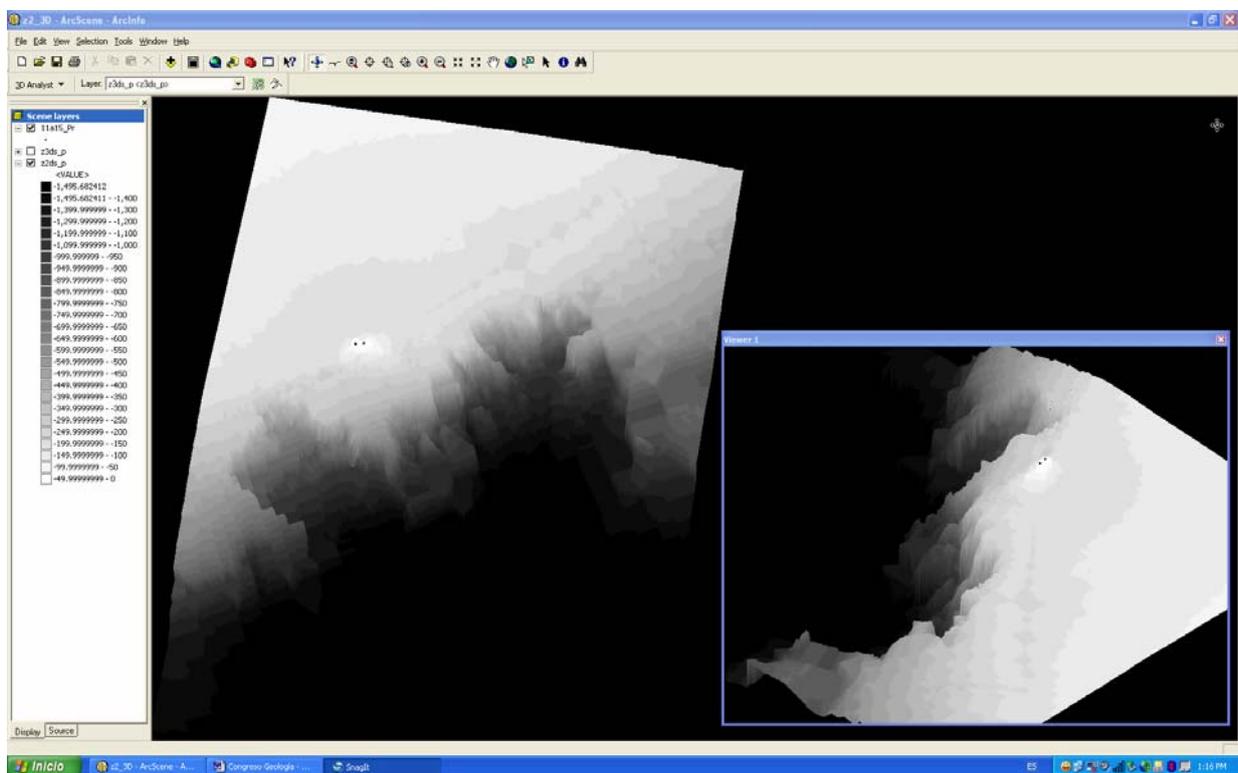


Figura 17. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 2 (alrededores de las Islas Hormigas).

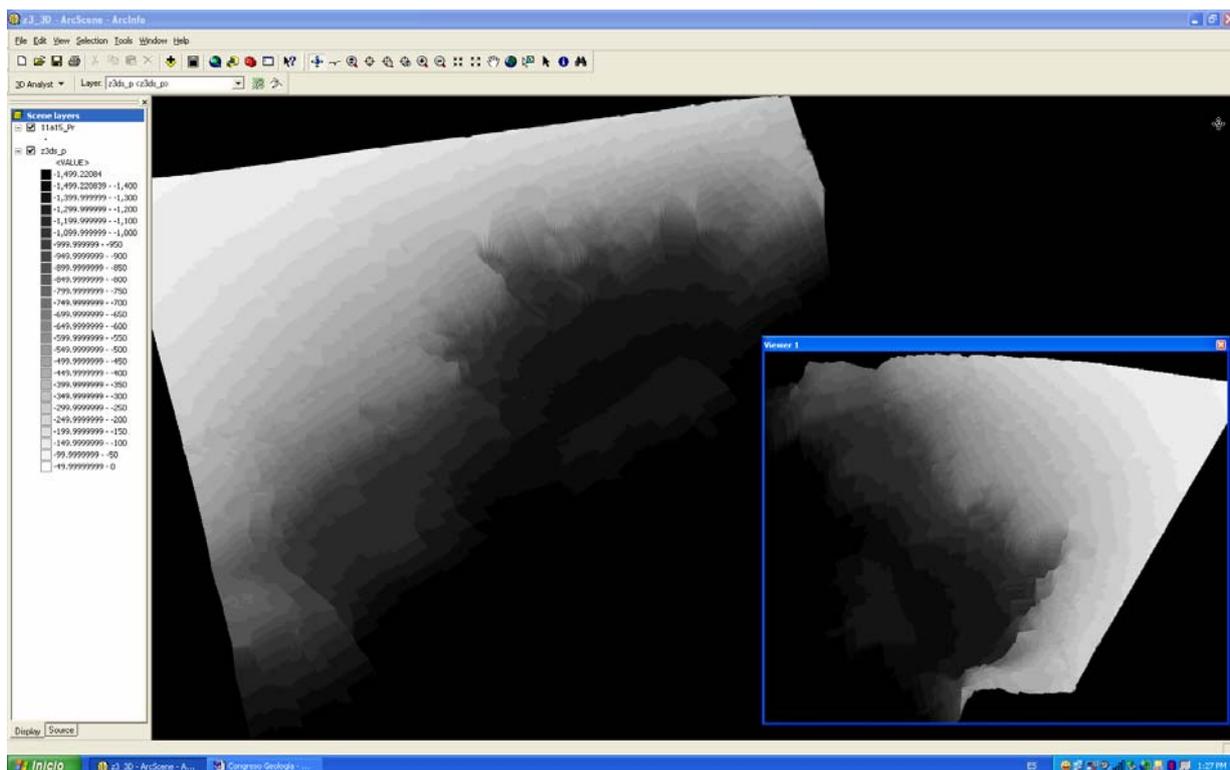


Figura 18. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 3 (alrededores de la Meseta Submarina de Lima – *Lima Plateau*) (Masías, 1976).

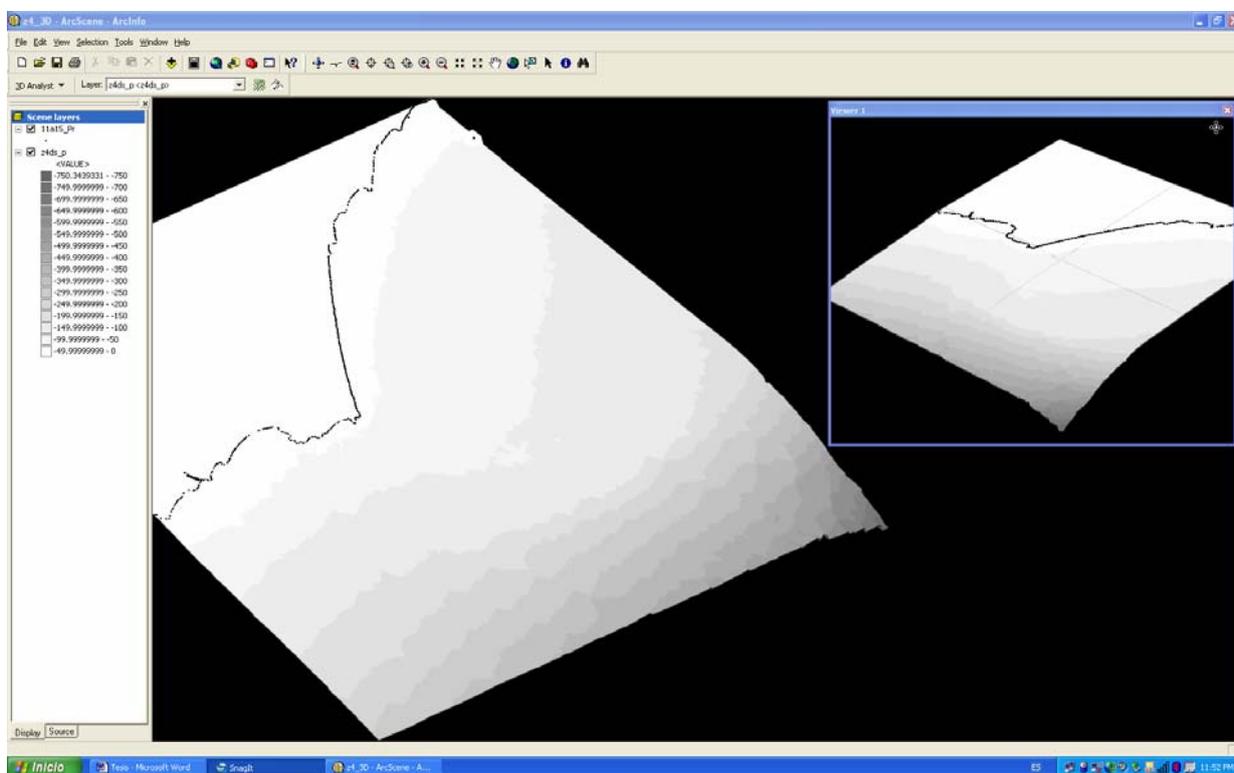


Figura 19. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 4.

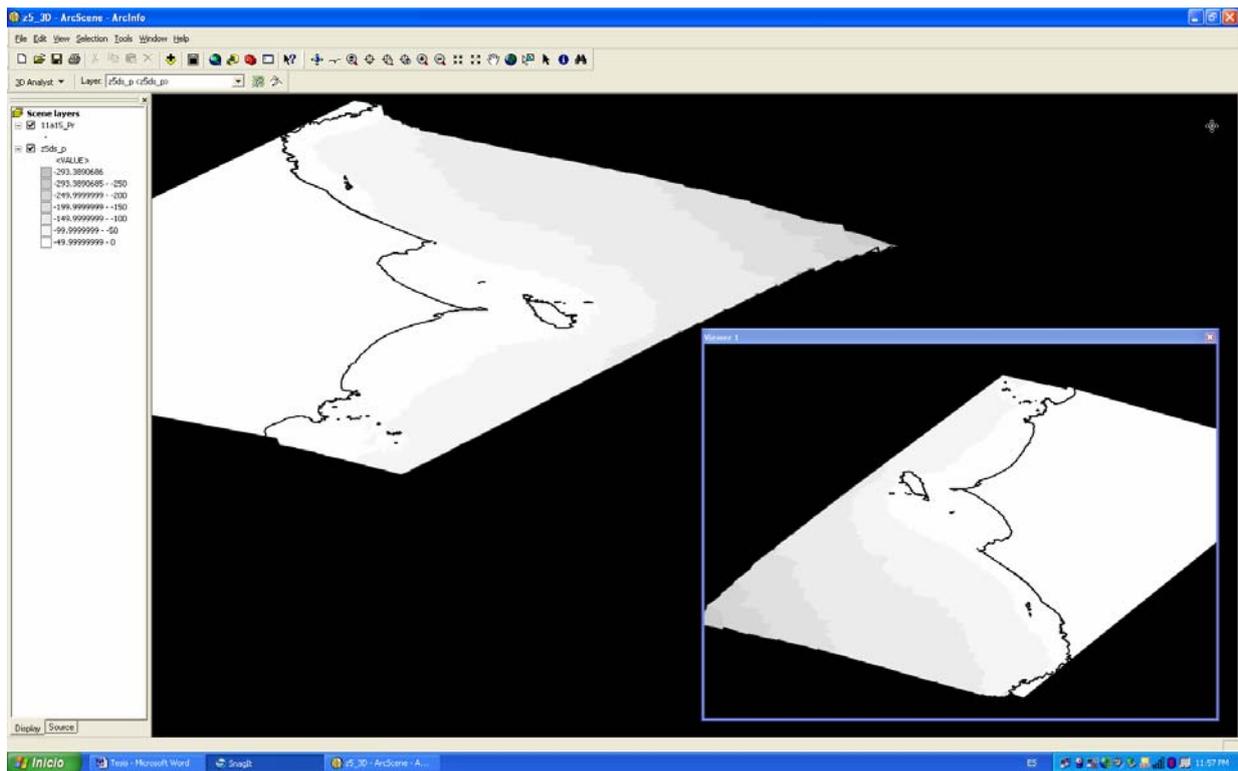


Figura 20. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 5.

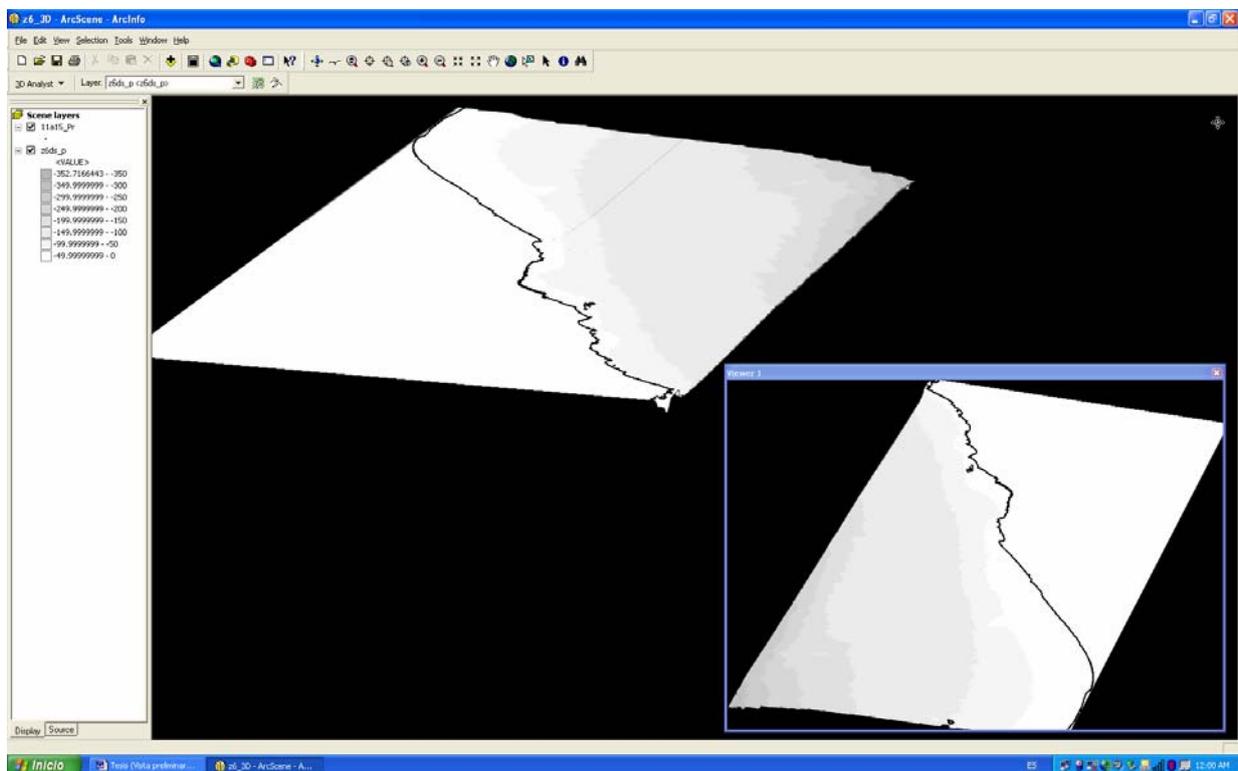


Figura 21. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 6.

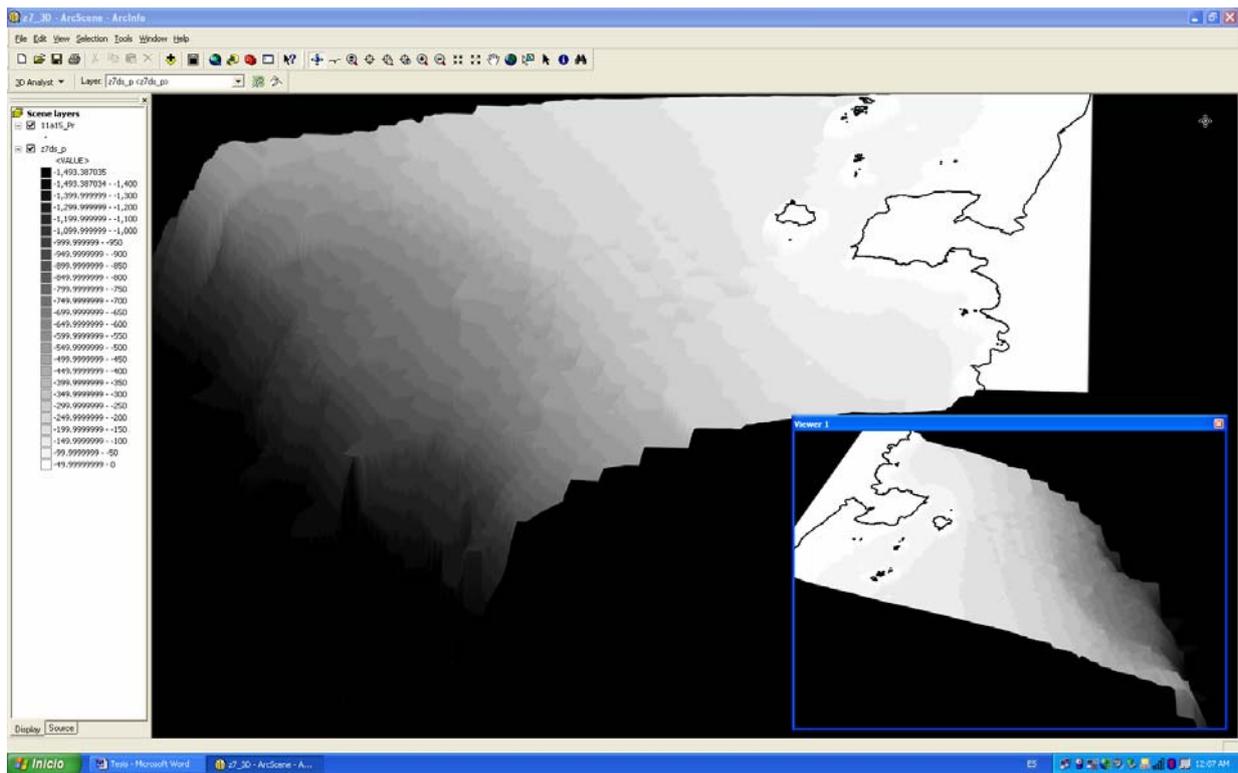


Figura 22. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 7.

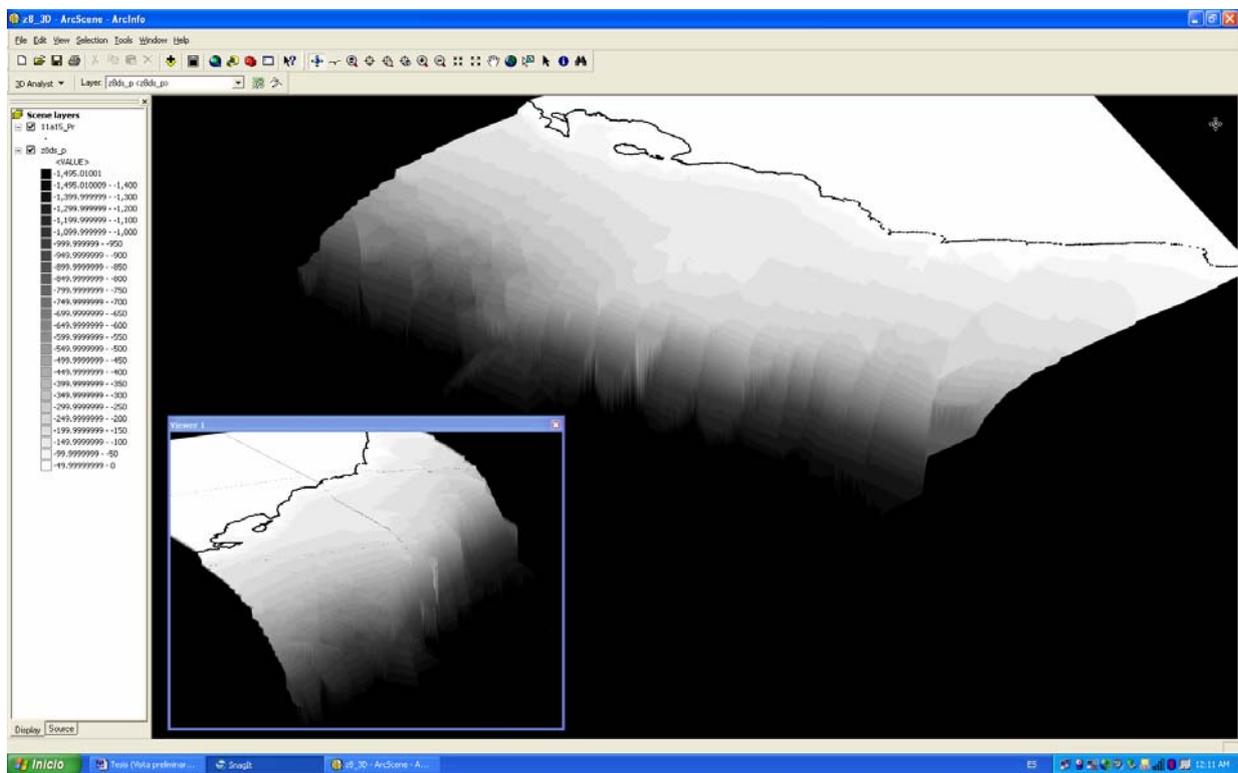


Figura 23. Imagen 3D de la morfología del suelo marino de la zona 8.

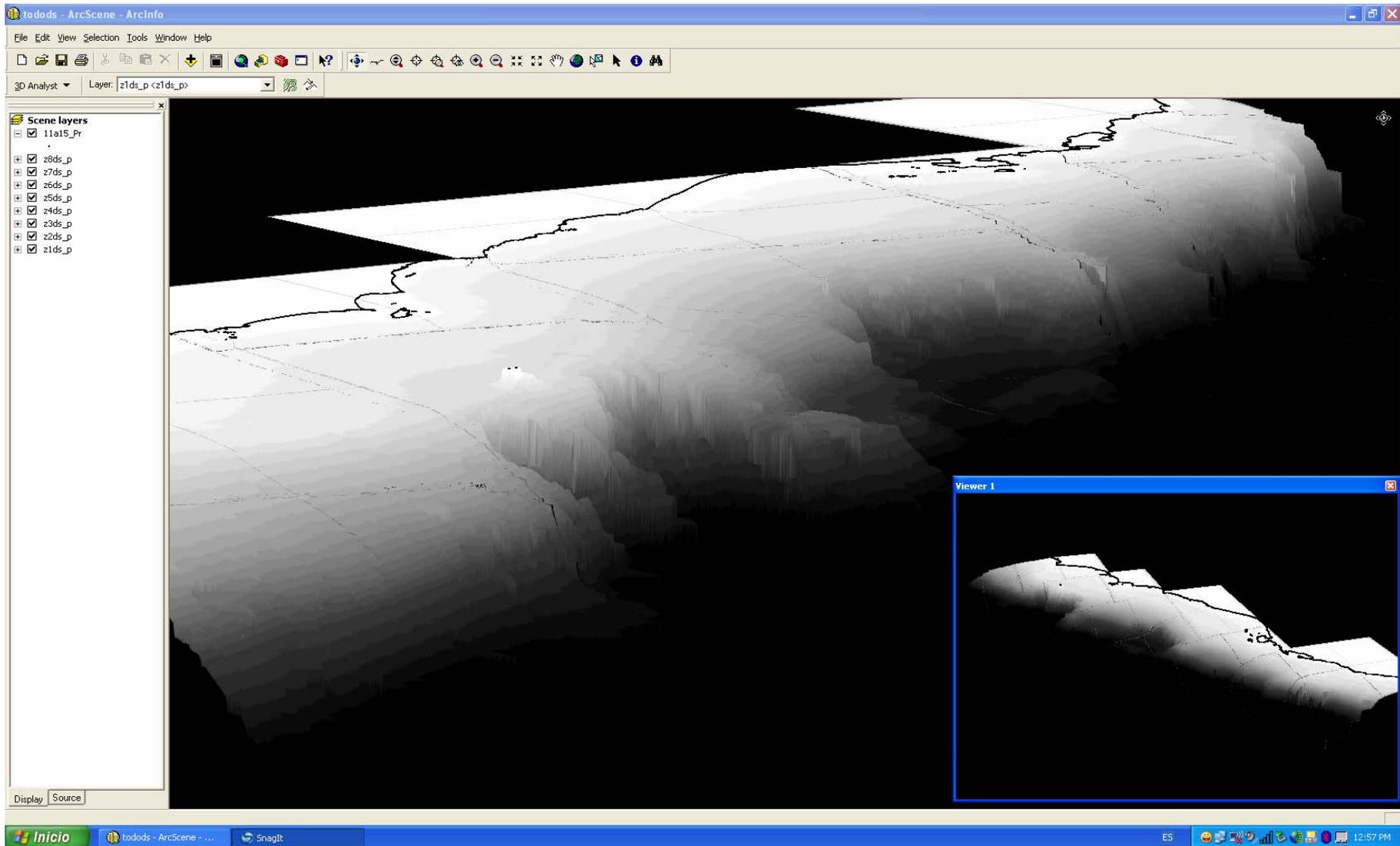


Figura 24. Vista noreste de la imagen completa en 3D de la morfología del suelo marino de la plataforma y talud superior continental de la zona de estudio (desde 11°S hasta 15°S).

3.6.2. Análisis

Para analizar las diferentes características del suelo marino se utilizó herramientas existentes en *ArcMap* (*ArcGis 8.3*). Con estas herramientas se calcularon distancias y pendientes para ciertos lugares y, el valor de perímetro y área (km²) para la zona completa de estudio establecida en esta tesis (desde 11°S hasta 15°S).

Como primer análisis se va a determinar la distancia existente desde la línea de costa actual hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*) que, en estudios anteriores, ha sido determinada en la isóbata de 200 metros de profundidad (ver referencias en Reinhardt *et al.*, 2002). Se va a determinar, por cada grado en latitud, 2 transeptos (por lo tanto, 30 millas de separación ó medio grado de separación entre transepto y transepto) donde se va a medir la distancia (en metros) y el grado de pendiente en ese punto de quiebre. Para el análisis, se van a crear por cada transepto cortes batimétricos transversales.

El número de transeptos evaluados en esta sección será de 10 (debido a que son 4 grados en latitud de diferencia, desde 11°S hasta 15°S). Cada transepto será referenciado por su posición de inicio y término (en grados decimales, así como de la profundidad).

► Transepto 11°S

Posición inicial (línea de costa actual): -11, -77.648

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -11, -77.86

Profundidad del suelo marino: - 122.562

Distancia aproximada (en kilómetros): 21.98

Distancia aproximada (en millas náuticas): 11.86

Pendiente (en grados): 1.34882

► Transepto 11°30'S

Posición inicial (línea de costa actual): -11.5, -77.3209

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -11.5, -77.95

Profundidad del suelo marino: -181.728

Distancia aproximada (en kilómetros): 67.5

Distancia aproximada (en millas náuticas): 36.4

Pendiente (en grados): 2.22253

► Transepto 12°S

Posición inicial (línea de costa actual): -12, -77.13582

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -12, -77.76

Profundidad del suelo marino: -229.1

Distancia aproximada (en kilómetros): 68.18

Distancia aproximada (en millas náuticas): 36.79

Pendiente (en grados): 2.70078

► Transepto 12°30'S

Posición inicial (línea de costa actual): -12.5, -76.79835

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -12.5, -77.06

Profundidad del suelo marino: - 142.193

Distancia aproximada (en kilómetros): 28.3

Distancia aproximada (en millas náuticas): 15.27

Pendiente (en grados): 0.208907

► Transepto 13°S

Posición inicial (línea de costa actual): -13, -76.49243

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -13, -76.77

Profundidad del suelo marino: -144.645

Distancia aproximada (en kilómetros): 29.77

Distancia aproximada (en millas náuticas): 16.07

Pendiente (en grados): 1.07582

► Transepto 13°30'S

Posición inicial (línea de costa actual): -13.5, 76.18813

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -13.5, -76.56

Profundidad del suelo marino: -128.15

Distancia aproximada (en kilómetros): 40.06

Distancia aproximada (en millas náuticas): 21.62

Pendiente (en grados): 0.517037

► Transepto 14°S

Posición inicial (línea de costa actual): -14, -76.2842

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -14, -76.44

Profundidad del suelo marino: -118.116 metros

Distancia aproximada (en kilómetros): 16.24

Distancia aproximada (en millas náuticas): 8.7

Pendiente (en grados): 2.85151

► Transepto 14°30'S

Posición inicial (línea de costa actual): -14.5, -75.96659

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -14.5, -76.31

Profundidad del suelo marino: -210.679

Distancia aproximada (en kilómetros): 36.54

Distancia aproximada (en millas náuticas): 19.7

Pendiente (en grados): 5.53686

► Transepto 15°S

Posición inicial (línea de costa actual): -15, -75.4421

Posición final (quiebre aproximado de la plataforma): -15, -75.67

Profundidad del suelo marino: -99.6018

Distancia aproximada (en kilómetros): 24.4

Distancia aproximada (en millas náuticas): 13.16

Pendiente (en grados): 5.18028

Como segundo análisis se calculó el área y perímetro aproximado para toda el área de estudio (desde 11°S a 15°S). Los valores son:

► Perímetro aproximado (desde 11°S hasta 15°S): 1523 km.

► Área aproximada (desde 11°S hasta 15°S): entre 47277 y 68158 km²

Para el cálculo del área, se obtuvo una distancia diferente en cada uno de los lados (debido a que la zona de estudio no representa una figura geométrica regular). El valor de 47277 km² es el resultado de la multiplicación de los valores con menor distancia, ~618 km (lado oeste, contorno de 1500 metros de profundidad) y ~76.5 km (límite grado 15°S). El valor de 68158 km² es el resultado de la multiplicación de los valores con mayor distancia, ~643 km (lado este, línea de costa actual) y ~106 km (límite grado 11°S). Para la obtención de estos valores se siguió el contorno irregular de cada uno de los lados con la herramienta *Measure* del *ArcMap* (*ArcGis* 8.3).

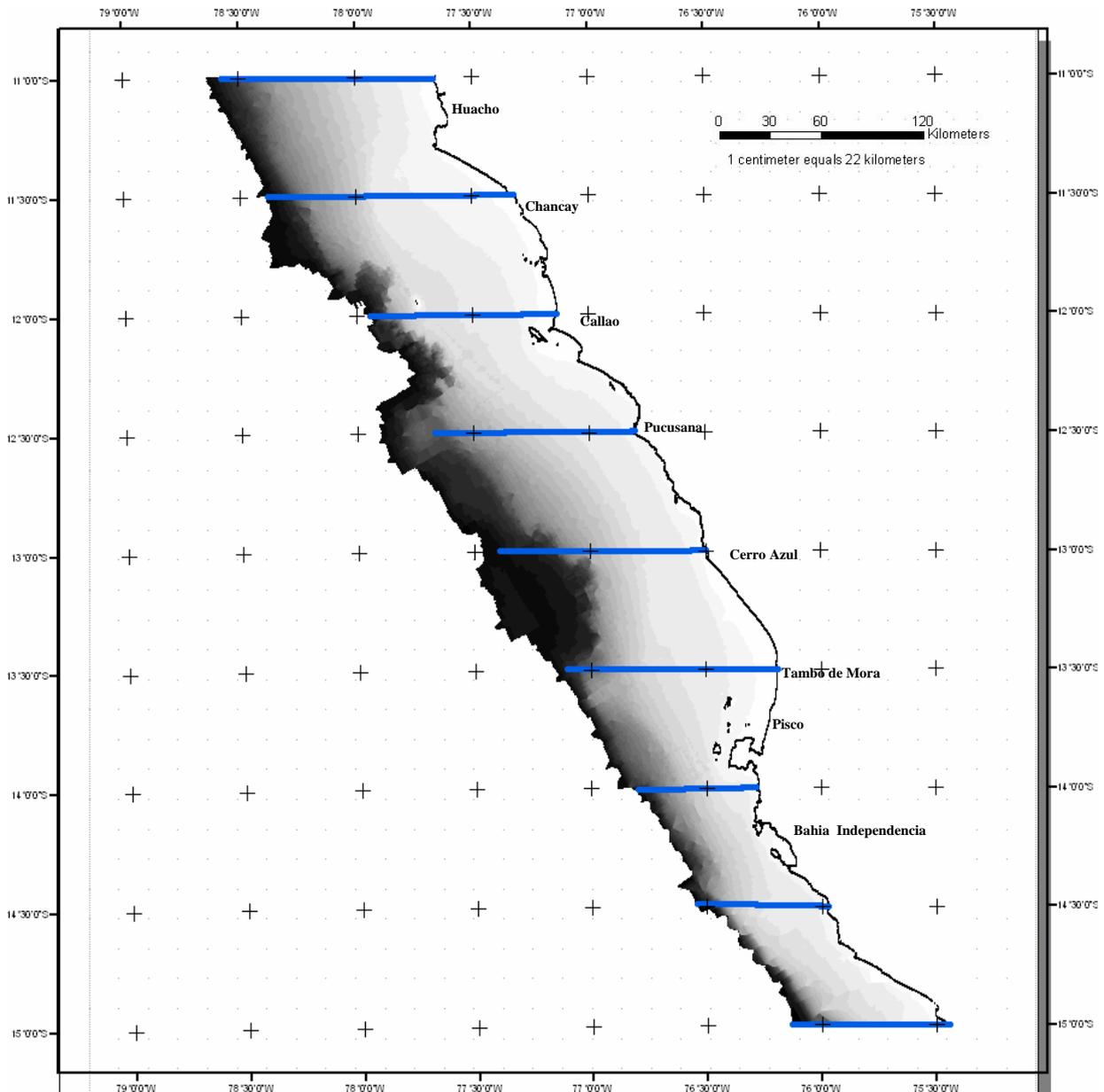


Figura 25. Distribución de los cortes batimétricos transversales (transeptos) entre el grado 11°S y 15°S.

Por consecuencia, los transeptos analizados en toda la zona tienen mucha congruencia con lo determinado por Masías en el año 1976, donde demuestra que el ancho promedio de la plataforma entre el grado 10°30'S y 14°40'S es de 32 km en promedio. El promedio de las distancias determinadas en este trabajo es de 33.297 km en esta zona de estudio (desde 11°S hasta 15°S).

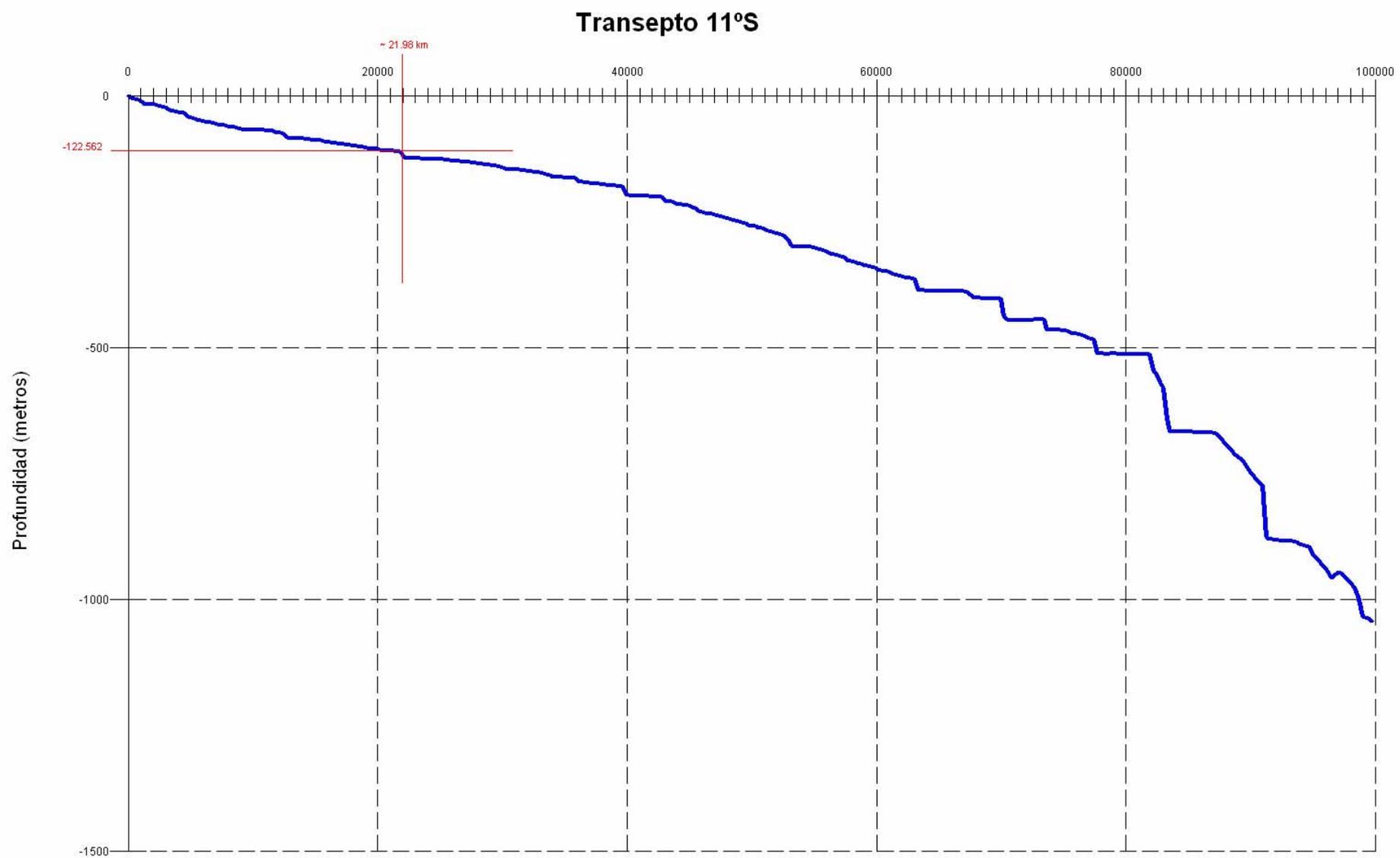


Figura 26. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 11°S (Transecto 11°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*): ~21.98 km.

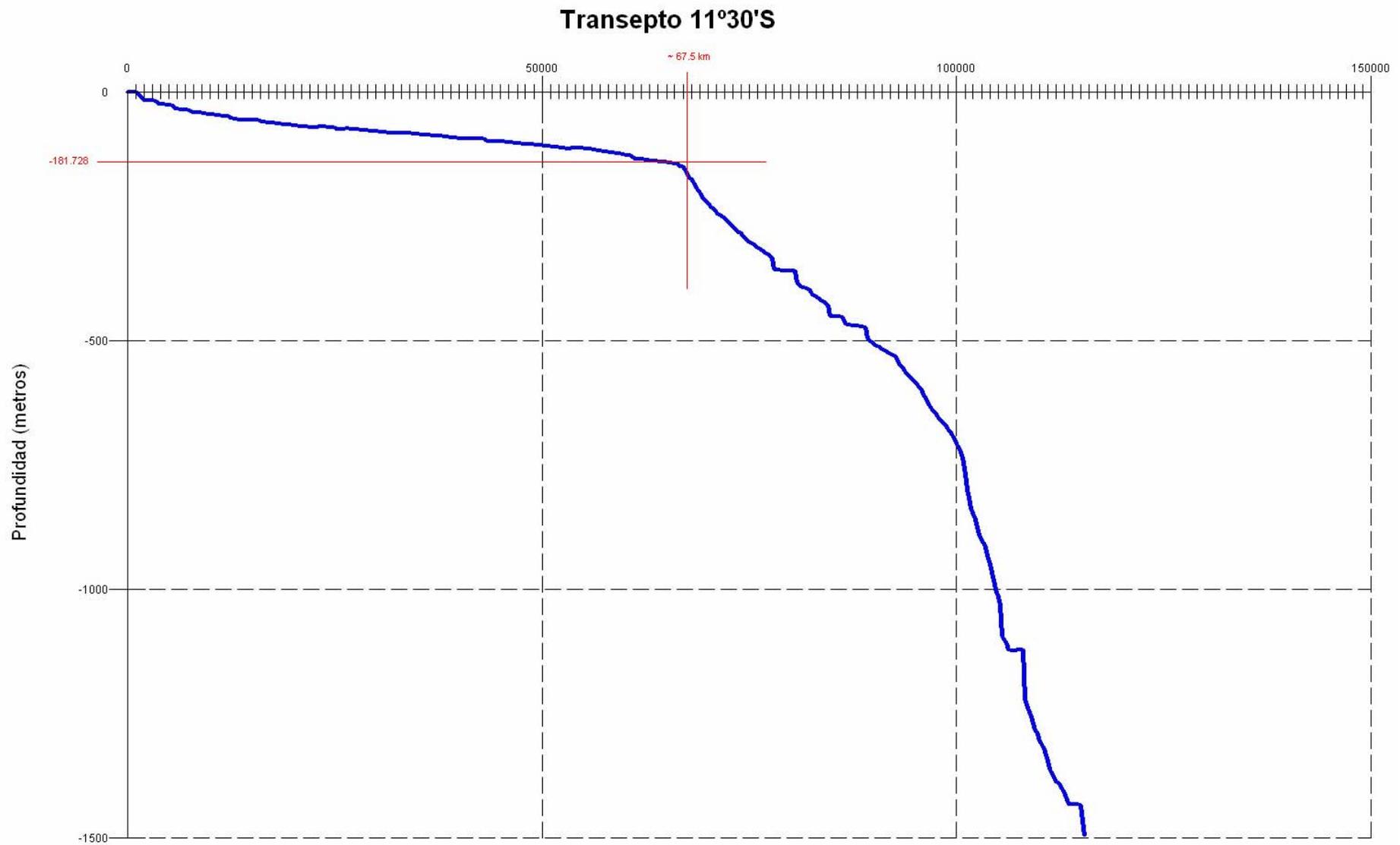


Figura 27. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 11°30'S (Transecto 11°30'S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*): ~67.5 km.

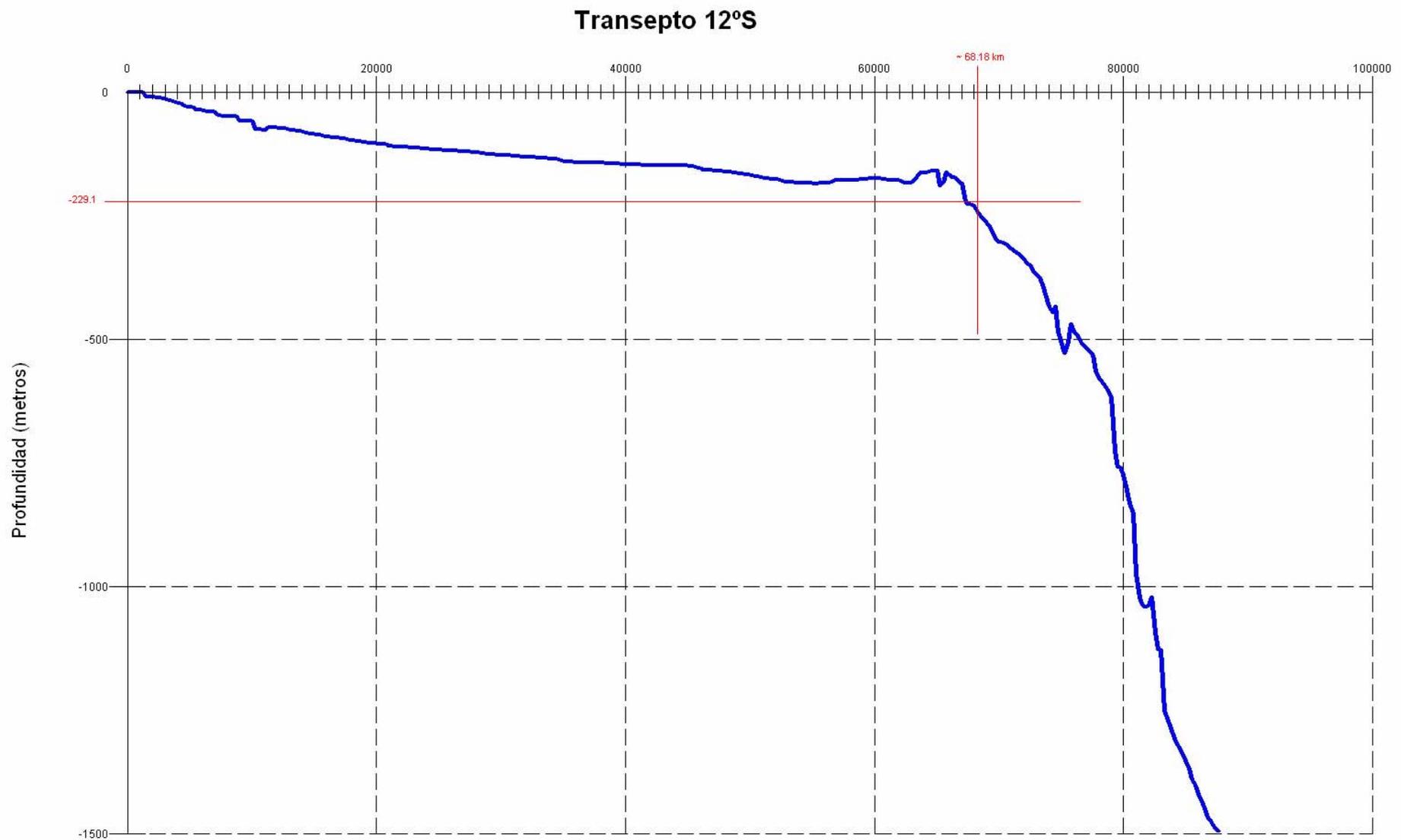


Figura 28. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 12°S (Transecto 12°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*): ~68.18 km.

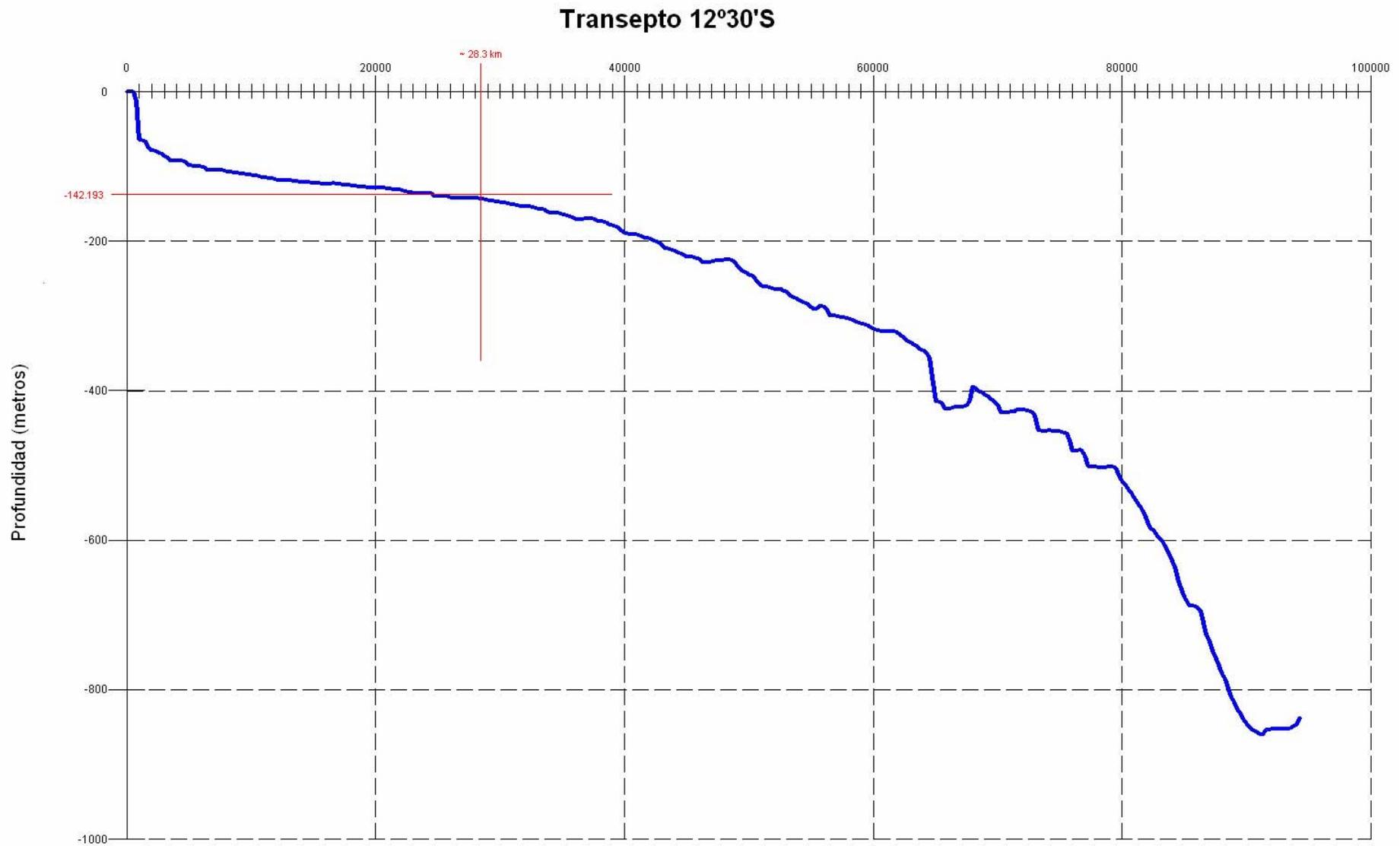


Figura 29. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 12°30'S (Transecto 12°30'S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*): ~28.3 km.

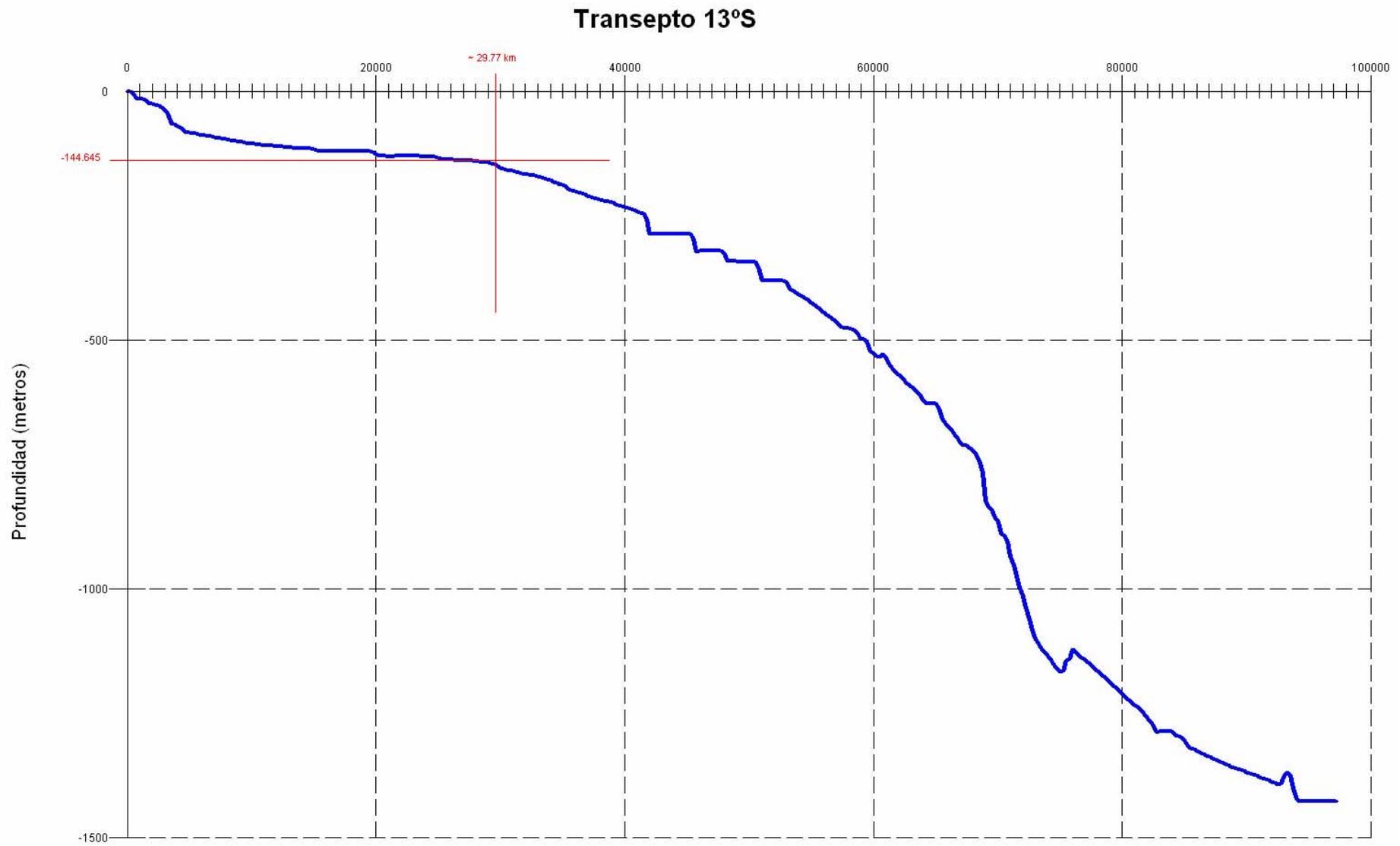


Figura 30. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 13°S (Transecto 13°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*): ~29.77 km.

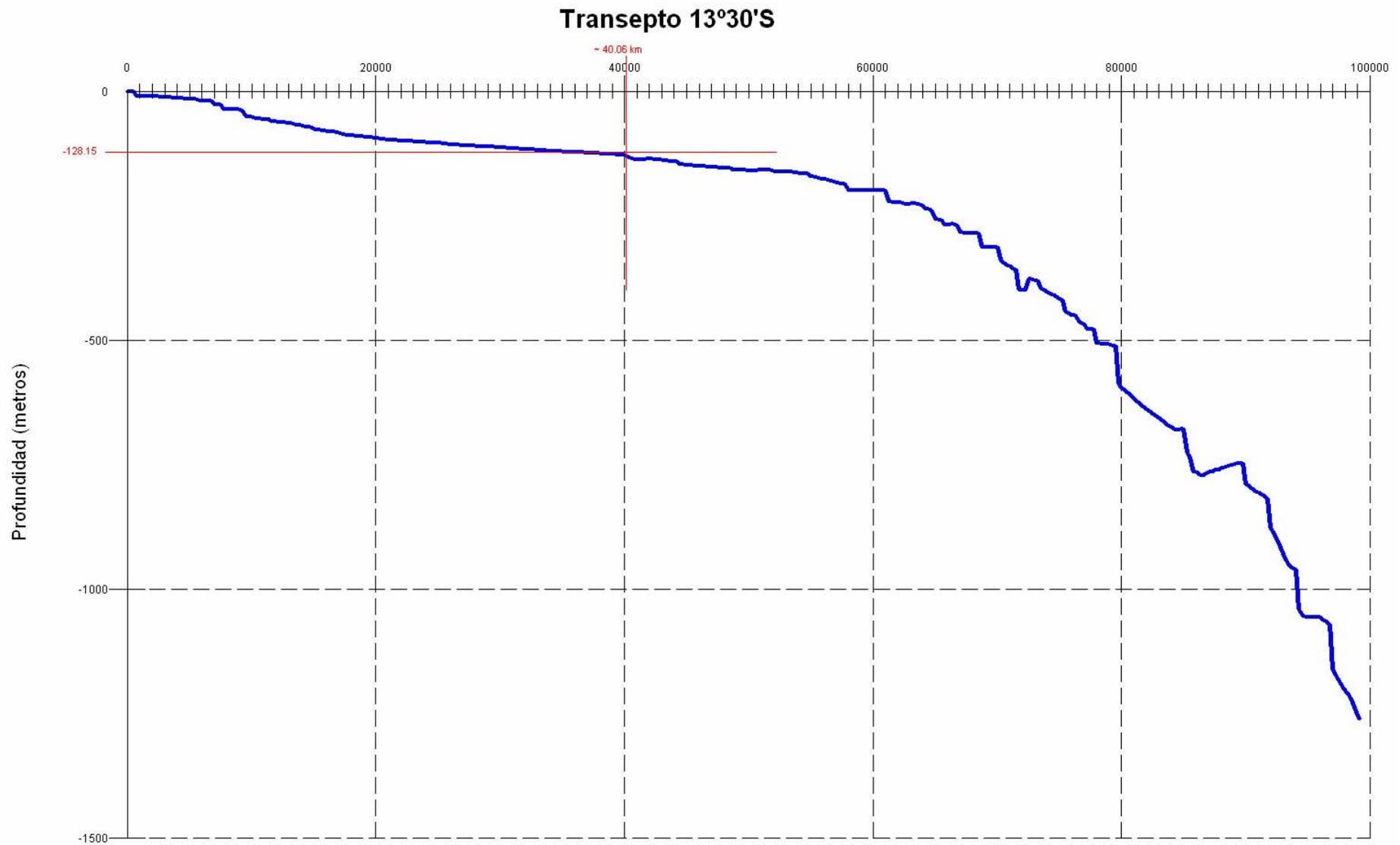


Figura 31. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 13°30'S (Transecto 13°30'S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*): ~40.06 km.

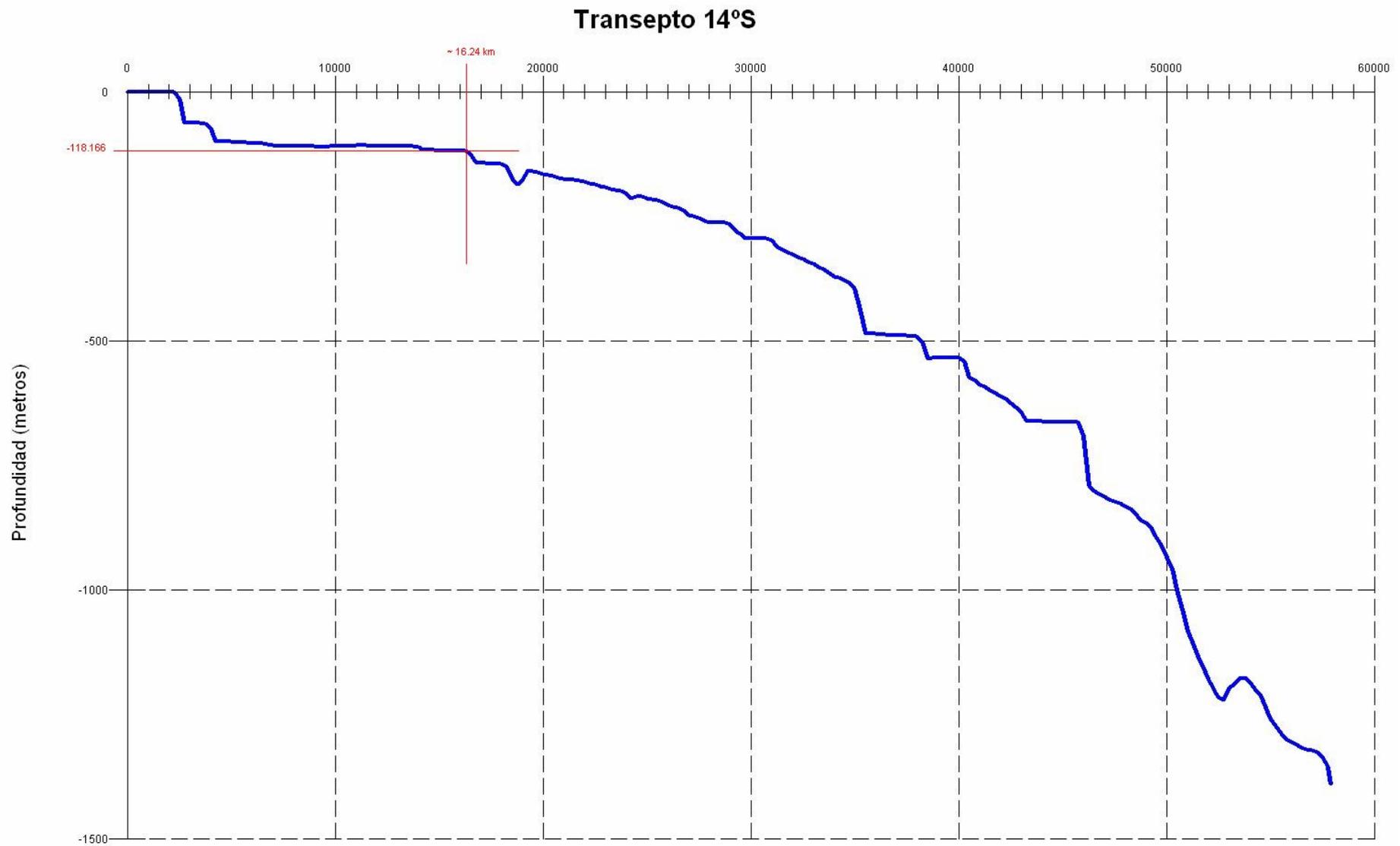


Figura 32. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 14°S (Transecto 14°S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*): ~16.24 km.

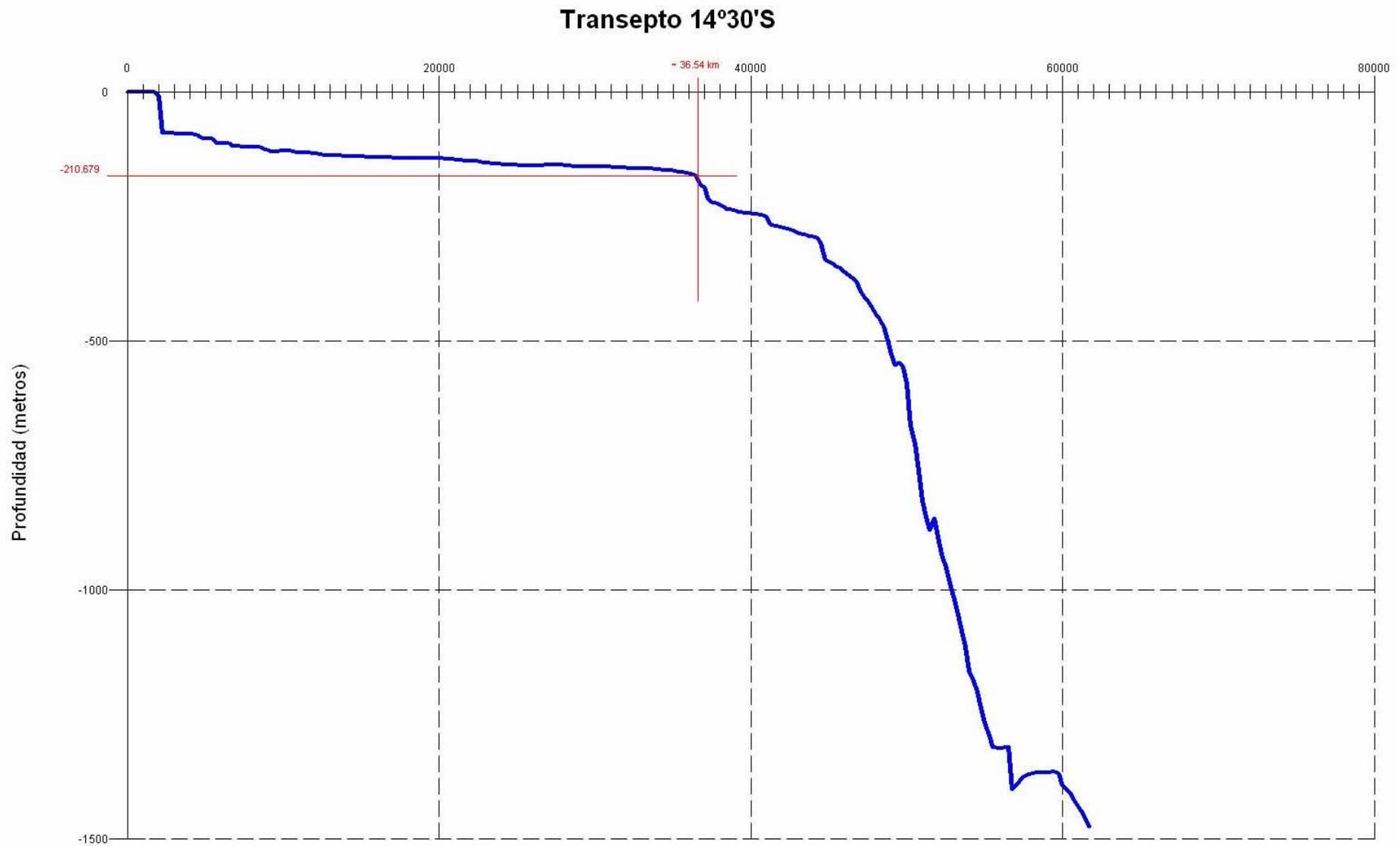


Figura 33. Corte batimétrico transversal realizado en el grado 14°30'S (Transecto 14°30'S). Distancia desde la costa hasta el quiebre de la plataforma (*Shelf break*): ~36.54 km.

3.6.3. Conclusiones

El conjunto total de datos batimétricos, obtenidos de 35 cruceros hidroacústicos de prospección pesquera (procesados con un rango de velocidades del sonido que va desde 1500 m/s hasta 1529.384 m/s); utilizado para el procesamiento y modelado de la superficie de la morfología del suelo marino (0 a 1500 metros de profundidad) de la zona central-sur del margen continental peruano (desde 11°S hasta 15°S) usando Tecnología SIG, demuestra que sí es posible registrar estructuras geológicas en el relieve superficial del suelo marino con ciertos detalles y a cierta resolución; sin embargo, estos datos carecen de una adecuada y ordenada distribución espacial, así como una igual calibración acústica; y no son adecuadas para estudios que requieren la observación y diferenciación de pequeños detalles.

Además, los datos de batimetría obtenidos con distintos valores de velocidades del sonido por cada crucero (lo cual determina la profundidad de los datos de batimetría) proporciona muchos datos de batimetría que pierden exactitud y confiabilidad con respecto a datos batimétricos con áreas de similares valores de profundidad del suelo marino obtenidos con otros valores de velocidad del sonido, que muchas veces, cruzan transeptos y producen “artefactos”. La suma, a este hecho, de inexistencia de datos batimétricos en zonas del suelo marino con áreas de gran extensión (p.e., 50 km² a 100 km²) y sin transeptos de comprobación (que son comunes en estudios de batimetría), y si en caso existiesen estos transeptos de comprobación “por coincidencia” (como sucede en este trabajo); tienen datos batimétricos obtenidos con diferentes velocidades del sonido, lo cual produce más “artefactos” y estructuras muy angulosas ó inverosímiles (p.e., zona 8, fig. 15 y 23). Además, hay que tener en cuenta que los datos batimétricos modelados, a pesar de que tengan diferencias de profundidad para zonas con similares profundidades, siempre van a tener una tendencia general (esto es por ser el suelo marino), que además ya fue establecida

y comprobada por otros estudios a grandes rasgos (p.e., Proyecto “Placa de Nazca”, 1973; Masías, 1976; Kulm y Thornburg, 1981; ver figura 1, 2 y 3)

Todo lo anteriormente presentado es únicamente producto de la falta de preocupación por preparar un estudio batimétrico adecuado de las zonas que se desean estudiar (ya sea con estas ecosondas científicas de tecnología *Split beam*, ecosondas *Multibeam*, sonares *SideScan*, etc.). Los datos obtenidos con la ecosonda científica utilizada por los cruceros hidroacústicos de prospección pesquera realmente pueden producir una excelente cantidad de datos batimétricos con alta resolución (con una adecuada y pareja distribución de datos batimétricos dependiendo de la resolución que se desea obtener y además, una estandarización en la calibración de todos los ecogramas y datos batimétricos obtenidos con una misma velocidad del sonido; p.e., 1500 m/seg., como sucede en la mayoría de estudios acústicos y geofísicos dedicados a estudiar el suelo marino a nivel mundial), que pueden mejorar la precisión de las actuales bases de datos batimétricos como los son GEBCO (1 min.) y ETOPO (2 min y 5 min).

Además, es importante contar con una adecuada y ordenada base de datos de información oceanográfica para la corrección oceanográfica de todos los conjuntos de datos obtenidos en el ambiente marino (p.e., valores de temperatura y salinidad corregidas por la presión capa metro de profundidad de columna de agua, cada 100 metros de profundidad de columna de agua con respecto al suelo marino, en transeptos separados cada medio grado y por cada estación del año ó, mejor aún, cada mes del año; cada año). Esto permitiría una buena zonificación de los datos obtenidos para su “correcta” corrección oceanográfica y así, se despejaría muchas dudas existentes respecto a la variabilidad que puedan presentar los datos, en especial, datos obtenidos con equipos acústicos y geofísicos.

Por otro lado, este trabajo batimétrico demuestra que es posible representar el relieve del suelo marino en forma de imagen 3D utilizando los datos batimétricos obtenidos con ecosondas de Tecnología *Split beam* y modelados con herramientas SIG para observar, de forma general, los grandes rasgos batimétricos y morfológicos del suelo marino. Para mejorar la resolución del mapeado y la producción de imágenes 3D del suelo marino, la mejor forma conocida hasta el momento, a pesar que también tiene sus contratiempos (ver Kukowski y Bialas, 2000); es la utilización de equipos *Multibeam* (p.e. *SIMRAD EM-120*, *Seabeam 1050* e *HydroSweep*) y *SideScan*, las cuales producen una buena resolución para zonas de pequeñas extensiones (ver Weinrebe y Greinert, 2000).

Finalmente, se espera que en próximos trabajos de investigación de este tipo, se continúe mejorando y perfeccionamiento los mapas e imágenes mostradas en esta tesis siguiendo las recomendaciones presentadas anteriormente.

IV. Distribución teórica-espacial de los sedimentos superficiales en la plataforma continental peruana entre la latitud 11°S y 15°S

4.1. Introducción

Los márgenes continentales son zonas en el ambiente marino que durante millones de años han acumulado grandes cantidades y diversos tipos de sedimentos en su suelo; muchos de estos son importantes consecuencias de eventos geológicos y cambios climáticos de escala mundial y regional; y otra importante cantidad, son producto de procesos biológicos y oceanográficos, también de escala mundial y regional.

Los sedimentos que fueron originados por importantes eventos geológicos y climáticos hace millones de años son, de forma general, los más antiguos y los que se encuentran acumulados cerca de la corteza oceánica; algunos de éstos ya en forma cristalizada ó formando otro tipo de compuesto (p. e., rocas cristalinas continentales metamórficas e intrusivas de la era Paleozoica a la Mesozoica) (Kulm *et al.*, 1985; Yaolin *et al.*, 1990; en Suess y von Huene, 1990). En cambio, los sedimentos que fueron ocasionados por procesos biológicos así como los procesos oceanográficos hace cientos y miles de años son, de forma general, los más recientes y los que se encuentran acumulados relativamente cerca de la superficie del suelo marino y modelando el mismo.

Ambas clases de sedimentos, tanto antiguos como recientes, muestran en su estructura estratigráfica (ó simplemente estratigrafía) muchos eventos naturales que influyeron intrínsecamente en el comportamiento del planeta y modelaron las características que en la actualidad se observan alrededor del mismo. Estas clases de sedimentos, en algunos casos, permiten la reconstrucción de estos eventos, y ayudan a comprender como estos

evolucionaron a través del tiempo en el ambiente natural. La ciencia que se encarga de estos estudios se denomina Paleoceanografía.

La distribución y ubicación de zonas que contengan sedimentos con potencial paleoceanográfico reciente (sedimentos con características apropiadas para la reconstrucción a una alta resolución de eventos durante el Holoceno Tardío) pueden ser determinadas por estudios sísmicos y acústicos de alta resolución; debido a que por factores como la profundidad y la presión, es casi imposible lidiar con un trabajo de campo *in situ*.

Los estudios sísmicos y acústicos de alta resolución reducen de forma considerable el esfuerzo humano y la inversión de dinero cuando se buscan zonas en el suelo marino que contengan sedimentos con éstas características, y a la vez, desarrollan una técnica eficaz que permitirá implementarse en la misma medida que el avance tecnológico prospere.

4.2. Antecedentes

En el margen continental peruano desde los años 70 se vienen realizando varios estudios sísmicos y acústicos de alta resolución, algunos de esos estudios fueron dedicados a la búsqueda de zonas propicias para realizar prospecciones paleoceanográficas. Estas prospecciones paleoceanográficas incluyen, además de estudios con sísmica y acústica de alta resolución; el dragado del suelo marino así como su perforación.

En el año 1973 se realizó el Proyecto “Placa de Nazca” (Kulm y Thornburg, 1981) en el cual se utilizó equipos de sísmica de alta resolución. Este proyecto tenía como objetivos y metas la descripción y correlación de estructuras geológicas antiguas por debajo del suelo

marino con las estructuras geológicas encontradas en la cordillera de la costa. Las metas de este proyecto no tenían una precisa relación con estudios paleoceanográficos pero sirvieron mucho en posteriores investigaciones.

En el año 1986, a bordo del buque *JOIDES Resolution* se realizó el *Leg 112* del Programa de Perforación en el Océano (*Ocean Drilling Program - ODP*), el cual basó su investigación en el estudio de eventos geológicos-tectónicos, estudios sedimentológicos, procesos geoquímicos, eventos climatológicos y paleoceanográficos en varios sitios del margen continental peruano. Este estudio proporcionó importante información sobre sedimentología y cronoestratigrafía en el desarrollo del estudio de la paleoceanografía, pero sus mayores esfuerzos se concentraron principalmente en datar eventos ocurridos a más de 2,000 años de antigüedad (antes del Holoceno Tardío) (Suess y von Huene, 1990).

Solamente pocos perfiles de una ecosonda sedimentológica de alta resolución fueron publicados en el estudio realizado por Krissek *et al.*, 1980; y Suess *et al.*, 1987, complementados por varios perfiles obtenidos con el *software PARASOUND* por Suess en el año 1992. Estos perfiles indicaron la morfología general de la plataforma por debajo de los 600 metros de profundidad (citado por Reinhardt *et al.*, 2002).

En el año 1992 se realizó una expedición en el margen continental peruano en el buque de investigación *R/V SEWARD JOHNSON* (SJ 10-92) auspiciada por la Fundación Nacional de Ciencia y el Programa Nacional de Investigación por debajo del Mar de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration – US Department of Commerce*) (Jahnke y Arthur, 1992). Este crucero recuperó gran cantidad de muestras superficiales del suelo marino con equipos para muestreo geológico de recuperación y perforación superficial; y en varias zonas de éste durante los tres transeptos realizados (11°04'S, 12°S y 13°30'S), se

realizó una buena descripción de las estructuras geológicas y elementos observados, así como de los organismos vivientes *in situ*. Además, se recuperó valiosa información acústica con un ecosonda *SIMRAD*, la cual fue útil al momento de correlacionar todo lo observado en el fondo (ya que todos estos sustratos presentaron una característica acústica; ya sean cortezas de fosforitas, fango, afloramientos de rocas, cangrejos, plancton, etc.) (Video *R/V Seward Johnson*; en Jahnke y Arthur, 1992). Su estudio se basó principalmente en la excepcional preservación de carbón orgánico en los sedimentos y los factores que los condicionan, así también como los procesos que se requieren para la formación de dolomitas y fosforitas sobre y por debajo de los sedimentos superficiales. Este crucero contó con un pequeño submarino, el cual fue una herramienta muy útil e importante, ya que no hubiera sido posible la perforación y recuperación de muestras (p. e., sedimentos laminados, costras de fosforita) con métodos tradicionales en mucho del suelo marino de los dos principales transeptos perpendiculares al margen continental peruano (12°S y 13°30'S).

En el año 2000, el Proyecto GEOPECO realizó el crucero *R/V SONNE* (SO-146) en el margen continental peruano obteniéndose importante información sísmica, batimétrica y morfológica con diversos equipos, siendo el de principal uso la ecosonda *Multibeam HYDROSWEEP DS-3* y el sistema acústico *Parasound* (el cual trabaja como una ecosonda sedimentológica de baja frecuencia y como un angosto haz de sondeo de alta frecuencia para determinar la profundidad en la columna de agua). Esta investigación evaluó los procesos de subducción, tectonismo y sistemas de hidratos de gas ocurridos en dos zonas; en el norte del margen peruano (8°S – 9°S) principalmente en la Cuenca Yaquina; y en el centro del margen peruano (11°S – 16°S) enfocado en la Cuenca Lima y el proceso de subducción de la Dorsal Submarina de Nazca (zona de colisión con el margen continental) en los 15°S (Kukowski y Bialas, 2000). Este estudio proporcionó diversos perfiles sísmicos

en ambas zonas, las cuales indicaron que existen áreas sin alteración (buenas zonas) que representan un registro ideal de sedimentos, por ejemplo para estudios paleoceanográficos (Hübscher, 2000; Kukowski y Bialas, 2000).

En el año 2000 también se desarrolló el crucero *RV SONNE (SO-147 "Peru Upwelling")* que estudió rasgos morfológicos del suelo marino, tectonismo, eventos geológicos, estructuras y ambientes sedimentarios, cambios climatológicos, actividad de la contracorriente Polar Antártica (*Poleward undercurrent*) y eventos paleoceanográficos ocurridos en las estructuras superficiales del margen continental peruano. Este estudio, además de utilizar equipos de perforación superficial; utilizó dos ecosondas sedimentológicas de alta resolución (*SEL-96* y *SES-2000DS*) y la ecosonda *Multibeam HYDROSWEEP DS-3* para evaluar toda la superficie del suelo marino con aproximadamente 6000 Km. de perfiles acústicos (Kudrass *et al.*, 2000). Los perfiles sísmicos y la batimetría obtenida en este crucero proporcionaron una herramienta muy útil al momento de determinar que zonas eran propicias para la recuperación de sedimento en y por debajo del suelo marino en varias zonas del margen continental peruano (Reinhardt *et al.*, 2002).

4.3. Descripción del área de estudio – ambiente geológico

Los perennes procesos de afloramientos en el margen continental peruano están concentrados entre los grados 7°S – 8°S, 11°S – 12°S y 14°S -16°S (Suess *et al.*, 1986; Suess y von Huene, 1990). Estos son conducidos por fuertes vientos y ocasionan actualmente una intensa Zona Mínima de Oxígeno ($ZMO < 5 \mu\text{MO}_2$) (Brockmann *et al.*, 1980; citado por Böning *et al.*, 2004; Helly y Levin, 2004) en aguas con una profundidad de columna de agua aproximada de entre 50 y 650 metros a lo largo de la plataforma y talud continental superior (Emeis *et al.*, 1991; Lückge y Reinhardt, 2000; citado por Böning *et al.*, 2004). Por

el contrario, durante eventos El Niño (p.e., El Niño 1997-98), los valores de O₂ sufren un aumento en la ZMO con niveles más altos de lo normal registrado (Levin *et al.*, 2002). En áreas donde la ZMO intercepta la plataforma existe una inducción a la hipoxia en las aguas del fondo marino limitando los procesos de bioturbación y favoreciendo la preservación de sedimentos laminados (Vargas *et al.*, 2004).

Por otro lado, el sistema de afloramiento esta dominado por dos corrientes (e.g., Hill *et al.*, 1998; citado por Böning *et al.*, 2004): La Corriente de Perú (*Peru Current*), que tiene dirección hacia el Ecuador y es rica en oxígeno (O₂); y La Corriente Submarina *Poleward* (*Poleward Undercurrent*)², la cual es excepcionalmente fuerte durante eventos El Niño (Hill *et al.*, 1998; citado por Böning *et al.*, 2004). La riqueza de los nutrientes, la deficiencia de O₂ de la contracorriente fluye desde los 5°S hasta los 15°S y toca el suelo marino entre los 150 y 400 metros de profundidad de columna de agua. En la actualidad, La Contracorriente Perú – Chile (PCCC) alcanza su más alta velocidad en los 10°S, conduciendo a una erosión parcial de la larga y estrecha plataforma continental (Reimers y Suess, 1983; citado por Reinhardt *et al.*, 2002), mientras que las velocidades son muchos menores entre los 11°S y los 14°S, permitiendo así, la deposición de sedimento sobre la pendiente de la plataforma y el talud continental (Suess *et al.*; 1986; Suess y von Huene, 1990).

La transferencia de las partículas a través de estas aguas deficientes en O₂ ocurre principalmente como material inorgánico/orgánico agregado en bolitas fecales (*fecal pellets*), además del hundimiento directo del material suspendido (Krissek *et al.*, 1980; Brodie y Kemp, 1995; citado por Böning *et al.*, 2004). La distribución y fijación de las partículas no están gobernadas solamente por las actividades de la contracorriente (Reimers y Suess,

² Una de las dos ramificaciones que se separa de La Corriente Submarina Pacífico Ecuatorial (EUC) al encontrarse con las Islas Galápagos es La Corriente Submarina *Poleward* (PUC). Esta corriente fluye sobre la plataforma exterior y el talud continental del margen continental peruano hacia la zona norte y centro del margen continental chileno. La otra ramificación es La Contracorriente Perú – Chile (PCCC) (ver Figura 35).

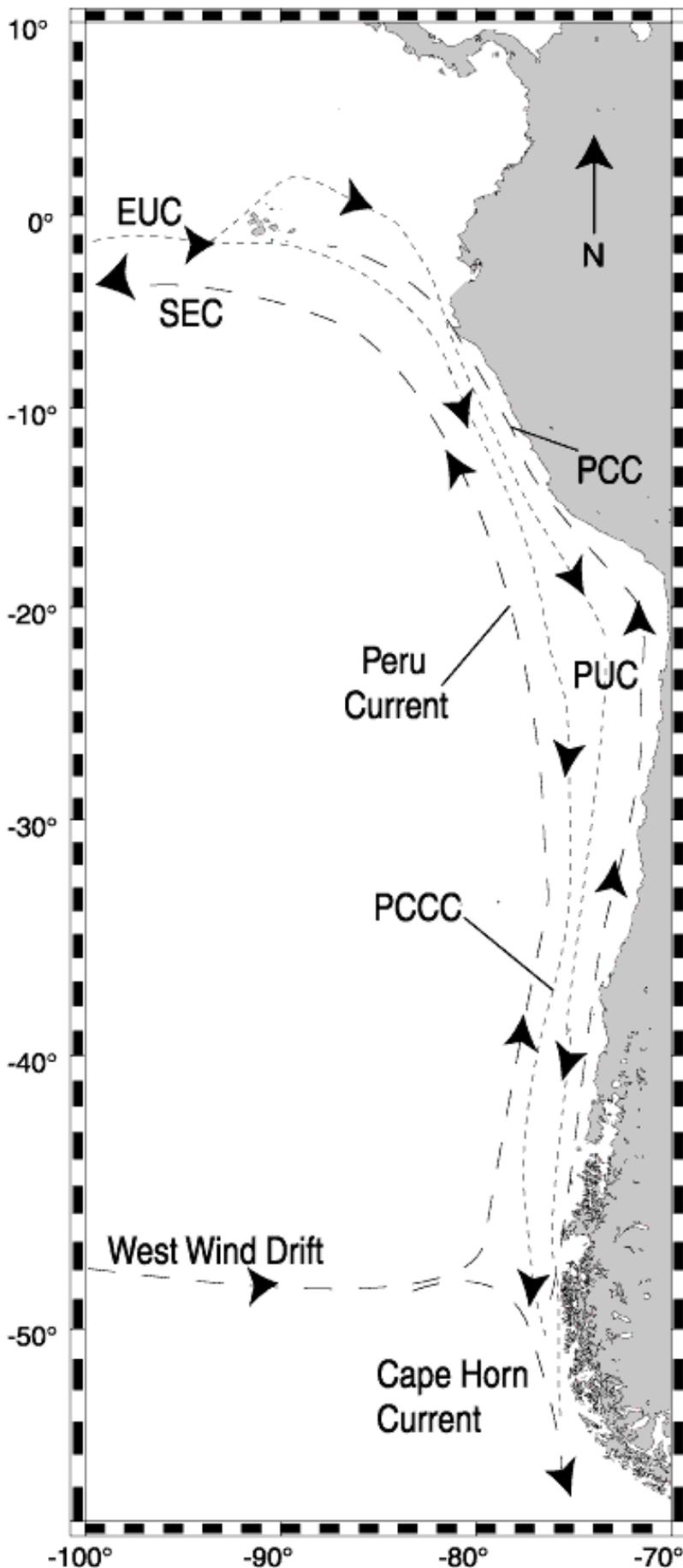


Figura 35. Principal sistema de corrientes marinas con proximidad a la superficie a las afueras de la costa oeste de Sudamérica (Pacífico Sureste Oriental). PC = La Corriente de Perú (*Peru Current*), también conocida como La Corriente de Humboldt (*Humboldt Current*) ó La Corriente Perú – Chile (*Peru – Chile Current*). PCCC = La Contracorriente Perú – Chile (*Peru – Chile Counter Current*), PUC = La Corriente Submarina de Perú (*Peru Undercurrent*), también conocida como La Corriente Submarina Perú – Chile (*Peru – Chile Undercurrent*), La Corriente Submarina de Gunther (*Gunther Undercurrent*) ó La Corriente Submarina Poleward (*Poleward Undercurrent*), PCC = La Corriente Costera Peruana (*Peru Coastal Current*), SEC = La Corriente Ecuatorial Sur (*South Equatorial Current*), EUC = La Corriente Submarina Pacifico Ecuatorial (*Equatorial Undercurrent*). (Miy y Tiedemann, 2003).

1983; citado por Reinhardt *et al.*, 2002), sino también por las extensas cubiertas bacteriales y capas de organismos en el suelo marino (e.g., Fossing, 1990; citado por Böning *et al.*, 2004; Levin *et al.*, 2002; Helly y Levin, 2004). Los sedimentos en estas zonas muestran laminaciones complejas ocasionadas por variaciones en los flujos biogénicos y detriticos, y además, la oxigenación del agua de fondo. Sin embargo, son poco comunes las laminaciones con escala de milímetros dentro de los sedimentos cerca de la superficie en el margen continental peruano (Brodie y Kemp, 1994; citado por Böning *et al.*, 2004).

Todos estos procesos en conjunto hacen que ocurra una productividad muy elevada por debajo del sistema de afloramiento, lo cual forma un gran descenso de material orgánico que se acentúa en el suelo marino para su consecuente acumulación y degradación en el tiempo (e.g., Krissek *et al.*, 1980; Scheidegger y Krissek, 1983; citado por Böning *et al.*, 2004); así como también, determinan que los sedimentos superficiales del talud continental peruano sean altamente heterogéneos (Levin *et al.*, 2002) y dejan a su paso una “huella geológica” de los procesos y variaciones de los distintos eventos ocurridos en el ambiente pasado marino.

Como consecuencia de estos procesos en el margen continental peruano, entre los grados 10°30'S y 15°S, ocurre una formación muy común de centros de deposición de sedimentos en forma de “lentes”. Estos centros de deposición (también llamados centros deposicionales) tienen en su interior capas de fango rico en materia orgánica, los cuales fueron llamados “lentes del talud superior” (Suess *et al.*, 1987; Suess y von Huene, 1990; Reinhardt *et al.*, 2002). Además, muchos de los sedimentos presentes en éstos “lentes” y en las cuencas de antearco entre los grados 10°S y 14°S consisten típicamente de fango y arcillas limosas diatomíticas (Delgado *et al.*, 1987), o de arcilla de grano fino enriquecido

con carbón orgánico, fosforitas, dolomitas, opalo biogénico y carbonatos (Krissek *et al.*, 1980; Suess y von Huene, 1990; Jahnke y Arthur, 1992).

La rápida subsidencia de estas cuencas de antearco en el margen continental central peruano (p.e., cuenca Lima con una tasa de subsidencia de 275 – 500 m/m.a.) (Kulm *et al.*, 1981, 1984; citado por Suess y von Huene, 1990) constituye una trampa sedimentaria única que ha registrado los efectos de afloramientos costeros en el ambiente marino desde el Mioceno (Kemp, 1990; Kulm *et al.*, 1981, 1984; Suess y von Huene, 1990). De esta manera, los sedimentos marinos atrapados en estas cuencas de antearco formando laminaciones (en muchos casos muy variables), constituyen un excepcional y no frecuente registro geológico debido a su relevancia en reconstrucciones paleoceanográficas de alta resolución (Vargas *et al.*, 2004).

4.4. Distribución teórica-espacial de sedimentos con potencial paleoceanográfico utilizando valores de retrodispersión acústica (Sv) entre la latitud 11°S y 15°S

Los estudios geoacústicos y sísmicos en el ambiente marino buscan mayormente la producción de mapas que muestren la morfología del suelo marino incluyendo información detallada acerca de la naturaleza de los sedimentos que lo componen (Caruthers y Fisher, 2002, Gutiérrez y Herbozo, 2004). Además, estos estudios se realizan para mejorar la comprensión de la relación existente entre la morfología y los tipos de sedimentos distribuidos. Algunos equipos acústicos y sísmicos de detección, a través de la utilización del sonido, pueden identificar ciertos atributos geológicos que van desde micro-estructuras (de centímetros a decímetros) hasta macro-estructuras (de metros a centenas de metros); también como partículas de distintos tamaños (ya sean grava, arena, cieno, arcilla) y varios

tipos de litologías (como piedras, cantos rodados, rocas, nódulos) (Gutiérrez y Herbozo, 2004).

Los equipos acústicos de detección (ecosondas, sonares) están diseñados para emitir sonido en intervalos que se alternan con momentos de “escucha”. Una señal digital modulada en cuanto a intensidad y forma puede ser decodificada para interpretar la información que encierra la retrodispersión del sonido (eco).

Las correcciones geométricas necesarias en función de la directividad del haz acústico, la velocidad del sonido, la atenuación y la absorción permiten revelar el “perfil” de la *Fuerza del Volumen de Retrodispersión* (S_V). Dicho perfil se presenta usualmente como una gráfica en dos dimensiones (X-Y) que presenta la variabilidad de la magnitud del eco de acuerdo con la profundidad. Esta gráfica recibe el nombre de *ecograma*, que es en realidad una matriz de datos que presenta, en escala de colores, ciertas características inherentes a los *blancos* o dispersores de sonido que se ubican en la columna de agua, incluyendo por supuesto el fondo marino.

Dicha matriz permite apreciar varios componentes relacionados con el fondo marino: la rugosidad, es decir, el grado de homogeneidad en el relieve submarino; el tipo de porosidad del sustrato, que permite en mayor o menor medida el paso del sonido; y la dureza del fondo, es decir, la identificación de los materiales que lo componen, que según su naturaleza reflejan en distinta medida el sonido proyectado desde transductores sónicos. La interpretación de esta información no siempre es sencilla, por lo que se han desarrollado programas específicos para estos fines (*RoxAnn, QTC, Echoview*) (Caruthers y Fisher, 2002). Sin embargo, existen ciertos criterios generales para interpretar la información encerrada en la retrodispersión: una línea de fondo “delgada” por lo general corresponde a fondos

“duros”; un ecotrazo grueso del fondo es usualmente acompañado de bruscos cambios en la coloración de los puntos de muestreo acústico, lo que es indicación de la presencia de un fondo “blando” (Gutiérrez y Herbozo, 2004).

Para poder correlacionar los distintos materiales y diversos tipos de sedimentos existentes en la superficie y por debajo del suelo marino; y asegurarse de que estos existen realmente, es necesario tener una base de datos de valores obtenidos con equipos acústicos de detección (p.e., ecosondas científicas, ecosondas sedimentológicas, sonares, sonares *Multibeam*) y una descripción de estos sedimentos en zonas del suelo marino donde se obtuvieron tal base de datos sobre información de retrodispersión acústica (p.e., dragados superficiales, perforación superficial y de gran profundidad).

4.5. Casos de detección hidroacústica – Plumas de Gas

Las capacidades de estos equipos acústicos de detección de alta resolución en investigación marina pueden reconocer diversos organismos y/ó objetos en la columna de agua (ya sean cardúmenes de peces, plancton, barcos hundidos, boyas, etc.); pero, específicamente en el campo de la geología marina y oceanografía geológica, éstos equipos pueden distinguir diversas estructuras geológicas, así como, sustratos y compuestos sedimentarios en y por debajo del suelo marino (como se mencionó anteriormente).

Con el paso del tiempo y la continua utilización de estos equipos en diversas investigaciones se observó que ciertos flujos podían ser detectados en el momento en que estos emanaban desde el suelo marino ó desde fuentes naturales como los denominados *thermal vents*, *cold vents* ó *cold seeps*. Estas emanaciones ó flujos observados son burbujas de gas que se desprenden desde estas fuentes naturales ó desde el suelo marino a grandes

profundidades de columna de agua. Algunos investigadores denominaron a estos escapes de gas como “Plumas de Gas” (ó *flares*) (Greinert *et al.*, 2000; Greinert, 2002; Greinert 2005, comunicación personal; Torres *et al.*, 2002; Klerkx, 2003; U. Von Rad *et al.*, 2000; Sahling, 2003; Hübscher 2005, comunicación personal), ya que estos *flares* al observarse en los ecogramas emergiendo desde el fondo marino se asemejan a gigantescas llamaradas de fuego (Morales y Díaz-Naveas, 2000; Klerkx, 2003).

En diversas partes del mundo se han observado estas emanaciones, ya sean en márgenes activos como en márgenes pasivos (Sahling, 2001; Klerkx, 2003). El Mar Negro y la Dorsal del Hidrato (Margen Continental de Cascadia, en las afueras de la costa de Oregon, USA) son buenos ejemplos para observar estas plumas de gas (Klerkx, 2003; Bangs *et al.*, 2003; Tréhu y Bohrmann, 2003). La presencia de comunidades biológicas bentónicas (así como comunidades bacterianas) ligadas a estas ocurrencias de gas son características típicas, inseparables y tal vez unos de los mejores indicios que evidencian sitios en el suelo marino donde ocurre la expulsión de fluidos ricos en metano y H₂S (Suess y von Huene, 1990; U. Von Rad *et al.*, 2000; Kukowski y Bialas, 2000, Morales y Díaz-Naveas, 2000; Sahling, 2003; Tréhu y Bohrmann, 2003). Ciertos organismos vivientes como *Calyptogena sp.*, *Acharax sp.*, y *Vestimentifera sp.*, así como los “tapices” de bacterias como el género *Beggiatoa sp.*, (muy parecido al género *Thioploca sp.*) son comunes en estas áreas donde la presencia de H₂S es abundante, influye dramáticamente en la distribución de los organismos en el fondo y, para algunos organismos, representa una fuente de energía y una fuente para vivir (quemautotofía) (Morales y Díaz-Naveas, 2000).

Además, en estas áreas de fuentes activas de metano, se pueden observar precipitaciones de costras y concreciones muy cerca, por debajo y en los alrededores de las plumas de gas. Estas formaciones son el resultado del proceso microbiano el cual genera CO₂, que por

consecuencia, induce a la precipitación de carbonatos (*authigenic carbonates*) (Morales y Díaz-Naveas, 2000; Greinert *et al.*, 2000; Kukowski y Bialas, 2000). La vida microbiana en estos ecosistemas bentónicos oxida el metano (CH_4) proveniente de la pluma de gas a través del suelo marino por medio de fallas o fracturas, en tanto que el sulfato (SO_4^{2-}) del agua de mar se reduce dando como productos dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S) (Morales y Díaz-Naveas, 2000). Estas concreciones y costras formadas por la degradación de metano; y en especial la formación de carbonatos (*authigenic carbonates*), (formadas por un complejo proceso geoquímico) (Greinert *et al.*, 2000; Kukowski y Bialas, 2000) debido a que estas formaciones son bloques de carbonatos en forma de concreciones dentro del sedimento, cantos ó capas de carbonatos sobre el suelo; así como complejas estructuras de carbonatos “*chemoherm*” que pueden tener más de 10 metros de alto y varios cientos de metros de diámetro formado en la superficie superior del sedimento; pueden ser visualizada en los ecogramas, ya que por ser un sustrato “duro”, van a tener una respuesta “acústica” de mayor magnitud (p.e., valores en dB del orden de 0 denotan un sustrato muy “duro”).

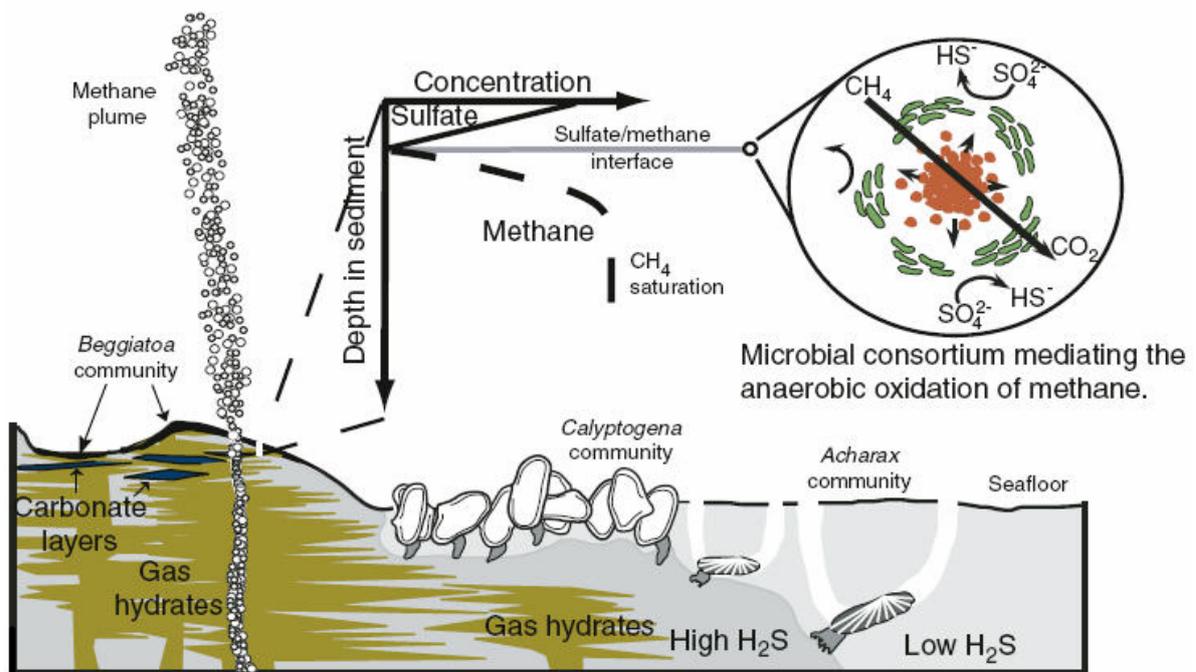


Figura 36. Ilustración de la compleja relación biogeoquímica esperada cerca de la cima sur de la Dorsal del Hidrato (Bohrmann *et al.*, 2002; citado por Tréhu y Bohrmann, 2003).

Sin embargo, además de esta presencia biológica; hay varios criterios que han sido desarrollados para evidenciar la expulsión de fluidos desde el suelo marino (Morales y Díaz-Naveas, 2000; Tréhu y Bohrmann, 2003).

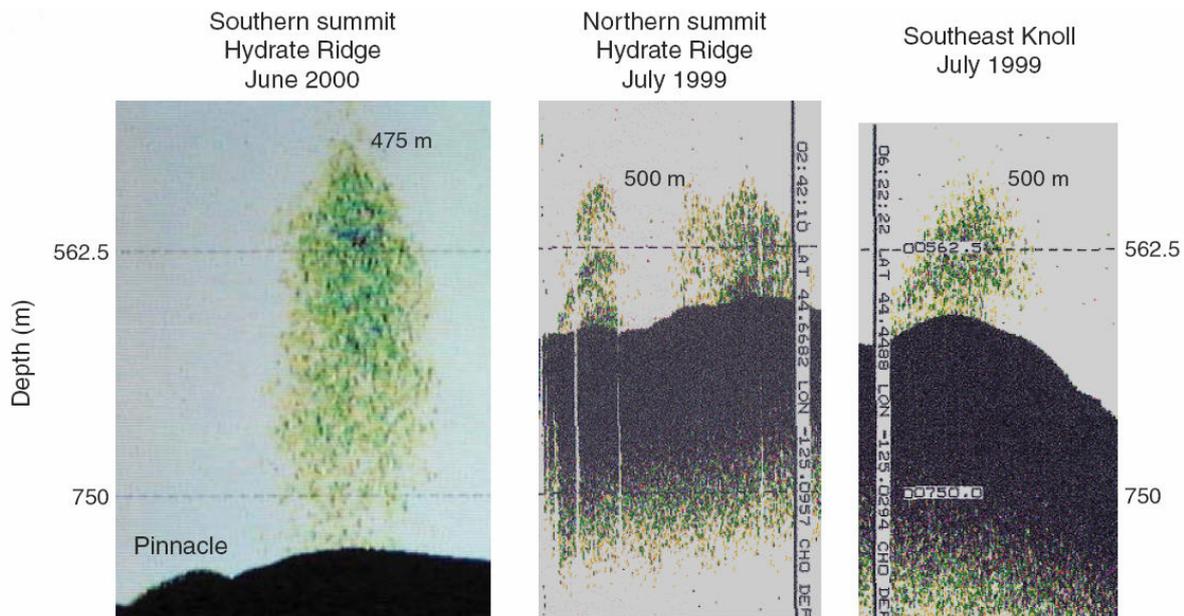


Figura 37. Registros de ecosonda de alta resolución (12 kHz) de la región de la Dorsal del Hidrato mostrando burbujas de gas en la columna de agua (Torres *et al.*, 1999; Tréhu y Bangs, 2001; citado por Tréhu y Bohrmann, 2003).

Las burbujas de gas, debido a su gran impedancia, son fácilmente observables por equipos acústicos de detección de alta resolución como las ecosondas (Greinert 2005; comunicación personal; Hübscher 2005, comunicación personal). Las características “acústicas” de estas burbujas de gas, que pueden ser apreciadas en los ecogramas, muchas veces pueden ser confundidas con registros de cardúmenes de peces y/o plancton (Gutiérrez 2005, comunicación personal; Hübscher 2005; comunicación personal).

El tamaño vertical de estas plumas de gas oscila entre 100 metros hasta 400 metros cuando ascienden desde el suelo marino hacia la superficie atravesando la columna de agua (Tréhu

y Bohrmann, 2003; Klerkx, 2003). Muchas veces, si es que la profundidad de columna de agua no es muy grande (menos de 200 metros) y la intensidad del *gas seep* es alta, las burbujas de gas (particularmente, gas metano) pueden escapar como gas libre hacia la superficie en grandes volúmenes y continuar su camino hacia la atmósfera donde el gas metano puede inflamarse (“*burning sea*”). Si esto ocurre, es muy probable que el gas metano tenga un efecto perjudicial en la atmósfera y el clima (ya que es un potente gas invernadero), más que en otros *gas seep* normales (ó más profundos, mayores a 200 metros) donde la mayor parte del gas metano es disuelto, diluido y eventualmente oxidado en el agua de mar, consumido por bacterias (bacterias metanogénicas) ó fijado en el suelo marino como cortezas de carbonatos (*authigenic carbonates*) (Klerkx, 2003). Es importante considerar que esta emisión de metano ó dióxido de carbono a la interfase océano-atmósfera puede aun ser significativa y peligrosa. El ascenso de estas plumas de gas, muchas veces, esta influenciado por el gas libre proveniente de la formación y descomposición de los hidratos de gas por debajo del suelo marino debido a diversos factores (donde se observan estas expulsiones de gas) (Pecher, 1996; Morales y Díaz-Naveas, 2000; Greinert *et al.*, 2000; Kukowski y Bialas, 2000; Pecher *et al.*, 2001; Sahling, 2001; Klerkx, 2003; Torres *et al.*, 2002; Hübscher *et al.*, 2003; Trehú y Bohrmann, 2003; Netzeband *et al.*, 2005).

4.5.1. Posible *gas seep* en las afueras de la costa de Chimbote

Todas las explicaciones anteriormente brindadas acerca de la detección de plumas de gas con medios hidroacústicos, y otros métodos para confirmar los mismos, dan un mejor entendimiento al momento de observar “formas” y diversas estructuras presentes en ecogramas cuando se investiga el suelo marino. En el norte del Perú, específicamente en las afueras de las costas de Chimbote (cerca o dentro de la Cuenca Trujillo y al sureste de la Cuenca Yaquina) (Thornburg y Kulm, 1981; Ballesteros *et al.*, 1988; Suess y von Huene,

1990); se detectó, con una ecosonda SIMRAD EK-500 tipo *Split beam* utilizando la frecuencia de 38 kHz, una “forma” muy parecida a una pluma de gas. En un primer momento se pensó que era una ascensión de peces mesopelágicos y plancton (como Eufáusidos y Mitófidos) debido a la hora en que se tomó el muestreo con la ecosonda (16:17 minutos) (Gutiérrez 2005, comunicación personal); pero luego de investigar sobre hechos similares alrededor del mundo y contactar especialistas en esta área, se pudo determinar que es muy posible que esta estructura sobre el suelo marino sea una pluma de gas en un *cold seep* (Greinert 2005, comunicación personal; Hübscher 2005, comunicación personal; Kukowski 2005, comunicación personal).

Existen ciertos hechos que apoyan esta posible expulsión de gas en este sitio, considerando lo determinado hasta el momento en otros lugares; las condiciones y observaciones que sustentan esto son:

- Esta posible pluma de gas se encuentra muy cerca o dentro de la Cuenca Trujillo y al sureste de la Cuenca Yaquina (Thornburg y Kulm, 1981; Ballesteros *et al.*, 1988; Suess y von Huene, 1990). En investigaciones anteriores se demostró, con estudios sísmicos, que ambas cuencas de antearco tienen fallamientos en su estructura estratigráfica interna, pero que, sin embargo, la Cuenca Trujillo esta llena de fallas muy complejas en su estructura estratigráfica interna (Thornburg, 1985; Shipboard Scientific Party, 1986; en Suess y von Huene, 1990).
- En la figura 40 se puede apreciar que la pluma de gas se encuentra ascendiendo encima de un monte. Este monte puede, probablemente, ser una estructura morfológica denominada *chemoherm* (resultado de la fijación de CO₂ por bacterias para la formación de concreciones de carbonato), la cual es característica típica de sitios con expulsión de fluidos ricos en metano y H₂S, y han sido observadas varias

de estas estructuras cerca de este sitio (Greinert *et al.*, 2000; Kukowski y Bialas, 2000; Kukowski 2005, comunicación personal).

- Se ha determinado, en estudios anteriores, la presencia de comunidades biológicas bentónicas tales como *Calypptogena sp.*, *Acharax sp.*, y *Vestimentifera sp.* en los alrededores del área de la Cuenca Yaquina, así como la de estructuras morfológicas denominadas *chemoherm* (Suess y von Huene, 1990; Greinert *et al.*, 2000; Kukowski y Bialas, 2000). Estos organismos y estructuras son características típicas de sitios con expulsión de fluidos ricos en metano y H₂S.
- El sitio 684 perforado en el estudio *Leg 112* de *ODP* (Shipboard Scientific Party, 1986; en Suess y von Huene, 1990) fue realizado muy cerca a este posible *gas seep*, por lo tanto, se tiene conocimiento de las posibles facies sedimentarias que componen esta área, así como de perfiles sísmicos y estudios geoquímicos de los sedimentos. Las conclusiones del estudio demuestran presencia de gases hidrocarburos tales como metano (por lo tanto, sedimentos ricos en metano) y minerales (*authigenic minerals*). En el estudio *Leg 112 ODP* atribuyen estos resultados a otros factores (tales como, *Poleward undercurrent*, fluctuaciones en el nivel del mar y en los procesos de afloramiento); pero es muy probable que estos resultados tengan relación con este posible *gas seep*.
- Además se determinó derrumbes submarinos en esta área, así como procesos de deslizamientos de material que cambiaron la morfología del suelo marino en ciertas zonas (Suess y von Huene, 1990; Sahling, 2003; Kukowski 2005, comunicación personal). Se desconoce si estos procesos fueron influenciados por la formación y disociación de hidratos de gas (Kukowski 2005, comunicación personal), pero lo que si se sabe es que estos procesos exponen comunidades biológicas bentónicas ó *cold seeps*, enterradas probablemente en el suelo marino (Suess y von Huene, 1990; Sahling, 2003; Kukowski 2005, comunicación personal).

- Se conoce que en esta zona (el área de la Cuenca Yaquina) existen hidratos de gas por debajo del suelo marino y que estos se encuentran en un estado de compleja estabilidad con el gas libre que aun no ha formado hidratos de gas (Hübscher *et al.*, 2003; Netzeband *et al.*, 2005; Kukowski y Bialas, 2000). Se sabe, por estudios geofísicos, que en la actualidad hay hidratos en estado de transformación (formación y disociación), y el gas metano libre se encuentra, de hecho, migrando a través de Zona de Estabilidad de los Hidratos de Gas (*GHSZ*) y ascendiendo dentro de la columna de agua por fallas cercanas al suelo marino (Netzeband *et al.*, 2005; Hübscher 2005, comunicación personal).

Todas estas explicaciones pueden llevar a concluir que esta expulsión de gas en realidad existe, pero es necesario comprobarlo con estudios más profundos.

En el Mar Negro se observó que ciertas zonas del suelo marino tenían *gas seeps* con alta intensidad durante su expulsión de gas. En cambio, en otras zonas, éstos sólo eran de significativa intensidad pero que ocurrían eventualmente (Klerkx, 2003). Esto puede ocurrir en el posible *gas seep* que se observó a las afueras de las costas de Chimbote.

4.5.1.1. Características del posible *gas seep*

Todas las medidas presentadas en esta sección fueron deducidas del ecograma mostrado en la figura 40, al momento de realizar el trabajo batimétrico gracias al proyecto “Investigaciones Paleoceanográficas en el Margen Continental Peruano” (Herbozo, 2005).

Las principales mediciones y observaciones deducidas de este ecograma son presentadas a continuación:

- El largo de este posible *chemoherm* ó pináculo es de casi 2 millas náuticas (aproximadamente 3,7 kilómetros de longitud) y su alto de, aproximadamente, 230 metros.
- La posible pluma de gas se encuentra, aproximadamente, a 600 metros de profundidad de columna de agua y se eleva alrededor de 130 metros en la columna de agua. Su ancho fue determinado con dos procedimientos: **1)** Se dedujo el ancho aproximado de 92,65 metros utilizando la distancia de 5 UBM seguidos (Unidad Básica de Muestreo) de 0,01 millas náuticas cada uno (18,53 metros cada uno) en el ecograma examinado con el software *Sonar Data Echoview*. **2)** Se determinó el valor de 74,11992 metros realizando una conversión desde la diferencia en segundos observados en latitud usando el ecograma examinado con el software *Sonar Data Echoview*. Para este procedimiento fue asumido que 1° grado en latitud es igual a 60 millas náuticas; por lo tanto, 1 segundo en latitud es igual a 30,8833 metros (se observó una diferencia de 2,4 segundos entre los extremos de la posible pluma de gas en el ecograma).
- En la figura 40 (ecograma examinado), justo por debajo de la posible pluma de gas, se observa una pequeña área de color rojo debajo de los primeros 15 metros por debajo del suelo marino. Esto a primera vista representa substratos relativamente “duros” con valores de -10 a -30 dB en la escala del software *Sonar Data Echoview* (valores en dB para substratos “duros”). Es importante notar que el ecosonda EK-500 debe su nombre a que muestrea cada valor de Sv por metro en la columna de agua (es decir, 500 muestras en la columna de agua), por consecuencia, los valores a más de 500 metros (600 metros en este caso) tiene una resolución menor a 1 metro

en los valores Sv (su magnitud es medida en dB), es decir, son “escuchados” por el ecosonda con menos fuerza que la enviada (esto es, sin considerar la pérdida por dispersión geométrica y absorción en la columna de agua por las condiciones oceanográficas) (Gutiérrez y Maclennan, 2005; Gutiérrez 2005, comunicación personal). Por eso, es relevante considerar esta observación ya que, a pesar de toda

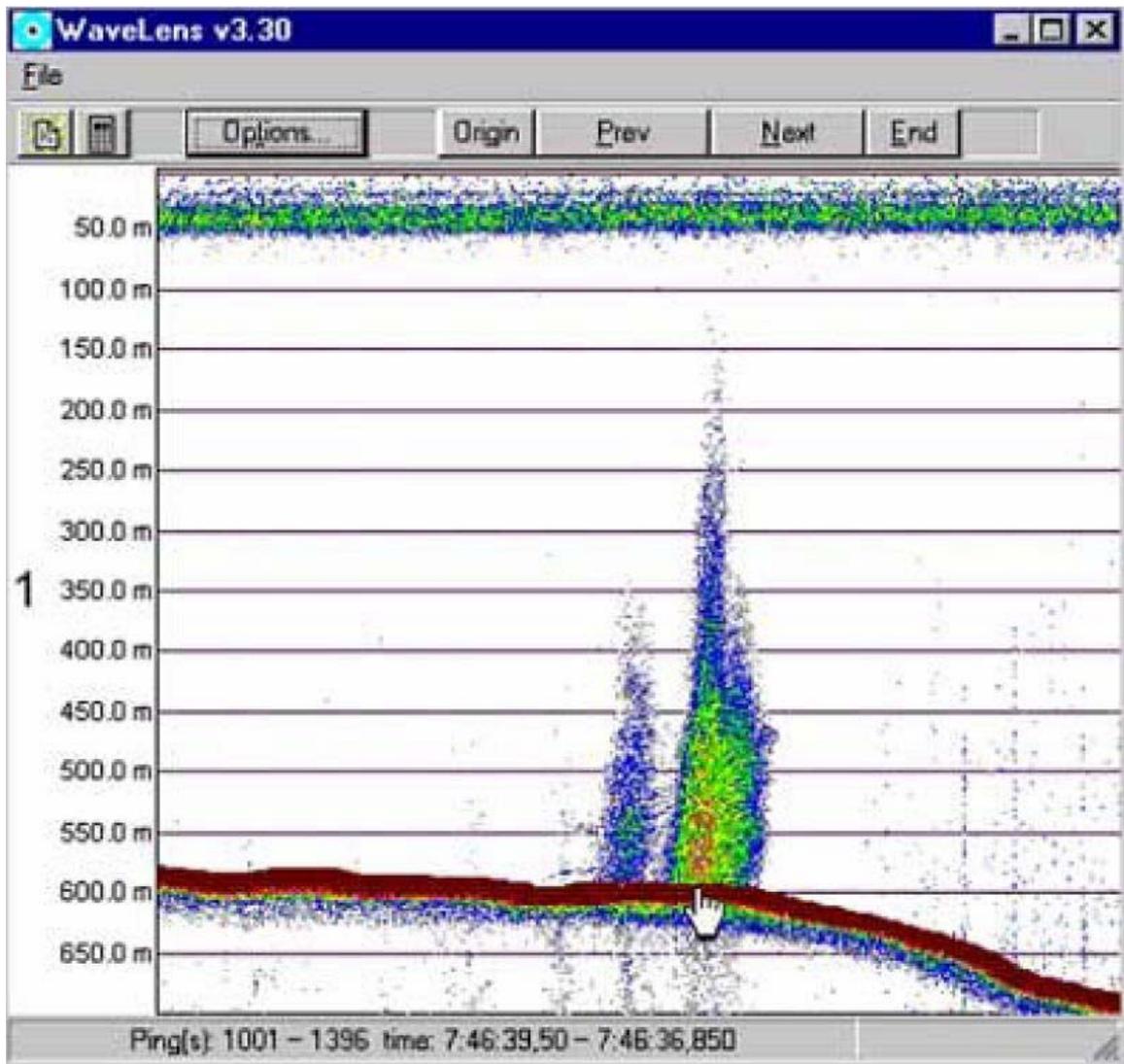


Figura 38. Ecograma mostrando un doble *seep* descubierto recién en Julio del 2001 con un ecosonda SIMRAD EK-500 del R/V *Professor Vodyanitskiy* a una profundidad de 593,5 metros denominado “*Two Captains*” al noroeste del Mar Negro. La pluma de gas se eleva alrededor de 400 metros dentro de la columna de agua (cortesía de V. N. Egorov/Yu. G. Artemov/S. B. Gulín, Sevastopol, Ucrania; citado por Klerkx, 2003).

la fuerza “acústica” perdida por diversos factores, el ecosonda aun puede registrar este tipo de posible substrato relativamente “duro” y mostrarlo en el ecograma (Kukowski 2005; comunicación personal). Por lo tanto, una de las típicas características que acompañan la expulsión de gases son los minerales (*authigenic minerals*) (formados *in situ* por diversos factores, uno de ellos, la degradación de metano por comunidades bacterianas).

- En la figura 40 también se observa una posible falla en la continuación sureste del montículo (en la figura 8: *possible seafloor side*). Esto puede, en varios casos, indicar presencia de gas por debajo del suelo marino (Kukowski 2005, comunicación personal).

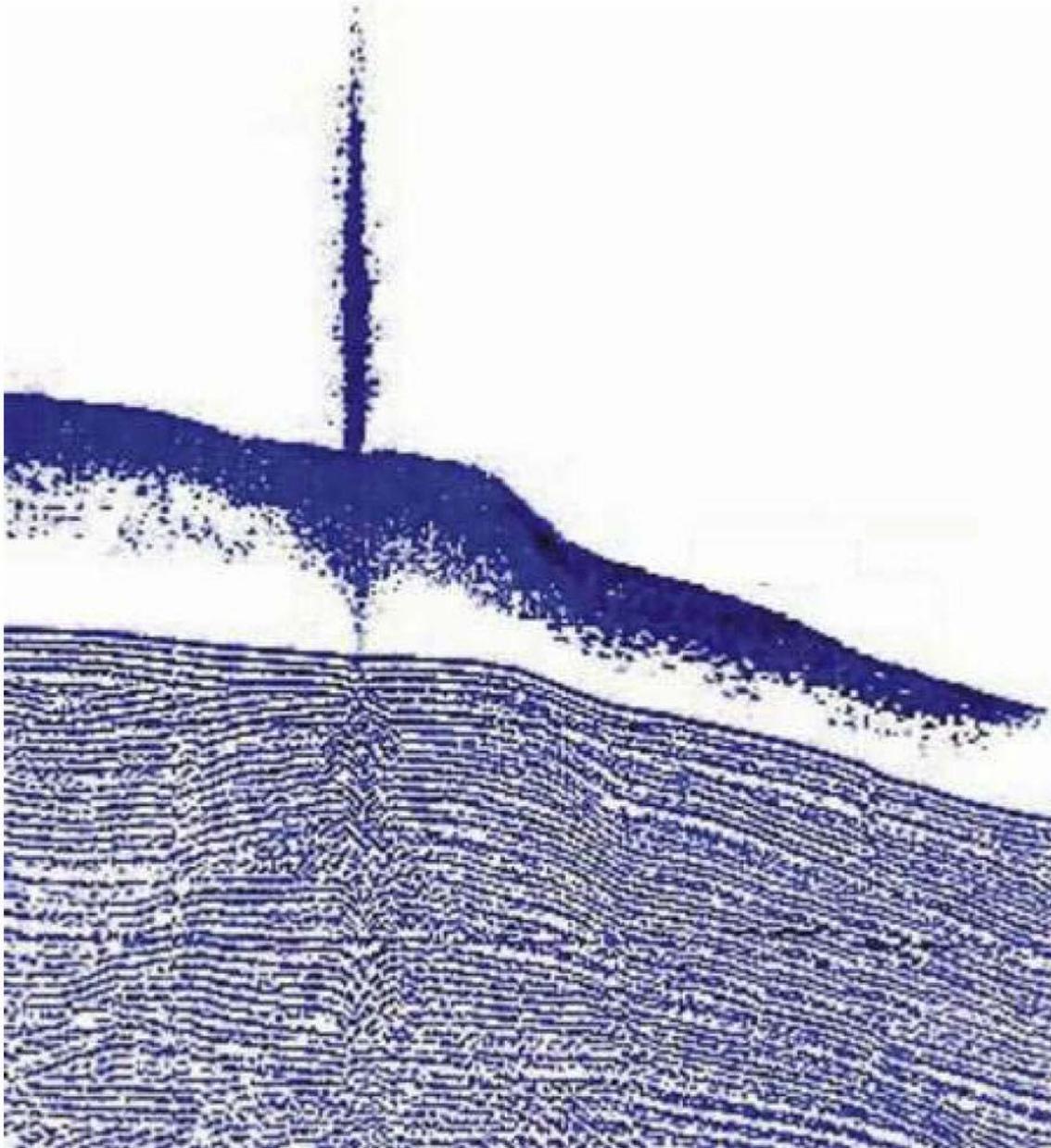


Figura 39. Esta figura combina una imagen acústica mostrando una pluma de gas dentro de la columna de agua y, por debajo, un perfil sísmico de alta resolución donde el ascenso vertical del gas a través de los estratos sedimentarios y fallas se visualiza claramente (cortesía del Dr. Lyobomir Dimitrov, Instituto de Oceanografía, Varna, Bulgaria; citado por Klerkx, 2003).

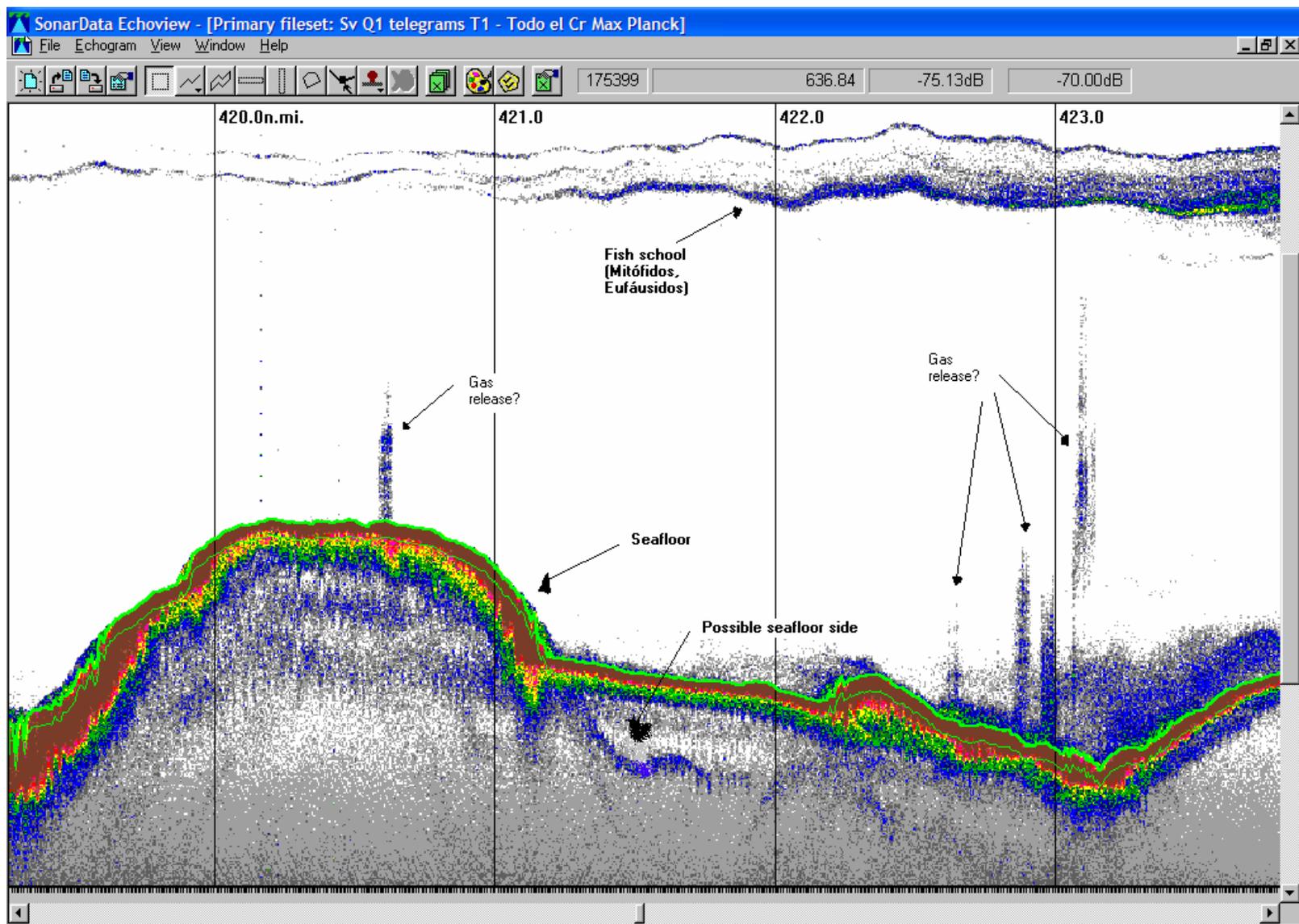


Figura 40. Posible pluma de gas (única estructura vertical en el lado derecho de la figura) descubierta a las afueras de las costas de Chimbote (cercana al área de la Cuenca Yaquina).

4.6. Resultados

La cantidad de valores Sv provenientes de registros hidroacústicos digitales de 35 cruceros de prospección pesquera (IMARPE), con los cuales se quiere representar en forma de imágenes la distribución teórica-espacial de sedimentos con potencial paleoceanográfico para reconstrucciones de eventos ocurridos durante el Holoceno Tardío a una alta resolución en el suelo marino de la zona central-sur de la plataforma continental y talud superior continental (desde 11°S hasta 15°S) utilizando Tecnología SIG; fue de aproximadamente 1.06 millones.

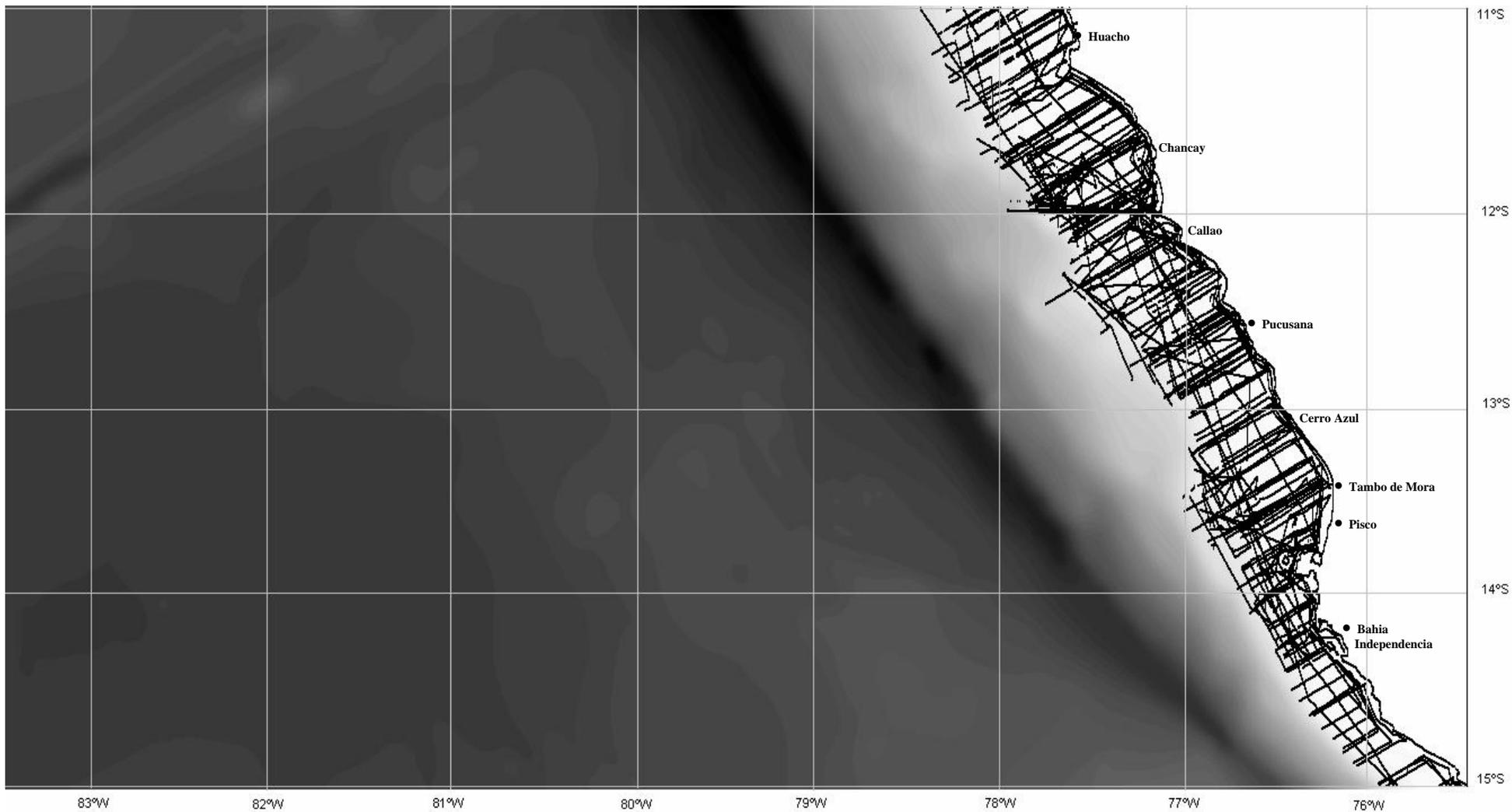


Figura 41. Distribución de los valores S_V obtenidos de los 35 cruceros hidroacústicos de prospección pesquera. Mapa base de contornos cada 100 metros (GEBCO).

La preparación de todo el conjunto de datos Sv para la creación de imágenes se basó, como referencia, en la clasificación exploratoria de sedimentos superficiales realizada en el Informe Acústico del crucero Paleocenoográfico 0405 (Gutiérrez y Herbozo, 2004). En este informe se determinó, de forma teórica utilizando la señal de $Sv\ mean$, que se puede separar áreas en el suelo marino por los diferentes sustratos que presentaban de acuerdo a sus distintas respuestas acústicas. No se utilizó, para la clasificación exploratoria en este informe, los valores de las señales $Sv\ max$ ni $Sv\ min$, pero se observó y determinó que estas señales tienen una influencia directa en la diferenciación de los diferentes tipos de sustratos, así como sus características, en el suelo marino. Para la fácil creación de las imágenes, el conjunto de valores Sv distribuido en toda el área de estudio (desde 11°S hasta 15°S), se separó en las mismas 8 zonas determinadas anteriormente. Los límites de las ocho (8) zonas son:

► Zona 1

El área de esta zona está delimitada desde 11°S hasta los 11°45'S en latitud y, desde 78°53'W hasta los 78°6'W en longitud.

► Zona 2

El área de esta zona está delimitada desde 11°45'S hasta los 12°30'S en latitud y, desde 78°32'W hasta los 77°18'W en longitud.

► Zona 3

El área de esta zona está delimitada desde 12°30'S hasta los 13°36'S en latitud y, desde 78°2'W hasta 76°48'W en longitud.

► Zona 4

El área de esta zona esta delimitada desde 11°S hasta los 11°45'S en latitud y, desde 78°6'S hasta la línea de costa en longitud.

► Zona 5

El área de esta zona esta delimitada desde 11°45'S hasta 12°30'S en latitud y, desde 77°18'W hasta la línea de costa en longitud.

► Zona 6

El área de esta zona esta delimitada desde 12°30'S hasta los 13°36'S en latitud y, desde 76°48'W hasta la línea de costa en longitud.

► Zona 7

El área de esta zona esta delimitada desde 13°36'S hasta los 14°6'S en latitud y, desde 77°6'W hasta la línea de costa en longitud.

► Zona 8

El área de esta zona esta delimitada desde 14°6'S hasta los 15°S en latitud y, desde 76°48'W hasta la línea de costa en longitud.

La separación del área de estudio en ocho (8) zonas permitió que las operaciones estadísticas y matemáticas llevadas a cabo por los métodos geoestadísticos y de interpolación en el SIG, necesarias para el modelado de las superficies en 2D y 3D en esta tesis; tengan mayor rapidez y sean operadas con facilidad durante sus procesos.

Se creó imágenes en 2D para cada zona utilizando el método de interpolación *Kriging*. Para realizar la interpolación usando *Kriging*, fue necesario realizarle a cada zona una validación geoestadística con la finalidad de ajustar todos los valores a una tendencia, la cual proporcionará mayor exactitud y precisión en las imágenes. La validación por medio de métodos geoestadísticos también “pondrá al descubierto” cuanto error existe en la creación del mapa y/o en los datos de entrada para la creación de estos.

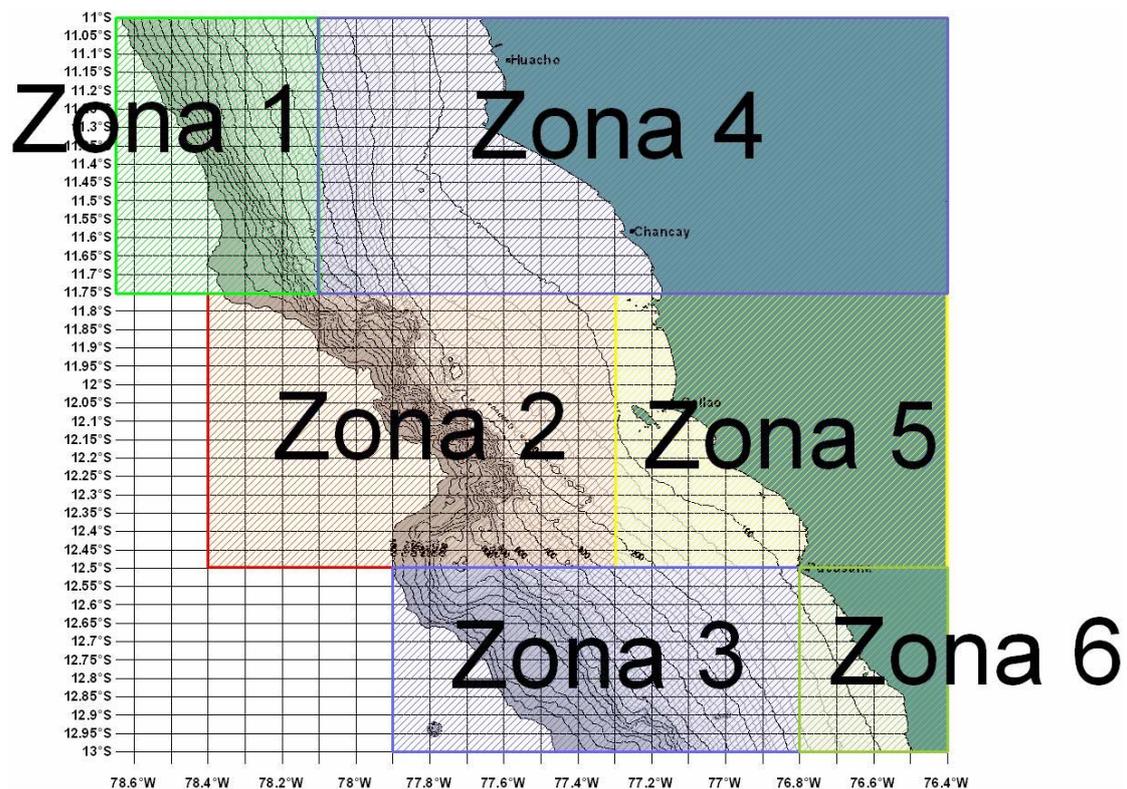


Figura 42. Zonificación del área de estudio (primera parte desde 11°S hasta 13°S). Mapa de contornos batimétricos en 2D creado con *Golden Software Surfer* a una resolución de 500 metros.

El método geoestadístico utilizado para validar las ocho (8) zonas fue el Método Kriging Ordinario para la Predicción de Mapas (*Geostatistical Method Ordinary Kriging with Prediction Map*). Además, se utilizaron tres modelos para modelar el semivariograma de los datos; estos modelos fueron el modelo Esférico (*Spherical model*), el modelo Exponencial (*Exponential model*) y el modelo Gaussiano (*Gaussian model*).

De los tres modelos mencionados anteriormente, se vio una tendencia muy similar entre el Exponencial y el Esférico cuando se crearon los semivariogramas y en los valores obtenidos de estos (*Lag Size*, *Major Range*, *Partial Sill* y *Nugget*). Por el contrario, el modelo Gaussiano mostró una tendencia con mayor ajuste a los datos evaluados. De forma general, estos modelos son representativos ante los demás modelos geoestadísticos, aparte de ser los de mayor uso y mayor estudio; es por eso que se usó solamente estos modelos para observar la correlación geoestadísticas de los valores Sv . Los valores obtenidos de los modelos geoestadísticos, con los cuales se evaluaron los valores Sv en cada una de las 8 zonas, serán mostrados en el Anexo 2.

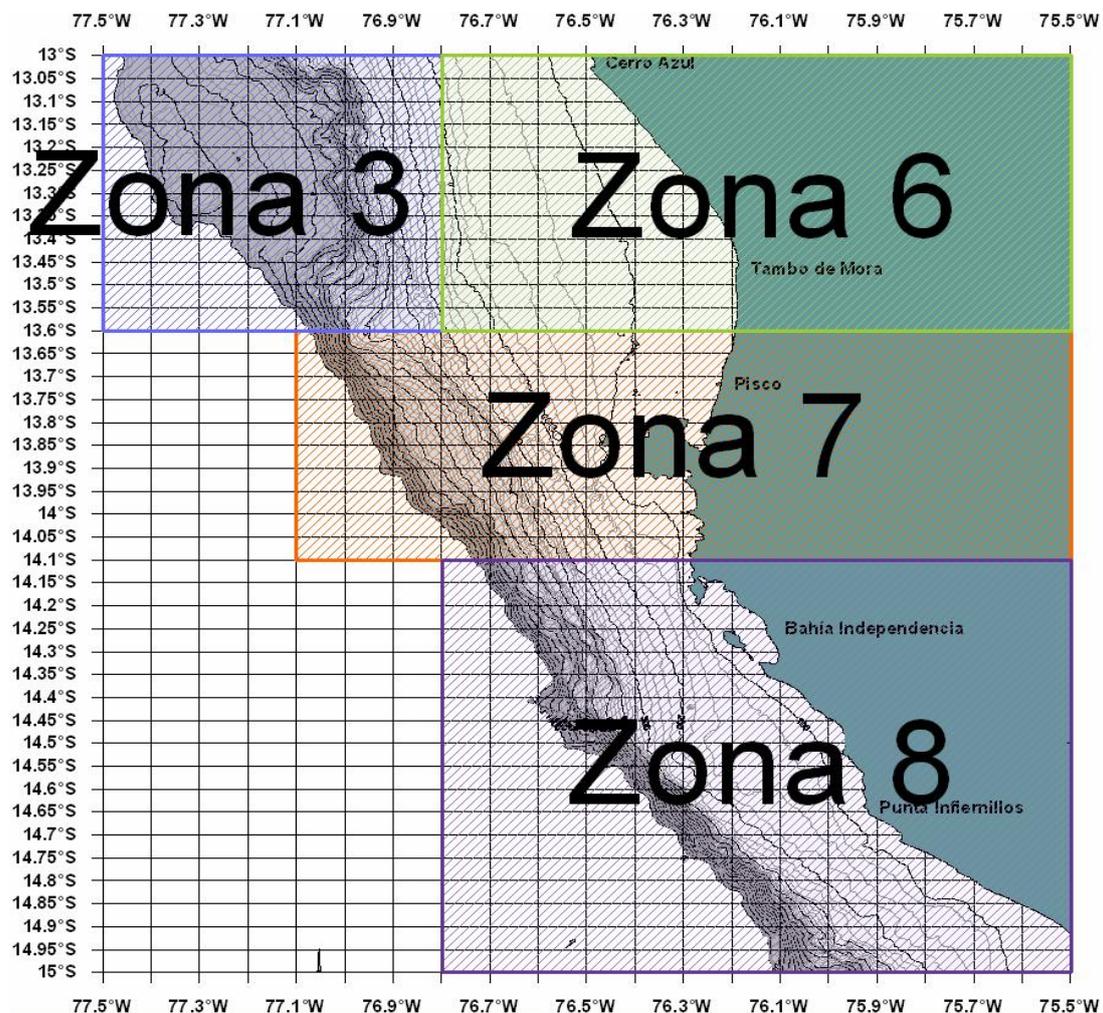


Figura 43. Zonificación del área de estudio (segunda parte desde 13°S hasta 15°S). Mapa de contornos batimétricos en 2D creado con *Golden Software Surfer* a una resolución de 500 metros.

Para la creación de las imágenes de distribución espacial de sedimentos superficiales usando valores de retrodispersión acústica (valores S_v) en el suelo marino para las ocho zonas de estudio se probó varios tipos de interpolaciones (*Kriging*, *Spline*, *IDW*) con diferentes valores de interpolación (ya sean distancias de 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 km de radio de interpolación con números de puntos para la interpolación en ese radio de 100, 1000, 10 000, 100 000, 500 000 y 1 000 000). Debido a que estos valores tienen variabilidad espacial (datos dispersos) y fue necesario modelar pequeñas y grandes áreas donde no se tienen valores S_v , se decidió utilizar el método *Kriging* con los valores geoestadísticos obtenidos del modelo Gausiano y, los valores de interpolación de 1000 km como máxima distancia de radio, 1000 como la cantidad de número de puntos para la interpolación dentro de ese radio y 250 metros de tamaño de celda para el *raster*. Se observó, en todas las interpolaciones, que a partir de esta forma de crear las superficies se mantenía una constante en las imágenes, no existía mayor cambio en las características de la distribución de los valores y, además, no demoraba mucho tiempo en su creación (en promedio de 30 a 1 hora para cada zona). Esto fue un gran avance y alivio en la creación de las imágenes ya que en un principio se intentó crear estas imágenes utilizando todo el conjunto de datos (es decir, los 1.06 millones de valores S_v en un único *shapefile*). Esta forma de creación, para los métodos de interpolación *IDW* y *Spline*, creó gran problema debido a que en 2 oportunidades se esperó 1 día de procesamiento continuo sin obtener resultados exitosos. Con el método *Kriging* se obtuvo la creación de las 3 imágenes (luego de 2 días de procesamiento por cada imagen) pero no se tomó en cuenta ya que el tamaño de píxel fue muy grande (casi 1500 metros). Es por eso, que la separación del área de estudio, se convirtió en un gran alivio y rápida manipulación para la creación de estas superficies. En estos casos no se utilizó el método *TIN*.

Para la creación de estas imágenes se utilizó, como se explicó anteriormente, los valores Sv sin corrección oceanográfica (ver, Corrección de los valores Sv).

4.6.1. Análisis

Para establecer una relación teórica entre los valores de retrodispersión acústica (Sv) y los tipos de sedimentos superficiales con potencial paleoceanográfico, se tuvo que buscar zonas de donde se extrajo sedimento con estas características de forma vertical del suelo marino en el área de estudio (desde 11°S hasta 15°S), y además, cuanto de esto fue extraído. Hay que tener en cuenta que los valores Sv presentados en esta tesis evalúan un total de 15 metros de sedimento de forma vertical por debajo del suelo marino en sus tres señales (Sv_{max} , Sv_{mean} y Sv_{min}).

Para establecer una correlación real entre valores Sv y sedimentos superficiales, se consideró trece (13) secciones verticales de sedimento obtenidas del suelo marino dentro de la zona de estudio (desde 11°S hasta 15°S). Dos de las secciones verticales de sedimento consideradas cubren, aproximadamente, un (1) metro de sedimento por debajo del suelo marino (Crucero Paleo 0405 – *Box corer* 0405-6 y *Box corer* 0405-13), una sección cubre, aproximadamente, 7 metros de sedimento por debajo del suelo marino (*ODP 112 – Hole 679A Core 1H*) y las diez secciones restantes cubren, aproximadamente, 15 metros de sedimento por debajo del suelo marino (*ODP 112 – 679B Core 1H y 2H; 679C Core 1H y 2H; 679D Core 1H y 2H; 680A Core 1H y 2H; 680B Core 1H y 2H; 680C Core 1H y 2H; 686A Core 1H y 2H; 686B Core 1H y 2H; y, 687A Core 1H y 2H; 687B Core 1H y 2H*).

Es preciso resaltar que cada una de las secciones consideradas anteriormente, con las cuales se desea establecer una relación teórica con los valores Sv ; es sedimento extraído con

características paleoceanográficas ya que es la prioridad de este trabajo. Se espera que, en futuros trabajos de clasificación de sedimentos superficiales usando valores de retrodispersión acústica (valores S_{ν}); se pueda establecer una relación teórica para otros tipos de sustratos tales como fosforita, afloramientos rocosos, etc.

En la tabla 1 se presentarán los valores S_{ν} y las descripciones de las secciones de sedimento.

Testigo	Prof. (m)	Sección (m)	S_v <i>max</i>	S_v <i>mean</i>	S_v <i>min</i>	Descripción
0405-06	299	0.95	-6.32	-14.68	-52.84	Ver Figura 43.
0405-13	184	1.04	-4.46	-15.34	-76.55	Ver Figura 44.
679A-1H	450	7	-8.12	-18.06	-55.23	La mayor litología observada fue fango de foraminíferos y nanofósiles, así como fango compuesto de pirita (<i>foraminifer and nannofossil mud and pyrite-bearing mud</i>), generalmente desde gris oliva (<i>olive gray - 5Y 4/2</i>) hasta gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>). Las menores litologías observadas fueron nódulos de fosforita (<i>phosphatic nodules</i>) de 1 - 2 cm de diámetro; así como fango diatomítico compuesto de pirita (<i>pyrite-bearing diatomaceous mud</i>) en los primeros 60 cm (0 - 60 cm), y ceniza volcánica muy fina de color gris (<i>fine-grained volcanic ash, gray</i>) desde 260 hasta 261 cm de profundidad (260 - 261 cm). Observación personal: Se observa en la figura del testigo, cantidad importante de material "revuelto" ó "inconsistente" desde los 360 cm hasta los 765 cm (medida tomada de acuerdo a la Figura 45).
679B-1H/2H	461	16	-6.91	-16.87	-58.44	La mayor litología observada fue fango compuesto de foraminíferos y nanofósiles, así como de fango diatomítico (<i>foraminifer- and nannofossil-bearing mud and diatomaceous mud</i>), generalmente oliva (<i>olive - 5Y 4/3</i>), gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) ó gris muy oscuro (<i>very dark gray - 5Y 3/1</i>). Las menores litologías observadas fueron nódulos de fosforita (<i>phosphatic nodules</i>) de 1 - 5 cm de diámetro (entre los 300 y 450 cm del testigo); así como fango diatomítico rico en cenizas (<i>ash-rich diatomaceous mud</i>) en dos capas finas de turbiditas, en los 197 cm hasta 205 cm (197 - 205 cm). A partir de los 650 cm, la mayor litología observada fue fango compuesto de foraminíferos y diatomeas (<i>diatom- and foraminifer- bearing mud</i>), generalmente gris oliva (<i>olive gray - 5Y 4/2</i>), gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) ó negro (<i>black - 5Y 2.5/2</i>). Los dos tercios de la parte inferior del testigo (aproximadamente desde los 950 cm hasta los 1600 cm) muestra una pronunciada laminación, así como nódulos de fosforita dispersos, y pocas capas finas (1 - 2 cm) de cieno de diatomeas de color amarillo sin brillo (<i>5Y 8/4</i>) (<i>pale yellow diatom ooze</i>). Observación personal: Se observa en la figura del testigo que el fango esta bastante "revuelto" ó "inconsistente" desde los 800 cm hasta los 950 cm. Por el contrario, se nota antes de esta "inconsistencia", regular cantidad de material compacto desde los 650 cm hasta los 800 cm. (medida tomada de acuerdo a la Figura 46 y 47)
679C-1H/2H	461	18.5	-6.91	-16.87	-58.44	No se abrió el testigo recuperado, por lo tanto, no se obtuvo descripción.
679D-1H/2H	450	17.4	-6.91	-16.87	-58.44	La mayor litología observada fue fango compuesto de foraminíferos y diatomeas (<i>diatom- and foraminifer-bearing mud</i>), generalmente oliva (<i>olive - 5Y 3/2</i>) ó negro (<i>black - 5Y 2.5/1</i>). Se observó en todo este intervalo que el material va acomodado de forma masiva principalmente hasta finamente acomodado localmente. Las menores litologías observadas fueron nódulos de fosforita (<i>phosphatic nodules</i>) de 1 - 5 cm de diámetro en los primeros 150 cm (de 0 a 150 cm), y hojas de yeso en todo este intervalo (<i>gypsum blades throughout</i>). A partir de

						los 790 cm, la mayor litología observada fue fango compuesto de foraminíferos y diatomeas (<i>diatom- and foraminifer-bearing mud</i>), generalmente de forma masiva a finamente acomodada. Los colores son gris (<i>gray - 5Y 5/1</i>) y gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) a negro (<i>black - 5Y 2.5/1</i>). Se observó cieno de diatomeas que ocurre en forma de lentes (<i>Diatom ooze occurs in lenses</i>). Las menores litologías observadas fueron nódulos de fosforita (<i>phosphatic nodules</i>), y yeso como finos cristales (<i>gypsum as fine-bladed crystals</i>) en dos partes, desde 1240 cm hasta 1390 cm y desde 1540 cm hasta 1690 cm de profundidad del testigo (ver Figura 48 y 49).
680A-1H/2H	263	17.8	-15.8	-22.80	-35.50	Las mayores litologías observadas fueron dos; la primera, fango compuesto de foraminíferos - fango compuesto de diatomeas (<i>foraminifer-bearing, diatom-bearing mud</i>) de color negro (<i>black - 5Y 2.5/2</i>) fue observada desde los 0 cm hasta los 175 cm; y la segunda, fango diatomítico compuesto de nanofósiles y arena compuesta de foraminíferos (<i>nannofossil-bearing diatomaceous mud and foraminifer-bearing sand</i>) de color gris oliva (<i>olive gray - 5Y 2.5/2</i>) y negro (<i>black - 5Y 3/2</i>) fue observada desde los 175 cm hasta 830 cm (desde 175 cm hasta el final de esta sección). Las menores litologías observadas fueron fango diatomítico cenizoso (<i>ashy, diatomaceous mud</i>) de color gris oliva (<i>olive gray - 5Y 5/1</i>) desde los 0 cm hasta los 175 cm; así como fango diatomítico cenizoso (<i>ashy diatomaceous mud</i>) de color gris oliva (<i>olive gray - 5Y 4/2</i>) y nódulos de fosforita litificados (<i>lithified phosphate nodules</i>) de color marrón amarillento (<i>yellowish brown - 10YR 5/6</i>) desde los 175 cm hasta 830 cm. A partir de los 830 cm, la mayor litología observada fue fango compuesto de diatomeas (<i>diatom-bearing mud</i>) de color oliva (<i>olive - 5Y 5/3</i>) y de color gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) con laminaciones. Las menores litologías observadas fueron, la 1era, cieno diatomítico compuesto de nanofósiles (<i>ooze diatom bearing-nannofossil</i>) de color amarillo oliva (<i>olive yellow - 5Y 6/6</i>) y "camas marcadas muy finas" (<i>very thin sharp-based beds</i>). La 2da, fango diatomítico cenizoso (<i>ashy diatomaceous mud</i>) de color gris suave (<i>light gray - 5Y 7/1</i>) y "camas marcadas finas" (<i>thin sharp-based beds</i>). La 3ra, arena cenizosa litificada (<i>lithified ashy sand</i>) de color gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 4/3</i>) y cemento fosfático (<i>phosphatic cement</i>). La 4ta, arena (<i>sand</i>) de color gris oliva (<i>olive gray - 5Y 3/2</i>) y contiene guijarros (<i>pebbles</i>) mayores a 3 cm (ver Figura 50 y 51).
680B-1H/2H	263	15	-15.8	-22.80	-35.50	La mayor litología observada fue fango compuesto de foraminíferos y fango compuesto de diatomeas (<i>diatom-bearing, foraminifer-bearing mud</i>) de color gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 4/4</i>) y de color negro (<i>black - 5Y 2.5/2</i>) con finas camas (<i>thin bedded</i>) hasta laminaciones (<i>laminated</i>), así como, arena limosa (<i>silty sand</i>) como capas finas en todo este intervalo (<i>thin layers throughout</i>). Observación personal: En la figura se observa que los primeros 150 cm, el fango es de color oscuro hasta un poco antes del final (145 cm ya cambia de color) y tiene una especie de puntos blancos bien acentuados desde los 0 cm hasta los 75 cm, luego desaparece relativamente por casi 25 cm (del 75 cm hasta casi 100 cm) y se acentúa pero sólo en el lado izquierdo de esta sección. A partir de los 550 cm, la mayor litología observada fue fango diatomítico con capas limosas (<i>diatomaceous mud interbedded with silty beds</i>) de 0 - 1.5 cm de espesor desde los 550 cm hasta los 1150 cm; principalmente de forma masiva desde 1150 cm hasta los 1500 cm (hasta el final). Las menores litologías observadas fueron, la 1era, limo diatomítico (<i>diatomaceous silt</i>) de 2 - 3 mm, rico en nanofósiles (<i>nannofossil-rich</i>) y color amarillo oliva (<i>olive yellow - 5Y 6/6</i>). La 2da, nódulos de fosforita (<i>phosphatic nodules</i>). La 3ra, fango masivo gris muy oscuro (<i>very dark gray massive mud</i>) entre los 1050 cm hasta los 1150 cm. La 4ta, se observó varias capas de ceniza volcánica en las siguientes partes de esta sección: a) Entre los 685 cm hasta

						686 cm; b) Entre los 685 cm hasta 686 cm; c) Entre los 792 cm hasta los 793 cm; d) Entre los 911 cm hasta los 912 cm; e) Entre los 1045 cm hasta los 1046 cm; f) Entre los 1355 cm hasta los 1356 cm (ver Figura 52 y 53).
680C-1H/2H	263	15.3	-15.8	-22.80	-35.50	No fue abierto el testigo, por lo tanto, no se tiene una descripción del material recuperado.
686A-1H/2H	457.3	14.6	0.49	-15.98	-74.29	La mayor litología observada fue fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) de color gris oliva (<i>olive gray - 5Y 4/2 y 5Y 5/2</i>), oliva (<i>olive - 5Y 5/4</i>), y gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>); además de sedimento laminado con algunos intervalos de sedimento suave deformado y algunas "deformaciones marcadas" (<i>laminated with some intervals of soft sediment deformation and some burrowing</i>). Las menores litologías observadas fueron: 1) Nódulos de fosfato y gravas nodulares (<i>phosphate nodules and nodular gravels</i>). 2) Arena de cuarzo feldespática (<i>quartz-feldspathic sand</i>). A partir de los 510 cm, la mayor litología observada fue fango y cieno diatomítico (<i>diatomaceous mud and ooze</i>) de color gris oliva (<i>olive gray - 5Y 3/2 y 5Y 4/2</i>), además de laminado hasta "deforme marcado", con conchas de foraminíferos dispersos (<i>laminated to burrowed with scattered foraminiferal shells</i>). Las menores litologías observadas fueron: 1) Nódulos de fosfato (<i>phosphate nodules</i>). 2) Fragmentos pequeños de conchas bivalvos dispersos (<i>scattered small bivalve shell fragments</i>). 3) Capa fina de arena inclinada (<i>thin graded sand layer</i>) (ver Figura 54 y 55).
686B-1H/2H	457.3	18	0.49	-15.98	-74.29	La mayor litología observada fue fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) de color negro (<i>black - 5Y 2.5/2, 5Y 3/2</i>), gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 4/3</i>) y gris oscuro (<i>dark gray - 5Y 4/2</i>); laminado hasta bioturbado compuesto de foraminífero (<i>laminated to bioturbated; foraminifer-bearing</i>); algunas capas finas inclinadas básicamente con porciones de limo (<i>some thin graded layers with silty basal portions</i>) y un poco de pequeñas estructuras de slump (<i>a few small slump structures</i>). Las menores litologías observadas fueron: 1) Nódulos de fosfato oscuros y duros (<i>phosphate nodules, dark, hard</i>). 2) Dolomita (<i>Dolomite</i>). 3) Arena de cuarzo feldespática compuesta de ceniza (<i>ash-bearing quartz-feldspathic sand</i>). 4) Cieno diatomítico (<i>diatomaceous ooze</i>) de color oliva (<i>olive - 5Y 5/6</i>) en finas láminas (<i>in thin laminae</i>). 5) Finas capas de fragmentos de conchas bivalvos (<i>thin layers of bivalve shell fragments</i>). A partir de los 850 cm, la mayor litología observada fue fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) de color gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>), oliva (<i>olive - 5Y 5/2</i>) y gris oliva (<i>olive gray - 5Y 5/3</i>); laminado y bioturbado. Las menores litologías observadas fueron: 1) Fango diatomítico con fragmentos de conchas bivalva (<i>diatomaceous mud with bivalve shell fragments</i>). 2) Arena lítica feldespática (<i>feldspathic-lithic sand</i>). 3) Nódulos de fosfato oscuros y duros (<i>phosphate nodules, dark, hard</i>). 4) Dolomita (<i>Dolomite</i>) (ver Figura 56 y 57).
687A-1H/2H	317.3	17	-7.13	-16.57	-64.17	Las mayores litologías observadas fueron: a) Desde los 0 cm hasta los 150 cm: fango (<i>mud</i>) de color negro (<i>black - 5Y 2.5/1</i>) cambiando a gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) en la base, homogéneo, moteado cerca de la base; color oliva (<i>olive - 5Y 4/3</i>) nódulos porosos de dolomicrita a los 71 - 74 cm. b) Desde 150 cm hasta los 300 cm: fango (<i>mud</i>), gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 4/2</i>) y gris oliva (<i>olive gray - 5Y 3/2</i>), gruesamente bandeado hasta bioturbado desde los 150 cm hasta los 214 cm (<i>coarsely banded to bioturbated</i>) y laminado desde los 214 cm hasta los 300 cm; burbuja de fosfato (<i>phosphate bleb</i>) de color marrón amarillo oscuro (<i>dark yellow brown - 10YR 4/6</i>) desde los 187 cm hasta los 189 cm, y arena de grano fino (<i>fine-grained</i>

					<p>sand) de color gris oscuro (<i>dark gray - 5Y 4/1</i>) con fina lámina a los 234 cm. c) Desde los 300 cm hasta los 450 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) de color gris oliva (<i>olive gray - 5Y 4/2</i>) y gris oliva oscuro (<i>dark olive gray</i>) bandeado en escala de cm de espesor (<i>banded in cm-scale thicknesses</i>). Se observó un fragmento de hueso fosfático de color marrón negro a los 334 cm (<i>brwnn black phosphatic bone fragment</i>). Nódulos de dolomita de color oliva con bolitas incluidas de fosforitas negras (<i>Olive - 5Y 4/4, dolomite nodules with included pellets of black phosphorites</i>) desde los 351 cm hasta los 358 cm. Fragmentos de dolomita y una vértebra de pez en fosfato negro (<i>dolomite fragments and one black phosphate fish vertebrae</i>) desde los 387 cm hasta 392 cm. d) Desde 450 cm hasta los 537 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) gris oliva (<i>olive gray - 5Y 4/2</i>) y gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>), con laminaciones ricas en diatomeas color oliva (<i>olive - 5Y 5/6</i>) débilmente bioturbadas; desde los 537 cm hasta los 600 cm se observó fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) color gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) con manchas (<i>mottles</i>) color oliva (<i>olive - 5Y 3/2</i>); y una pequeña pieza de hueso fosfático (<i>small piece phosphatic bone</i>) a los 594 cm. e) Desde los 600 cm hasta los 740 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) negro (<i>black - 5Y 2.5/2</i>) y gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) con manchas raras (<i>rare mottles</i>) gris oliva (<i>olive gray - 5Y 4/2</i>). Además, limo diatomítico volcánico (<i>diatomaceous volcanic silt</i>) gris (<i>gray - 5Y 5/1</i>) con finas láminas a los 695 cm. f) Desde los 740 cm hasta los 746 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) negro (<i>black - 5Y 2.5/1</i>) y 6 - 15 cm; fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>). 6 - 15 cm. A partir de los 750 cm, las mayores litologías observadas fueron: a) Desde los 750 cm hasta los 900 cm: fango diatomítico y limo (<i>diatomaceous mud and silt</i>) de color gris muy oscuro (<i>very dark gray - 5Y 3/1</i>) limo y fango (<i>mud and silt</i>), y gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) hasta gris oliva (<i>olive gray - 5Y 3/3</i>), masivo, ligeramente moteado (<i>faintly mottled</i>). Burbujas de fosforita (<i>phosphorite blebs</i>) en los 858 cm y 872 cm. b) Desde 900 cm hasta los 1050 cm: fango diatomítico y limo (<i>diatomaceous mud and silt</i>), oliva oscuro (<i>dark olive - 5Y 3/3</i>) con bandas oliva ricas en diatomeas (<i>with olive diatom-rich bands</i>), moteado (<i>mottled</i>), con cambios ocasionales (<i>ocassional burrows</i>), huesos de pez en los 980 cm y 1003 cm. c) Desde los 1050 cm hasta los 1200 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) oliva (<i>olive - 5Y 3/3</i>), masivo, moteado, con capas no definidas (<i>vague layering</i>) pero con evidencia de bioturbación (<i>but evidence for bioturbation</i>); además se observó un <i>Slump</i> entre los 1135 cm y 1163 cm; arena y limo gris oliva oscuro (<i>dark olive gray sand and silt - 5Y 3/2</i>) entre los 1184 cm y 1200 cm. d) Desde 1200 cm hasta los 1350 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) a oliva (<i>olive - 5Y 3/3</i>) gruesamente laminado (<i>coarsely laminated</i>). Capas de arena (<i>sand layers</i>) en 1250 - 1257 cm; 1284 - 1287 cm; 1292 - 1306 cm. Camas inclinadas (<i>graded beds</i>) en 1298 - 1302 cm; 1305 - 1320 cm; 1325 - 1331 cm; y 1339 - 1343 cm. e) Desde 1350 cm hasta los 1500 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/2</i>) a negro (<i>black - 5Y 2.5/2</i>) con fragmentos de conchas, moteado. Capa de arena inclinada (<i>graded sand layer</i>) a los 1360 cm. f) Desde los 1500 cm hasta los 1512 cm: escombros y nódulos de fosfato (<i>rubble and phosphate nodules</i>) negro (<i>black - 5Y 2.5/2</i>) a oliva (<i>olive - 5Y 3/3</i>); y desde 1512 cm hasta 1650 cm fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) negro (<i>black - 5Y 2.5/2</i>) a gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/3</i>), bioturbado (desde 1512 cm hasta 1588 cm) o laminado (desde 1588 cm hasta 1650 cm); fragmento de hueso a los 1598 cm. g) Desde 1650 cm hasta 1720 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) gris oliva oscuro (<i>dark</i></p>
--	--	--	--	--	--

						<i>olive gray - 5Y 3/2</i>). Hueso a los 1678 cm. Arena gris (<i>gray sand</i>) a los 1670 - 1672 cm. Sección vacía desde 1692 - 1718 cm (ver Figura 58 y 59).
687B-1H	317.3	5.2	-7.13	-16.57	-64.17	Las mayores litologías observadas fueron: a) Desde 0 cm hasta 150 cm: fango (<i>mud</i>) negro (<i>black - 5Y 2.5/1</i>) (muy suave en 0 - 67 cm, de color más oliva y bioturbado en 66 - 67 cm, limoso por debajo de los 76 cm); nódulos de fosfato duro en 64 - 66 cm. b) Desde 150 cm hasta 300 cm: fango (<i>mud</i>) gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/20</i>), laminado. c) Desde 300 cm hasta 441 cm: fango (<i>mud</i>) gris oliva (<i>olive gray - 5Y 3/2</i>), laminado con lámina individual de cieno oliva de diatomeas; más limoso por debajo de los 429 cm; nódulo de fosfato a 437 cm. d) Desde 450 cm hasta 502 cm: fango diatomítico (<i>diatomaceous mud</i>) gris muy oscuro (<i>very dark gray - 5Y 3/1</i>), laminado. e) Desde 600 cm hasta 619 cm: fango (<i>mud</i>), gris oliva oscuro (<i>dark olive gray - 5Y 3/1</i>). La descripción desde los 520 cm hasta los 1470 cm no se realizó debido a que no se recuperó muestra suficiente, solamente se recuperó 0.05 metros de material de 9.5 metros que debió recuperarse (0.5% de material recuperado) (ver Figura 60).

Tabla 1. Valores *S_v* y descripción del sedimento recuperado para cada testigo.

De la tabla 1 se puede deducir lo siguiente:

- ▶ Los testigos 680A y 680B ($Sv_{max} = -15.8$ dB; $Sv_{mean} = -22.80$ dB; $Sv_{min} = -35.50$ dB); muestran una respuesta acústica bien marcada, con un valor Sv_{max} por debajo del obtenido en el testigo 679A (7 decibeles de diferencia), un valor Sv_{mean} por debajo del obtenido del testigo 679A (4 decibeles de diferencia) y, un valor de Sv_{min} por encima del obtenido del testigo 0405-06 (17 decibeles de diferencia). Estas respuesta acústicas se pueden deber a la presencia de diversos tipos de sedimentos en toda la sección (p.e., fango compuesto de foraminíferos, fango compuesto de diatomeas, fango diatomítico compuesto de nanofósiles y arena compuesta de foraminíferos), la ausencia considerable de nódulos de fosforita en todos los niveles (con respecto a los demás testigos), la presencia de laminaciones en todos los niveles de la sección, pocas y pequeñas secciones de sedimento “no compacto” y poca variabilidad en la escala de colores (ver Figura 50, 51, 52 y 53).
- ▶ Los testigos 686A y 686B ($Sv_{max} = 0.49$ dB; $Sv_{mean} = -15.98$ dB; $Sv_{min} = -74.29$ dB); muestran una respuesta acústica bien marcada, con un valor de Sv_{max} muy alto con respecto a los demás, un valor de Sv_{mean} similar respecto a los demás y, un valor Sv_{min} similar al obtenido del testigo 0405-13. Estas respuestas acústicas se pueden deber a la presencia de fango diatomítico en casi toda la sección, presencia de nódulos y gravas de fosforita de tamaño considerable y dispersos a distintos niveles del testigo (ver Figura 54, 55, 56 y 57).
- ▶ El testigo 0405-13 ($Sv_{max} = -4.46$ dB; $Sv_{mean} = -15.34$ dB; $Sv_{min} = -76.55$ dB) muestran una respuesta acústica casi promedio, con un valor de Sv_{max} un poco alto respecto al promedio, un valor de Sv_{mean} similar a los obtenidos en los demás testigos

y, un valor Sv_{min} similar al obtenido del testigo 686A y 686B. No se puede saber con exactitud cuales son las características sedimentarias para los 15 metros de este testigo, pero del primer metro recuperado se puede observar que todo es fango, no existen muchas laminaciones y no hay presencia de nódulos (ver Figura 44).

- ▶ El testigo 679A ($Sv_{max} = -8.12$ dB; $Sv_{mean} = -18.06$ dB; $Sv_{min} = -55.23$ dB) muestra una respuesta acústica casi promedio, con un valor de Sv_{max} casi similar al obtenido del testigo 687A y 687B, un valor Sv_{mean} un poco bajo respecto a los que se encuentran en el promedio (exceptuando a los testigos 680A y 680B) y, un valor Sv_{min} muy similar al obtenido de los testigos 679B y 679D. No se puede saber con exactitud cuales son las características sedimentarias para los 15 metros de este testigo, pero de los 7 primeros metros recuperados se puede observar que el fango tiene un color gris (relativamente claro) en casi la mayoría de sus niveles, tiene dispersos importante cantidad de nódulos de fosforita de 1 a 2 cm en casi todos los niveles y gran parte de todo el fango se observa “revuelto” y “no compacto” (ver Figura 45).
- ▶ Los testigos 679B y 679D ($Sv_{max} = -6.91$ dB; $Sv_{mean} = -16.87$ dB; $Sv_{min} = -58.44$ dB) muestra una respuesta acústica casi promedio, con un valor de Sv_{max} casi similar a los obtenidos de los demás testigos (exceptuando 680A, 680B, 686A y 686B), un valor Sv_{mean} similar a los obtenidos de los demás testigos y, un valor Sv_{min} similar a los obtenidos del testigo 679A y 0405-06. Estas respuestas acústicas se pueden deber a la presencia de nódulos de fosforita de 1 a 5 cm de diámetro dispersos en casi todo los niveles, presencia de laminaciones en distintas secciones y distintos niveles de colores de fango en toda la sección. Se puede observar también que varias secciones del testigo presentan sedimento “revuelto” y “no compacto” (ver Figura 46, 47, 48 y 49).

- ▶ El testigo 0405-06 ($Sv_{max} = -6.32$ dB; $Sv_{mean} = -14.68$ dB; $Sv_{min} = -52.84$ dB) muestra una respuesta acústica casi promedio, con un valor de Sv_{max} casi similar al obtenido del testigo 679B y 679D, un valor Sv_{mean} similar a los obtenidos de los demás testigos y, un valor Sv_{min} similar a los obtenidos de los testigos 679A, 679B y 679D. No se puede saber con exactitud cuales son las características sedimentarias para los 15 metros de este testigo, pero, aproximadamente del primer metro recuperado, se puede observar fango compacto, de color similar y con una importante cantidad de laminaciones (ver Figura 43).

- ▶ Los sedimentos recuperados en los testigos 687A y 687B ($Sv_{max} = -7.13$ dB; $Sv_{mean} = -16.57$ dB; $Sv_{min} = -64.17$ dB) tienen una respuesta acústica única respecto a los demás testigos observados, pero muy similar a la obtenida de los testigos 0405-06 y, 679B y 679D. Estas respuestas acústicas se pueden deber a que estos testigos presentan fango en casi todos sus niveles de color casi igual (color oscuro), bastantes laminaciones y bastante compacto, además de la poca presencia de nódulos de fosforita y nódulos de dolomita dispersos (ver Figura 58, 59 y 60).

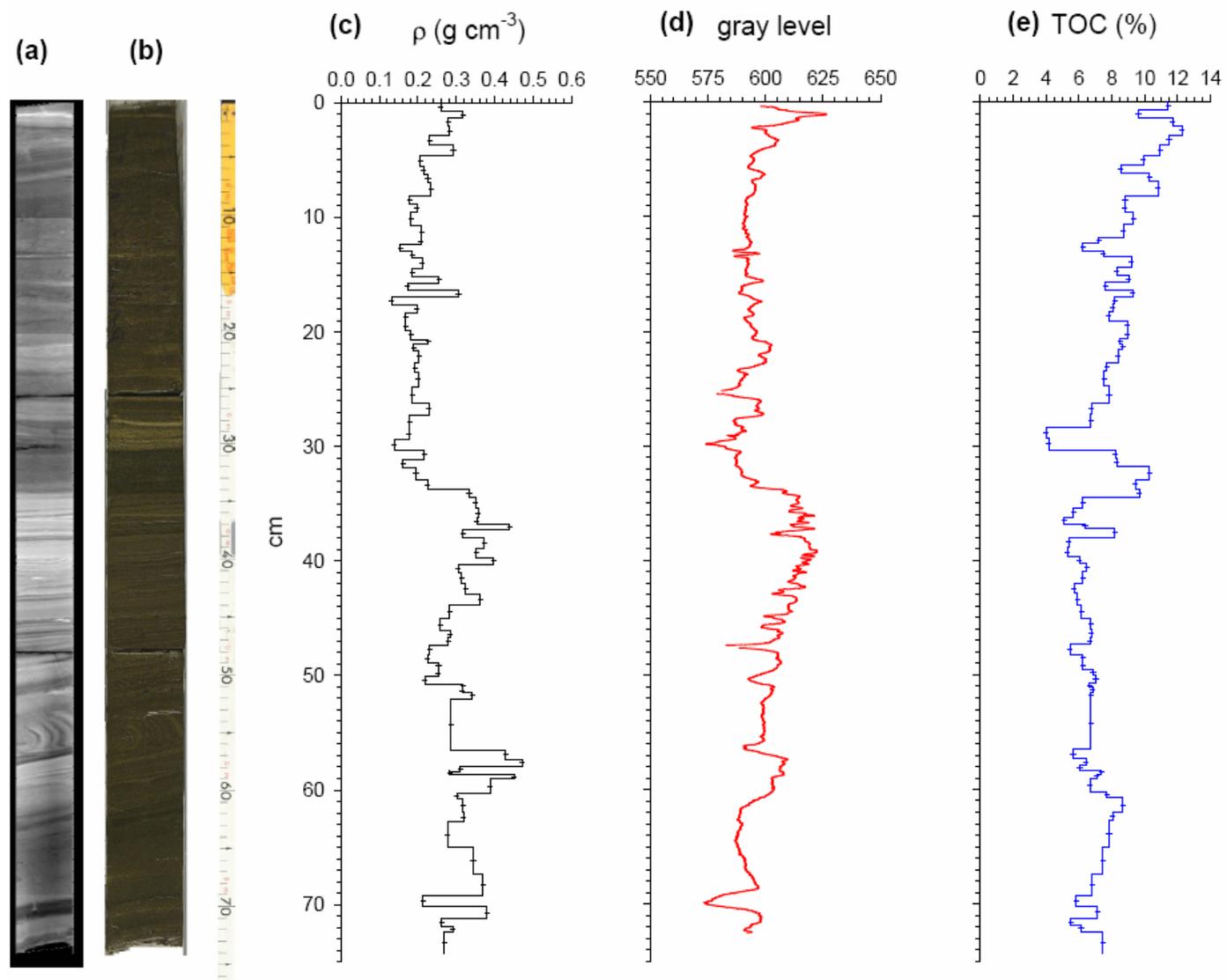


Figura 44. Características sedimentarias del testigo 0405-06 (*Boxcore*). **(a)** Radiografía digital (SCOPIX), **(b)** Fotografía digital, **(c)** Distribución de la densidad del volumen seco (ρ), **(d)** Escala de grises (*X-ray gray level*) (unidades arbitrarias), **(e)** Porcentaje total de carbón orgánico (TOC) (D. Gutierrez *et al.*, 2006).

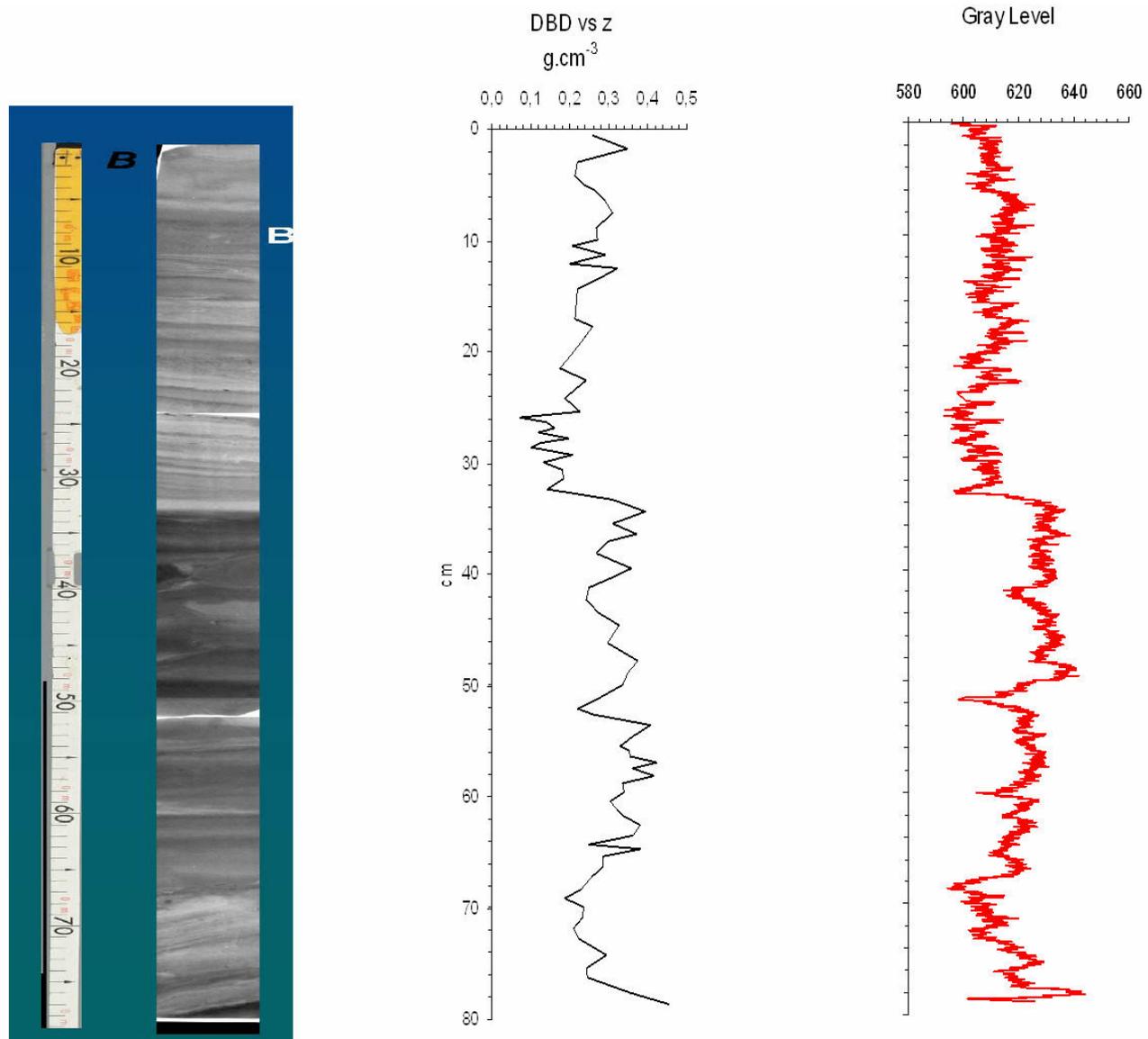
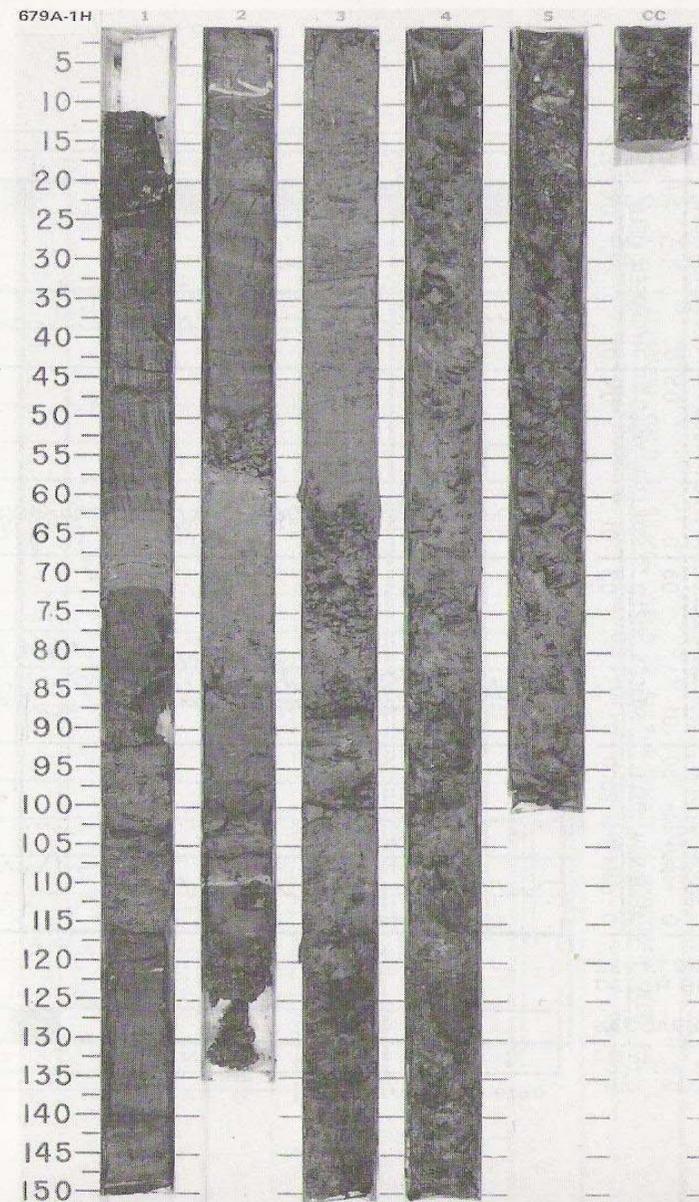


Figura 45. Características sedimentarias del testigo 0405-13 (*Boxcore*). **(B)** Radiografía digital (SCOPIX), **(Gray Level)** Escala de grises (*X-ray gray level*) (unidades arbitrarias).

SITE 679 HOLE A CORE 1H CORED INTERVAL 439.5-446.5 mbsl; 0.0-7.0 mbsf

TIME-ROCK UNIT	BIOSTRAT. ZONE/ FOSSIL CHARACTER				PALEOMAGNETICS	PHYS. PROPERTIES	CHEMISTRY /CaCO ₃	SECTION	METERS	GRAPHIC LITHOLOGY	DRILLING DISTURB.	SED. STRUCTURES	SAMPLES	LITHOLOGIC DESCRIPTION																																																																																																																																																								
	FORAMINIFERS	NANNOFOSSILS	RADIOLARIANS	DIATOMS																																																																																																																																																																		
QUATERNARY														<p>FORAMINIFER AND NANNOFOSSIL MUD and PYRITE-BEARING MUD</p> <p>Major lithology: foraminifer and nannofossil mud and pyrite-bearing mud, generally olive gray (5Y 4/2) to dark olive gray (5Y 3/2).</p> <p>Minor lithologies:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. phosphatic nodules, 1-2 cm in diameter. 2. pyrite-bearing diatomaceous mud (Section 1, 0-60 cm). 3. fine-grained volcanic ash, gray (N 5.0) (Section 2, 110-111 cm). <p>SMEAR SLIDE SUMMARY (%):</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>1, 30</td> <td>1, 59</td> <td>1, 96</td> <td>1, 103</td> <td>1, 134</td> <td>2, 53</td> <td>2, 104</td> </tr> <tr> <td></td> <td>D</td> <td>D</td> <td>D</td> <td>D</td> <td>D</td> <td>D</td> <td>D</td> </tr> </table> <p>TEXTURE:</p> <table border="1"> <tr> <td>Sand</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>40</td> <td>—</td> <td>25</td> <td>20</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Silt</td> <td>25</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>5</td> <td>15</td> <td>50</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Clay</td> <td>70</td> <td>70</td> <td>35</td> <td>95</td> <td>60</td> <td>30</td> <td>80</td> </tr> </table> <p>COMPOSITION:</p> <table border="1"> <tr> <td>Quartz</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>5</td> <td>Tr</td> </tr> <tr> <td>Mica</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Clay</td> <td>70</td> <td>45</td> <td>35</td> <td>80</td> <td>50</td> <td>20</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>Volcanic glass</td> <td>Tr</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>Tr</td> <td>15</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Calcite/dolomite</td> <td>—</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>—</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Accessory minerals</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Pyrite</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>Tr</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Gypsum</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>5</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Foraminifers</td> <td>—</td> <td>10</td> <td>40</td> <td>5</td> <td>25</td> <td>50</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Nannofossils</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>Tr</td> <td>—</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Diatoms</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>Tr</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Radiolarians</td> <td>Tr</td> <td>Tr</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Sponge spicules</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Fish remains</td> <td>Tr</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>3</td> <td>Tr</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </table>		1, 30	1, 59	1, 96	1, 103	1, 134	2, 53	2, 104		D	D	D	D	D	D	D	Sand	5	10	40	—	25	20	—	Silt	25	20	25	5	15	50	20	Clay	70	70	35	95	60	30	80	Quartz	—	—	—	—	—	5	Tr	Mica	—	—	—	—	—	—	—	Clay	70	45	35	80	50	20	80	Volcanic glass	Tr	—	—	—	Tr	15	—	Calcite/dolomite	—	10	20	5	5	—	10	Accessory minerals								Pyrite	10	15	5	10	10	Tr	10	Gypsum	—	—	—	5	—	—	—	Foraminifers	—	10	40	5	25	50	—	Nannofossils	—	—	Tr	—	10	10	—	Diatoms	15	15	Tr	—	—	—	—	Radiolarians	Tr	Tr	5	5	—	—	—	Sponge spicules	5	5	—	—	—	—	—	Fish remains	Tr	—	—	3	Tr	—	—
		1, 30	1, 59	1, 96	1, 103	1, 134	2, 53	2, 104																																																																																																																																																														
		D	D	D	D	D	D	D																																																																																																																																																														
	Sand	5	10	40	—	25	20	—																																																																																																																																																														
	Silt	25	20	25	5	15	50	20																																																																																																																																																														
Clay	70	70	35	95	60	30	80																																																																																																																																																															
Quartz	—	—	—	—	—	5	Tr																																																																																																																																																															
Mica	—	—	—	—	—	—	—																																																																																																																																																															
Clay	70	45	35	80	50	20	80																																																																																																																																																															
Volcanic glass	Tr	—	—	—	Tr	15	—																																																																																																																																																															
Calcite/dolomite	—	10	20	5	5	—	10																																																																																																																																																															
Accessory minerals																																																																																																																																																																						
Pyrite	10	15	5	10	10	Tr	10																																																																																																																																																															
Gypsum	—	—	—	5	—	—	—																																																																																																																																																															
Foraminifers	—	10	40	5	25	50	—																																																																																																																																																															
Nannofossils	—	—	Tr	—	10	10	—																																																																																																																																																															
Diatoms	15	15	Tr	—	—	—	—																																																																																																																																																															
Radiolarians	Tr	Tr	5	5	—	—	—																																																																																																																																																															
Sponge spicules	5	5	—	—	—	—	—																																																																																																																																																															
Fish remains	Tr	—	—	3	Tr	—	—																																																																																																																																																															
* N21 to Holocene																																																																																																																																																																						
* NN20																																																																																																																																																																						
* Quaternary																																																																																																																																																																						



Information on Core Description Forms, for ALL sites, represents field notes taken aboard ship. Some of this information has been refined in accord with post-cruise findings, but production schedules prohibit definitive correlation of these forms with subsequent findings. Thus the reader should be alerted to the occasional ambiguity or discrepancy.

Figura 46. Testigo 679A-1H (0 a 7 metros por debajo del suelo marino).

SITE 679 HOLE B CORE 1H CORED INTERVAL 440.5 -447.0 mbsl; 0.0 -6.5 mbsf

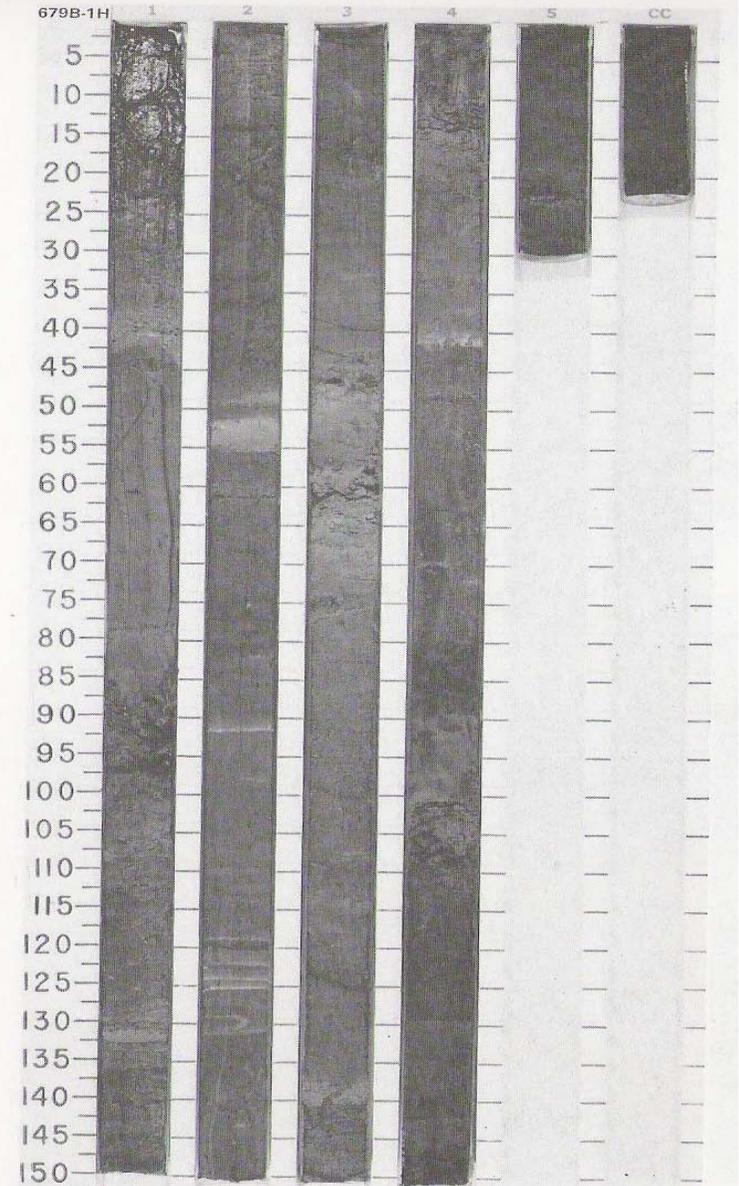
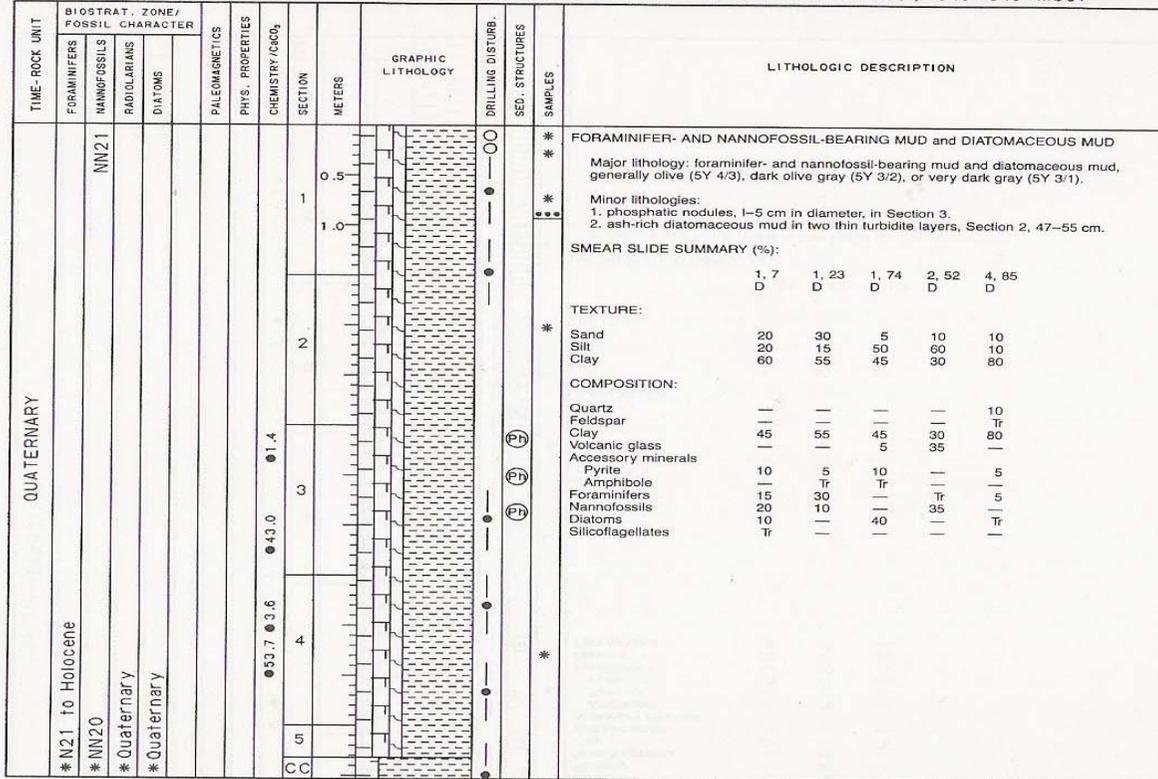


Figura 47. Testigo 679B-1H (0 a 6.5 metros por debajo del suelo marino).

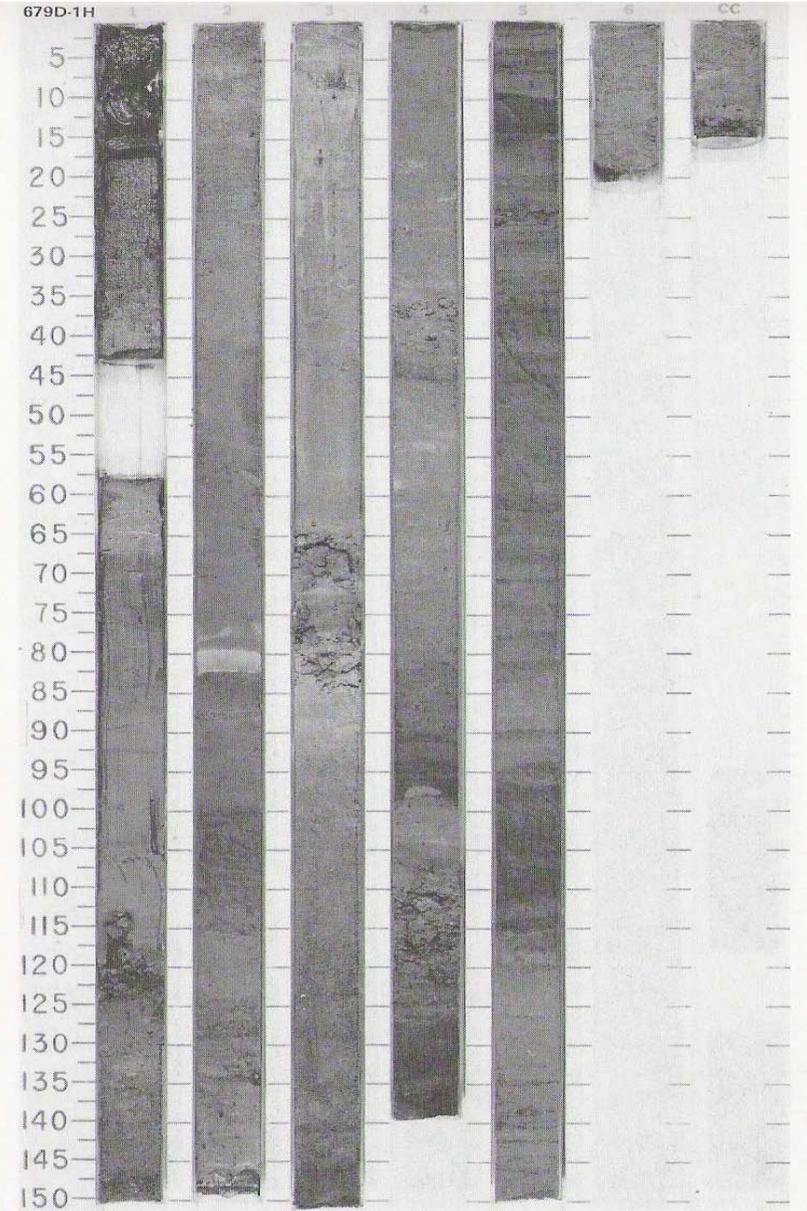
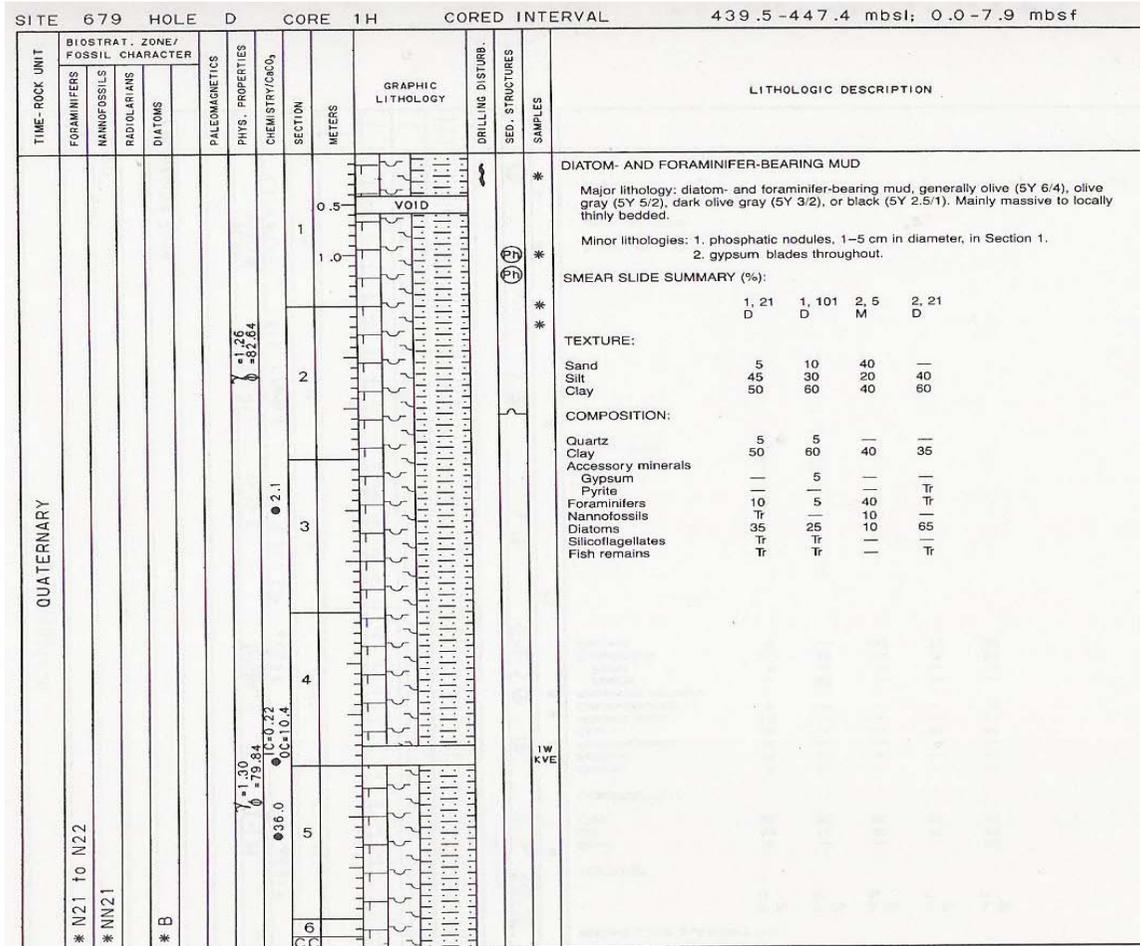


Figura 49. Testigo 679D-1H (0 a 7.9 metros por debajo del suelo marino).

SITE 680 HOLE B CORE 1H CORED INTERVAL 276.2-281.7 mbsl; 0.0-5.5 mbsf

TIME-ROCK UNIT	BIOSTRAT. ZONE/ FOSSIL CHARACTER				PALEOMAGNETICS	PHYS. PROPERTIES	CHEMISTRY (CO ₂)	SECTION	METERS	GRAPHIC LITHOLOGY	DRILLING DISTURB.	SED. STRUCTURES	SAMPLES	LITHOLOGIC DESCRIPTION																																					
	FORAMINIFERS	NANFOSSILS	RADIOLARIANS	DIATOMS																																															
QUATERNARY	* N21 - N23	* NN20 ?	* Quaternary	* <i>Pseudoemotia doliolus</i> Zone	Brunhes	0.0-0.39	0.0-0.14 0.0-0.48	0.5 1.0	1 2				* *	<p>MUD</p> <p>Major lithology: diatom-bearing, foraminifer-bearing mud, dark olive gray (5Y 4/4) and black (5Y 2.5/2), thin bedded to laminated, silty sand as thin layers throughout.</p> <p>SMEAR SLIDE SUMMARY (%):</p> <table border="1"> <tr> <td>1, 18</td> <td>3, 63</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>D</td> </tr> </table> <p>TEXTURE:</p> <table border="1"> <tr> <td>Sand</td> <td>5</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Silt</td> <td>45</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>Clay</td> <td>50</td> <td>45</td> </tr> </table> <p>COMPOSITION:</p> <table border="1"> <tr> <td>Quartz</td> <td>10</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Feldspar</td> <td>10</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Clay</td> <td>50</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>Volcanic glass</td> <td>—</td> <td>Tr</td> </tr> <tr> <td>Calcite/dolomite</td> <td>—</td> <td>Tr</td> </tr> <tr> <td>Foraminifers</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Nannofossils</td> <td>5</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Diatoms</td> <td>20</td> <td>40</td> </tr> </table>	1, 18	3, 63	D	D	Sand	5	—	Silt	45	55	Clay	50	45	Quartz	10	5	Feldspar	10	15	Clay	50	35	Volcanic glass	—	Tr	Calcite/dolomite	—	Tr	Foraminifers	5	5	Nannofossils	5	—	Diatoms	20	40
1, 18	3, 63																																																		
D	D																																																		
Sand	5	—																																																	
Silt	45	55																																																	
Clay	50	45																																																	
Quartz	10	5																																																	
Feldspar	10	15																																																	
Clay	50	35																																																	
Volcanic glass	—	Tr																																																	
Calcite/dolomite	—	Tr																																																	
Foraminifers	5	5																																																	
Nannofossils	5	—																																																	
Diatoms	20	40																																																	
									3				* *																																						
									4																																										
									CC																																										

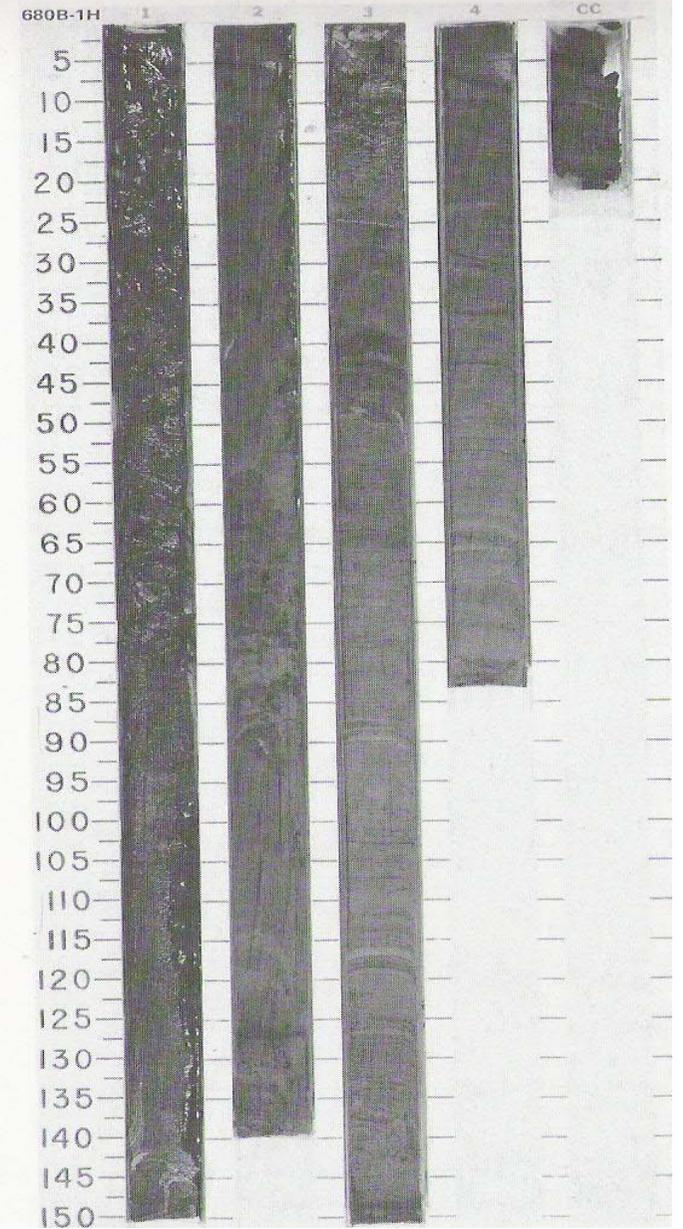


Figura 53. Testigo 680B-1H (0 a 5.5 metros por debajo del suelo marino).

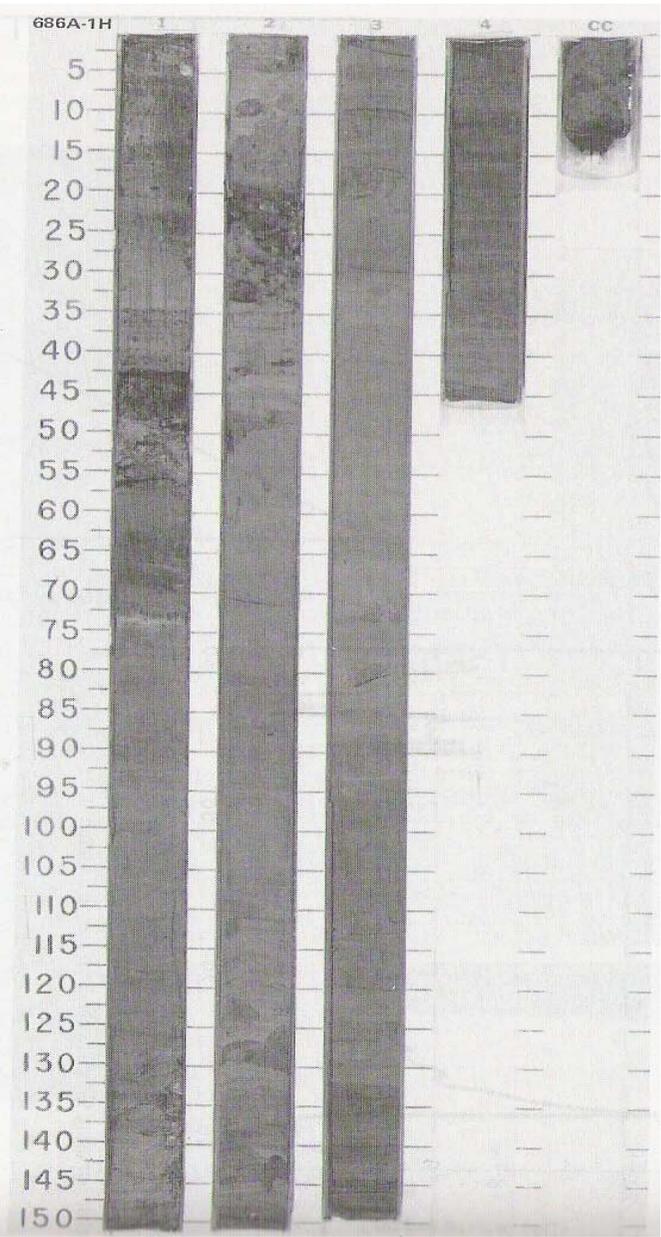
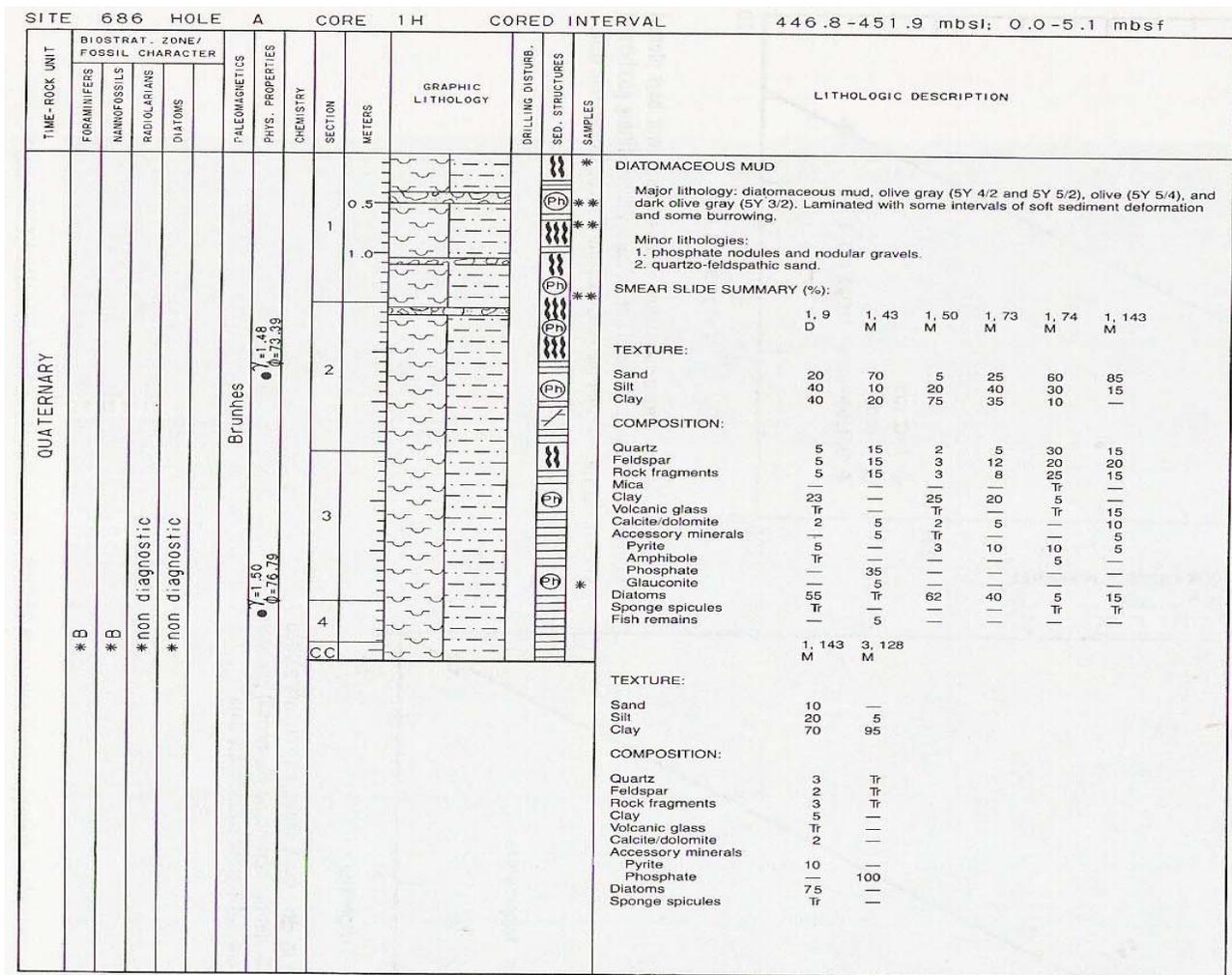


Figura 55. Testigo 686A-1H (0 a 5.1 metros por debajo del suelo marino).

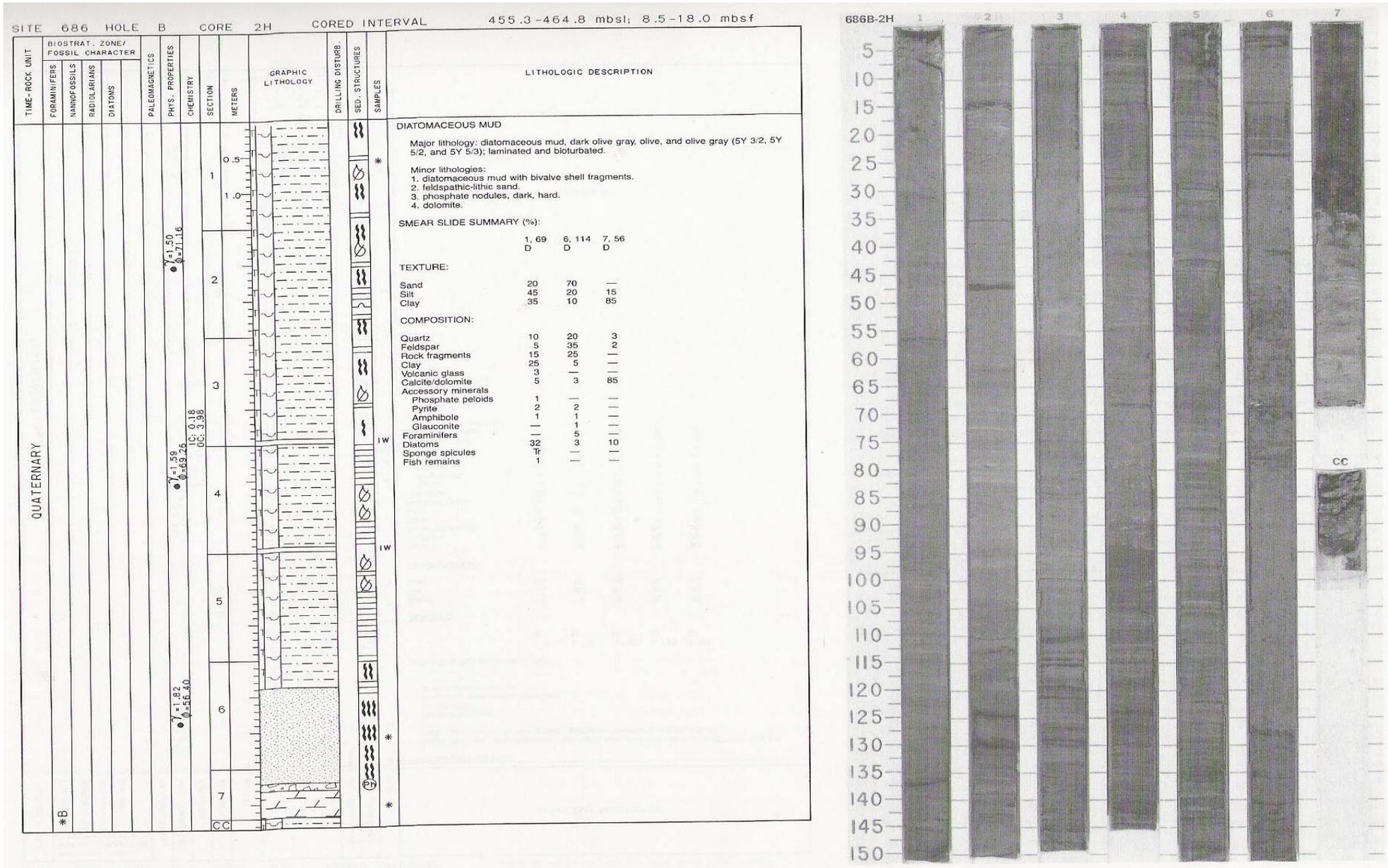


Figura 58. Testigo 686B-2H (8.5 a 18 metros por debajo del suelo marino).

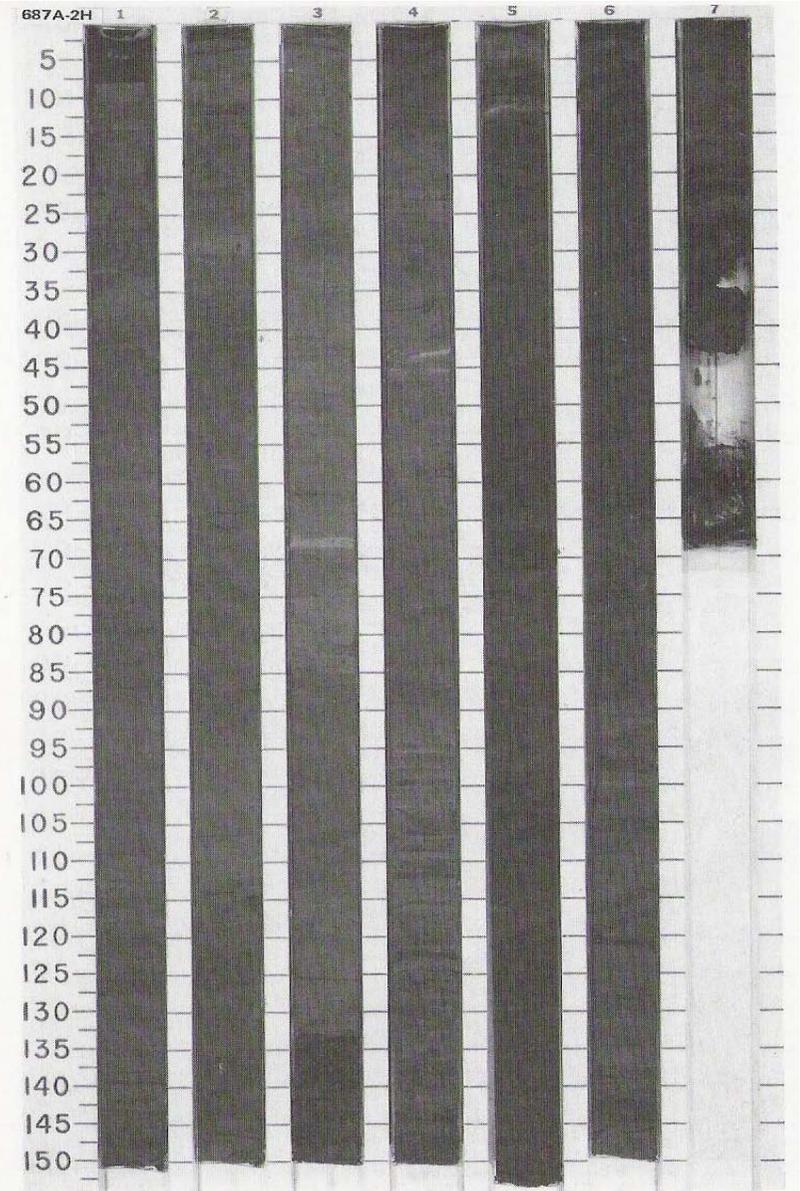
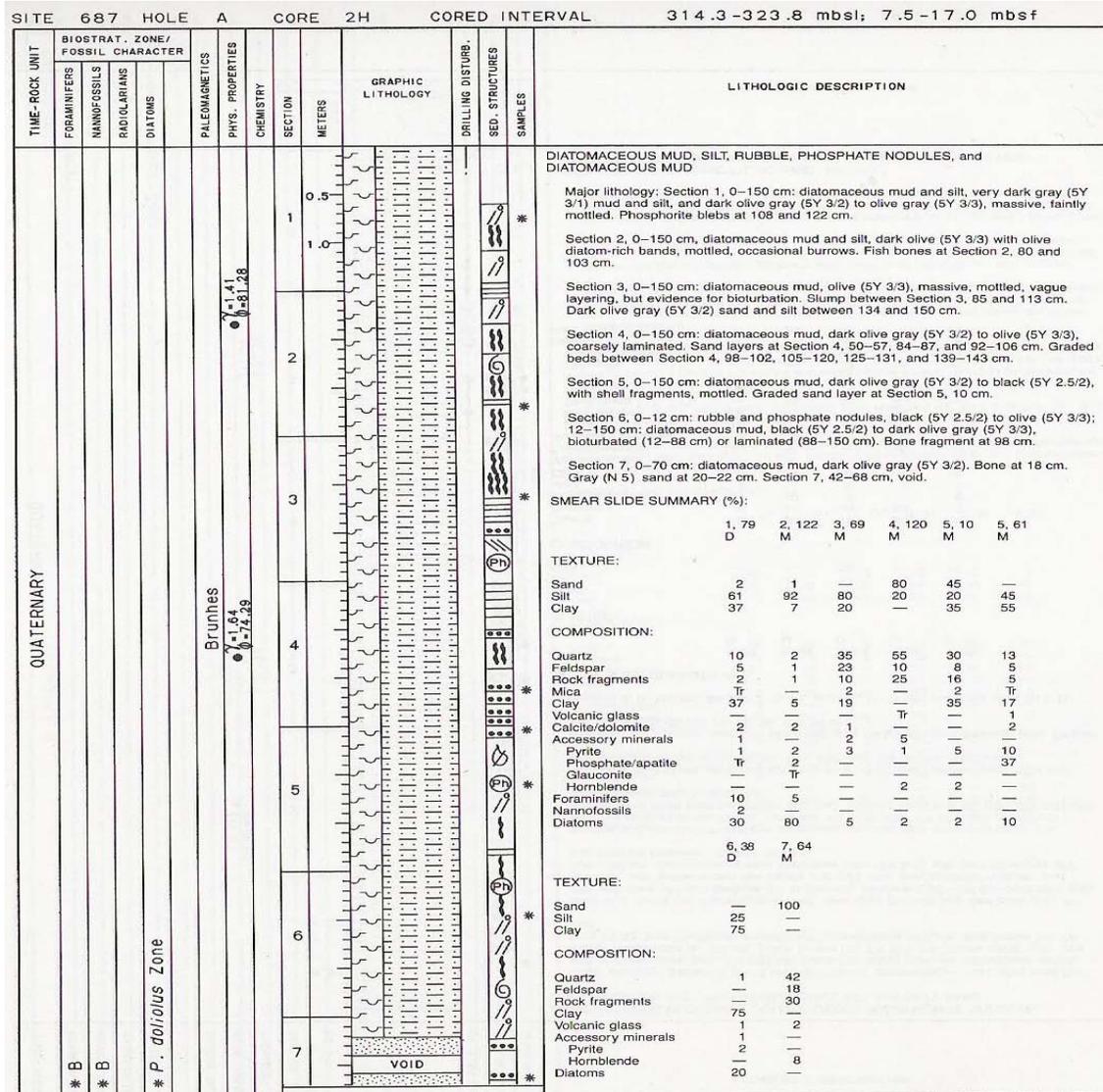


Figura 60. Testigo 687A-2H (7.5 a 17 metros por debajo del suelo marino).

SITE 687 HOLE B CORE 1H CORED INTERVAL 306.8-312.0 mbsl; 0.0-5.2 mbsf

TIME-ROCK UNIT	BIOSTRAT. ZONE/ FOSSIL CHARACTER				PALEOMAGNETICS	PHYS. PROPERTIES	CHEMISTRY	SECTION	METERS	GRAPHIC LITHOLOGY	DRILLING DISTURB.	SED. STRUCTURES	SAMPLES	LITHOLOGIC DESCRIPTION																																																																																				
	FORAMINIFERS	NANNOFOSSILS	RADIOLARIANS	DIATOMS																																																																																														
QUATERNARY	* B			* <i>P. diluvius</i> Zone					0.5 1 2 3 4 CC					<p>* MUD and DIATOMACEOUS MUD</p> <p>Major lithology: Section 1, 0-150 cm: mud, black (5Y 2.5/1) (very soft at 0-67 cm, more olive and bioturbated at 68-67 cm, silty below 76 cm); hard phosphate nodule at 64-66 cm. Section 2, 0-150 cm: mud, dark olive gray (5Y 3/20), laminated. Section 3, 0-141 cm: mud, olive gray (5Y 3/2), laminated with individual laminae of olive diatom ooze; siltier below 129 cm; phosphate nodule at 137 cm. Section 4, 0-52 cm: diatomaceous mud, very dark gray (5Y 3/1), laminated. CC, 0-19 cm: mud, dark olive gray (5Y 3/1).</p> <p>SMEAR SLIDE SUMMARY (%):</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>1, 16</td> <td>3, 140</td> <td>4, 10</td> </tr> <tr> <td></td> <td>D</td> <td>M</td> <td>D</td> </tr> </table> <p>TEXTURE:</p> <table border="1"> <tr> <td>Sand</td> <td>15</td> <td>100</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Silt</td> <td>30</td> <td>—</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>Clay</td> <td>55</td> <td>—</td> <td>35</td> </tr> </table> <p>COMPOSITION:</p> <table border="1"> <tr> <td>Quartz</td> <td>9</td> <td>25</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Feldspar</td> <td>2</td> <td>20</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Rock fragments</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Clay</td> <td>50</td> <td>—</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>Volcanic glass</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Calcite/dolomite</td> <td>3</td> <td>—</td> <td>Tr</td> </tr> <tr> <td>Accessory minerals</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td> Phosphate peloids</td> <td>5</td> <td>15</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td> Pyrite</td> <td>5</td> <td>—</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td> Amphibole</td> <td>Tr</td> <td>5</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Foraminifers</td> <td>Tr</td> <td>—</td> <td>Tr</td> </tr> <tr> <td>Nannofossils</td> <td>Tr</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Diatoms</td> <td>20</td> <td>—</td> <td>42</td> </tr> <tr> <td>Sponge spicules</td> <td>1</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Silicoflagellates</td> <td>Tr</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Fish remains</td> <td>—</td> <td>25</td> <td>—</td> </tr> </table>		1, 16	3, 140	4, 10		D	M	D	Sand	15	100	10	Silt	30	—	55	Clay	55	—	35	Quartz	9	25	3	Feldspar	2	20	2	Rock fragments	5	10	5	Clay	50	—	35	Volcanic glass	—	—	3	Calcite/dolomite	3	—	Tr	Accessory minerals				Phosphate peloids	5	15	7	Pyrite	5	—	3	Amphibole	Tr	5	—	Foraminifers	Tr	—	Tr	Nannofossils	Tr	—	—	Diatoms	20	—	42	Sponge spicules	1	—	—	Silicoflagellates	Tr	—	—	Fish remains	—	25	—
	1, 16	3, 140	4, 10																																																																																															
	D	M	D																																																																																															
Sand	15	100	10																																																																																															
Silt	30	—	55																																																																																															
Clay	55	—	35																																																																																															
Quartz	9	25	3																																																																																															
Feldspar	2	20	2																																																																																															
Rock fragments	5	10	5																																																																																															
Clay	50	—	35																																																																																															
Volcanic glass	—	—	3																																																																																															
Calcite/dolomite	3	—	Tr																																																																																															
Accessory minerals																																																																																																		
Phosphate peloids	5	15	7																																																																																															
Pyrite	5	—	3																																																																																															
Amphibole	Tr	5	—																																																																																															
Foraminifers	Tr	—	Tr																																																																																															
Nannofossils	Tr	—	—																																																																																															
Diatoms	20	—	42																																																																																															
Sponge spicules	1	—	—																																																																																															
Silicoflagellates	Tr	—	—																																																																																															
Fish remains	—	25	—																																																																																															

CORE 112-687B-2H NO RECOVERY

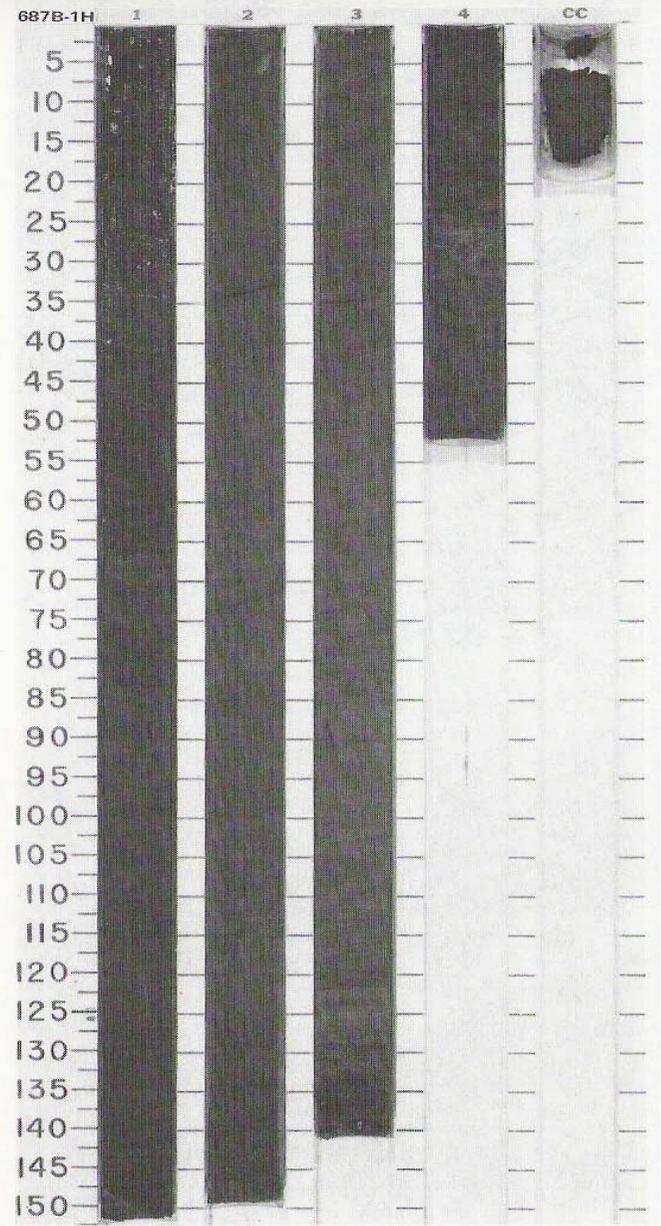


Figura 61. Testigo 687B-1H (0 a 5.2 metros por debajo del suelo marino).

4.6.2. Mapas

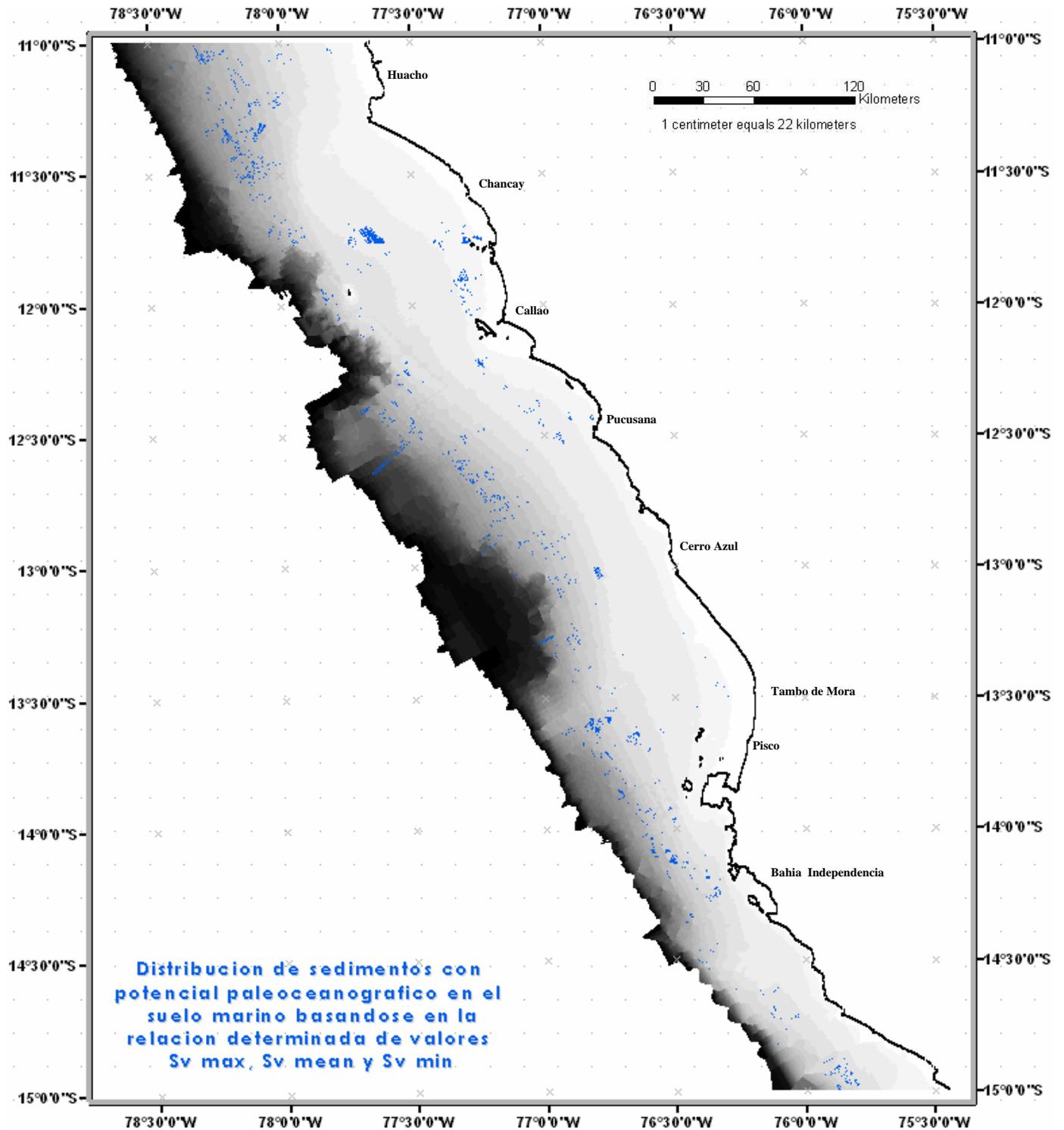


Figura 62. Mapa de distribución de sedimentos con potencial paleoceanográficas en el suelo marino de la zona de estudio (desde 11°S hasta 15°S) basándose en la relación determinada entre las tres señales Sv (Sv_{max} , Sv_{mean} , Sv_{min}) y los testigos 0405-06, 679B, 679D, 687A y 687B. Contornos del suelo marino cada 50 metros.

4.6.3. Conclusiones

La evaluación de 15 metros de sedimento por debajo del suelo marino utilizando solamente un valor de retrodispersión acústica por cada señal (Sv_{max} , Sv_{mean} y Sv_{min}) no es suficiente para determinar y diferenciar todos los diferentes sustratos presentes uno por uno en cada nivel por debajo del suelo marino (p.e., de 0 a 5 cm es arcilla, de 5 a 10 cm es limo, etc.). Sin embargo, cada valor de retrodispersión acústica por señal, relacionadas entre sí, pueden mostrar, de forma general, “patrones” con los que se pueden diferenciar las características presentes en un determinado conjunto de sedimentos.

Específicamente, en la búsqueda de sedimentos con registros geológicos excepcionales para realizar reconstrucciones paleoceanográficas a una alta resolución; se determinó que el siguiente rango de valores Sv puede representar estos sedimentos característicos:

- ▶ Sv_{max} : -6 a -7 dB
- ▶ Sv_{mean} : -14 a -17 dB
- ▶ Sv_{min} : -52 a -64 dB

Este rango fue deducido de la comparación de los valores Sv distribuidos en el suelo marino donde se recuperaron los sedimentos observados en los testigos 0405-06, 679B, 679D, 687A y 687B, en los que se observa cierta similitud en su composición sedimentaria. Fueron escogidos estos testigos debido a que mostraron gran potencial para reconstrucciones paleoceanográficas.

Por otro lado, es importante explicar que el conjunto de valores interpolados para la creación de las imágenes no fue corregido con información oceanográfica al igual que en

las imágenes creadas con valores batimétricos. Debido a la variabilidad observada entre los datos batimétricos después de la corrección oceanográfica planteada en esta tesis, se prefirió no aplicar el mismo método de corrección para estos valores S_v .

Es importante contar con una adecuada y ordenada base de datos de información oceanográfica para la corrección oceanográfica de todos los conjuntos de datos obtenidos en el ambiente marino (p.e., valores de temperatura y salinidad corregidos por la presión por capas de un metro de profundidad de columna de agua, cada 100 metros de profundidad de columna de agua con respecto al suelo marino, en transeptos separados cada medio grado y por cada estación del año ó, mejor aún, cada mes del año; cada año). Esto permitiría una buena zonificación de los datos obtenidos para su “correcta” corrección oceanográfica y así, se despejaría muchas dudas existentes respecto a la variabilidad que puedan presentar los datos, en especial, datos obtenidos con equipos acústicos y geofísicos.

Se espera, que en próximos trabajos de investigación de este tipo, se continúe mejorando y perfeccionando la identificación de sedimentos superficiales usando valores de retrodispersión acústica (p.e., valores S_v obtenidos con 1 metro de resolución por cada señal y comparada con 1 metro de sedimento del testigo); hasta el punto de establecer una relación real y con mayor exactitud a la presentada en esta tesis.

V. Diseño e Implementación de una aplicación de Sistema de Información Geográfica para Estudios Paleoceanográficos

5.1. Introducción

El mundo real, debido al gran condicionamiento de sus distintas variables y la gran producción de información a cada segundo, es difícil de ser representado en formato digital y/o en modelos predictivos (p.e., modelos climáticos, modelos oceanográficos, etc.). Sin embargo, la obtención y recopilación de toda esa información es de gran utilidad debido a que se puede crear un registro temporal y característico de las variables, así como una base de datos con la cual se pueda realizar una serie de tendencias que mejoren el conocimiento de las áreas de estudios.

Por tal razón, el diseño y la implementación de un sistema de información geográfica con la cual se puede administrar, gestionar, manipular, analizar, modelar y representar el mundo real de forma aproximada es de suma importancia con el fin de solucionar problemas de planificación y gestión.

En ciertas zonas de estudios, en especial en los sistemas del ambiente marino, no se manejan ampliamente estas tecnologías debido a que la resolución de los datos disponibles en la mayoría de veces no se encuentra estandarizada en dimensiones iguales (p.e., una dimensión, dos dimensiones, tres dimensiones y/o 4 dimensiones), así como por no tener buena resolución para áreas con extensiones muy grandes (en la mayoría de las veces debido al tipo de muestreo y a la persona que muestrea), y además por último, debido a la complejidad de los procesos físicos cambiantes y las relaciones espaciales-temporales ocurridos en estos ambientes. Es por eso que el volumen de la información total colectada

a través de percepción remota, métodos acústicos y técnicas tradicionales de observación de campo se han convertido tremendamente grandes y complejas (Schaefer, 2003).

Como consecuencia, para la realización de estudios paleoceanográficos así como para todas las ciencias marinas, la naturaleza interdisciplinaria en el estudio de sus procesos requiere la integración de información de múltiples tipos y formatos que se debe realizar en una única plataforma como lo son los sistemas de información geográfica (tecnologías SIG), para lograr que la complejidad y los grandes volúmenes de información sean manejables rápidamente y de forma confiable.

5.2. Antecedentes

Existen muchos estudios desde los años 80 hasta la actualidad que han utilizado tecnología SIG para mejorar sus resultados y han promovido el desarrollo de los mismos en distintas ramas de las ciencias (The ARC/INFO IBM, 1989; Burrough, 1988; Bosque, 1992; Suárez, 1993, Macera, 1995; Chuiquipul, 1997, Dunin-Borkowski, 1998; Velasco, 2003; Turno, 2003, Santa Cruz, 2003, Quispe, 2004); inclusive en el ambiente marino (Schaefer, 2003; Atiquipa, 2005, comunicación personal). Sin embargo, muchos de los estudios realizados en el ambiente marino carecen de un amplio desarrollo hasta el momento debido a la complejidad y volumen de sus procesos de estudio, así como de sus variables, lo cual será mejorado por el desarrollo de investigación utilizando tecnologías SIG, de reciente aparición, en este ambiente (Schaefer, 2003).

En el año 1995, se concluyó el *Baltic Drainage Basin Project (BDBP)* realizado en la región del Mar Báltico por la unión de una serie de Instituciones Internacionales como el Instituto Beijer (Estocolmo), El Departamento de Sistemas Ecológicos (Universidad de Estocolmo)

y la UNEP/GRID-Arendal. El *BDBP* fue un proyecto de investigación multidisciplinario llevado bajo el Programa de Investigación del Ambiente EU 1991-1994 (Langaas, 1997).

En el año 1998, la Unidad de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica del Instituto del Mar del Perú (UPRSIG – IMARPE) adquirió una implementación del software *MapInfo* para el manejo de información satelital (Sistemas *ARGOS*) proveniente de las embarcaciones pesqueras posicionadas dentro de las 200 millas del mar Peruano (Atiquipa, 2005; comunicación personal).

En 1998, se estableció en el Departamento de Geociencias de la Universidad del Estado de Oregon (USA) un laboratorio dedicado al desarrollo de tecnologías SIG en procesos marinos y costeros, cartografía y mapeado del suelo marino; así como el manejo, análisis y modelamiento de grandes volúmenes de información (Wright, 2005).

En el año 2003, el Instituto Alfred Wegener (*Alfred Wegener Institute Foundation for Polar and Marine Research - AWI*) desarrolló diversas definiciones sobre el uso de tecnologías SIG en el desarrollo de la investigación en ambientes y sistemas marinos, logrando grandes avances en el estudio de procesos costeros y flujos de materia orgánica en el ciclo marino del carbón orgánico (Schaefer y Schlueter, 2003).

5.3. Generalidades

Buckley (1989) (citado por Dunin-Borkowski, 1998) considera que antes de pasar a hablar de los SIG, se debe tener en cuenta algunos aspectos generales de la naturaleza de la información geográfica:

5.4. Elementos geográficos

Todos los elementos geográficos pueden ser reducidos a tres tipos, los cuales son:

- Puntos
- Líneas
- Polígonos

Estos elementos están normalmente acompañados por una descripción dada por una “etiqueta” o “*label*”, cuya función es diferenciar los elementos geográficos de un mismo tipo.

La representación de los elementos geográficos y su simbología depende de la escala gráfica utilizada. Es así que los cambios de escala pueden producir que algunos detalles aparezcan o desaparezcan, que los elementos cambien de polígonos a líneas o a puntos y que también cambien de forma.

5.5. Mapas e información espacial

Un mapa es un conjunto de puntos, líneas y polígonos que están definidos por su ubicación en el espacio, con referencia a un sistema de coordenadas y por sus atributos no espaciales. Así pues, un mapa es un modelo del mundo real.

El dato espacial está referido a la distribución irreal de los datos en segunda, tercera o cuarta dimensión. En cambio, el dato geográfico es un tipo de dato espacial referido al

globo terrestre. Es así que el elemento geográfico puede ser expresado por un dato espacial o un dato geográfico, dependiendo del contexto en el cual se encuentre.

Los elementos geográficos son representados en un sistema de coordenadas que lo localizan en la superficie terrestre. Existen una gran variedad de sistemas de coordenadas, entre los cuales tenemos, latitud y longitud y la proyección *Universal Transversal Mercator* (*UTM*). Esta última es la más usada y se está convirtiendo en una proyección estándar en el uso de los SIG.

5.6. Errores de escala

El uso y comparación de información geográfica de fuentes de diferentes escalas es totalmente inapropiado y puede llevar a un error significativo.

El uso de un SIG no elimina los errores de precisión que se dan al momento de la integración de datos de diferentes fuentes y diferentes formatos originales (puntos, líneas o polígonos), a escalas múltiples. (Bosque, 1992; citado por Dunin-Borkowski, 1998).

Es así que la precisión de un SIG, va a depender de las características de la fuente de la cual proviene, de la escala de los productos y el método y resolución al momento del análisis. A escalas pequeñas la precisión es menor y a un mayor número de niveles en el análisis es también mayor la posibilidad de error.

5.7. Principales componentes de un SIG

Los principales componentes de un SIG, según Marble *et al.*, 1992 (citado por Dunin-Borkowski, 1998), son los siguientes:

- Subsistema de entrada de datos.
- Subsistema de almacenamiento, búsqueda y recuperación.
- Subsistema de manipulación y análisis de la información.
- Subsistema de salida y presentación de datos.

a) *El subsistema de entrada de datos*; cuya función es la de permitir al usuario capturar, coleccionar y transformar los datos espaciales y temáticos en formato digital. Las fuentes de estos datos son cartas nacionales y mapas temáticos, sacados de fotos aéreas o imágenes satelitales y otros (Buckley, 1998; citado por Dunin-Borkowski, 1998). En este subsistema, aparte de la digitalización u otras formas similares de entrada, se encuentran también los procedimientos de edición que permiten eliminar errores o redundancias en la información incorporada al SIG (Bosque, 1992; citado por Dunin-Borkowski, 1998). Los datos se tomarán de acuerdo a un conjunto particular de objetivos. (Burrough, 1989; Dengo, 1988).

b) *El subsistema de almacenamiento, búsqueda y recuperación*; que tiene como función organizar los datos espaciales y temáticos, de tal forma que permita rápidamente la búsqueda de los datos necesarios para los diferentes tipos de análisis. Aquí se encuentra el sistema manejador de base de datos (DBMS) (Buckley, 1989; Boque, 1992). La diferencia entre una búsqueda y recuperación de datos de tipo temática y espacial, es que la primera contesta a las preguntas: ¿Qué existe y qué valor adopta una variable temática en una

localización concreta?; el segundo tipo de búsqueda se refiere a preguntas como: ¿En qué lugares existe, qué localización tiene un atributo temático concreto? (Bosque, 1992).

- c) *El subsistema de manipulación y análisis de la información*; la cual procesa, integra y transforma datos espaciales y de atributo, generando información derivada que permite mayor conocimiento del que inicialmente se disponía. Esta función es el punto crítico de los SIG (Buckley, 1989; citado por Dunin-Borkowski, 1998) y lo convierte en una “máquina de simulación” que permite presentar alternativas, para finalmente tomar una decisión o solución al problema planteado (Buckley, 1989; Bosque, 1992). Además es el subsistema más importante y lo diferencia de otros sistemas cartográficos como el *CAD (Computer-Aided Drafting)* (Buckley, 1989; citado por Dunin-Borkowski, 1998).

- d) *El subsistema de salida y presentación de datos*; la cual muestra al usuario los datos incorporados en la base de datos del SIG y los resultados de las operaciones analíticas realizadas sobre ellos. Permite obtener mapas, gráficos, tablas numéricas y otro tipo de resultados en diferentes soportes: papel, pantallas gráficas u otros (Bosque, 1992).

5.8. Componentes físicos de un SIG

El SIG necesita para funcionar, de forma general, tres componentes físicos importantes (Burrough, 1986; citado por Dunin-Borkowski, 1998):

- 5.8.1. Hardware:** Incluye una unidad central de procesamiento (*CPU*), disqueteras, *drive* para “*tapes*”, tablero digitalizador, impresora de mapas (“*plotter*”), unidad de video (terminal gráfico).

5.8.2. Software: Debe satisfacer los requerimientos de los cuatro subsistemas identificados en el acápite anterior y del “*hardware*” utilizado.

5.8.3. Contexto institucional de la organización que contiene el SIG: Las nuevas herramientas, en este caso el SIG, son usadas eficientemente si existe una apropiada integración a todo el proceso de trabajo de la institución. Esto significa una proyección en el uso de esta herramienta, ya que aparte de la inversión en el *hardware* y *software*, se debe capacitar a personas para el uso de esta nueva tecnología en el contexto de la organización.

5.9. Tipo de datos de un SIG

Una base de datos es una colección organizada de información relacionada que puede ser almacenada y manipulada fácilmente (Ashton-Tate, 1986; citado por Dunin-Borkowski, 1998). En los SIG, se considera la integración de dos tipos de bases de datos: espacial y temática (Bosque, 1992).

La estructura del SIG está basada en el tipo de información que puede ser compilada de un mapa y tiene que tener tres características: nombre, localización y atributos, que pueden variar en el tiempo (Dengo, 1988; citado por Dunin-Borkowski, 1998). Los dos tipos de datos que existen en un SIG son los geográficos (gráficos) y los no geográficos o atributos, que se describen a continuación:

5.9.1. Datos geográficos: Se refiere al dato espacial. Se trata de la localización de los elementos geográficos (Buckley, 1989; citado por Dunin-Borkowski, 1998); los

cuales se presentan en forma de líneas, puntos, polígonos y sus atributos asociados (Buckley, 1989; Burrough, 1989; Alva, 1991).

Los modelos de datos geográficos son de dos tipos (Burrough, 1989; Buckley, 1989; citado por Dunin-Borkowski, 1998):

5.9.1.1. Modelo de dato celular: Llamado también por algunos “*raster*”, es una estructura que consiste en una malla de celdas, llamadas comúnmente “*pixel*”. Cada celda está referenciada a una fila y una columna (Burrough, 1989; Buckley, 1989; citado por Dunin-Borkowski, 1998).

El tamaño de las celdas es seleccionado de acuerdo a la precisión y resolución que necesite el usuario (Buckley, 1989).

Según Buckley (1989) (citado por Dunin-Borkowski, 1998), existen muchos tipos de estructura celular, sin embargo sólo se usan dos en el SIG:

- **Estructura “*raster*” o matriz de espacios regulares:** Es la estructura celular más usada. Consiste en una división del dato espacial en celdas de espacios regulares, es decir, cada celda tiene el mismo tamaño y forma. La forma cuadrada es comúnmente utilizada.
- **Estructura “*quadtrees*”:** Se trata de una estructura con una resolución variable a lo largo de un área geográfica. Es decir, al tener una malla de celdas con valores heterogéneos, solo las celdas con mayor información se dividirán en cuadrantes, permitiendo así un mayor detalle y una optimización del espacio. Existen pocos “*software*” con este tipo de modelo, sin embargo se encuentra en constante investigación.

5.9.1.2. Modelo de dato vectorial: Implica el uso de vectores para representar un elemento geográfico. Un vector es definido por un número secuencial de puntos (vértices) que definen una línea. A su vez, un conjunto de vectores cerrados, formará un polígono. En la representación vectorial el almacenamiento de los vértices para cada elemento es importante, así como la conectividad entre ellos (Buckley, 1989; citado por Dunin-Borkowski, 1998).

Existen varios modelos de datos vectoriales, el más usado es el modelo de dato topológico que permite la relación espacial entre elementos por medio de los principios de adyacencia y conectividad. Sin una estructura topológica de datos en el sistema vectorial, muchas funciones de manipulación y análisis de datos no podrían ser factibles (Buckley, 1989; citado por Dunin-Borkowski, 1998).

5.9.2. Datos no gráficos: Se refieren a los atributos. Los atributos describen las características del elemento espacial. Esta característica puede ser, por su naturaleza; cuantitativa, por ejemplo promedio anual de precipitación o; cualitativa, por ejemplo tipo de suelos (Dengo, 1988; Buckley, 1989; citado por Dunin-Borkowski, 1998).

Según Buckley (1989), existe una variedad de modelos de bases de datos diferentes. Las más comunes son los siguientes:

5.9.2.1. Modelo tabular: Almacena datos en forma de archivos secuenciales, con formatos fijos para la localización de los valores de un atributo. Este tipo de modelo fue una de las primeras formas de almacenamiento de datos en los SIG; sin embargo, hoy en

día se encuentra en desuso por su poca capacidad de integración de datos, ineficiente almacenamiento y poca flexibilidad.

5.9.2.2. Modelo jerárquico: Organiza los datos de una estructura de “árbol”. Los datos están estructurados de forma descendente en una jerarquía de elementos. Este modelo no ha tenido aceptación para su empleo en el SIG. (Buckley, 1989; Bosque, 1992).

5.9.2.3. Modelo de red: Organiza los datos en una estructura de red, donde cada dato puede relacionarse con cualquier otro y no sólo con dos, como en el modelo anterior. Es más flexible que el anterior modelo, pero sin embargo no ha sido adecuado para los requerimientos de un SIG (Buckley, 1989; Bosque, 1992).

5.9.2.4. Modelo relacional: Organiza los datos en tablas. Cada tabla es identificada por un único nombre y es organizada en columnas y filas. Las tablas pueden ser relacionadas o referenciadas por una columna en común. Usualmente la columna en común es un número identificador de un elemento geográfico seleccionado. El modelo de base de datos relacional es el más aceptado en el manejo de atributos de un dato geográfico (Buckley, 1989; Bosque, 1992).

5.9.2.5. Modelo orientado a objetos: Este modelo maneja los datos a través de objetos. Un objeto es una colección de elementos de datos y operaciones, que juntos van a ser considerados como una entidad. La atracción de este modelo es la mayor facilidad de utilización para los usuarios que trabajan con conceptos más cercanos a los de la vida real, debido a que los elementos pueden ser agrupados junto con los atributos.

Este modelo es relativamente nuevo y muy pocos SIG lo utilizan, sin embargo está en pleno desarrollo (Buckley, 1989; Bosque, 1992).

5.10. Aplicaciones del SIG

Las aplicaciones de los sistemas de información geográfica, son amplias (Charly, 1987; citado por Bosque, 1992) y van desde el inventario de los recursos naturales y humanos hasta el control de los datos catastrales y de propiedad urbana y rústica (catastro multipropósito). Así por ejemplo, se puede utilizar en planificación y gestión urbana, cartografía y control de grandes instalaciones (red telefónica, redes de abastecimiento y evacuación de aguas, redes de transportes), marketing geográfico (Bosque, 1992) y monitoreo del uso de la tierra, entre otros (Singh, 1985). Es así que es útil en cualquier área donde sea necesario el manejo de información espacial (Bosque, 1992).

Según Buckley (1989) y Alva (1991) (citado por Dunin-Borkowski, 1998), los SIG para el inventario y ayuda de la gestión de los recursos naturales y medio ambiente, se vienen desarrollando desde 1960 aproximadamente, mientras que Bosque (1992) explica que es desde los años 70.

En el Perú es a partir del año 1985, en que la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN, hoy Instituto Nacional de Recursos Naturales: INRENA) puso en operación el primer SIG. Desde esta fecha, son diversas instituciones las que trabajan con este tipo de sistemas, como APODESA del INADE, IGN, las Facultades de Ingeniería Agrícola y Ciencias Forestales de la UNALM (Alva, 1991), el Centro Internacional de la Papa, Instituto Nacional de Defensa Civil, Instituto Nacional de Estadística e Informática (APODESA, 1994), INGEMMET (Velasco, 2003), la Unidad de Percepción y Sistemas de

Información Geográfica del Instituto del Mar del Perú (UPRSIG – IMARPE) (Atiquipa, 2005; comunicación personal), entre otros.

Una de las aplicaciones más importantes de los SIG es la evaluación de los recursos naturales (Singh, 1985; Bosque, 1992) y se ha utilizado sobre todo en el control de bosques, agricultura y su incidencia en la contaminación de las aguas y del suelo, en el estudio sobre ocupación y uso de suelos, control de animales silvestres, entre otros.

Su utilización ha tenido menos éxito en el control de recursos subterráneos (p.e., minería, etc.) y en el estudio de los océanos, esto es debido a las dificultades en el manejo de datos en tres dimensiones, que son necesarios para el tratamiento de estos problemas (Bosque, 1992; Schaefer, 2003).

En Filipinas, el SIG jugó un rol vital en el análisis y selección del sistema de áreas protegidas nacionales integradas, desarrollado en 1990 (Roque, 1992). La finalidad era evaluar el valor de la conservación y amenazas para la biodiversidad de estas áreas, para así planificar y proponer proyectos de desarrollo. Luego cada área protegida contaría con su propio SIG, que permitiría a los manejadores de parques nacionales poner al día los planes del sitio, en respuesta a los nuevos datos y desarrollo dentro y alrededor de dichas áreas.

En Estados Unidos, el *U.S. National Park Service (USNPS)*, desde 1976, viene utilizando la integración de imágenes satelitales con SIG para la evaluación y manejo de los recursos naturales para todos los parques nacionales de Alaska y otros del sistema de parques nacionales (Nyquist, s/f).

En Canadá, *The State of Environment Reporting Service*, *The Canadian Wildlife Service* y *The Canadian Park Service*, en cooperación con varias organizaciones de conservación canadiense, han

desarrollado en los últimos años, una base de datos de áreas nacionales de conservación con la ayuda del SIG. Esta base de datos permitiría visualizar el estado de protección de estas áreas, evaluar los ecosistemas fragmentados y analizar los recursos naturales amenazados, así como los impactos humanos sobre éstas (Rubec *et al.*, 1992; citado por Dunin-Borkowski, 1998).

En el Perú, como ya se mencionó anteriormente, existen varias instituciones que de acuerdo a sus objetivos, utilizan como herramienta el SIG (APODESA, 1994). Entre las relacionadas al manejo de recursos naturales, tenemos el desarrollado por ADOPESA: “Plan de manejo de las cuencas del reservorio de Poechos”, cuyo objetivo era determinar áreas con riesgo potencial de erosión con ayuda del SIG y percepción remota (Quispe, 1994).

Otro de los proyectos relacionados al tema es el ejecutado por el Centro de Datos para la Conservación (CDC – UNALM) de la Facultad de Ciencias Forestales de la UNALM, entre los años 1992 y 1994. Se trata del Sistema de Información Geográfica de la Reserva Nacional Pacaya – Samiria, que integra estudios de suelos, uso de la tierra, estudios fisiográficos de vegetación y socio – económicos; realizados por el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) y el mismo CDC – UNALM. Todo esto será utilizado como una herramienta de planificación para el desarrollo de dicha zona (Barrena, 1994; citado por Dunin-Borkowski, 1998).

Barrena (1994) (citado por Dunin-Borkowski, 1998), describe que para el desarrollo del SIG de la Reserva Nacional Pacaya – Samiria, se usaron tres niveles de trabajo, para la administración de la información. Cada nivel tiene un objetivo diferente. Así, el nivel 1 es la base, equivalente a hojas de la carta nacional 1/100 000; el nivel 2 es la integración de las

cartas nacionales del nivel anterior que formarán toda el área de estudio para un análisis integral y el nivel 3 provendrá también del nivel 1, pero se trata de estudios más puntuales de zonas como centros de desarrollo, puestos de vigilancia y estaciones biológicas, entre otros.

5.11. Métodos utilizados para la evaluación de estudios paleoceanográficos

Existen diversos métodos para evaluar la correlación entre gran cantidad de variables procesadas a través de un SIG. Para estudios en paleoceanografía estas variables, de procedencia geológica, geoacústica, geofísica, oceanográfica y biológica; necesitan ser evaluadas en dos planos debido a que su distribución es temporal y espacial (horizontalmente y verticalmente respectivamente); ubicada en el mar (profundidad de columna de agua de mar), en el suelo marino y por debajo del suelo marino.

Principalmente los métodos más adecuados para estudios geológicos, específicamente para paleoceanografía son:

- *Método de Unidades Integradas de Territorio (UIT).*- Este método consiste en la preparación de documentos cartográficos que representa las unidades geográficas mediante la integración de varios mapas temáticos.
- *Método de análisis geoestadístico.*- La prioridad de este método es el análisis bajo la consideración de la ubicación espacial (coordinativa o relativa), además de la correspondencia que existe entre dos variables, así como el análisis de consistencia.

- *Método de análisis espacial.*- Este método consiste en un análisis geográfico que permite analizar la información representada según sus variables a través de modelos. Básicamente este método consiste en formular hipótesis acerca de las condiciones de los datos que se representarán por las formulaciones de las condiciones marinas y establecer las variables que intervienen en ella. Estas variables del medio marino se representan generalmente a través de criterios de validación que se constituyen en ese momento en variables del modelo. Estas variables del medio marino se representan generalmente a través de mapas temáticos que se constituyen en ese momento en variables del modelo, en el que se analizan las unidades de mapeo que la conforman y se les asigna un valor de importancia dentro del modelo para luego generar las UIT que nos permitirán determinar a aquellos unidades espaciales que cumplan ciertos criterios de validación. Para utilizar éste método se utiliza la aplicación de algoritmos lógicos previamente establecidos como las funciones de análisis espacial tales como la superposición de mapas (por ejemplo; intersección y unión), así como la determinación de zonas de influencia (*Buffer*), que nos van a permitir generar los mapas temáticos de distribución de las variables que muestren zonas propicias para prospecciones paleoceanográficas, así como el índice de confiabilidad de esto.

5.12. Procedimientos en la aplicación SIG para creación espacial

El procedimiento desarrollado en la aplicación SIG utilizada para la creación espacial se describe a continuación:

1. *Conceptualización y diseño de los diferentes modelos de un SIG*, que consiste en formular los modelos que se trabajarán en la implementación del SIG para investigación paleoceanográfica.

2. *Diseño de la base de datos*, a partir de los modelos formulados y las variables que intervienen en éstos. Esta etapa consiste en establecer la manera en que serán estructurados los datos tanto alfanuméricos como gráficos y que se utilizarán dentro del SIG.
3. *Automatización de los datos*, para automatizar los mapas necesarios para ejecutar los modelos se ha utilizado el método de digitalización y vectorización. En esta etapa también se incluyen acciones tales como generación de la base de datos alfanumérica, asignación de códigos de identificación y la construcción de topología.
4. *Análisis espacial*, el cual incluye el uso de las capacidades del SIG para definir relaciones espaciales entre capas de datos. Entre otras funciones se usa la superposición de un mapa en otro para determinar las características de un sitio en particular. Cada tipo de elemento del mundo real está separado de una capa. La combinación de estas capas constituye la simulación de las relaciones del mundo espacial a través del computador. Cabe resaltar que esta metodología ha sido desarrollada incorporando los mapas y la información tabular dentro de un SIG implementado para la ejecución de la presente tesis a manera de que los procesos que involucran esta metodología puedan ser repetidos hasta alcanzar los resultados esperados por estar automatizados.
5. *Producción cartográfica*, luego de haber ejecutado los mapas y validados los resultados según información de gabinete se han preparado los mapas finales que muestran los mapas temáticos.

6. *Preparación de un sistema automatizado*, que consiste en preparar una aplicación que va a contribuir a una buena gestión en la administración de los datos para la realización de estudios paleoceanográficos.
7. *Auditoria del trabajo SIG*, es la etapa que casi no se cumple pero es de suma importancia. Se revisa el sistema y se toman decisiones para mantenerlo igual, modificarlo, ampliarlo o cancelarlo.

5.13. Conceptualización y diseño de los diferentes modelos de un SIG para estudios paleoceanográficos

Esta sección de investigación SIG representa de manera simple lo que se quiere sintetizar; por lo tanto es un conjunto de relaciones espaciales de interacción del mundo real y para ello se deben definir los objetivos o entidades de interés, sus atributos y sus interrelaciones, clasificarlos, codificarlos y asignar las normas de representación (símbolos).

Algunos autores definen a un modelo como una hipótesis, una idea estructurada la cual puede ser un rol, una ecuación o relación que puede ser una síntesis de datos.

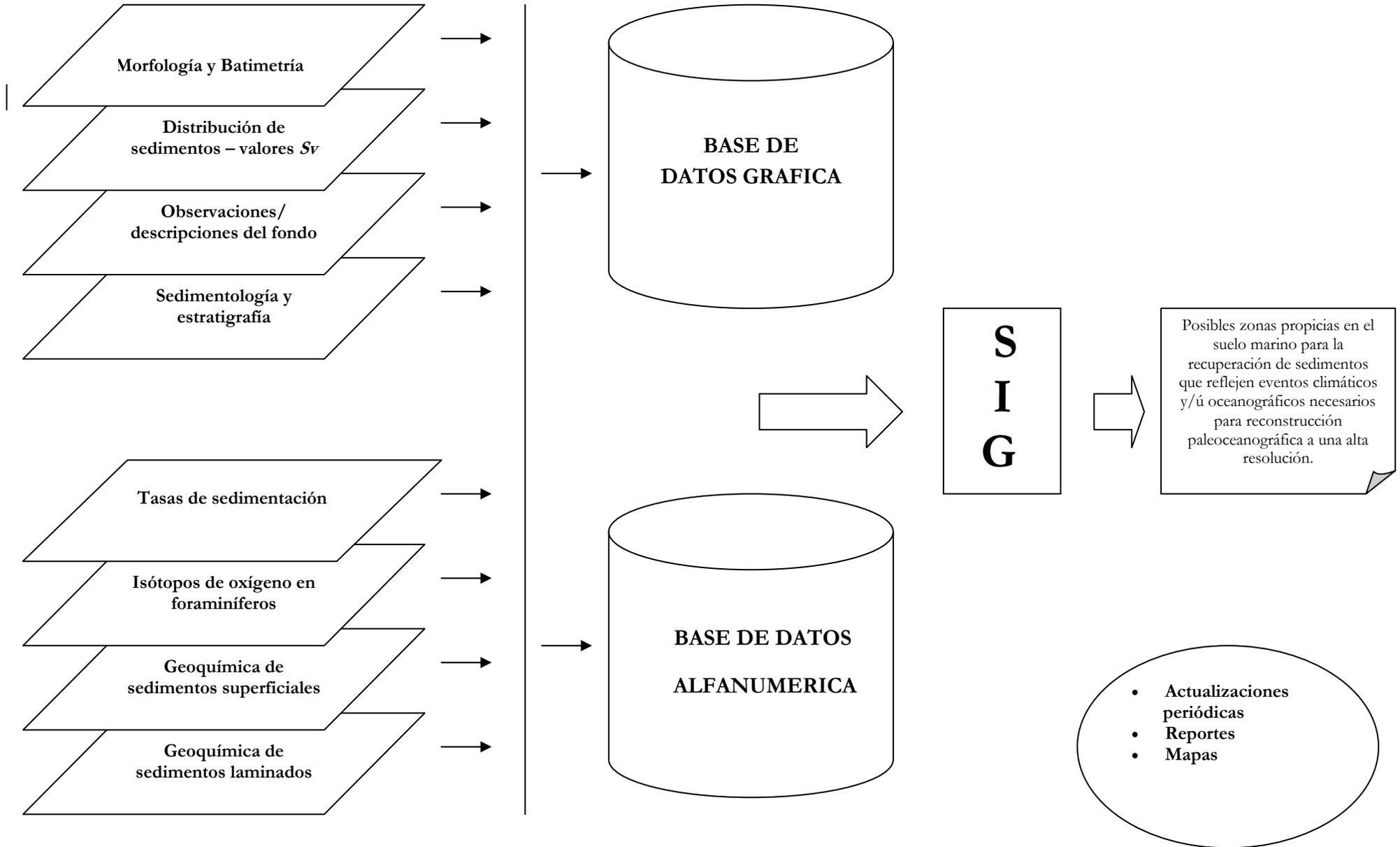
Las diferentes maneras de conceptualización y diseño de los modelos SIG que pueden ser apropiados para estudios e investigación paleoceanográficas son los siguientes:

- *Modelo conceptual*.- Se refiere a como están caracterizados los elementos o variables en paleoceanografía cuando se almacenan en una base de datos, en el que se podrán definir los objetivos o entidades, sus relaciones y sus características o atributos; y que a su vez pueden estar representados en un espacio geográfico, entendiéndose que

cada unidad es un elemento que tiene significado con relación a los requerimientos de información a mantener. Para obtener el modelo conceptual, el primer paso es el análisis de la información y los datos que se utilizarán y producirán para luego determinar las entidades y atributos con las relaciones y flujo de información de los diferentes procesos que se llevan a cabo para estudios en paleoceanografía.

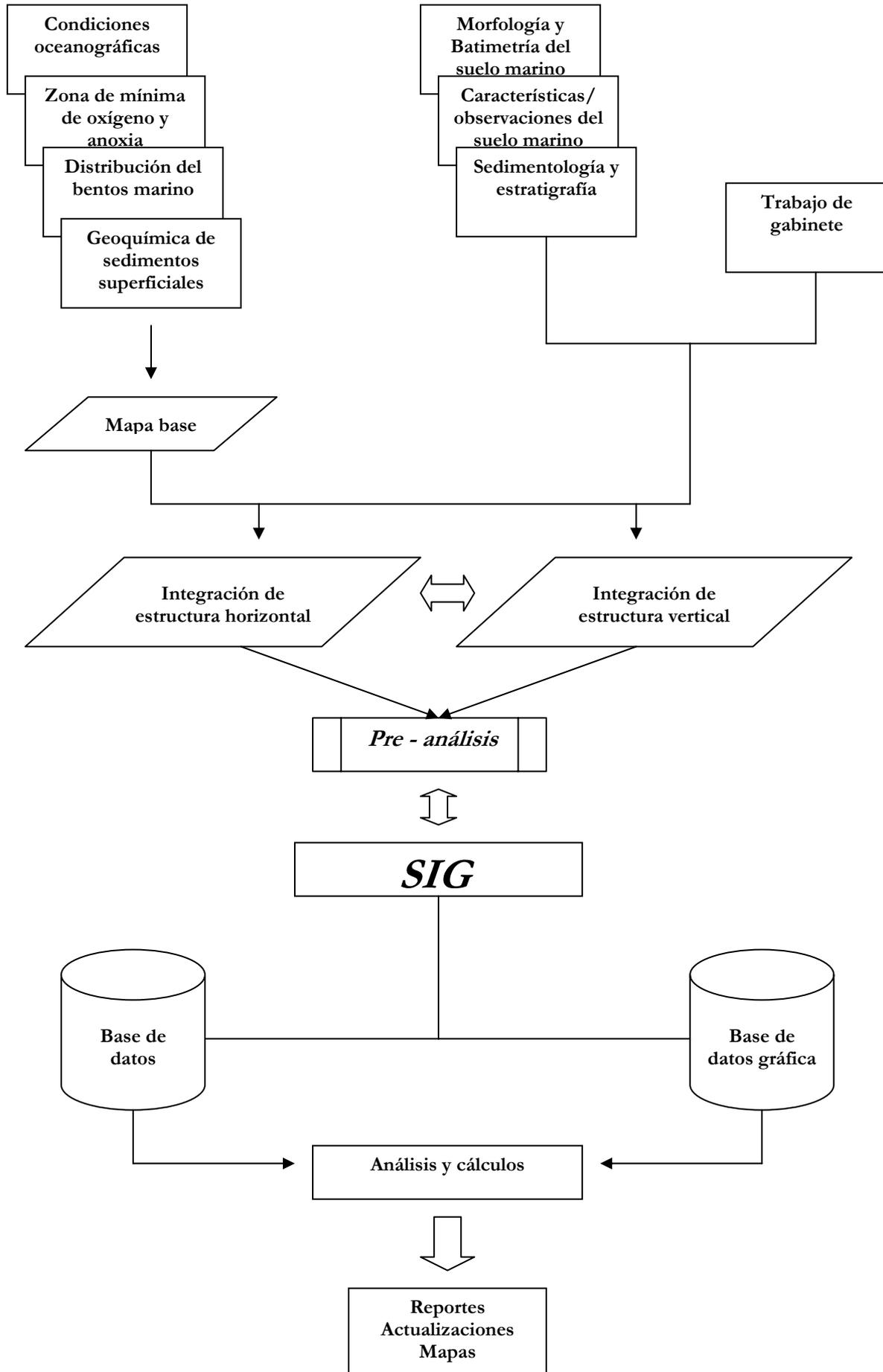
El diagrama de modelo conceptual de datos en estudios paleoceanográficos constituye la base para definir la información a utilizar en este primer trabajo (diagrama 1); mientras que en el siguiente cuadro (diagrama 2) se observa el diseño y conceptualización del SIG para próximos trabajos.

Modelo Conceptual de Datos para Estudios Paleoceanográficos



* Esquema adaptado de Quispe, C. (2004)

Diseño y Conceptualización del SIG para Estudios Paleoceanográficos



- *Modelo Entidad – Relación (E/R).*- Es una representación de los datos en el ambiente de la aplicación que pretende registrar las entidades del sistema que agrupan datos y las interrelaciones entre entidades, en este modelo se asocian entidades establecidas, con el fin de generar posteriormente el modelo lógico.

El modelo Entidad – Relación describe las nociones del objeto o entidad, relación de los atributos, y la definición de los indicadores únicos por cada entidad. La forma para llegar a relacionar los diferentes temas es mediante una base de datos formada por una serie de tablas que guardan información de los resultados obtenidos de las prospecciones paleoceanográficas, donde esta información se encuentra estructurada en atributos o características de cada tema; los que son comunes a varios temas y son los que permiten relacionarlos entre sí.

Este modelo se representa por los siguientes elementos:

Entidad

Es un objeto que existe y puede distinguirse de otros, sobre el que se almacenan datos; en las que cada entidad esta representada por un conjunto de atributos que la identifican.

Relación

Es una asociación entre datos de dos o más entidades; refleja una operación, una dependencia, una jerarquía, una clasificación, y un intercambio de información. En ella se involucran datos que pertenecen a las diferentes entidades de los resultados obtenidos en las prospecciones paleoceanográficas.

Atributos

Es una característica o propiedad de una entidad, un atributo que asocia un conjunto de valores con un conjunto de entidades o un conjunto de relaciones y una representación de los valores que representa las características de las estructuras en las prospecciones paleoceanográficas (estructuración horizontal y vertical).

- *Modelo Lógico.*- En este modelo se describe la base de datos que contendrá la información alfanumérica y los niveles de información gráfica que se capturarán con sus atributos como la clase de datos, el tamaño y las relaciones entre las entidades existentes a través del uso de identificadores únicos; además de la geometría del dato como punto, línea o área. Con este modelo se completa la plataforma de la base de datos de la tesis, para este efecto se relacionará la descripción de la tabla de datos asociados a cada entidad establecida en el estudio paleoceanográfico tomando como base el modelo conceptual desarrollado anteriormente. Se trata de hacer una descripción detallada de las entidades, los procesos y análisis que se llevarán a cabo, así como los productos que se espera obtener y la preparación de los menús de actualización y reportes para usuarios.

En esta parte del diseño del SIG se definen los diferentes tipos de análisis que se estarán llevando a cabo más adelante, además de las consultas y actualizaciones que se vayan a realizar comúnmente y constantemente, esto por cuanto de la estructura de la base de datos (gráficas y alfanuméricas) depende los resultados obtenidos al final; es por lo anterior, que en esta etapa, se hace un diseño detallado de lo que contendrá el SIG; de la presentación que tendrán los productos normalmente, definiendo los tipos de mapas con sus leyendas, contenido temático y demás, reportes o tablas que se espera satisfagan

los principales requerimientos de los usuarios; con estos se agilizarán los próximos procesos de investigación que envuelve directamente a los usuarios.

5.14. Resultados

La creación de modelos de superficie (mapas morfológicos del suelo marino y mapas de distribución teórica-espacial de sedimentos con potencial paleoceanográfico) y una base de datos de información geológica, con su consecuente interrelación; fue posible gracias al diseño y la implementación de una aplicación SIG.

Para la creación del mapa temático que muestra las posibles zonas en el suelo marino donde se pueden recuperar sedimentos propicios para realizar reconstrucciones paleoceanográficas a una alta resolución, fue necesario reclasificar las estructuras *raster* de cada mapa (ocho zonas batimétricas, ocho zonas de la distribución de valores *Sv max*, ocho zonas de la distribución de valores *Sv mean*, ocho zonas de la distribución de valores *Sv min*, y las ocho zonas de pendiente) y darle el valor de 1 a todas las celdas de las estructuras *raster* que cumplan con las condiciones óptimas detalladas en la tabla 2 mostrada en la siguiente sección. Las celdas que no cumplan con las condiciones detalladas en la tabla 2 se le asigno el valor de 0.

Por lo tanto, las zonas mostradas en la figura 64 muestran celdas que solamente cumplieron con las condiciones detalladas en la tabla 2 y que, por cumplir con tal condicionamiento; presentan valores de 5.

Los análisis realizados con el *software ArcGis v. 8.3* como plataforma SIG (ESRI, 2001; 2002; 2004; 2004) para la determinación de estas posibles zonas, utilizando toda la información geológica procesada en esta tesis, se presenta a continuación.

5.14.1. Análisis

Para el análisis de los modelos de superficie creados anteriormente con el fin de mostrar posibles zonas en el suelo marino que contengan sedimentos con características paleoceanográficas que permitan una reconstrucción de eventos ambientales y ecológicos pasados a una alta resolución; se tuvo que separar, por medio de la reclasificación de las estructuras *raster* (valores de profundidad del suelo marino, valores *Sv* y valores de pendiente) asignándoles valores de 1 a las celdas que cumplan con las condiciones planteadas en la tabla 2; las posibles zonas para estudios paleoceanográficas en el suelo marino. Para tal efecto, se creó la siguiente tabla mostrando la clasificación:

Zonas en el suelo marino con mayor probabilidad de encontrar sedimentos con características paleoceanográficas para reconstrucciones a una alta resolución	Rango de valores	Clasificación
Zona Mínima de Oxígeno (ZMO < 5 μMO_2)	Entre 50 y 650 metros (columna de agua)	1
<i>Sv max</i>	-6 a -7 dB	1
<i>Sv mean</i>	-14 a -17 dB	1
<i>Sv min</i>	-52 a -64 dB	1
Pendiente del suelo marino	Entre 0 a 2.5 grados	1
Total		5

Tabla 2. Rango de valores por categoría usada para clasificar las variables con las cuales se definirán las posibles zonas en el suelo marino (desde 11°S hasta 15°S) donde encontrar sedimento con características paleoceanográficas para reconstrucciones a una alta resolución.

De acuerdo a lo detallado en el capítulo IV, la distribución de sedimentos en el margen continental peruano es altamente heterogénea (Levin *et al.*, 2002) y esta determinada, entre otros factores, por la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO) y contracorriente de la *Poleward undercurrent*.

En la búsqueda de posibles zonas en el suelo marino donde encontrar sedimento con características apropiadas para realizar reconstrucciones paleoceanográficas a una alta resolución, la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO) y la *Poleward undercurrent* juegan un rol clave y fue necesario evaluarlas como variables en este estudio. Se asumió para toda la zona de estudio que aproximadamente, desde 50 hasta 650 metros de profundidad de columna de agua, la ZMO mantiene un valor menor de $5 \mu\text{MO}_2$ (Brockmann *et al.*, 1980; citado por Böning *et al.*, 2004; Helly y Levin, 2004). En áreas donde la ZMO intercepta la plataforma existe una inducción a la hipoxia en las aguas del fondo marino limitando los procesos de bioturbación y favoreciendo la preservación de sedimentos laminados (Vargas *et al.*, 2004). Además, la *Poleward undercurrent* mantiene velocidades menores entre los 11°S y 14°S a profundidades de suelo marino entre 150 y 400 metros, lo cual permite la deposición de sedimentos sobre la pendiente de la plataforma y el talud continental (Suess *et al.*; 1986; Suess y von Huene, 1990). Debido a que estas profundidades se encuentran dentro del rango observado en la ZMO, se optó por considerar solamente para la reclasificación (como primer análisis), las profundidades del suelo marino observadas en el rango de la ZMO.

Además, los sedimentos recuperados del suelo marino en esta zona de estudio en investigaciones previas, los cuales presentaron potencial paleoceanográfico y fueron utilizados para determinar sus “posibles patrones” acústicos utilizando las tres señales S_v ; también fueron clasificados para determinar las posibles zonas.

Los valores de pendiente mostradas en la tabla 2 fueron deducidos de los mapas batimétricos de cada zona de donde se extrajeron sedimentos con potencial paleoceanográfico en investigaciones previas.

En conjunto se determinó, luego de la suma de mapas, que las zonas en el suelo marino que presentaron valores de 5 representan zonas con mayor probabilidad de encontrar sedimentos con características paleoceanográficas para reconstrucciones paleoceanográficas a una alta resolución. No se presentan las zonas que mostraron valores de 4, 3, 2 ó 1; debido a que no se cuenta con concreta información que respalde estas zonas con menores probabilidades. En este primer estudio de este tipo solamente se van a considerar las zonas que presentaron la mayor probabilidad.

5.14.2. Mapas

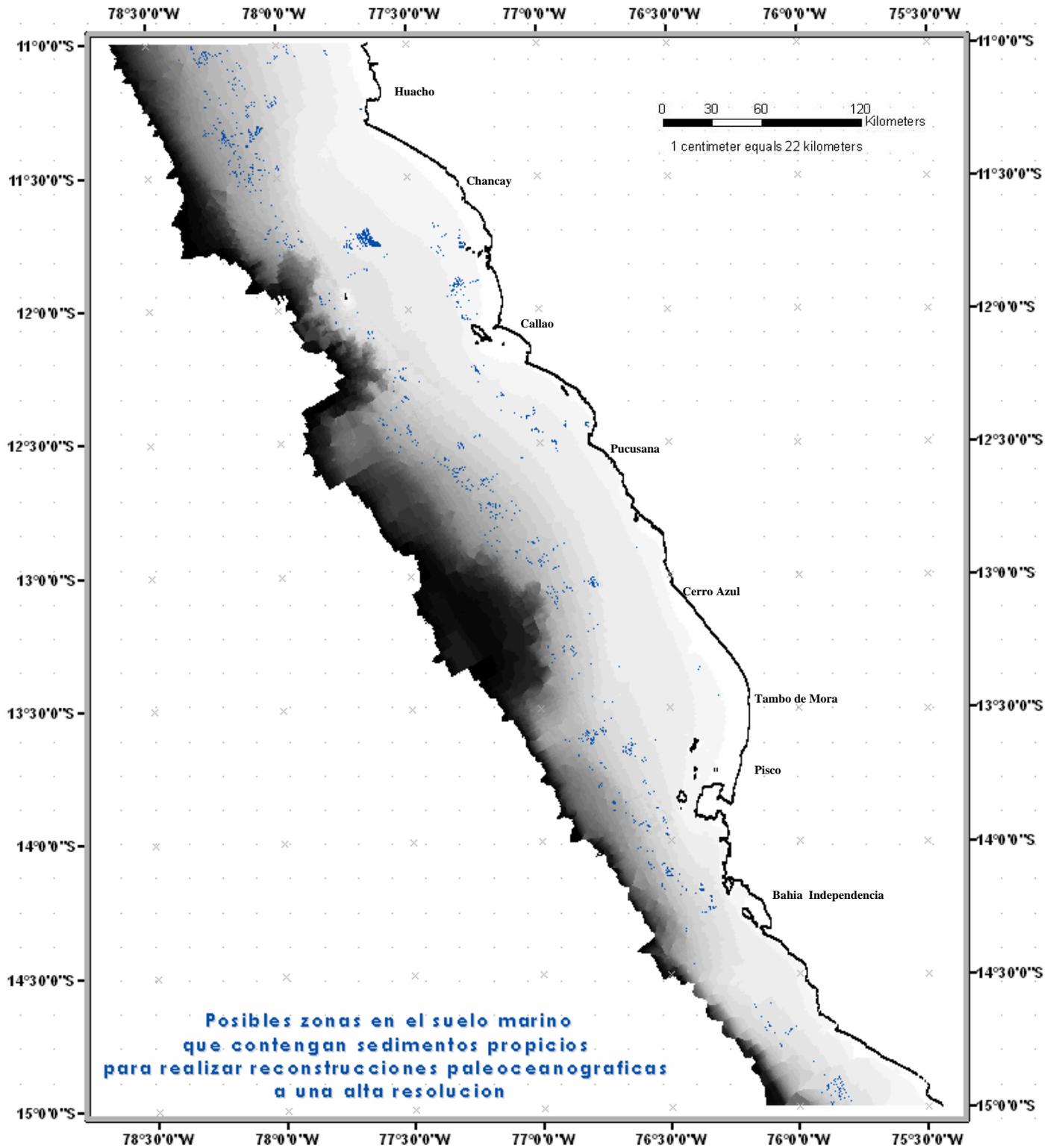


Figura 63. Posibles zonas en el suelo marino donde encontrar sedimentos adecuados para realizar reconstrucciones paleoceanográficas a una alta resolución. Contornos del suelo marino cada 50 metros.

5.14.3. Conclusiones

El uso del *software ArcGis v. 8.3* como programa base para administrar, gestionar, manipular, analizar y procesar información geológica con el fin de crear modelos del ambiente geológico marino para poder encontrar zonas en el suelo marino que contengan sedimentos con particulares estructuras geológicas, y que estos lleven en su composición sedimentológica registros paleo-ambientales y paleo-ecológicos de alta resolución con los que se pueda reconstruir eventos ocurridos en el pasado durante el Holoceno Tardío (en los últimos 200 años pasados) (D. Gutiérrez *et al.*, 2006); fue de suma importancia debido a que, por ser información espacial, necesitan ser interrelacionados para sacar conclusiones de éstas; con el fin de solucionar problemas de planificación, investigación y gestión.

Además, debido a la adquisición de información geológica constante, ya sea por nuevos estudios de investigación (p.e., próximos cruceros de prospección paleoceanográfica) ó información reunida de trabajos anteriores; era necesario contar con una única plataforma SIG que soporte gran cantidad de información y que pueda procesarla sin mayores inconvenientes.

Por otro lado, de acuerdo a las posibles zonas determinadas y mostradas en la figura 64 evaluando información geológica procesada en esta tesis; se observó que tiene similitud a las zonas determinadas con anterioridad por estudios paleoceanograficos realizados por el Area de Geología Marina de IMARPE (Velazco, 2003; datos no publicados). Hay que tener en cuenta que esta determinación estuvo basada solamente en tres variables (Valores S_v , profundidades de la ZMO en el suelo marino y pendiente del suelo marino). La adición de nuevas variables geológicas (p.e., geoquímica de los sedimentos, distribución de valores de O_2 de aguas de fondo, secciones sísmicas) permitirá encontrar nuevas zonas con mayor

probabilidad y será posible presentar distintas zonas con menores probabilidades, y ser establecidas con información concreta que la respalde.

VI. Recomendaciones y sugerencias

Se recomienda y sugiere complementar, así como reforzar y continuar investigando; los siguientes puntos para trabajos futuros en los temas desarrollados en la presente tesis:

- Complementar la base de datos creada con información geológica marina obtenida de cruceros anteriores a este trabajo.
- Actualizar de forma periódica la base de datos.
- Continuar con la implementación de nuevas entidades geológicas a la base de datos actual y crear nuevos atributos a las entidades ya establecidas (p.e., atributo de “hora y fecha” en la entidad “LANCE”).
- Diseñar e Implementar, en conjunto con otras áreas de investigación, nuevas entidades de orden oceanográfico (p.e., información de oceanografía física, oceanografía química, oceanografía biológica) para el progreso de los estudios paleoceanográficos.
- Creación de metadata para la base de datos.
- Contar con información oceanográfica disponible (ya sea, geológica, biológica, física y química) para posteriores estudios paleoceanográficos.
- Si se continúa con la creación de modelos del suelo marino a partir de datos batimétricos obtenidos de cruceros de prospección pesquera (IMARPE) usando

ecosondas científicas *SIMRAD EK-500*, *EY-500* y *EK-60* transductores de tecnología *Split beam* con distintas calibraciones; se sugiere buscar una forma apropiada de estandarizar esta información batimétrica para el mejoramiento de la creación de mapas batimétricos en 2D e imágenes morfológicas en 3D del relieve del suelo marino del margen continental peruano.

- Continuar con la investigación acerca de la clasificación de sedimentos superficiales utilizando valores de retrodispersión acústica (Sv), y calibrar estas respuestas acústicas con información sísmica que se pueda obtener en el futuro. Comparar las señales acústicas y sísmicas con porciones de menor distancia vertical de sedimento (p.e., secciones de un metro).
- Preparar un crucero de investigación con equipos acústicos y/ó sísmicos (p.e., ecosonda *Multibeam*, sonar *SideScan*) que proporcionen imágenes del suelo marino con gran resolución.
- Preparar un estudio de las condiciones hidrodinámicas de la columna de agua (p.e., valores de temperatura y salinidad corregidos por la presión por capas de un metro de profundidad de columna de agua, cada 100 metros de profundidad de columna de agua con respecto al suelo marino, en transeptos separados cada medio grado y por cada estación del año ó, mejor aún, cada mes del año; cada año); con la finalidad de mejorar las correcciones de valores obtenidos en el ambiente marino en el futuro (p.e., valores acústicos y sísmicos).

VII. Referencias Bibliográficas

AVISO (2004). Sea Level Anomalies. *Base de datos satelitales, AVISO, Francia*, http://www-aviso.cnes.fr:8090/HTML/information/frames/applications/actu/sla_uk.html, 2004.

Barrena A., Macera U., Huertas S. (1995). El sistema de información geográfica en la reserva nacional de Pacaya – Samiria. *Colegio de Ingenieros del Perú, Capítulo de Ingeniería Forestal, 5 Congreso Nacional Forestal, Lima (Perú), 15-17 Nov 1995, p. 154 – 159.*

Böning P., Brumsack H-J., Böttcher M., Schnetger B., Kriete C., Kallmeyer J., Borchers S. (2004). Geochemistry of Peruvian near-surface sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta. Volume 68, No 21 (2004), p. 4429 – 4451.*

Bosque J. (1992). Sistema de Información Geográfica. *Monografías y Tratados GER, Serie: Geografía y Ecología, 1992, p. 1 – 451.*

Bureau Hidrográfico Internacional – Mónaco (2001). Normalización de los nombres de las formas del Relieve Submarino – Directrices, Formulario de Propuesta, Terminología. *Versión Inglesa/Española, 3era edición, Abril del 2001, p. 1 – 33.*

Caruthers J., Fisher C. (2002). Remote Sediment Classification Using Acoustical Techniques. *Final report for Task 5, FY 01, December 2002, p. 1 – 32.*

Chiquipul, J. (1997). Aplicación del Sistema de Información Geográfica para identificar zonas con riesgo de erosión en la cuenca del río Chinchipe. Tesis. *Universidad Nacional*

Federico Villarreal, *Facultad de Ingeniería Geográfica y Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica*, 1997, p. 1 – 175.

Clift P., Pecher I., Kukowski N., Hampel A. (2003). Tectonic erosion of the Peruvian forearc, Lima Basin, by subduction and Nazca Ridge collision. *TECTONICS*, v. 22, no.3. June 2003. p. 1 – 20.

Couch R., Whitsett R. (1981). Structures of the Nazca Ridge and the continental shelf and slope of southern Peru. *Nazca Plate: Crustal formation and Andean convergence. Geological Society of America Memoir 154*, p. 569 – 586.

Cuadros G. (2001). Elementos de Geoestadística. Monografía. Departamento de Informática, Universidad de Pinar del Rio, Cuba. www.monografias.com, 2001, p. 1 – 30.

Danjoy A. (1996). Sistema de Información Geográfica: Herramienta decisiva para el éxito de la inversión agrícola. *Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Manejo Forestal, Artículo n° 485*, p. 25 – 28.

Delgado C., Gomero R., Salzwedel H., Flores L., Carbajal G. (1987). Distribución de los sedimentos en el margen continental peruano. Mapa textural. *Bol. Inst. Mar Perú 11(5)*.

Delgado C., Gomero R. (1995). Atlas sedimentológico de la Plataforma Continental Peruana. *Inf. Inst. Mar Perú # 110*, p. 5-31.

Díaz V. (2002). Geoestadística aplicada. Publicación. *Instituto de Geofísica, UNAM; Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, CUBA; 2002*, p. 1 – 144.

Dunin-Borkowski, M. (1998). Aplicación de Sistema de Información Geográfica en el manejo forestal – Proyecto Dumpras. Tesis. *Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Manejo Forestal, 1998, p. 1 – 99.*

ESRI (2001). ArcGis™ Geostatistical Analyst: Statistical Tools for Data Exploration, Modeling, and Advance Surface Generation. *ESRI 380, New York St., Redlands, CA 92373-8100, USA, www.esri.com, 2001, p. 1 – 23.*

ESRI (2002). ArcGis® - Using ArcGis Spatial Analyst. *ESRI 380, New York St., Redlands, CA 92373-8100, USA, www.esri.com, 2002, p. 1 – 238.*

ESRI (2002). Using ArcGis™ 3D Analyst™. *ESRI 380, New York St., Redlands, CA 92373-8100, USA, www.esri.com, 2002, p. 1 – 64.*

ESRI (2004). ArcGis® - Geoprocessing in ArcGis®. *ESRI 380, New York St., Redlands, CA 92373-8100, USA, www.esri.com, 2004, p. 1 – 370.*

ESRI (2004). La Cartografía de ESRI: Capacidades y Tendencias. *ESRI 380, New York St., Redlands, CA 92373-8100, USA, www.esri.com, 2004, p. 1 – 18.*

Gagnon K., Chadwell D., Norabuena E. (2005). Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements. *Letters of Nature, Volumen 434, 10 March 2005, p. 205 – 208.*

Greinert J., Nadler T. (2000). OFOS and TVG observations in Yaquina Basin. Artículo dentro de *Kukowski N., Bialas J. (2000). Geophysical Experiments at the Peruvian Continental*

Margin, Investigations of Tectonics, Mechanics, Gas Hydrates and Fluid Transport – Cruise Report SO146-1/2. Geomar Report #96, Kiel (2000), p. 1 – 490.

Gutiérrez M., Herbozo G. (2004). Batimetría y clasificación exploratoria del fondo marino utilizando información de retrodispersión acústica. *Informe Acústico 0405 Paleocanografía, Julio 2004, Unidad de Tecnologías de Detección, Instituto del Mar del Perú, p. 1 – 13.* (En Edición).

Gutiérrez M., Maclennan D. (2005). Correcciones TVG y S_v a los índices acústicos de abundancia y su aplicación en la evaluación de recursos demersales y mesopelágicos. *Inf. Ins. Mar Perú. #190 (2002), p. 1 - 10.* (En Edición)

Gutiérrez D., Sifeddine A., Reyss J., Vargas G., Velazco F., Salvattecchi R., Ferreira V., Ortlieb L., Field D., Baumgartner T., Boussafir M., Boucher H., Valdés 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, European Geosciences Union, 6, 2006, p. 119 – 125.*

Gutiérrez D., Quipuzcoa L., Enríquez E., Marquina R. (2003). Distribución de mesoescala de comunidades bentónicas y clorofila “a” en sedimentos superficiales de áreas potenciales de reconstrucción paleocanográfica. *Informe Crucero Paleocanográfico 0305 (2003), p. 1 –10.*

Hampel A. (2002). The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: a re-evaluation. *Earth and Planetary Science Letters # 203 (2002), p. 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*, v. 109. February 2004. p. 1 – 19.

Hampel A., Adam J., Kukowski N. (2004). Response of the tectonically erosive south Peruvian forearc to subduction of the Nazca Ridge: Analysis of three-dimensional analogue experiments. *TECTONICS*, v. 22, no.3. June 2003. p. 1 – 20.

Helly J., Levin L. (2004). Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep-Sea Research I* #51, 2004, p. 1159 – 1168.

Herbozo G. (2005). Trabajo batimétrico en la Costa Central-Sur (desde 11°S a 15°S) del Margen Continental Peruano. *Proyecto Investigaciones Paleoceanográficas en el Margen Continental Peruano, Área de Geología Marina (AGM) y Unidad de Tecnologías de Detección (UTD), Instituto del Mar del Perú (IMARPE – Perú) e Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD – Francia), 5 Dvds, 2005 (Datos no publicados).*

Hu J. (1998). Methods of Generating Surfaces in Environmental GIS Applications. *Bechtel Environmental Inc., 1998, p. 1 – 4.*

Huaccha M. (2004). Aplicación del SIG a la seguridad ciudadana en el Cercado de Lima. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geográfica y Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica, 2004, p. 1 – 14.*

Hussong H., Wiperman L. (1981). Vertical movement and tectonic erosion of the continental wall of Peru-Chile Trench near 11°30'S latitude. *Nazca Plate: Crustal formation and Andean convergence. Geological Society of America Memoir 154*, p. 509 – 524.

Hübscher C., Kukowski N. (2003). Complex BSR pattern in the Yaquina Basin off Peru. *Geo-Mar Lett #23, 2003*, p. 91 – 101.

ICES. (1987). Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. *Cooperative Research Report #144*.

Jahnke R., Arthur M. (1992). Preliminary Report of the 1992 Peru Margin Expedition R/V Seward Jonson Cruise SJ 10-92 - Cruise Report. *Funded by The National Science Foundation and NOAA-National Undersea Research Program, October 1992*, p. 1 – 184.

Johnson S., Ness G. (1981). Shallow structures of the Peru Margin 12°S – 18°S. *Nazca Plate: Crustal formation and Andean convergence. Geological Society of America Memoir 154*, p. 525 – 544.

Krabbenhöft A., Bialas J., Kopp H., Kukowski N., Huebscher C. (2004). Crustal structure of the Peruvian continental margin from wide-angle seismic studies. *Geophys. J. Int. (2004)*, p. 1 – 16.

Klerkx J. (2003). Contribution of high-intensity gas seeps in the Black Sea to methane emission to the atmosphere – the CRIMEA project. *International Bureau of Environmental Studies, Brussels, Belgium, 2003*, p. 1 – 6.

Kukowski N., Bialas J. (2000). Geophysical Experiments at the Peruvian Continental Margin, Investigations of Tectonics, Mechanics, Gas Hydrates and Fluid Transport – Cruise Report SO146-1/2. *Geomar Report #96, Kiel (2000), p. 1 – 490.*

Kukowski N., (2005). Transtensional Tectonics, Gas Hydrate Systems and Morphology at a Convergent Margin Shaped by Subduction Erosion Insights from Geophysical Data from Offshore Peru between 5° and 15°. *Especialista del Departamento de Geofísica y Geología, Geoforschungszentrum (GFZ) Postdam de Alemania, Conferencia en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), 13 de Octubre 2005.*

Kukowski N., (2005). Mass Transfer and Mechanics of Convergent Margins the Accretive versus the Erosive. *Especialista del Departamento de Geofísica y Geología, Geoforschungszentrum (GFZ) Postdam de Alemania, Conferencia en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), 14 Octubre 2005.*

Langaas S., Ahlenius H. (2005). Baltic Sea Region – GIS, Maps and Statistical Database. *Baltic Drainage Basin Project (BDBP), UNEP, <http://www.grida.no/baltic/index.htm>, 2005.*

León, J. (2005). Coastal Evolution of Shelly Beach, Otago Harbour: A Composite Approach to Examining the Morphodynamic Behaviour of Human-Modified Sand Spit. *Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Geography at the University of Canterbury, 2005, p. 1 – 228.*

Levin L., Gutiérrez D., Rathburn A., Neira C., Sellanes J., Muñoz P., Gallardo V., Salamanca M. (2002). Benthic processes on the Peru margin: a transect across the oxygen minimum zone during the 1997 - 98 El Niño. *Progress in Oceanography #53 (2002), p. 1 – 27.*

Macera, M. (1995). Metodología para establecer una base de datos georeferenciados en el Parque Nacional del Manu. Tesis. *Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Manejo Forestal, 1995, p. 1 – 159.*

Macharé J., Sebrier M., Huaman D., Mercier J. (1986). Tectónica Cenozoica de la Margen Continental Peruana. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, v. 76. (1986), p. 45 – 77.*

Masías A. (1976). Morphology, Shallow Structure and Evolution of the Peruvian Continental Margin, 6° to 18°S. (M.S. Thesis): *Corvallis, Oregon State University, USA, 1976, p. 1 – 92.*

Max A., Tiedemann R. (2003). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Volume 202 ODP. *College Station, TX, 1988, p. 1 – 897.*

Morales E., Díaz-Naveas J. (2000). Hidratos de Gas Submarinos, Una Nueva Fuente de Energía para el Siglo XXI. *Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (UCV), Chile*
<http://www.hydrates.ucv.cl/page00.html>, 2000.

Netzeband G., Hübscher C., Gajewski D., Grobys J., Bialas J. (2005). Seismic velocities from the Yaquina forearc basin off Peru: evidence for free gas within the gas hydrate stability zone. *International Journal of Earth Sciences, Springer – Verlag 2005, 10.1007/s00531-005-0483-2, p. 1 – 28.*

Olu - Le Roy K. (2003). Biogeographic patterns of seeps: the global picture. *DRO/Département Environnement Profond, IFREMER Centre de Brest, PLOUZANE, France, Speaker/Extended Abstract, 2003, p. 1 – 5.*

Ortlieb L., Macharé J. (1990). Geocronología y Morfoestratigrafía de Terrazas Marinas del Pleistoceno Superior: El Caso de San Juan – Marcona, Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 81. (1990), p. 87 – 106.

Paul C., Matsumoto R. (2000). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 146 ODP. *College Station, TX, 2000*, p. 1 – 447.

Paul C., Matsumoto R. (2000). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Volume 146 ODP. *College Station, TX, 2000*, p. 1 – 623.

Pecher I. (1996). Seismic studies of Bottom Simulating Reflectors at the Convergent Margins Offshore Peru and Costa Rica. *Geomar Report #47, Kiel (1996)*, p. 1 – 159.

Pecher I., Kukowski N., Hübscher C., Greinert J., Bialas J. y 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, (2001)*, p. 343 – 354.

Quipe, C. (2004). Sistema de Información Geográfica en el análisis de catastro minero – Caso departamento de Huancavelica. Tesis. *Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad de Ingeniería Geográfica y Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica, 2004*, p. 1 – 204.

Reinhardt L., Wunderlich J. (2001). High Resolution Subbottom Profiling during SO147 “Peru Upwelling”. *Statusseminar Meeresforschung mit dem FS Sonne, Hannover, 2001*, p. 1 – 3.

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. *Marine Geophysical Researches* # 23, 2002, p. 335 – 351.

Ripple, W. (1989). Fundamentals of Geographic Information Systems: A Compendium. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing and the American Congress on Surveying and Mapping*, 1989, p. 1 – 74.

Rosenzweig, A. (1947). Algunos aspectos de la geología de la Isla San Lorenzo e Islas vecinas. Tesis. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Geología, Escuela profesional de Geología*, 1947, p. 1 – 55.

Santa Cruz, A. (2003). Diseño e implementación de aplicación de Sistema de Información Geográfica para la vigilancia epidemiológica del Dengue, Distrito de Tumbes, años 2001 – 2002. Tesis. *Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad de Ingeniería Geográfica y Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica*, 2003, p. 1 – 199.

Sahling H. (2003). Global occurrence of seeps: what we know and what we don't. *Article of GEOMAR Forschungszentrum für Marine Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Speaker*, 2003, p. 1 – 4.

Schaefer A. (2003). Marine GIS. *Alfred Wegener Institute, Foundation for Polar and Marine Research, AWI*, http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/Marine_GIS/why_GIS.html, 2003.

Schaefer A., Schlueter M. (2003). Marine GIS. *Alfred Wegener Institute, Foundation for Polar and Marine Research, AWI*, http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/Marine_GIS/marine_flux_studies.htm, 2003.

Siwabessy J., Penrose J., Kloser R., Fox D. (1999). Seabed habitat classification. *Shallow survey '99 – Internacional Conference on High Resolution Surveys in Shallow Water. Sydney, Australia. October 1999, p. 1 – 7.*

Suárez, E. (1993). Aplicación del Sistema de Información Geográfica en la zonificación agroclimática de los cultivos de Quinoa y Kiwicha, Caso Cuenca media y alta del río Pisco. Tesis. *Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad de Ingeniería Geográfica y Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica, 1993, p. 1 – 156.*

Suess E., von Huene R. (1990). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 112 ODP. *College Station, TX, 1988, p. 1 – 738.*

Suess E., von Huene R. (1990). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Volume 112 ODP. *College Station, TX, 1988, p. 1 – 1015.*

Teves N. (1975). Aspectos sedimentarios y estructurales del Sector Costanero Peruano frente a la Dorsal de Nazca. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Tomo #50, 1975, p. 87 – 98.*

The ARC/INFO News (1989). The ARC/INFO – IBM. *Environmental Systems Research Institute, 1989, p. 1 – 12.*

Thornburg T., Kulm L. (1981). Sedimentary basins of the Peru continental margin: Structure, stratigraphy, and Cenozoic tectonics from 6°S to 16°S latitude. *Nazca Plate: Crustal formation and Andean convergence. Geological Society of America Memoir 154*, p. 393 – 422.

Tinoco R., (1999). Definición y algunas aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica. *Artículo*, p. 1 – 6.

Torres M., McManus J., Huh C. (2002). Fluid seepage along the San Clemente Fault scarp: basin-wide impact on barium cycling. *Earth and Planetary Science Letters #203*, 2002, p. 181 – 194.

Trehú A., Bohrmann G. (2003). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 204 ODP. *College Station, TX, 2003*, p. 1 – 944.

Trehú A., Bohrmann G. (2003). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Volume 204 ODP. *College Station, TX, 1988*, p. 1 – 1221.

Turno H., Isla I., Juárez V. (2003). Implementación de un SIG en la evaluación de la aptitud para prácticas forestales en el litoral bonaerense. *Boletín Paranaense de Geociencias*, n. 53, 2003, p. 27 – 34.

UPRSIG (2005). Valores de Temperatura Superficial del Mar Peruano. *Unidad de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, Instituto del Mar del Perú, Perú*, http://200.60.133.147/uprsig/sst_prov.html, 2005.

Vargas G., Ortlieb L., Pichon J., Bertaux J., Pujos M. (2004). Sedimentary facies and high resolution primary production inferences from laminated diatomaceous sediments off northern Chile (23°S). *Marine Geology* #211, 2004, p. 79 – 99.

Vargas G., Ortlieb L., Chapron E., Valdes J., Marquardt C. (2005). Paleoseismic inferences from a high-resolution marine sedimentary record in northern Chile (23°S). *Tectonophysics* #399, 2005, p. 381 – 398.

Velasco, J. (2003). Implementación del *Mapserver* como servidor de mapas dinámicos por Internet en el INGEMMET. *XII Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú, 2003, p. 159 – 204.*

Velazco, F. (2005). Reporte pre-crucero Paleocenoigráfico 2005. *Proyecto Investigaciones Paleocenoigráficas en el Margen Continental Peruano, Área de Geología Marina (AGM), Instituto del Mar del Perú (IMARPE), 2005, p. 1 – 9.*

Von Rad U., Berner U., Delisle G., Dooze-Rolinski H., Fechner N., Linke P., Lückge A., Roeser H., Schmaljohann R., Wiedicke M., SONNE 122/130 Scientific Parties (2000). Gas and fluid venting at the Makran accretionary wedge off Pakistan. *Geo-Marine Letters, Springer-Verlag 2000, #20, p. 10 – 19.*

Weinrebe W., Greinert J. (2001). Sounding Ocean Floor Morphology at Continental Margins to Understand Geodynamic History. *Article of GEOMAR Forschungszentrum für Marine Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2001, p. 1 – 7.*

Wright D. (1998). Davey Jones' Locker – Seafloor Mapping and Marine/Coastal GIS. Department of Geosciences, Oregon State University. <http://dusk2.geo.orst.edu/djl/highseas.html>, 2005.

Wunderlich J., Wendt G. (2001). High Resolution Echosounding at SO147 – Equipment and Technical Aspects. *Statusseminar Meeresforschung mit dem FS Sonne, Hannover, 2001*, p. 1 – 4.

VIII. Glosario Geológico

Afloramiento

1. *Afloramiento ó Surgencia (Upwelling)*

Las surgencias (también llamadas afloramientos) ó ascenso de las aguas por debajo de las capas superficiales hacia la capa superficial, es inducida por la acción de los vientos que soplan paralelos a la costa, que en combinación con la rotación de la tierra, ocasionan un desplazamiento del agua superficial hacia mar abierto. Al ocurrir este movimiento, el agua que está bajo la superficie pasa a ocupar el lugar de la que se ha desplazado hacia mar abierto, provocando una disminución de la temperatura superficial del mar. Esta agua, que suele ser rica en nutrientes, enriquece la capa superficial permitiendo una alta producción primaria.

2. *Afloramiento de rocas (rocks outcropping)*

Se le denomina afloramientos de rocas a cuerpos de roca expuestos en la superficie de la Tierra. Estos afloramientos de roca pueden ser observados sobre tierra firme, así como en el suelo marino.

Mineral autigénico (authigenic minerals)

Pertenciente a minerales que se forman en la cuenca de deposición. Estos incluyen los carbonatos, cuarzos, cloruros y otros minerales que rellenan o cementan los poros del sedimento que se forman durante la diagénesis. La Evaporita es un ejemplo de *authigenic mineral*, ó también denominado como formado *in situ*.

Bajo ó Alto fondo (Shoal)

Accidente de la plataforma continental que representa un peligro para la navegación de superficie, con sustancialmente menos resguardo que la zona circundante y compuesto de material no consolidado.

Borde ó quiebre de la plataforma continental (Shelf-edge)

Línea a lo largo de la cual hay un marcado aumento de la pendiente en el margen de mar afuera de una plataforma continental (o isla). También se le conoce como Orla litoral y/o continental (*Shelf break*).

Cañón submarino (Canyon)

Depresión profunda, relativamente angosta y de paredes abruptas, cuyo fondo generalmente se hace más profundo en forma continúa. Es característica de algunos taludes continentales.

Cordillera Submarina Dorsal (Ridge)

Elevación larga y angosta de complejidad variable, con flancos escarpados. También se le denomina como, una elevación larga y angosta que frecuentemente separa cuencas oceánicas. Además se le llama, el principal sistema montañoso oceánico de extensión mundial (llamado también, Cordillera Meso Oceánica).

Cuenca (Basin)

Una depresión, en el fondo del mar, de extensión variable, más o menos equidimensional en planta.

Escarpe (EscarPMENT)

Pendiente submarina, característicamente lineal, muy abrupta y alargada, que divide zonas llanas o suavemente pendientes del fondo marino en zonas que no son plataformas. Se abrevia también como *Scarp*.

Fosa (Trench)

Depresión del fondo marino, larga, angosta, característicamente muy profunda y asimétrica con flancos relativamente escarpados.

Geoacústica (Geoacoustics)

Geoacústica significa, básicamente, el uso del sonido para mapear paisajes de grandes distancias. Estos mapeos utilizando el sonido incluyen el suelo marino, donde el proceso es el envío de ondas sonoras hacia el suelo marino, y el tiempo que le toma a los ecos regresar revela la profundidad del paisaje del suelo marino, otros detalles topográficos y características acerca de la composición de los sedimentos. La propagación acústica de las ondas es influenciada por varios factores en ambiente marino, tales como las condiciones de la superficie, las propiedades de la velocidad del sonido en la columna de agua, la batimetría y los tipos de sedimentos presentes en el suelo marino. Entre estos factores, el efecto más fuerte sobre la propagación de las ondas acústicas la ofrece, frecuentemente, la composición del suelo, y sus propiedades son probablemente las más difíciles de obtener.

Guyot (Guyot)

Monte submarino cuya cima es relativamente plana y de suave relieve.

Meseta submarina (Plateau)

Zona llana o casi llana de extensión considerable, con una brusca ruptura de pendiente por uno o más lados. Un área relativamente elevada de parte continental comparativamente plana, la cual es comúnmente limitado en por lo menos un lado por un descenso abrupto hacia la parte más baja. Específicamente, es una extensa área continental de más de 150 – 300 metros por encima del continente o el nivel del mar. Es más alto que una planicie y más extensa que una gran meseta.

Margen continental (Continental margin)

Zona de separación, consistiendo generalmente en una plataforma, una pendiente y el umbral continental, que separa el continente de la planicie abisal o el fondo oceánico profundo. Ocasionalmente puede haber una fosa oceánica en lugar del umbral continental.

Paleoceanografía (Paleoceanography)

Paleoceanografía es el estudio de la historia de los océanos en el pasado geológico respecto a la circulación, química, biología, geología y los patrones de sedimentación. La fuente de información proviene, en gran parte, de los sedimentos biogénicos recuperados del fondo de los océanos, por lo tanto, este campo tiene una relación muy cercana a la sedimentología y paleontología. Los estudios paleoceanográficos también están ligados íntimamente a la paleoclimatología.

Pináculo (Pinnacle)

Cualquier bloque de roca o de coral en forma de pilar o punta, aislado o coronando una cima.

Plataforma continental (Shelf)

Zona adyacente a un continente (o rodeando una isla) que se extiende desde la línea de bajamar hasta una profundidad en la que generalmente hay un incremento marcado de las pendientes hacia las profundidades oceánicas.

Provincia fisiográfica (Province)

Región identificable por un conjunto de rasgos fisiográficos semejantes, cuyas características contrastan marcadamente con las de las zonas circundantes.

Talud continental (Slope)

Declive hacia las grandes profundidades que se extiende desde el borde de la plataforma continental o hasta el punto donde hay una disminución general de la pendiente.

Terraza (Terrace)

Zona relativamente plana, horizontal o ligeramente inclinada, a veces larga y angosta, limitada por una pendiente ascendente de un lado y por otra pendiente descendente más marcada en el lado opuesto.

Barrera de Comunicacion (Sill)

Una barrera del fondo marino, de profundidad relativamente somera, que restringe el movimiento del agua entre las cuencas.

IX. Glosario Acústico

Máscara (Mask)

Este operador (operador *BITMASK* – *Echoview software*) aplica una máscara *bitmap* a otra variable. Acepta valores *Sv*, *TS*, así como valores en decibeles (*dB*) no especificados ó una variable lineal como su primer operando, y una variable Booleana como el segundo operando. Los datos correspondientes a valor 1 en la *bitmask* no son cambiados. Los datos correspondientes a valores 0 en el *bitmask* serán también convertidos a valores “no data” si la casilla de verificación “cero es no data” es señalado en las propiedades de la variable diálogo. Por el contrario, ellos serán convertidos a 999.0 (para las variables en *dB*) ó 0 (para las demás variables).

Línea bitmap (Line bitmap)

Este operador (operador *BITMASK* – *Echoview software*) es usado para crear un *bitmap* del área entre dos líneas específicas. Acepta una única variable como entrada – Esta variable es usada para determinar las veces y la geometría del *ping*.

Re-muestreo por número de pings (Resample by number of pings)

Este operador (operador de manipulación de datos – *Echoview software*) re-muestra la variable de entrada usando un número fijo de *pings* en el dominio tiempo/distancia, y en una específica profundidad superior, profundidad inferior y número de puntos de datos en el dominio de la profundidad. Acepta un único *Sv*, *TS*, valores en decibeles (*dB*) no especificados ó variable lineal como entrada y salidas del valor promedio para puntos de datos muestreados.

Conjuntos de Archivos (Filesets)

Los conjuntos de archivos (*Filesets – Echoview software*) son los medios por los que los archivos de datos son agrupados juntos. Un único archivo *EV* puede contener múltiples conjuntos de archivos, cada uno de los cuales puede contener múltiples archivos de datos. De esta manera, un único archivo *EV* puede proporcionar acceso para los datos desde múltiples transductores y, múltiples variables pueden ser analizadas desde cada transductor sin un conjunto de archivos. El conjunto primario del archivo no puede ser borrado. *Echoview* usa conjuntos de archivos para grupos de archivos de datos.

Variables (Variables)

Una variable *Echoview* es un concepto generalizado con referencia a los datos que pueden ser mostrados en un ecograma. En la práctica, esto significa tiempo versus datos etiquetados colectados en la columna de agua que puede ser mostrados en dos dimensiones: tiempo en la dimensión horizontal y, profundidad en la dimensión vertical.

Archivos EV (EV files)

Los archivos *EV* (*Echoview software*) son una poderosa herramienta de organización que permite combinar archivos de datos de la forma que uno desee hacerlo. Un archivo *EV* contiene todos los datos para un estudio completo, un archivo *EV* para cada transepto del estudio, ó un archivo *EV* para cada día del estudio. Es por esto que toda persona esta liberada de cualquier limitación artificial impuesta por el grabado de los datos en el *software* que tiende a separar la continuidad del grabado de los datos en archivos separados a veces (frecuentemente inconveniente). Cuando los archivos de los datos son adicionados en un archivo *EV*, los datos originales no son copiados ó modificados en ninguna manera. Más bien, el archivo *EV* almacena indicadores a lo largo de los datos con los resultados de cualquier corrección que pueda ser hecha a estos datos. Esto significa que:

- Un único archivo de los datos puede ser adicionado a más de un archivo *EV*.
- Los archivos *EV* son relativamente pequeños y pueden ser apoyados independientemente de los archivos de los datos.
- El archivo de los datos puede ser almacenado de forma separada de los archivos *EV* en medios de solo lectura tales como *CD-ROMs*.

No hay un límite en construir el número de archivos de datos ó el volumen total de los datos que pueden ser adicionados a un único archivo *EV*, sin embargo, el rendimiento del *Echoview* se deteriorará si muchos archivos son adicionados. El número de archivos de datos que pueden ser adicionados a un archivo *EV*, sin causar una inaceptable reducción en el rendimiento, dependerá de la potencia de su computadora (*hardware*). En muchos casos, los archivos *EV* referidos a cientos de *megabytes (MB)* de datos darán un rendimiento razonable.

Archivos de datos (Data files)

Echoview usa el término “*data file*” para referirse a los archivos de datos grabados de ecosondas y otros equipos. Los archivos de datos son por lo general información primaria archivada de una investigación. *Echoview* nunca cambiará o modificará un archivo de datos grabados. Los archivos de datos generalmente contienen datos para un periodo arbitrario de tiempo. Estos generalmente no corresponden a un transepto, u otra unidad lógica de datos, esta necesita ser analizada como una única unidad lógica. Los archivos de datos están organizados dentro de archivos *EV* para el propósito del análisis. Cuando un archivo de datos se adiciona a un archivo *EV*, los datos originales no son copiados o modificados en ninguna forma. Más bien, el archivo *EV* almacena indicadores de los datos. Los resultados de cualquiera de los cambios hecho a un archivo *EV* son también almacenados en el mismo archivo *EV*, por ejemplo, cuando se cambia los ajustes de una calibración,

solamente el valor del parámetro de la nueva calibración es almacenado más que los valores modificados de los datos. No hay un límite en construir el número de archivos de datos ó el volumen total de los datos que pueden ser adicionados a un único archivo *EV*, sin embargo, el rendimiento del *Echoview* se deteriorará si muchos archivos son adicionados. El número de archivos de datos que pueden ser adicionados a un archivo *EV*, sin causar una inaceptable reducción en el rendimiento, dependerá de la potencia de su computadora (*hardware*). En muchos casos, los archivos *EV* referidos a cientos de *megabytes (MB)* de datos darán un rendimiento razonable.

Cuadro de Acceso para el Manejo de las Variables (Variable Manager Dialog Box)

El cuadro de acceso para el manejo de las variables (*Echoview software*) es usado para:

- Crear nuevas variables virtuales.
- Borrar variables virtuales.
- Copiar variables virtuales.
- Ver las propiedades de las variables.
- Ver ecogramas.
- Ver el mapa de trayectos del crucero y visualizar los trayectos realizados.

Los comandos disponibles del cuadro de acceso para el manejo de las variables son descritos a continuación:

- **Cerrar:** Cierra el cuadro de acceso para el manejo de las variables.
- **Nuevo:** Crea una nueva variable virtual. El nuevo cuadro de acceso de la variable aparecerá.

- **Borrar:** Borra la variable virtual seleccionada. La opción Borrar no estará disponible si la variable esta siendo vista en un ecograma ó si la variable es usada como un operando por otra variable.
- **Propiedades:** Abre el cuadro de acceso de las propiedades de la variable para la variable seleccionada.
- **Copiar:** Crea una copia de una variable virtual. El nombre de la copia será: Copia de [nombre de la variable] por *default*. Hay que notar que la variable copiada tiene una configuración independiente de la variable original excepto por la configuración de la calibración si la variable original tuvo una variable sin procesar.
- **Ecograma:** Visualiza la variable seleccionada como un ecograma. Hay que notar que esto no es necesario para visualizar la variable si no esta usado como una entrada para otras variables.
- **Mapa de trayectos del crucero:** Visualiza los trayectos realizados de la variables seleccionada. El botón del mapa de trayectos del crucero solamente estará disponible para variables S_v .

Nota:

- El cuadro de acceso para el manejo de las variables puede ser usado para acceder a las propiedades de cualquier variable (sin procesar o virtual) sin necesidad de mostrar la variable en un ecograma.
- El cuadro de acceso para el manejo de las variables es “amoldable”, lo que significa que puede quedar abierta mientras uno esta haciendo otras tareas.

Ecosonda Científica (Scientific Echosounder)

Son sistemas que usan ondas acústicas para determinar las distancias recorridas desde el emisor hasta el receptor del equipo. Estos sistemas se basan en la medida del tiempo que tarda una onda acústica en recorrer la distancia existente entre el punto de partida y el fondo marino (también obstáculos en la columna de agua como son los cardúmenes de peces), donde se refleja y retorna al punto de partida. La emisión y recepción acústica se realiza generalmente a través del mismo transductor que convierte las variaciones mecánicas en pulsos eléctricos y viceversa, de forma que en la emisión, la energía eléctrica se convierte en acústica, y en la recepción de la onda acústica se transforma en señal eléctrica.

Fuerza del Volumen de Retrodispersión Acústica (S_V) (Back-scattering Acoustic Values)

La energía de un eco se denota como la Fuerza del Volumen de Retrodispersión Acústica (S_V), que se expresa en términos de dB ó m^3/m^2 (según se le obtenga en el dominio lineal o logarítmico, respectivamente). Los valores S_V representan la cantidad de energía acústica “escuchada” de un obstáculo, en este caso, de una cierta porción del suelo marino. Dependiendo de un estudio acerca de clasificación del suelo marino, los valores S_V pueden representar la naturaleza y características de los materiales observados en el fondo del mar.

X. Glosario SIG

Estacionaridad

Es una propiedad de la función aleatoria. Se dice que una función aleatoria es “estrictamente estacionaria” si su función de distribución de probabilidad es invariante a cualquier traslación respecto a un vector.

Función aleatoria

Puede ser vista como una colección de variables aleatorias que dependen de la posición.

Geoestadística

Metodología para el análisis de datos espacialmente correlacionados. El rasgo característico es el uso de variogramas de técnicas relacionadas para cuantificar y modelar la correlación espacial de la estructura. También incluye diferentes técnicas como *Kriging*, la cual utiliza modelos de correlación espacial. Los métodos geoestadísticos son aplicables en todas las ciencias de la Tierra. Pueden aplicarse para explorar los procesos responsables de la variación espacial. También pueden aplicarse donde existe una información completa obtenida por percepción remota u otra fuente, para determinar un muestreo eficiente, así como también para estimar el valor de propiedades en localidades no muestreadas.

Georeferenciación

Establecer una relación entre las coordenadas de la imagen o mapa y las coordenadas verdaderas conocidas (sistema de coordenadas particular o coordenadas geográficas).

Imágenes Raster (Estructura Raster)

Estructura celular de datos, compuesta por filas y columnas en una matriz regular (o mapa de bits) que almacenan imágenes. Grupos de células con el mismo valor pueden representar entidades geográficas. Ocupa volúmenes de almacenamiento mayores, dependiendo de su resolución.

Imágenes Vector (Estructura Vectorial)

Forma de almacenamiento de datos en un SIG de poco volumen, en el cual las distintas unidades temáticas se definen por las coordenadas de sus bordes. Una descripción topológica asociada a esa información gráfica permite reconstruir, posteriormente, las variables temáticas asociadas a esos polígonos.

Kriging

Método de interpolación del valor medio ponderado donde los pesos asignados a las muestras minimizan la varianza del error, la que se calcula como una función del modelo del variograma y localizaciones de las muestras relacionadas unas con las otras, y del punto o bloque que esta siendo estimado.

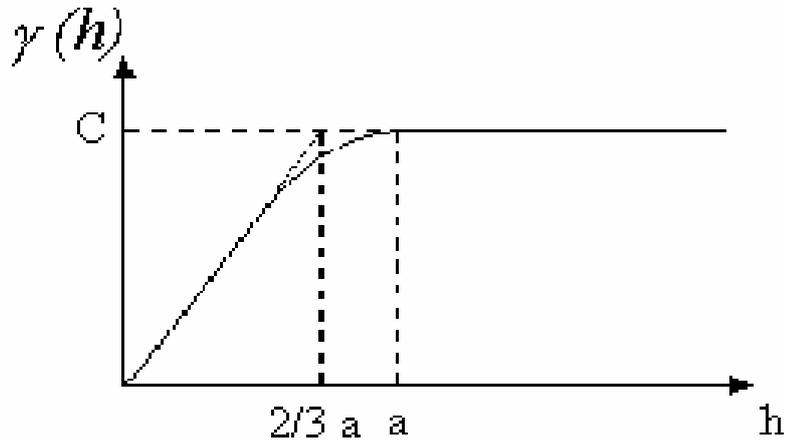
Kriging Ordinario

Es un tipo de *Kriging* que asume que la medida local no esta necesariamente cercana a la medida de la población, y que usa solamente para el estimado la muestra para la vecindad local. Es el método mas comúnmente usado por su robustez.

Modelo Esférico

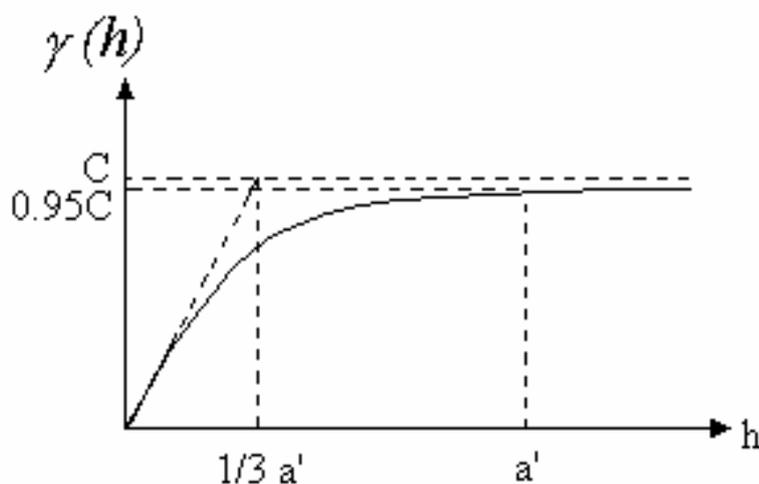
Es una de las funciones autorizadas que es usada frecuentemente como modelo de semivariograma. Este modelo es probablemente el más utilizado, es una expresión

polinomial simple (como se presenta en el gráfico). Se puede observar un crecimiento casi lineal y después a cierta distancia finita del origen se alcanza una estabilización, la meseta. La tangente en el origen encuentra a la meseta en el punto de la abscisa $(2/3)(a)$, donde “a” representa el valor del alcance.



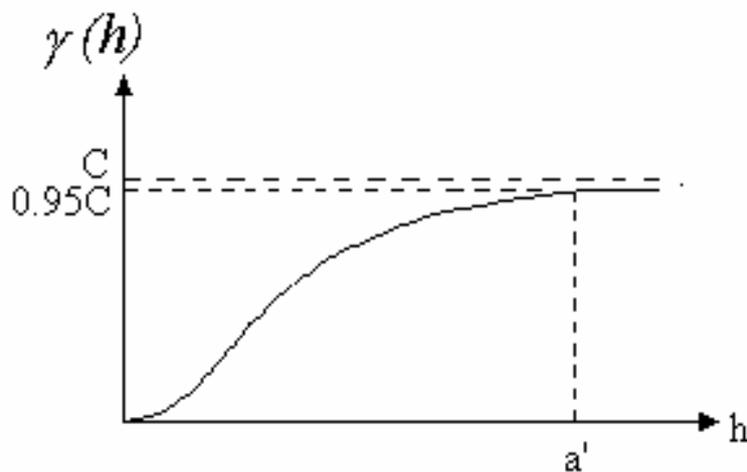
Modelo Exponencial

Es una de las funciones autorizadas que es usada frecuentemente como modelo de semivariograma. Este modelo a diferencia del Esférico crece inicialmente mas rápido y después se estabiliza de forma asintótica (como se muestra en el gráfico). Como la meseta no se alcanza a una distancia finita, se usa con fines prácticos el “alcance efectivo” o el “alcance práctico” que es a' (según el gráfico), valor que se obtiene en el punto de abscisa para el cual el modelo obtiene el 95% de la meseta, con un valor de $a' = 3a$, donde a es el parámetro de la escala. La tangente en el origen encuentra a la meseta en $a = (1/3)(a')$.



Modelo Gaussiano

Es una de las funciones autorizadas que es usada frecuentemente como modelo de semivariograma. Este es un modelo extremadamente continuo (como se muestra en el grafico). Inicialmente presenta un comportamiento parabólico en el origen, después, al igual que en modelo Exponencial, este alcanza la meseta de forma asintótica. El alcance practico tiene un valor de $a = 1.73a$; que es el valor de la abscisa donde se alcanza el 95% de la meseta.



Nodo

Punto de intersección entre dos líneas contiguas.

Resolución (Resolución Espacial)

Medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de las imágenes. Refiere al tamaño de la mínima unidad de información en el terreno (píxel).

RMS (Root Mean Square)

El error RMS mide cuantas unidades de las coordenadas del mapa (georeferenciado) difieren de las unidades de las coordenadas de la imagen original. Lo ideal es que el valor

sea 0, aunque sólo en teoría. Dependiendo de la escala del mapa, existen ciertas tolerancias de error, establecidas según la institución de USA, *National Map Accuracy Standards*:

- Para mapas de escala 1:5,000 el error RMS debe ser menor a 15.6 unidades.
- Para mapas de escala 1:10,000 el error RMS debe ser menor a 7.8 unidades.
- Para mapas de escala 1:20,000 el error RMS debe ser menor a 4.0 unidades.
- Para mapas de escala 1:40,000 el error RMS debe ser menor a 2.0 unidades.

Archivo SHP (Shapefile)

Formato de archivo de estructura vectorial y no topológico, usado por el software de ESRI, ArcView GIS para mostrar la ubicación geométrica de puntos o líneas o polígonos; las tres formas básicas para representar todos los datos geográficos en un SIG.

Sistema de Navegación Global (Sistema de Posicionamiento Global)

Sistema que consta de 24 satélites que circulan el planeta con una frecuencia de dos veces al día, por una órbita muy precisa y transmitiendo información a la tierra. Con el uso de receptores, se triangulan por lo menos tres de estas señales, permitiendo determinar la posición exacta del receptor y su altitud aproximada. El error de estimación de la posición varía según el modelo del receptor, las condiciones atmosféricas y, la geometría y número de satélites.

Tabla de atributos

Usado por el SIG *ArcView*, permite trabajar con fuentes de datos tabulados que luego se pueden incorporar a mapas, simbolizarlos y ordenarlos (*query*). Representa los datos tabulares, más no los contiene, de forma que la tabla es dinámica. Esto significa que si un dato es actualizado, la tabla y el mapa se actualizan automáticamente.

Tema (Theme)

Usado por el SIG *ArcView*, representa todas las entidades de una forma en particular (punto, línea o polígono). Las propiedades de un tema incluyen la escala de visualización, las etiquetas de texto, etc. Puede representar un *shapefile* o puede convertir su contenido en uno (dependiendo del tipo de archivo mostrado).

View

Usado por el SIG *ArcView*, es el componente de un proyecto donde se integran distintos temas. Los temas pueden ser visualizados uno encima del otro (en forma de capas) y su orden puede ser modificado, así como el estilo de sus leyendas. Las propiedades del *view* incluyen la proyección utilizada, las unidades del mapa y las unidades de distancia. Temas con diferentes propiedades no pueden ser vistos en un mismo *view*.

XI. Anexos

Anexo 1

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	235275	1106283	886933	1028322	803468	1176772	785007	690218
<i>Lag Size</i>	7011.3	10841	10709	8574.7	7296.7	10644	7803.2	11878
<i>Major Range</i>	79590	123060	121570	101640	82830	120830	88580	134840
<i>Partial Sill</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nugget</i>	1443.9	2194.9	2251.4	20.923	2.9063	371.78	443.41	88.895

Tabla 3. Número de puntos batimétricos “sucios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (*Spherical Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	235275	1106283	886933	1028322	803468	1176772	785007	690218
<i>Lag Size</i>	7011.3	10841	10709	8574.7	7296.7	10644	7803.2	11878
<i>Major Range</i>	79590	123060	121570	27563	32745	120830	88580	134840
<i>Partial Sill</i>	0	0	0	625.19	861.72	0	0	0
<i>Nugget</i>	1443.9	2194.9	2251.4	20.923	2.9063	371.78	443.41	88.895

Tabla 4. Número de puntos batimétricos “sucios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (*Exponential Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	235275	1106283	886933	1028322	803468	1176772	785007	690218
<i>Lag Size</i>	7011.3	10841	10709	8574.7	7296.7	10644	7803.2	11878
<i>Major Range</i>	83107	128500	88502	101640	43740	58671	92493	47259
<i>Partial Sill</i>	526230	504420	263080	20297	2044.6	5200.5	141460	88895
<i>Nugget</i>	1443.9	2194.9	2251.4	20.923	2.9063	371.78	443.41	88.895

Tabla 5. Número de puntos batimétricos “sucios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Gausiano (*Gaussian Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	230852	1062873	854166	1008435	782043	1157961	771259	680988
<i>Lag Size</i>	6962.8	10773	10578	8545.6	7198.5	10510	7929.3	11864
<i>Major Range</i>	79040	122290	120080	101290	81715	119310	90011	134680
<i>Partial Sill</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nugget</i>	1030.3	1196.9	2338.5	19.597	2.6278	337.18	444.02	83.981

Tabla 6. Número de puntos batimétricos “limpios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (*Spherical Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	230852	1062873	854166	1008435	782043	1157961	771259	680988
<i>Lag Size</i>	6962.8	10773	10578	8545.6	7198.5	10510	7929.3	11864
<i>Major Range</i>	79040	122290	120080	26733	33964	119310	90011	134680
<i>Partial Sill</i>	0	0	0	531.36	882.1	0	0	0
<i>Nugget</i>	1030.3	1196.9	2338.5	19.597	2.6278	337.18	444.02	83.981

Tabla 7. Número de puntos batimétricos “limpios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (*Exponential Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	230852	1062873	854166	1008435	782043	1157961	771259	680988
<i>Lag Size</i>	6962.8	10773	10578	8545.6	7198.5	10510	7929.3	11864
<i>Major Range</i>	82532	127700	90381	101290	41806	54979	93988	46728
<i>Partial Sill</i>	424890	451850	240560	19066	1745.7	4526.1	136390	83981
<i>Nugget</i>	1030.3	1196.9	2338.5	19.597	2.6278	337.18	444.02	83.981

Tabla 8. Número de puntos batimétricos “limpios” evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Gausiano (*Gaussian Model*) por cada zona de estudio.

Anexo 2

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	4423.7	1300.9	10453	6875	7080.4
<i>Major Range</i>	82007	89188	122240	50216	15420	118660	78043	80375
<i>Partial Sill</i>	0	0	0	0	1.4955	0	0	0
<i>Nugget</i>	22.792	35.057	26.76	19.861	15.293	22.692	16.409	17.029

Tabla 9. Número de valores Sv max evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (*Spherical Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	4423.7	1300.9	10453	6875	7080.4
<i>Major Range</i>	52674	93129	122240	50216	15420	118660	12524	80375
<i>Partial Sill</i>	11.758	0.75023	0	0	1.0409	0	14.039	0
<i>Nugget</i>	22.792	35.057	26.76	19.861	15.293	22.692	16.409	17.029

Tabla 10. Número de valores Sv max evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (*Exponential Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	4423.7	1300.9	10453	6875	7080.4
<i>Major Range</i>	14464	93129	101490	17421	6966.4	41446	81491	23513
<i>Partial Sill</i>	43.022	13.562	15.763	8.4498	7.5138	4.685	11.837	12.847
<i>Nugget</i>	22.792	35.057	26.76	19.861	15.293	22.692	16.409	17.029

Tabla 11. Número de valores Sv max evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Gausiano (*Gaussian Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	4424.6	2163.6	10453	6875	5592.3
<i>Major Range</i>	78537	93129	122240	50227	24561	123900	78043	63482
<i>Partial Sill</i>	0	2.1259	0	0	0	0	0	0
<i>Nugget</i>	17.332	22.003	14.828	16.061	10.461	13.163	9.8766	12.518

Tabla 12. Número de valores *Sv mean* evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (*Spherical Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	4424.6	2163.6	10453	6875	5592.3
<i>Major Range</i>	78537	93129	19616	50227	24561	19042	12524	63482
<i>Partial Sill</i>	0	2.0786	7.9122	0	0	4.1024	10.369	0
<i>Nugget</i>	17.332	22.003	14.828	16.061	10.461	13.163	9.8766	12.518

Tabla 13. Número de valores *Sv mean* evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (*Exponential Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	4424.6	2163.6	10453	6875	5592.3
<i>Major Range</i>	13274	17415	94995	18129	7404	67307	81491	17771
<i>Partial Sill</i>	34.636	5.1967	12.577	9.3927	5.026	3.4067	7.5383	10.656
<i>Nugget</i>	17.332	22.003	14.828	16.061	10.461	13.163	9.8766	12.518

Tabla 14. Número de valores *Sv mean* evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Gaussiano (*Gaussian Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	8385.2	4483.8	10453	6875	10582
<i>Major Range</i>	78537	89188	116830	95186	50899	118660	81491	120120
<i>Partial Sill</i>	0	0	0	0	0	0	0.3088	0
<i>Nugget</i>	25.566	5.2031	72.402	61.317	68.423	58.622	42.702	64.358

Tabla 15. Número de valores $Sv\ min$ evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Esférico (*Spherical Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	8385.2	4483.8	10453	6875	10582
<i>Major Range</i>	12604	14313	95230	99392	50899	118660	81491	120120
<i>Partial Sill</i>	29.099	73.803	0	1.7011	0	0	128.23	0
<i>Nugget</i>	25.566	5.2031	72.402	61.317	68.423	58.622	42.702	64.358

Tabla 16. Número de valores $Sv\ min$ evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Exponencial (*Exponential Model*) por cada zona de estudio.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
N° de datos	35518	185500	142548	163351	126777	172494	129200	105772
<i>Lag Size</i>	6918.5	7856.8	10768	8385.2	4483.8	10453	6875	10582
<i>Major Range</i>	82007	85285	62794	99392	12924	57865	75383	26652
<i>Partial Sill</i>	51.077	124.1	115.42	117.52	68.263	43.126	108.07	209.4
<i>Nugget</i>	25.566	5.2031	72.402	61.317	68.423	58.622	42.702	64.358

Tabla 17. Número de valores $Sv\ min$ evaluados y valores geoestadísticos obtenidos de la evaluación con el modelo Gaussiano (*Gaussian Model*) por cada zona de estudio.

XII. Apendices

Apéndice 1

1. Procedimientos y metodologías para el estudio del suelo marino

– Sondeo de la morfología del margen continental

Representar en forma de imagen la morfología submarina requiere de una extensa cartografía y mapeado batimétrico del área. Los márgenes continentales, particularmente márgenes activos o convergentes, muestran grandes variaciones en la profundidad de agua y están entre las regiones más escarpadas de la superficie de la tierra. Esto requiere considerables esfuerzos en la adquisición, procesamiento y visualización de las mediciones batimétricas. (Weinrebe & Greinert, 2000).

– Investigaciones acústicas y geofísicas

Para estudiar las estructuras y formaciones a lo largo de los márgenes continentales es necesario utilizar diversos equipos acústicos y geofísicos. El estudio con estos sofisticados equipos tienen una gran capacidad de precisión así como de confiabilidad, es por lo tanto que son utilizados de forma más común en cada investigación alrededor del mundo. Por otro lado, estos cuentan con un margen de error (a veces muy grande) que pueden confundir y variar las características de las zonas estudiadas (por lo general el suelo y por debajo del suelo marino) debido muchas veces a las condiciones del mar, condiciones del clima o a las plataformas (buques de investigación) donde se realiza el estudio. Algunos aspectos positivos y negativos para el uso de estos equipos son mostrados a continuación:

– *Emisión de ruido*

La emisión de ruido es importante en cualquier medida científica, pero es particularmente importante cuando se graba información sísmica y acústica a bordo de un buque científico “ruidoso”. El espectro del ruido acústico producido por un buque científico parece variar con el estado cambiante del mar (incremento de potencia del motor, por consecuencia, más ruido) y las actividades del buque. Afortunadamente, el carácter espectral de gran parte de este ruido proporciona una oportunidad para removerlas de las señales de banda ancha de interés.

Los buques en general son conocidos también por generar fuertes campos eléctricos y electromagnéticos, los cuales contribuyen con el incremento del ruido electrónico en cualquier equipo electrónico a bordo. También existe una emisión problemática por sí mismo en el buque. Diferentes partes de la estructura del mismo así como el casco, tendrán varios niveles dinámicos intrínsecos debido al complicado recorrido de la corriente eléctrica en sus diferentes momentos. (*Shipboard Scientific Party - Leg 164, 1996*).

– *Fuentes de ruido eléctrico*

La información de carga eléctrica en un típico buque de casco de acero en el océano varía de forma temporal y espacial. Esto se debe a que los flujos de corriente inducidos por el movimiento de la fuerza eléctrica y una pluralidad de estos caminos van incrementando el problema. Esto es excepto si los sistemas sísmicos de grabación son reducidos al mínimo, entonces estas variaciones de fondo en el problema de banda ancha aparecen como ruido en la señal de la banda. La medida de todos estos problemas es complicada. (Hoskins y Wood, 1996; *Shipboard Scientific Party - Leg 164, 1996*).

- **Metodología para el estudio morfológico y batimétrico del suelo marino en el margen continental peruano utilizando información hidroacústica**

La metodología usada para evaluar la información batimétrica obtenida en prospecciones pesqueras utilizando equipos hidroacústicos fue desarrollada por la Unidad de Tecnologías de Detección del Instituto del Mar del Perú (UTD – IMARPE).

Los medios físicos utilizados para esta evaluación fueron:

- Computadora Pentium 4 (*Desktop*) con 110 HD (Disco duro)
- Procesador de 3.0 GHz
- Memoria RAM de 512 MB
- Lectora DVD/CD-RW (CD regrabable)

– **Evaluación batimétrica (Profundidad, latitud y longitud)**

Los cruceros de evaluación hidroacústica para recursos pesqueros trabajan con ecosondas científicas *SIMRAD EK-500*, *EY-500* y *EK-60* transductores de tecnología *Split Beam* (Reynisson, 1991; citado por Gutiérrez y Herbozo, 2004); los cuales trabajan con frecuencias de 38 kHz y 120 kHz, respectivamente (denominadas de baja frecuencia).

Para evaluación acerca de la morfología del suelo marino, la adecuada resolución de la información batimétrica obtenida con la frecuencia de 120 kHz es (en metros) desde 0 hasta 300 metros de profundidad, dependiendo de las condiciones del mar. De forma similar, la adecuada resolución de información batimétrica obtenida con la frecuencia de 38 kHz es (en metros) desde 0 hasta 2000 metros de profundidad, dependiendo de las condiciones del mar y los ajustes del ecosonda (por lo general todas las calibraciones son

similares). La penetración del eco en la columna de agua para obtener datos de batimetría depende del ajuste que se realice a la longitud de pulso transmitida (ms) (*Transmitted pulse length*) al momento de calibrar el ecosonda (por lo general en estas calibraciones el valor de la longitud de pulso transmitido es de 1 milisegundo ó ms).

La calibración del ecosonda en los 35 cruceros evaluados se realizó empleando un blanco estándar de acuerdo con lo descrito en ICES, 1987.

- Calibración y reparación de ecogramas virtuales (Archivos *EVI*)

Pasos a seguir:

1. De la información obtenida en un crucero se ingresa todos los datos al disco duro de la computadora que tenga instalado el software *Sonar Data Echoview* (la versión 1 trabaja con *Windows 98*; la versión 2 y 3 de este software trabajan en *Windows XP*).
2. Abrir el software *Sonar Data Echoview* y adicionar todos los archivos con extensión **.ek5* y **.dgo1*; dependiendo del tipo de crucero.
3. Observar en *GPS fixes – Cruise Track* si los transeptos del buque se realizaron sobre la zona de estudio (en este caso de 11°S a 15°S).
4. Escoger SvQ_1 (power) T_1 (datos muestreados) ó SvW_1 (power) T_1 (datos crudos) para calibrar los ecogramas virtuales del *Primary fileset* (SvQ_1 telegrams T_1 ó SvW_1 telegrams T_1).
5. Los datos que se ingresan para calibrar todos los ecogramas digitales son:
 - *Absorption coefficient* (coeficiente de absorción) (dB/m)

- *Sound speed* (velocidad del sonido) (m/seg)
- *Transmitted power* (potencia transmitida) (W)
- *Equivalent 2-way solid beam angle* (Ángulo de haz sólido bidireccional equivalente)
- *Sv gain* (Ganancia Sv) (dB)
- *Wavelength* (longitud de onda) (m)
- *Transmitted pulse length* (longitud de pulso transmitido) (ms)
- *Draft correction* (m)
- *Nominal degrees*

Todos los datos anteriores se obtienen al momento de la calibración, sólo *Wavelength* (Longitud de onda) es el resultado de la división entre *Sound speed* (velocidad del sonido) y la frecuencia utilizada en Hz. Los datos de calibración fueron obtenidos antes del crucero y dependen de las condiciones del mar (columna de agua).

6. Se realiza la separación horizontal del ecograma *Primary fileset* en espacios (UBM – Unidad Básica de Muestreo) de 18.53 metros (0.01 milla náutica), lo cual indica que se produce por cada segundo tres emisiones de eco. La separación vertical del ecograma depende de la frecuencia; para 120 Khz. se utiliza cada 150 metros y para 38 Khz., cada 200 metros. En este tipo de trabajo no es recomendable utilizar separación vertical.
7. Se observa la profundidad máxima en el ecograma (según el tipo de frecuencia utilizada) y de acuerdo a dicha profundidad, se “corrige” la línea de fondo. Es importante sólo procesar información confiable.

8. Se elige la opción *EV File properties* y en la opción *Export* se activan todos los íconos. Si se desea tener todos los datos en un solo archivo se escoge la opción *single file*. Luego se elige la opción *Lines* y se crea la línea de Fondo y la línea de Fondo 15. La línea Fondo es la misma *SvQ₁* ó *SvW₁* (*Sounder detected-bottom*). La línea de Fondo 15 toma como referencia la línea Fondo y se le agrega 15 metros por debajo de ésta. Se aplican y aceptan todos los cambios hechos en *EV File properties*.

9. Cada vez que se adicionan archivos **.ek5* ó **.dgo1* provenientes de diferentes días, es necesaria la creación de nuevas líneas Fondo y Fondo 15.

10. Se elige la opción *Variable manager* y se crean las siguientes opciones (algoritmo):

1° Se crea la opción (variable) *Resample*, la cual esta determinada por *Resample by number of pings*. Esta opción permite evaluar el ecograma según el número de *pings*.

En ésta opción se realizan los siguientes cambios:

- *Resample* → *Input* → *Number of pings per sample* → 1
- *Resampling mode* → *Average all pings*.
- *Output* → *Upper depth (0.00)* → *Lower depth* (según el tipo de frecuencia) → *Number of datapoints (9999)*.

2° Se crea la opción (variable) *Line bitmap*, la cual esta determinada por *Line bitmap*.

En esta opción se realizan los siguientes cambios:

- *Operands* → *Operator* → *Line bitmap*
- *Operand 1* → *Resample*
- *Line bitmap* → *Start line* → *Fondo*
Stop line → *Fondo 15*

3° La opción *Mask* solamente se utiliza cuando se está trabajando con el *software* *Sonar Data Echoview* versión 3. (Llave #3).

- **Corrección de data batimétrica usando información oceanográfica**

Para la corrección de toda la información batimétrica obtenida de los 35 cruceros hidroacústicos (IMARPE) en el área central-sur del margen continental peruano, comprendido entre los grados 11°S y 15°S; se utilizó una serie de procedimientos detallados en el Informe Paleoceanográfico-Acústico 2004, desarrollado por la Unidad de Tecnologías de Detección de IMARPE (UTD – IMARPE), en el cual se procesó toda la información acústica obtenida durante el crucero Paleoceanográfico 0405 (Mayo del 2004) (Gutiérrez y Herbozo, 2004).

Estos procedimientos que se muestran a continuación fueron adaptados al presente estudio debido a que la densidad actual de toda la información batimétrica recuperada de los 35 cruceros es mucho mayor (aproximadamente 6.2 millones de puntos batimétricos), que la recuperada del crucero Paleoceanográfico en el año 2004 (aproximadamente 100,000 puntos batimétricos).

- **Corrección de las lecturas batimétricas**

La corrección de los valores batimétricos obtenidos implicó determinar la velocidad del sonido por capas de 1 metro (*layers*) en función de la temperatura corregida por la presión y salinidad obtenidas con CTD en 4 estaciones oceanográficas durante el crucero Panorama *Leg 3a* (del 31 de Diciembre de 1997 al 3 de Enero de 1998) (Levin *et al.*, 2002) realizado en el buque de investigación *R/V Melville*. La información oceanográfica utilizada para esta

corrección fue tomada durante el evento El Niño 97-98, donde las condiciones oceanográficas fueron distintas a un año No-Niño.

Toda la información batimétrica obtenida de los 35 cruceros fue separada según la profundidad de las estaciones (Data menor a 304 metros; Estación A – 303 metros; Estación B – 556 metros; Estación C – 820 metros, y Estación D – 1200 metros) y se asumió condiciones similares para toda el área estudiada (desde los 11°S hasta 15°S).

Para la corrección de los datos batimétricos se recurrió a la ecuación propuesta por Mckenzie (1981) (citado por Gutiérrez y Herbozo, 2004):

$$c = 1448.96 + 4.591T - 0.05304T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.34(S - 35) + 0.0163D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 0.01025T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3$$

Donde, “T” es la temperatura en grados Celsius, “S” es la salinidad en *ups* y “D” es la profundidad en metros (en este caso la temperatura estaba corregida por la presión) (Levin *et al.*, 2002).

Determinada la velocidad para el punto de profundidad media en cada capa (capas de 1 metro), se estimó el tiempo necesario para que la onda de sonido la recorra verticalmente. Los tiempos parciales “ t_i ” así determinados son consecutivamente desagregados del tiempo total “ t ”:

$$t = d / c_x$$

$$t = t_1 + t_2 + \dots + t_n = \sum t_i$$

Donde, “d” es la profundidad medida por el ecosonda y “c_x” es la velocidad nominal del sonido calculada durante la calibración del ecosonda.

La profundidad corregida es obtenida sumando la altura de cada capa más la distancia recorrida durante el tiempo “t_n”:

$$d_c = d_1 + d_2 + \dots + c_n \cdot t_n = \sum_1^{n-1} d_i + c_n \cdot t_n$$

– Corrección “rápida” de las lecturas batimétricas – Caso Cruceros

Alemanes

La metodología empleada para corregir de forma “rápida” las lecturas batimétricas de los cruceros alemanes *GEOPECO SO-146* (Kukowski y Bialas, 2000) y *Peru Upwelling SO-147* (Kudrass *et al.*, 2000) fue deducido de la corrección batimétrica hecha a los 35 cruceros hidroacústicos (IMARPE) utilizando la información oceanográfica obtenida en el crucero *Panorama Leg 3a* (Levin *et al.*, 2002).

El motivo principal para el desarrollo de esta metodología fue el tiempo necesario para aplicar la corrección completa (como se realizó en los 35 cruceros IMARPE); debido a la gran cantidad de puntos batimétricos obtenidos en estos cruceros. La cantidad aproximada de puntos batimétricos entre las latitudes 11°S y 15°S fueron:

- *GEOPECO SO-146* : 13.3 millones de puntos batimétricos.
- *Peru Upwelling SO-147* : 18.4 millones de puntos batimétricos.
- *35 Cruceros IMARPE* : 6.2 millones de puntos batimétricos.

Este procedimiento fue adaptado a estos cruceros (*GEOPECO SO-146 y Peru Upwelling SO-147*) debido a que la densidad de puntos batimétricos es demasiada grande para ser procesada en la hoja de cálculo *Microsoft Excel* (factor tiempo). Normalmente, la cantidad promedio de puntos batimétricos por crucero (IMARPE) es de 180,000; en cambio, la cantidad de puntos batimétricos obtenidos de estos dos cruceros juntos (*GEOPECO SO-146 y Peru Upwelling SO-147*) pasan los 30'000,000 de puntos.

En el proceso completo de corrección de las lecturas batimétricas se observó que cada hoja de cálculo *Excel* solamente es capaz de procesar, de forma normal, alrededor de 13,000 filas utilizando las 256 columnas. El número de columnas a utilizar depende de cada estación ya que cada estación, como en el caso de la Estación D (1200 metros), utiliza 5 hojas de cálculo *Excel* con todas las columnas completas (256 columnas) para tal corrección de puntos batimétricos con información oceanográfica (es decir; 1200 capas de 1 metro de información oceanográfica, ósea, 1200 columnas en 5 hojas de cálculo *Excel*).

Debido a que los cruceros alemanes en cuestión fueron realizados entre los meses de Marzo a Julio del año 2000, se utilizó la velocidad del sonido determinada para el crucero 0006-07 Olaya (Junio - Julio del 2000: velocidad del sonido = 1513,476 m/s) para poder aplicar la corrección oceanográfica “rápida” a los datos batimétricos. Según la base de datos satelitales sobre Anomalías del Nivel del Mar (*Sea Level Anomalies*) de *AVISO* de Francia, y datos de Temperatura Superficial del Mar Peruano de la Unidad de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (UPRSIG) de IMARPE; las condiciones oceanográficas en éstas áreas fueron similares (desde los 11°S hasta los 15°S) durante los meses que se realizaron los cruceros alemanes.

La información batimétrica sin corrección oceanográfica obtenida en los cruceros alemanes fue brindada de forma gratuita por la “Agencia Federal Marítima e Hidrográfica” de Alemania (BSH, 2005); es por eso que fue necesario aplicarle la misma corrección oceanográfica utilizada por los 35 cruceros hidroacústicos procesados (IMARPE) para estandarizar los posibles errores que pueda tener este trabajo.

Toda la información batimétrica obtenida de cada crucero alemán (GEOPECO *SO-146* y *Peru Upwelling SO-147*) fue separada según la profundidad de las estaciones (Data menor a 304 metros; Estación A – 303 metros; Estación B – 556 metros; Estación C – 820 metros, y Estación D – 1200 metros) y se asumió condiciones similares para toda el área estudiada (desde los 11°S hasta 15°S).

➤ Metodología

Los pasos que se siguieron para corregir de forma “rápida” los puntos batimétricos de los cruceros GEOPECO *SO-146* y *Peru Upwelling SO-147*, fueron:

- Luego de separar todos los puntos batimétricos según la profundidad de las estaciones (Data menor a 304 metros; Estación A – 303 metros; Estación B – 556 metros; Estación C – 820 metros, y Estación D – 1200 metros), se aplicaron los valores resultantes obtenidos de la hoja de cálculo *Excel* durante la corrección oceanográfica del crucero 0006-07 Olaya.
- Para cada estación se obtuvieron similares valores de corrección según la profundidad final de muestreo por hoja de cálculo (por ejemplo, 240 metros). Los valores que se utilizaron por estación y capas fueron los siguientes:

1. Data menor a 304 metros

- $D (1503.9/1513.476) + 1.5 = D_1$ (puntos entre 0 y 50 metros)
- $D (1503.9/1513.476) + 1.85 = D_1$ (puntos entre 50 y 100 metros)
- $D (1503.9/1513.476) + 2.45 = D_1$ (puntos entre 100 y 200 metros)
- $D (1503.9/1513.476) + 2.9 = D_1$ (puntos entre 200 y 240 metros)
- $D_1 (1494.9/1513.476) + 0.16 + 7 = D_{\text{final}}$

Donde, “D” es la profundidad en metros y el valor constante de 1513.476 es la velocidad del sonido del crucero. De acuerdo a la corrección hecha en la hoja de cálculo *Excel*, el valor de 1503.9 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 240 metros y el valor de 1494.9 es la velocidad del sonido determinada para la capa final de 303 metros. Los valores que se suman, tanto a “D” como a “D₁”; son constantes observadas (en metros) en el proceso de corrección completa en la hoja de cálculo *Excel*. El valor de 7 es el calado de crucero (en metros) del buque *FS SONNE* donde se realizó la investigación.

2. Estación A (303 metros)

- $D (1503.9/1513.476) + 2.94 = D_1$
- $D_1 (1494.9/1513.476) + 0.16 + 7 = D_{\text{final}}$

Donde, “D” es la profundidad en metros y el valor constante de 1513.476 es la velocidad del sonido del crucero. De acuerdo a la corrección hecha en la hoja de cálculo *Excel*, el valor de 1503.9 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 240 metros y el valor de 1494.9 es la velocidad del sonido determinada para la capa final de 303 metros. Los valores que se suman, tanto a “D” como a “D₁”; son constantes observadas (en metros) en

el proceso de corrección completa en la hoja de cálculo *Excel*. El valor de 7 es el calado de crucero (en metros) del buque *FS SONNE* donde se realizó la investigación.

3. Estación B (556 metros)

- $D (1505.7/1513.476) + 2.56 = D_1$
- $D_1 (1488/1513.476) + 1.46 = D_2$
- $D_2 (1487.2/1513.476) + 0.02 + 7 = D_{\text{final}}$

Donde, “D” es la profundidad en metros y el valor constante de 1513.476 es la velocidad del sonido del crucero. De acuerdo a la corrección hecha en la hoja de cálculo *Excel*, el valor de 1505.7 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 240 metros, el valor de 1488 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 480 metros y el valor de 1487.2 es la velocidad del sonido determinada para la capa final de 556 metros. Los valores que se suman, tanto a “D”, “D₁” y “D₂”; son constantes observadas (en metros) en el proceso de corrección completa en la hoja de cálculo *Excel*. El valor de 7 es el calado de crucero (en metros) del buque *FS SONNE* donde se realizó la investigación.

4. Estación C (820 metros)

- $D (1505/1513.476) + 2.70 = D_1$
- $D_1 (1487.8/1513.476) + 1.41 = D_2$
- $D_2 (1485.2/1513.476) + 0.15 = D_3$
- $D_3 (1483.2/1513.476) + 0.10 + 7 = D_{\text{final}}$

Donde, “D” es la profundidad en metros y el valor constante de 1513.476 es la velocidad del sonido del crucero. De acuerdo a la corrección hecha en la hoja de cálculo *Excel*, el valor de 1505 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 241 metros, el valor de 1487.8 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 481 metros, el valor de 1485.2 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 721 metros y el valor de 1483.2 es la velocidad del sonido determinada para la capa final de 820 metros. Los valores que se suman, tanto a “D”, “D₁”, “D₂” y “D₃”; son constantes observadas (en metros) en el proceso de corrección completa en la hoja de cálculo *Excel*. El valor de 7 es el calado de crucero (en metros) del buque *FS SONNE* donde se realizó la investigación.

5. Estación D (1200 metros)

- $D (1505.2/1513.476) + 2.55 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.22 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.43 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) + 0.01 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.10 + 7 = D_{\text{final}}$

Donde, “D” es la profundidad en metros y el valor constante de 1513.476 es la velocidad del sonido del crucero. De acuerdo a la corrección hecha en la hoja de cálculo *Excel*, el valor de 1505.2 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 240 metros, el valor de 1490.2 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 480 metros, el valor de 1483.6 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 720 metros, el valor de 1483 es la velocidad del sonido determinada para la capa de 960 metros y el valor de 1482.9 es la velocidad del sonido determinada para la capa final de 1198 metros. Los valores que se suman, tanto a “D”, “D₁”, “D₂”, “D₃” y “D₄”; son constantes observadas (en metros) en el

proceso de corrección completa en la hoja de cálculo *Excel*. El valor de 7 es el calado de crucero (en metros) del buque *FS SONNE* donde se realizó la investigación.

- Debido a que en estos cruceros (*GEOPECO SO-146* y *Peru Upwelling SO-147*) se obtuvieron valores de batimetría de zonas más profundas en el margen continental en ésta área de estudio (11°S – 15°S), también tuvieron que ser corregidos de forma “rápida” para lo cual se obtuvieron los siguientes valores de corrección obtenidos en la Estación D, donde sólo cambian las constantes observadas que se suman (en metros). Estos son:

1. Valores a 2000 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.55 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.20 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.43 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.01 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.09 + 7 = D_{\text{final}}$

2. Valores a 2500 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.57 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.19 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.44 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.03 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.10 + 7 = D_{\text{final}}$

3. Valores a 3000 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.58 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.18 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.44 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.04 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.12 + 7 = D_{\text{final}}$

4. Valores a 3500 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.60 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.17 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.45 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.05 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.13 + 7 = D_{\text{final}}$

5. Valores a 4000 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.61 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.15 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.45 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.06 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.14 + 7 = D_{\text{final}}$

6. Valores a 4500 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.63 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.14 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.45 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.08 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.16 + 7 = D_{\text{final}}$

7. Valores a 5000 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.64 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.13 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.46 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.09 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.17 + 7 = D_{\text{final}}$

8. Valores a 5500 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.66 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.12 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.46 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.10 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.19 + 7 = D_{\text{final}}$

9. Valores a 6000 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.67 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.11 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.47 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.11 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.20 + 7 = D_{\text{final}}$

10. Valores a 6500 metros

- $D (1505.2/1513.476) + 2.69 = D_1$
- $D_1 (1490.2/1513.476) + 1.10 = D_2$
- $D_2 (1483.6/1513.476) + 0.47 = D_3$
- $D_3 (1483/1513.476) - 0.13 = D_4$
- $D_4 (1482.9/1513.476) - 0.21 + 7 = D_{\text{final}}$

Apéndice 2

2. Metodología para la evaluación sedimentológica del suelo marino en el margen continental peruano utilizando información de Retrodispersión Acústica (Sv)

La metodología usada para evaluar la información de retrodispersión acústica obtenida en prospecciones pesqueras utilizando equipos hidroacústicos fue desarrollada por la Unidad de Tecnologías de Detección del Instituto del Mar del Perú (UTD – IMARPE).

Los medios físicos utilizados para esta evaluación fueron:

- Computadora Pentium 4 (*Desktop*) con 110 HD (Disco duro)
- Procesador de 3.0 GHz
- Memoria RAM de 512 MB
- Lectora DVD/CD-RW (CD regrabable)

- Evaluación sedimentológica (Sv , latitud y longitud)

Los cruceros de evaluación hidroacústica para recursos pesqueros trabajan con ecosondas científicas *SIMRAD EK-500*, *EY-500* y *EK-60* transductores de tecnología *Split beam* (Reynisson, 1991; citado por Gutiérrez, 2004); los cuales trabajan con frecuencias de 38 kHz y 120 kHz, respectivamente (denominadas de baja frecuencia).

Para la evaluación exploratoria sobre clasificación sedimentológica del suelo marino (Gutiérrez y Herbozo, 2004), se obtuvieron grandes cantidades de valores de *Fuerza Media del Volumen de Retrodispersión Acústica (Sv)* de las frecuencias de 38 y 120 kHz, de los 35

cruceros evaluados. La calibración del ecosonda en los 35 cruceros se realizó empleando un blanco estándar de acuerdo con lo descrito en ICES (1987).

El uso recomendable de los valores obtenidos con la frecuencia de 120 kHz para la evaluación sedimentológica es hasta una profundidad de 250 metros en el suelo marino. En el mismo sentido, los valores recomendables para la frecuencia de 38 kHz para la evaluación sedimentológica son hasta una profundidad de 1000 metros del suelo marino.

Ya que se exportaron valores S_v con ambas frecuencias durante esta investigación; es necesario, para la creación de los mapas, interpolar valores S_v provenientes de un mismo coeficiente de absorción, ya que los coeficientes de absorción son distintos para ambas frecuencias investigadas (dependiendo de la calibración) (Gutiérrez, 2005; comunicación personal).

Se evalúa los primeros 15 metros de los valores S_v (partiendo del suelo marino), donde los valores van cambiando con el aumento o disminución de la profundidad. Esta idea fue planteada por el Ing. Mariano Gutiérrez (Jefe de la Unidad de Tecnologías de Detección UTD – IMARPE).

Todos los valores de S_v fueron obtenidos con equipos *EK-500*, *EY-500* y *EK-60*, los cuales fueron evaluados desde la superficie del suelo marino hasta 15 metros por debajo. El equipo *EK-60* muestra una mejor resolución de las características del sedimento en el suelo marino, debido a que este equipo si puede obviar los valores de S_v obtenidos en la columna de agua y sólo evaluar los valores de S_v obtenidos de los sedimentos del suelo marino y por debajo de este; ya que los equipos *EK-500/EY-500* no pueden dejar de lado los valores S_v obtenidos (Gutiérrez, 2005; comunicación personal).

- Calibración y reparación de ecogramas virtuales (Archivos *EVI*)

Pasos a seguir:

1. De la información obtenida en un crucero se ingresa todos los datos al disco duro de la computadora que tenga instalado el software *Sonar Data Echoview* (la versión 1 trabaja con *Windows 98*; la versión 2 y 3 de este software pueden trabajar en *Windows XP*).
2. Abrir el software *Sonar Data Echoview* y adicionar los archivos con extensión **.ek5* y **.dgo1*; dependiendo del tipo de crucero.
3. Observar en *GPS fixes – Cruise Track* si los transeptos del buque se realizaron sobre la zona de estudio (en este caso desde 11°S hasta 15°S).
4. Escoger *SvQ₁ (power) T₁* (datos muestreados) ó *SvW₁ (power) T₁* (datos crudos) para calibrar los ecogramas virtuales del *Primary fileset (SvQ₁ telegrams T₁ ó SvW₁ telegrams T₁)*.
5. Los datos que se ingresan para calibrar todos los ecogramas digitales son:
 - *Absorption coefficient* (coeficiente de absorción) (dB/m)
 - *Sound speed* (velocidad del sonido) (m/seg)
 - *Transmitted power* (potencia transmitida) (W)
 - *Equivalent 2-way solid beam angle* (Ángulo de haz sólido bidireccional equivalente)
 - *Sv gain* (Ganancia Sv) (dB)
 - *Wavelength* (longitud de onda) (m)
 - *Transmitted pulse length* (longitud de pulso transmitido) (ms)

- *Draft correction* (m)
- *Nominal degrees*

Todos los datos anteriores se obtienen al momento de la calibración, sólo *Wavelength* (Longitud de onda) es el resultado de la división entre *Sound speed* (velocidad del sonido) y la frecuencia utilizada en Hz. Los datos de calibración fueron obtenidos antes del crucero y dependen de las condiciones del mar (columna de agua).

6. Se realiza la separación horizontal del ecograma *Primary fileset* en espacios (UBM – Unidad Básica de Muestreo) de 18.53 metros (0.01 milla náutica), lo cual indica que se produce por cada segundo tres emisiones de eco. No se recomienda separación vertical del ecograma, ya que esta línea interfiere al momento de exportar los datos entre las líneas creadas, Fondo y Fondo 15.
7. Se observa la profundidad máxima en el ecograma (según el tipo frecuencia utilizada) y dependiendo de eso, se “corrige” la línea de fondo. Es importante sólo procesar información confiable.
8. Se elige la opción *EV File properties* y en la opción *Export* se activan todos los íconos. Si se desea tener todos los datos en un solo archivo se escoge la opción *single file*. Luego se elige la opción *Lines* y se crea la línea de Fondo y la línea de Fondo 15. La línea Fondo es la misma SvQ_1 ó SvW_1 (*Sounder detected-bottom*). La línea de Fondo 15 toma como referencia la línea Fondo y se le agrega 15 metros por debajo de ésta. Se aplican y aceptan todos los cambios hechos en *EV File properties*.

9. Cada vez que se adicionan archivos **.ek5* ó **.dgp1* provenientes de diferentes días, es necesaria la creación de nuevas líneas Fondo y Fondo 15.

10. Se elige la opción *Variable manager* y se crean las siguientes opciones (variables):

1° Se crea la opción (variable) *Resample*, la cual esta determinada por *Resample by number of pings*. Esta opción permite evaluar el ecograma según el número de *pings*.

En ésta opción se realizan los siguientes cambios:

- *Resample* → *Input* → *Number of pings per sample* → 1
- *Resampling mode* → *Average all pings*.
- *Output* → *Upper depth (0.00)* → *Lower depth* (según el tipo de frecuencia) → *Number of datapoints (9999)*.

2° Se crea la opción (variable) *Line bitmap*, la cual esta determinada por *Line bitmap*.

En esta opción se realizan los siguientes cambios:

- *Operands* → *Operator* → *Line bitmap*
- *Operand 1* → *Resample*
- *Line bitmap* → *Start line* → *Fondo*
Stop line → *Fondo 15*

3° La opción *Mask* solamente se utiliza cuando se está trabajando con el software *Sonar Data Echoview* versión 3. (Llave #3).

- Corrección de los valores S_V

Para la corrección de todos los valores S_V obtenidos de los 35 cruceros hidroacústicos en el área comprendida entre los grados 11°S y 15°S, se debe utilizar una serie de procedimientos detallados en el informe paleoceanográfico del año 2004 desarrollado por la Unidad de Tecnologías de Detección (UTD – IMARPE), en el cual se procesó toda la información obtenida durante el crucero Paleoceanográfico 0405 (Mayo del 2004) (Gutiérrez y Herbozo, 2004). Estos procedimientos se muestran a continuación pero no fueron aplicados en este estudio debido a la complejidad observada durante la investigación; pero se completará su corrección en la realización de próximos trabajos acerca del mismo tema.

➤ Metodología

La función de ganancia cronovariante (TVG) de la ecosonda permite restituir al sonido la energía perdida por efecto de los fenómenos de absorción y dispersión geométrica; la energía de un eco se expresa como la *Fuerza Media del Volumen de Retrodispersión Acústica* - S_V (dB ó m^3/m^2 según se le obtenga en el dominio lineal o logarítmico, respectivamente). De acuerdo a lo descrito por Gutiérrez y Maclennan (2005), la corrección TVG depende, esencialmente, de la velocidad del sonido y del coeficiente de absorción. Las ecosondas científicas emplean valores nominales para estos parámetros a fin de corregir las distorsiones de la propagación del sonido. La obtención de los valores correctos, no nominales, para ambos factores, depende de la salinidad, temperatura y presión según la distancia al transductor.

Los valores específicos de velocidad y absorción pueden ser obtenidos a través de ecuaciones empíricas; la información necesaria, relativa a temperatura y salinidad puede ser

obtenida durante las prospecciones a fin de conocer la estructura vertical de ambas variables y corregir los valores S_V por zonas. Tales ecuaciones han sido desarrolladas, entre otros, por Mackenzie (1981); Francois y Garrison (1982) y MacLennan y Simmonds (1992) (citado por Gutiérrez y Herbozo, 2004). De este modo, una función *TVG* más exacta puede ser expresada en unidades de temperatura, salinidad y presión. Supóngase que “ c_0 ” y “ α_0 ” son los valores nominales empleados por el ecosonda *EK-500* para la velocidad y la absorción, respectivamente. El factor de corrección del valor S_V a una profundidad R es:

$$K_{tvgr} = 1 + \frac{\text{Ln}(10)}{5} \cdot \frac{R}{1000} \cdot (\alpha_R - \alpha_0) + \left(\frac{\text{Ln}(10)}{5} \cdot \alpha_0 \cdot \frac{R}{1000} + 2 \right) \cdot \left(\frac{c_R}{c_0} - 1 \right)$$

Donde:

“R” es la profundidad a la que se colectó el valor que se quiere corregir (metros); “ α_R ” es el coeficiente de absorción a la distancia R (dB/Km.); “ α_0 ” es el coeficiente de absorción a 0 metros del transductor (valor nominal en la ecosonda en dB/Km.); “ ϵ ” es el valor medio entre los componentes de la velocidad del sonido a cero metros y a la distancia R; “ c_0 ” es la velocidad del sonido a 0 metros del transductor, que es un valor nominal en la ecosonda (m/s). La determinación de “ α_R ”, “ α_0 ” y “ ϵ ” está descrita en Gutiérrez y MacLennan (2005). La aplicación del factor “ K_{tvgr} ”, que es lineal, se realiza en el dominio logarítmico en el caso que S_V esté expresado en decibeles. Para corregir las lecturas S_V en este caso se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_{V_c} = S_V - |10 \cdot \log(K_{tvgr})|$$

Apéndice 3

3. Metodologías y procedimientos para la Implementación de la aplicación SIG para estudios paleoceanográficos

– Metodología para el diseño de la Base de Datos

La metodología que se creó para construir la base de datos necesaria para el diseño y la implementación de un Sistema de Información Geográfica (tecnologías SIG) para estudios paleoceanográficos se basó en tres pasos principales, los cuales decidieron que tipo de enfoque darle a esta investigación:

1. Debido a que el diseño y la implementación del SIG para estudios paleoceanográficos se basa, en principio, en la búsqueda de zonas propicias en el suelo marino que contengan sedimentos con particulares estructuras geológicas (como lo son los sedimentos laminados) y que estos lleven en su composición sedimentológica registros paleo-ambientales y paleo-ecológicos de alta resolución con los que se pueda reconstruir eventos ocurridos en el pasado durante el Holoceno Tardío (en los últimos 200 años pasados) (D. Gutiérrez *et al.*, 2006); entonces era necesario la interrelación de variables (entre ellas geológicas y geoacústicas) para obtener adecuadas consecuencias de este proceso.
2. La importante cantidad de datos obtenidos de tres cruceros paleoceanográficos realizados por el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y la cooperación internacional (IAI, IRD, CISESE), además de una gran cantidad de datos obtenidos por diversas instituciones internacionales en esta zona de estudio (desde

11°S hasta 15°S) que tienen y proporcionan un enorme potencial para realizar investigación paleoceanográfica; deben ser fácilmente manipulada, ya que periódicamente debe ser actualizada con nueva información ó proveniente de prospecciones anteriores; tener una buena administración y gestión, ser analizada de forma precisa y, ser modelada de la forma más confiable posible.

3. Finalmente, la base de datos debe empezar con un número pequeño de variables debido a que, hasta el momento, este tipo de trabajo no ha sido implementado para estudios paleoceanográficas; así que es muy posible, que en el transcurso de todo el proceso de creación surjan problemas que dificulten el progreso de esta tesis. Es por tal razón que se optó por trabajar con variables específicas y, mejor aún, variables que hasta el momento no se habían desarrollado e investigado (tales como la morfología y batimetría del suelo marino, clasificación exploratoria de sedimentos superficiales utilizando valores de retrodispersión acústica y, observaciones y descripciones de los tipos de sedimentos recuperados del suelo marino en esta zona de estudio).

El enfoque que se le da a esta investigación, en principio, es la de zonificar los posibles lugares en el suelo marino que cumplan con condiciones propicias para obtener muestras de sedimentos con características paleoceanográficas de alta resolución. Además, esta investigación *a posteriori* va a cumplir la función de administrar, gestionar, analizar y modelar información de toda índole la cual pueda ser utilizada para estudios en geología marina, debido a que un sinnúmero de variables de diferentes ramas (ya sean variables oceanográficas y/o climatológicas) tienen una influencia y un impacto trascendente en el comportamiento del ambiente marino (ya que todo esta conectado en el ambiente natural).

– Diseño de la Base de Datos

El diseño de la base de datos se basó en el modelo Entidad – Relación (*E/R*), para lo cual se comenzó definiendo el problema:

– *Definición del Problema*

- a. Un crucero puede tener una o muchas estaciones.
- b. Una estación pertenece a un crucero.
- c. Una estación tiene uno o muchos lances y un lance pertenece a una estación.

– Creación de las Entidades

Las entidades fueron creadas de la siguiente manera:

- Se definieron tres entidades: “CRUCERO”, “ESTACION” y “LANCER”.
- Para cada entidad se definieron llaves primarias (únicas) y sus respectivos atributos. Por ejemplo, para la entidad “CRUCERO” la llave primaria (identificador único) es “CRUCERO_NRO”. El estudio abarca ocho cruceros (1 hasta el 8), debido al número de cruceros disponibles con información útil para estudios paleoceanográficos. Los demás atributos de la entidad “CRUCERO” son: “NOMBRE”, “BUQUE INVESTIGACION”, “PAIS”, “FECHA INICIO”, “FECHA TERMINO” y “LOCACION”.
- La siguiente entidad denominada “ESTACION” tiene una llave primaria que consta de dos atributos: “CRUCERO_NRO” y “ESTACION_NRO”; esto se debe a que esta entidad utiliza una llave foránea proveniente de la entidad “CRUCERO” (“CRUCERO_NRO”) y su identificador (“ESTACION_NRO”) para crear una

relación entre ellas. Al igual que la entidad anterior, se utilizaron valores alfanuméricos para identificar los datos.

- La última entidad denominada “LANCE” tiene una llave primaria que consta de tres atributos denominados “CRUCERO_NRO”, “ESTACION_NRO” y “LANCE_NRO”; esto se debe a que esta entidad utiliza el identificador de la entidad “CRUCERO”, el identificador de la entidad “ESTACION_NRO” y su identificador (“LANCE_NRO”) para crear una relación entre ellas. Al igual que las entidades anteriores, se utilizaron valores alfanuméricos para identificar los datos. Los demás atributos de la entidad “LANCE” son mostrados en el diagrama 3.

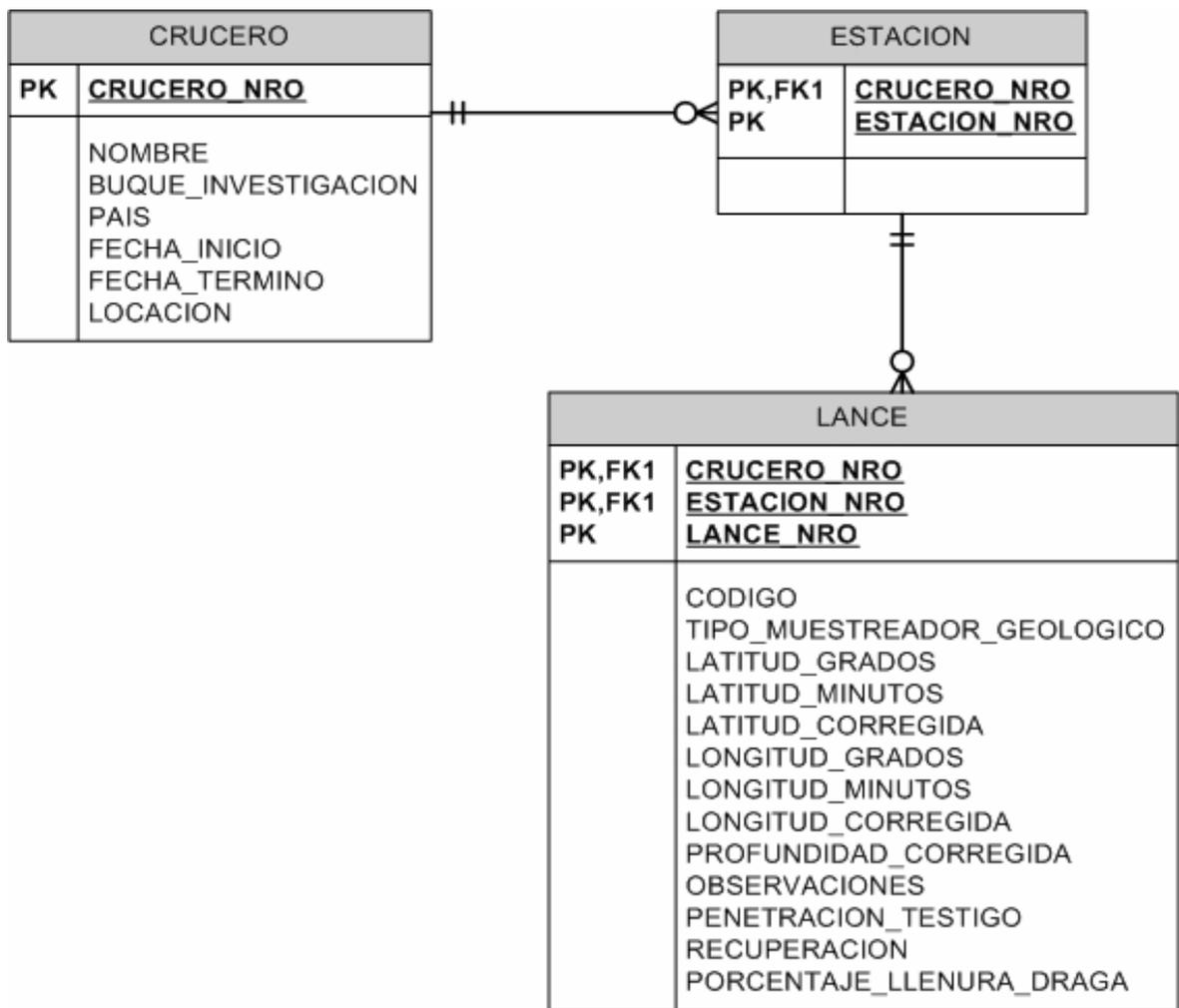


Diagrama 3. Creación de las primeras entidades que se van a utilizar por la base de datos para estudios paleoceanográficos.

– **Metodología para la producción del valor cartográfico agregado**

Para la realización de este diseño e implementación de Tecnología SIG en estudios paleoceanográficos fue necesario realizar un trabajo cartográfico de buena resolución en toda el área de estudio; esto significa, la obtención de coordenadas geográficas exactas de la línea de costa actual e islas en los alrededores por medio de la digitalización de cartas

hidrográficas. La metodología que se siguió para esta obtención de coordenadas geográficas fueron:

1. Conseguir las cartas hidrográficas que cubran el área de estudio (en este caso se necesitaron cinco cartas hidrográficas debido a que el área de estudio va desde el grado 11°S hasta el grado 15°S). Las cartas hidrográficas utilizadas para la zona de estudio pertenecen a la HIDRONAV (Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú) y son las siguientes:

- **PERU HIDRONAV – 223 Bahía Ancón a Isla Pachacamac;** levantamiento hidrográfico realizado por la Dirección de Hidrografía y Navegación hasta Setiembre de 1997; proyección Mercator referida al *datum* sistema geodésico mundial WGS 84, a una escala de 1/100000 (12°01'30"S).
- **PERU HIDRONAV – 224 Isla Pachacamac a Punta MalPaso de Asia;** levantamiento hidrográfico realizado por la Dirección de Hidrografía y Navegación desde 1980 hasta 1987 con adición en Febrero del 2000; proyección Mercator referida al *datum* sistema geodésico mundial WGS 84, a una escala de 1/100000 (12°35'00"S).
- **PERU HIDRONAV – 225 Punta MalPaso de Asia a Puerto Tambo de Mora;** levantamiento hidrográfico realizado por la Dirección de Hidrografía y Navegación en los años 1976-1988 con información adicional hasta Febrero del 2000; proyección Mercator referida al *datum* sistema geodésico mundial WGS 84, a una escala de 1/100000 (13°08'00"S).
- **PERU HIDRONAV – 226 Puerto Tambo de Mora a Ensenada Lagunillas;** levantamiento hidrográfico realizado por la Dirección de

Hidrografía y Navegación en el año 1988 con informaciones adicionales de 1996 y 2000; proyección Mercator referida al *datum* sistema geodésico mundial WGS 84, a una escala de 1/100000 (13°41'45"S).

- **PERU HIDRONAV – 227 Ensenada Lagunillas a Punta Azua;** levantamiento hidrográfico realizado por la Dirección de Hidrografía y Navegación en Noviembre de 1988 y Marzo del 2000; proyección Mercator referida al *datum* sistema geodésico mundial WGS 84, a una escala de 1/100000 (14°13'00"S).

2. Se procedió a escanear cada carta hidrográfica debido a que este método es una de las mejores formas conocidas y comunes para la digitalización. Cada carta hidrográfica, que tiene una medida aproximada de 1 metro de alto por 1,2 metros de largo, fue escaneada y grabada en formato *.tif. Es necesario y altamente recomendado que se usen cartas nuevas, es decir, que no tengan arrugas, borrones, etc. Tres cartas hidrográficas fueron escaneadas en blanco y negro; y dos de ellas, con sus colores originales. Todas las cartas hidrográficas, después de su escaneo, fueron grabadas en un CD-RW con capacidad de 650 MB/74 minutos. Cada carta fue comprimida luego del escaneo para grabarla en el CD-RW, y al momento de digitalizar, tuvieron que ser descomprimidas ya que el programa utilizado (*Software ArcView GIS 3.3*) no acepta archivos comprimidos (al menos no en este proceso de digitalización).

3. Cuando ya se tienen listas todas las cartas hidrográficas escaneadas, se procede a georeferenciarlas en el SIG. En este caso se utilizó el programa *ArcView GIS 3.3*. Los pasos a seguir fueron:

- Primero, se crea una carpeta en Mis documentos donde se van a guardar directamente todos los archivos creados (ya sean guardados manualmente y/o por defecto).
- Segundo, se abre una vista de trabajo en el ArcView para cargar la imagen que se desea georeferenciar (en este caso, una carta hidrográfica a la vez).
- Tercero, se activan las extensiones *TNC.further*, *Register and Transform tool* y *Vector Conversions Extension*, las cuales fueron necesarias para georeferenciar las cartas hidrográficas en este trabajo.
- Cuarto, se ingresa a *View* en la barra principal de herramientas y se accede al icono *Register and Transform (test version)*. Para este momento, ya se deben haber escogido un mínimo de 6 puntos de control en la carta hidrográfica escaneada (esto es, puntos con coordenadas fácilmente identificables) y haber sido anotadas. Se recomienda escoger las intersecciones de las líneas de latitud y longitud. De preferencia, se deben escoger los puntos de control cerca a la línea de costa. Se debe hacer clic en cada punto escogido (ó intersección) con el cursor para que sea reconocido como punto de control por el ArcView. Después de haber ingresado los 6 puntos de control en la ventana *Register and Transform (test version)* y verificado que el valor del error RMS (*Root Mean Square Error*) se encuentre por debajo de 0,004 in (para todos las cartas el valor de error RMS fue menor a 0,004), se selecciona el icono *Write World File*. Los archivos fueron grabados por defecto con extensión *.tfw en la carpeta creada en Mis Documentos con el nombre original del proyecto, esto significa, si el nombre del proyecto es “mapa_base_lima_223.apr”; el archivo de georeferenciación se llamará “mapa_linea_base_223.tfw”.

- Quinto, luego de crear los puntos de control se debe cerrar la vista y abrirla nuevamente para que aparezcan los puntos de control encima de la carta hidrográfica.
- Sexto, se ingresa nuevamente a *View* en la barra principal de herramientas y se accede al icono *New Theme*. Luego aparecerá una ventana con el nombre *New Theme* que preguntará cual característica se desea utilizar para empezar la digitalización. Para este trabajo se utilizó la característica *Line*. Luego de escoger la característica *Line* se debe guardar el *New Theme* en la carpeta creada y empezar la digitalización (es preferible darle un nombre distinto a cada archivo para no crear confusión con los próximos archivos). La escala de visualización durante la digitalización fue de 1/5000.
- Séptimo, finalizada la digitalización se procede a guardar la línea digitalizada en la carpeta creada (es preferible darle un nombre distinto a cada archivo para no crear confusión con los próximos archivos). Esta línea será grabada con la extensión *.shp. También se graban por defecto y con el mismo nombre en este paso tres archivos con distintas extensiones (aparte del archivo grabado manualmente con extensión *.shp), las extensiones son *.sbn; *.sbx y *.shx.
- Octavo, se selecciona la línea digitalizada en la vista de trabajo actual (barra vertical al lado de la carta escaneada) y se ingresa a *Vector Conversions* en la barra principal de herramientas donde se accede a *Polyline to Point*. Esta extensión convertirá toda la línea creada en puntos con coordenadas geográficas con valor de elevación igual a 0; es decir, cada vez que se haya hecho un punto (ó clic) sobre algún lugar de la carta se obtendrá un valor

de latitud y longitud con valor de elevación igual a 0. Se graba el archivo creado para este paso con la extensión *.shp.

- Noveno, se ingresa a *Further* en la barra principal de herramientas donde se accede a *Add X/Y Coordinates to Attribute Table*. Esta opción calcula todos los valores en longitud y latitud, y los presenta ingresando al icono *Open Theme Table* la cual será grabada con la extensión *.dbf para su posterior análisis.
- Décimo, se graba el proyecto y se empieza uno nuevo con los mismos pasos ya explicados.

4. Finalmente, el motivo por el cual se creó esta metodología necesaria para la obtención de coordenadas geográficas a partir de digitalización de línea de costa e islas en los alrededores se debe a que son necesarias al momento de la creación de la batimetría y morfología de la zona. En estos estudios marinos es necesario saber en cuanto influye y varía la morfología del suelo marino con islas incluidas en los procesos ocurridos en la columna de agua; y más aún, en los procesos de sedimentación, afloramientos, zonas de mínima de oxígeno e hidrodinámica.

La cantidad de coordenadas geográficas obtenidas de las cinco cartas hidrográficas por medio de la digitalización de la línea de costa e islas en los alrededores fue mayor a 150 000 puntos. Esto permitirá, al momento de crear la batimetría y morfología del suelo marino en la zona de estudio; visualizar en que forma el contorno actual de la línea de costa y las islas influyen en esta zona. Además, servirá para próximos estudios efectuados entre estas latitudes (desde el grado 11°S hasta el grado 15°S).

– **Métodos y metodología para la generación de superficies en aplicaciones ambientales SIG**

En aplicaciones ambientales SIG, la generación de superficies es un requerimiento frecuentemente establecido en las primeras etapas de los análisis. Superficies topográficas, superficies de roca, tablas de agua subterránea, y plumas de contaminación son ejemplos de superficies que necesitan ser generadas desde fuentes de información disponible. La importancia de generar estas superficies es que estas son usadas como la información básica para llevar a cabo más análisis espaciales en aplicaciones ambientales. Basado en estas superficies, podemos realizar análisis adicionales para responder preguntas mucho más complejas, donde las respuestas necesitan tener una amplia visualización. Así, la precisión de los análisis subsecuentes directamente depende de la precisión de la construcción de las superficies en la primera etapa de los análisis.

ArcInfo ofrece varios métodos para la creación de superficies. Estos métodos incluyen:

- *Trend Surface* (TREND)
- *Inverse Distance Weighted* (IDW)
- *Triangulation* (CREATE TIN)
- *Kriging* (KRIGING)

Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de interpolación de información. Ninguno de los métodos trabaja universalmente como el mejor método para todos los conjuntos de información. La selección de un método en particular depende de la distribución de los puntos de información y de los objetivos del estudio.

El propósito de esta sección es discutir acerca de estos métodos y proporcionar algunas sugerencias sobre como estos deberían ser adecuadamente usados para la construcción de superficies en aplicaciones ambientales. Además, aquí se tratará acerca de los problemas relacionados a cómo el conjunto de la información debería ser evaluada antes de la generación de la superficie.

- **Introducción**

En aplicaciones ambientales SIG, la generación de superficies es un requerimiento frecuentemente establecido en las primeras etapas de los análisis. Ejemplos de superficies incluye superficies topográficas, superficies de rocas, tablas de agua subterránea, y plumas de contaminación para los medios específicos. Superficies como estas proporcionan información crítica para análisis subsecuentes que envuelven temas como el modelado de aguas subterráneas, la distribución de contaminación por debajo de la superficie y la estimación del volumen.

La información para la generación de estas superficies es usualmente colectada a través de muestreo y mediciones realizados en el campo de estudio. Debido al alto costo y recursos limitados, la recolección de información puede ser conducida solamente en locaciones puntuales seleccionadas con números limitados. En orden de generar una superficie continua de un dominio (p.e., tabla de agua subterránea), algunos tipos de métodos de interpolación tienen que ser usados para estimar valores de superficie en estas locaciones donde no fueron tomadas muestras o mediciones.

ArcInfo ofrece cuatro métodos de interpolación para la generación de superficies:

- *Trend Surface* (TREND)
- *Inverse Distance Weighted* (IDW)
- *Triangulation* (CREATE TIN)
- *Kriging* (KRIGING)

El método de *Triangulation* (CREATE TIN) genera superficies representadas por puntos espaciados irregularmente. Los otros tres métodos (*GRID*) generan superficies representadas por puntos de información espaciadas igualmente. En términos de interpolación, cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y desventajas. Ninguno de los métodos trabaja universalmente como el mejor método para cualquier conjunto de información.

Esta sección busca dar una evaluación comparativa de estos métodos de interpolación y proporciona algunas ideas de cómo estos métodos deberían ser usados adecuadamente para la generación de superficies.

– **Evaluación y Preparación de la Información**

Este paso es siempre el primero y muy importante para la generación de cualquier superficie ya que diferentes métodos de interpolación trabaja mejor para diferentes conjuntos de datos. Un buen entendimiento del conjunto de información es un ingrediente esencial de una buena interpolación. El tiempo necesario para explorar, entender, y describir el conjunto de datos debería ser suficientemente considerado no obstante la rápida adopción del método más adecuado de interpolación (Issaks y Srivastava, 1989; citado por Hu, 1998).

La evaluación de los datos consiste en dos partes:

- *Evaluación de Calidad.*- Este procedimiento se utiliza para garantizar que los datos sean precisos y representativos. Por ejemplo, buenos datos para la generación de tablas de agua subterránea deberían estar basados en lecturas de nivel de agua en días iguales y desde el mismo tipo de pozos (tales como pozos de monitoreo poco profundos). En orden de representar con precisión la tabla normal de agua subterránea, el muestreo de la fecha debería ser cuidadosamente escogido para reflejar las condiciones normales del tiempo. Atención espacial debería tenerse en los valores anormales que aparecen en el conjunto de datos ya que estos valores tergiversarán seriamente el proceso de interpolación. La mejor manera de detectar estos valores es a través del mapa o visualizando el conjunto de datos. Valores anormales aparecen usualmente como “espacialmente sobresalientes”; es decir, un valor en extremo bajo rodeado por valores altos o viceversa. La visualización del mapa también proporciona conocimientos adicionales acerca del conjunto de los datos, ya sea sobre como las muestras se encuentran espacialmente distribuidas (de forma uniforme o agrupados), y cual es el patrón general y la tendencia asociada con el conjunto de los datos (altos valores y bajos valores).
- *Evaluación Estadística.*- Este procedimiento se realiza para entender las propiedades estadísticas asociada con el conjunto de datos. Estas propiedades puede incluir la distribución, locación, extensión, y forma del conjunto de los datos. Hay muchas herramientas disponibles en las descripciones estadísticas de una variedad las cuales pueden ser usadas para describir estas propiedades (Isaaks y Srivastava, 1989; Geo-Eas, 1992; citado por Hu, 1998). Por ejemplo, la tabla de frecuencia y el histograma correspondiente puede ser usado para describir como

los valores observados frecuentemente descienden dentro de ciertos intervalos o clases. El ploteo de la probabilidad puede ser usado para determinar cuan cerca esta la distribución del conjunto de los datos a la distribución normal o Gaussiana. Los resúmenes estadísticos proporcionan un valioso resumen de información contenido en el histograma. Esto incluye tres grupos: las medidas de locación, las medidas de extensión, y las medidas de forma. Las medidas de locación describen varias partes donde la distribución se encuentra. El centro de la distribución esta descrita por la media, la mediana, y la moda. La locación de las otras partes de la distribución están dadas por varios *quantiles*. La medida de extensión describe la variabilidad. Este grupo incluye la varianza, la desviación estándar, y el rango *interquartile*. Las medidas de forma incluye el coeficiente de selección y el coeficiente de variación. El coeficiente de selección proporciona información sobre la simetría mientras que el coeficiente de variación da información sobre la longitud de la fila para ciertos tipos y distribuciones.

– **Métodos de Interpolación**

Una pregunta que se hace frecuentemente es sobre cual es el mejor método de interpolación para cualquier conjunto de datos. La respuesta a esta pregunta es ninguno. Hay muchos métodos de interpolación disponibles (Watson, 1992; Burrough, 1996; citado por Hu, 1998). Cada uno de estos métodos trabaja mejor para un conjunto de datos en particular debido a su inherente suposición y diseño del algoritmo para la estimación. Para un determinado conjunto de datos, diferentes métodos de interpolación puede trabajar mejor para diferentes objetivos de estudio (es decir, superficie suave vs. superficie precisa). Aunque la interpolación lineal basada en la cercanía de los datos con gradientes combinados puede parecer que sea un método más general y flexible (Watson, 1991; citado

por Hu; 1998), no hay aun un método de interpolación el cual garantice los mejores resultados para todos los conjuntos de datos. Con este enunciado en mente, la selección de un método en particular debería de depender sobre las características del conjunto de los datos así como de los objetivos del estudio.

Las siguientes discusiones son enfocadas en cuatro métodos de interpolación los cuales pueden ser fácilmente utilizados por los usuarios de *ArcInfo*:

- *Trend Surface (TREND)*
- *Inverse Distance Weighted (IDW)*
- *Triangulation (CREATE TIN)*
- *Kriging (KRIGING)*

Entre estos cuatro métodos, *Trend Surface (TREND)* actúa como un método de interpolación global mientras que los otros tres métodos funcionan como métodos de interpolación local. Con los métodos de interpolación global, todos los puntos de observación dentro de un área de estudio son utilizados para estimar el valor en un punto nuevo. Con los métodos de interpolación local, solamente un subconjunto de puntos de observación localizados cerca del nuevo punto es usado para estimar el valor en este punto.

- *Trend Surface (TREND)*

La idea detrás de la interpolación *Trend Surface* es ajustar la superficie en mínimos cuadrados a los puntos de observación de los datos usando regresión de polinomio. La ventaja de este método es que es superficialmente fácil de entender, por lo menos con respecto a la forma en que las superficies son estimadas. Puede ser usado para mostrar

amplias características de los puntos de los datos de observación, tales como la completa dirección de la corriente de agua subterránea.

La desventaja es que este método es altamente afectado por los valores extremos y dispareja distribución de los puntos de datos de observación. El problema es más complicado por el hecho que algunos de los puntos de datos son más informativos que otros. Por ejemplo, en la interpolación de superficies topográficas, los puntos de datos tomados de las cumbres, precipicios, caminos, y límites de un área geográfica son más significantes que los puntos tomados de una cuesta o de una llanura. *Trend Surface* es un método aproximado y suavizante, raramente pasa por los puntos de los datos originales.

Es implícito en regresión múltiple que los residuales de una regresión lineal o de superficie tengan errores normalmente distribuidos o independientes. Las desviaciones del *Trend Surface* son siempre espacialmente dependientes en algunos grados, de hecho, uno de los usos más provechosos del *Trend Surface* ha sido dejar al descubierto partes de un área de estudio que muestra las más grandes desviaciones de la tendencia general. Por consecuencia, el uso principal del *Trend Surface* no es trabajar como un interpolador, sino, trabajar más como una forma para remover las amplias características de los datos previos usando algunos de los otros métodos locales de interpolación.

➤ *Inverse Distance Weighted (IDW)*

En este método de interpolación, los puntos de observación son ponderados durante la interpolación de tal manera que la influencia de un punto relativo a otro disminuye con la distancia desde el nuevo punto. La ponderación esta asignada a puntos de observación a través del uso de un poder de ponderación que controla como los factores de ponderación disminuye así como aumenta la distancia desde el nuevo punto. El poder

más grande de la ponderación durante la interpolación tiene menor efecto en los puntos lejanos desde el nuevo punto. Como el poder aumenta, el valor del nuevo punto se aproxima al valor del punto de observación más cercano.

La simplicidad del principio fundamental, la velocidad en el cálculo, la facilidad de la programación, y los resultados razonables para muchos tipos de datos son algunas de las ventajas asociadas con el método de interpolación *Inverse Distance Weighted*. Las desventajas para éste método de interpolación son: a) la elección de la función de ponderación puede introducir ambigüedad, especialmente cuando las características de la superficie básica no son conocidas; b) la interpolación puede ser fácilmente afectada por la distribución dispareja de los puntos de datos de observación ya que un ponderado igual será asignado a cada uno de los puntos de los datos aun si estos se encuentran agrupados; c) el máximo y el mínimo en la superficie interpolada puede ocurrir solamente en los puntos de los datos ya que el método de interpolación *Inverse Distance Weighted* es una técnica suavizante por definición.

➤ *Triangulation (CREATE TIN)*

El método de *Triangulation* es el método de interpolación más flexible ofrecido por *ArcInfo*. Este puede generar superficies interpoladas desde muchas diferentes fuentes tales como datos de puntos, líneas, líneas discontinuas, y polígonos. Debido a esta flexibilidad y velocidad de la interpolación, *Triangulation* se ha convertido en un método de interpolación popular para los usuarios de *ArcInfo*.

Hay varios métodos de interpolación disponibles (Watson, 1992; citado por Hu, 1998). *Delaunay Triangulation* es el método adoptado en *ArcInfo* debido a estas ventajas: a) los triángulos son lo más posible de ángulos iguales; b) el valor para un nuevo nodo esta

asegurado a ser lo más cercano posible a un punto de observación conocido; c) la triangulación no es afectada por el orden de los puntos de observación a ser considerada.

En comparación con los métodos de interpolación basados en la creación de grillas, *Triangulation* ofrece varias ventajas; primero, cuando las superficies tienen características de relieve significativo, *Triangulation* genera superficies más precisas. Esto se debe a que el método *Triangulation* mantiene las características de las líneas discontinuas tales como canales de corriente (ríos, riachuelos, etc.), dorsales, y líneas de costa; así como características del relieve tales como cumbres y precipicios. En segundo lugar, *Triangulation* es un método exacto. Es más preciso que los métodos basados en grillas porque los puntos originales de los datos están localizados exactamente en la superficie. Los métodos basados en grillas solamente cumplen los puntos originales de los datos de forma ocasional. Finalmente, *Triangulation* es también un método muy rápido en términos de procesamiento. Esto es porque *Triangulation* puede representar eficientemente la misma superficie como lo hacen los métodos basados en grillas pero con menos puntos de datos.

La principal desventaja de este método es que las superficies no son suaves y pueden dar una apariencia dentada ó irregular. Esto es ocasionado por las pendientes discontinuas en los bordes del triángulo y los puntos de los datos. Además, *Triangulation* es generalmente no adecuado para extrapolación más allá del dominio de los puntos de datos observados.

➤ *Kriging (KRIGING)*

Kriging es un método de interpolación ponderado que funciona con promedios. Este método es derivado de la teoría variable regionalizada la cual asume que la variación espacial de cualquier propiedad geológica, de suelos ó hidrogeológica; conocida como una

“variable regionalizada” que es estadísticamente homogénea por todas las partes de la superficie; esto es, el mismo patrón de variación puede ser observado en todas las locaciones sobre la superficie. Esta variación espacial de la propiedad puede ser expresada en términos de semivariogramas. *Kriging* deriva las ponderaciones desde los semivariogramas, y esto minimiza la estimación de la varianza las cuales son estimadas por ellas mismas. En *ArcInfo*, la estimación de la varianza (llamada varianza de la grilla) es automáticamente generada como un subproducto de la superficie interpolada.

El cálculo y la interpretación del semivariograma es el “corazón” del método *Kriging*. El semivariograma mide el grado de correlación espacial entre los puntos de los datos de observación en un área de estudio como una función de la distancia y dirección entre los puntos de datos de observación. Esto controla la manera en que los ponderados del *Kriging* son asignados a los puntos de los datos durante la interpolación, y como consecuencia controla la calidad de los resultados.

El cálculo del semivariograma es siempre el primer paso para los métodos de interpolación que usan *Kriging*, ya que solamente hay limitados puntos de datos de observación disponibles, es imposible calcular el “verdadero” semivariograma. En la práctica, los semivariogramas son estimados frecuentemente desde los valores observados en los datos. Esto es llevado a cabo aunque la selección de la función que ajusta los puntos de datos de observación sea el mejor. Este proceso envuelve la interpretación y decisión, y frecuentemente requiere un gran número de cálculos “a fuerza de probar”. *ArcInfo* ofrece cinco funciones matemáticas las cuales pueden ser usadas como posibles candidatas para el semivariograma de un conjunto de datos dado: *spherical*, *circular*, *exponential*, *Gaussian*, y *linear*.

Kriging supera muchos defectos ó puntos débiles de los tradicionales métodos de interpolación. Por ejemplo, los ponderados *Kriging* son determinados por el semivariograma y la configuración del conjunto de los datos. *Kriging* es un óptimo interpolador en el sentido que las estimaciones no son sesgadas y se han conocido varianzas mínimas. Ya que la estimación de las varianzas pueden ser determinadas y mapeadas al igual que las estimaciones, y asumiendo una distribución particular, podemos calcular la confianza y la podemos establecer en las estimaciones. Esto hace al *Kriging* extraordinariamente diferente de otros métodos de interpolación. La estimación de la varianza puede ser también usada para determinar donde se necesita más información si se planea un muestreo en el futuro.

Los ponderados del *Kriging* no dependen solamente en las distancias existentes entre los puntos de observación y las locaciones de estimación, sino también, en las distancias mutuas entre los puntos de observación. Como resultado, *Kriging* tiene dos únicas e interesantes propiedades: el efecto separación (*declustering effect*) y el efecto selección (*screen effect*). Con la propiedad de separación, varios puntos de observación cercanamente juntos tendrán colectivamente el ponderado de un único punto de observación localizado cerca del centroide del agrupamiento. Con el efecto selección, la influencia de un punto de observación será reducida por adición de uno o más puntos de observación en las ubicaciones intermedias entre el punto de observación original y la ubicación de la estimación. Como el efecto separación hace insignificante la influencia de los puntos de observación alejados, el uso de un subconjunto de muestreo en *Kriging* es una práctica segura comparada con otros métodos de ponderación.

Una debilidad del *Kriging* es que los puntos de los datos originales son cumplidos en raras ocasiones. Este es un problema común asociado a los métodos de interpolación basados en grillas. Esto puede llevar al dilema en que los contornos generados desde la

superficie aparecen en el lado equivoco de los puntos observados de los datos. La explicación para esto es que el *Kriging* es esencialmente un método de interpolación “suave”, y se comporta como un filtro de los puntos de los datos alejados. *Kriging* tampoco tiene la intención ni esta capacitado para duplicar realidad. Su objetivo es evitar “metidas de pata”, por consiguiente, más tendencias espaciales generales en los puntos de observación de los datos. Otro problema asociado con *Kriging* es la estimación del semivariograma. No es siempre fácil averiguar ó comprobar si una estimación particular del semivariograma es de hecho un verdadero estimador de la correlación espacial en un área. Las razones para escoger un semivariograma en particular para ajustar el conjunto de datos dado se dificulta frecuentemente al explicar en términos de procesos físicos. Ellos pueden solamente ser justificados en términos de ajustar una máxima probabilidad sobre mínimos cuadrados al conjunto de datos. Finalmente, *Kriging* no es un método adecuado para conjuntos de datos que tienen precipicios ó puntas anómalas, ó cambios abruptos tales como líneas discontinuas.

– Evaluación de las Superficies Interpoladas

Si un usuario SIG no puede decidir cual de los métodos de interpolación mencionados arriba debería usarse, una simple solución es tratar varios métodos de interpolación y comparar los resultados a través de métodos estadísticos. Ambas evaluaciones, de una variable aleatoria (*univariate*) y de dos variables aleatorias (*bivariate*), son herramientas descriptivas que pueden ser utilizadas para tales propósitos (Issaks y Srivastava, 1992; citado por Hu, 1998).

- *Distribución de Estimación de una Variable Aleatoria.*- Es razonable esperar que un buen método de interpolación producirá valores estimados cuya distribución es

similar a la distribución de los valores verdaderos. Las diferencias entre los valores estimados y los valores verdaderos son referidos como residuales. La media de la distribución residual es frecuentemente llamada sesgo. Una meta razonable para cualquier método de interpolación es producir estimaciones no sesgadas. Esto significaría que la media, mediana, y moda de la distribución residual debería ser cercana a cero. Otra característica es ver la pequeña extensión de la distribución residual. Ambos, la varianza ó desviación estándar, son buenos criterios para las mediciones de la extensión de la distribución residual.

- *Distribución de Estimación de dos Variables Aleatorias.*- Un cuadro comparativo de valores interpolados verdaderos proporciona una buena medición de cuan bien ha sido llevado a cabo un método de interpolación. Si todos los valores estimados son los mismos que los valores verdaderos, el cuadro comparativo sería una línea recta con 45 grados de orientación. En realidad, la línea, mientras más cercano esté de la nube de puntos, mejor será la estimación. Además, el coeficiente de correlación puede ser también usado como un índice confiable para las mediciones de cuán cercano se encuentran los valores interpolados a los valores verdaderos.

- **Metodología para la creación de las superficies del suelo marino**

Para la creación de las superficies del suelo marino utilizando información batimétrica y valores de retrodispersión acústica se siguieron doce (12) pasos que son descritos a continuación:

1. Primero, fue necesario reunir toda la información en un solo archivo y observar si se encuentra completa y ordenada (en este trabajo se observó que es preferible tener todo el conjunto de los datos ordenada latitudinalmente de forma ascendente).
2. Luego de verificar el orden del conjunto de los datos fue necesario verificar nuevamente si la cantidad de puntos en el archivo común era el mismo que las cantidades en los archivos disgregados (esto se debe a que fueron 35 cruceros IMARPE de los cuales se obtuvo la información batimétrica y los valores de retrodispersión acústica).
3. Se debe guardar cada archivo con el formato **.txt* ya que la mayoría de SIG tienen gran compatibilidad con este tipo de formato. Cada archivo, por razones de seguridad durante el proceso (para no causar conflictos en el SIG) debe ser guardado con un nombre de ocho (8) caracteres como máximo, así de forma igual, para la carpeta donde se guarda. Es preferible utilizar la raíz "C:\ " para guardar la carpeta de sólo ocho (8) caracteres como máximo en el nombre y dentro de éste, el archivo con formato **.txt* de ocho (8) caracteres como máximo en el nombre.
4. Luego de haber verificado las cantidades y haber guardado el archivo correctamente, se procede a cargarlo en el programa *ArcView GIS* por medio de *View/Table/Add*. Si la cantidad de datos en el archivo es grande (p.e., 6 millones de datos) es probable que se demore en cargar el archivo, eso depende de la potencia de la unidad y del programa utilizado.
5. Después de cargar, éste se minimiza y se va a *Views/Open*.
6. Se va a *View* en el menú superior y *Properties*. En esta opción se modifican *Map Units (unknown por decimal degrees)* y *Distance Units (unknown por meters)*. Las demás opciones, incluida *Projection*, se deja como esta debido a que en el programa *ArcGis* se realizará la proyección necesaria.

7. En *View* se ingresa a *Add Event Theme* y se verifica que cada opción del archivo se encuentre en su lugar (p.e., *X table* en *longitud*/*Y table* en *latitud*).
8. Se acepta y se espera a que aparezca la distribución de puntos del archivo en la vista de trabajo.
9. Luego de creado el archivo con la distribución de puntos se procede a seleccionar el archivo e ir a *Theme/Convert to Shapefile*. Se selecciona la ruta donde se desee guardar el *shapefile* que se va a crear y se procede a la creación del mismo.
10. Luego de creado el *shapefile* se carga el programa *ArcGis* (en *ArcMap*) y se va a *Show/Hide ArcToolbox Window/Data Management Tools/Projections and Transformations/Define Projection*. Con esta opción se le va a definir la proyección al *shapefile* creado con el programa *ArcView GIS* (de *GCS_Assumed_Geographic_1 a Geographic Coordinate Systems/World/GCS WGS 1984*).
11. Al tener el *shapefile* proyectado en *WGS 1984* se pasa a proyectar los datos y *shapefile* a *UTM* (es decir, “aplana” el globo terrestre y lo convierten en una superficie plana con celdas iguales) (León, 2006; comunicación personal). Este procedimiento es necesario cuando se desea crear grillas de superficies (en este caso, distribución de sedimentos superficiales y, morfología y batimetría del suelo marino), de donde se van a obtener valores del análisis de distancias, áreas y volúmenes. Al ser proyectados los datos y *shapefile* a coordenadas *UTM*, los resultados de los análisis van a ser más precisos que los obtenidos de una grilla creada con coordenadas en grados decimales. Para tal procedimiento se elige la opción *Show/Hide ArcToolbox Window/Data Management Tools/Projections and Transformations/Feature/Project* (de *Geographic Coordinate Systems/World/GCS WGS 1984 a Projected Coordinate Systems/Utm/Wgs 1984/WGS 1984 UTM Zone 18S*). El proceso se demora dependiendo de la cantidad de datos presentes en el archivo.

12. Luego de tener listo los archivos debidamente proyectados (*WGS 1984 UTM Zone 18S*) y los datos del *shapefile* con latitudes y longitudes en grados decimales convertidos a datos con latitudes y longitudes en UTM; se procede a crear la superficie con los diferentes métodos de interpolación, ya sean, *Trend Surface (TREND)*, *Inverse Distance Weighted (IDW)*, *Triangulation (CREATE TIN)* y *Kriging (KRIGING)*. El tiempo que demora cada método y las características de la interpolación será detallado más adelante en esta tesis.

El hecho que no existe una interpolación universal da a los usuarios SIG buenas y malas noticias. Las malas noticias es que un usuario SIG no puede simplemente lanzar su o sus conjuntos de datos dentro del primer método disponible y tener la esperanza de conseguir una solución rápida y satisfactoria. Las buenas noticias es que un usuario SIG puede eventualmente conseguir una superficie la cual es más adecuada para su o sus conjuntos de datos. Esto es llevado a cabo a través del conocimiento del conjunto de datos y seleccionando el método de interpolación más apropiado basado en una evaluación comparativa.

En la práctica, la selección de un método particular de interpolación debería depender en la configuración del conjunto de datos, el tipo de superficies a ser generadas, y la tolerancia de la estimación de los errores. En la generación de las superficies, un procedimiento de tres pasos es recomendado: el primer paso es evaluar el conjunto de datos. Esto da ideas de cómo se encuentran distribuidos los datos espacialmente, y puede proporcionar pistas de cual método de interpolación debería ser usado. El segundo paso es adoptar y aplicar un método de interpolación el cual es el más adecuado para ambos, tanto para el conjunto de datos y para los objetivos del estudio. En caso de duda, un usuario debería tratar varios métodos que estén disponibles. El tercer paso es comparar los resultados usando las

herramientas descriptivas de una variable aleatoria (*univariate*) y de dos variables aleatorias (*bivariate*) y determinar el resultado más estratificado y el método más adecuado. Esto puede parecerse, al principio, a un proceso que ocupa una oportunidad. Sin embargo, cuando un usuario gana más experiencia y adquiere más conocimiento de los diferentes métodos de interpolación, el tiempo requerido para la generación de la más adecuada superficie debería ser reducida enormemente.

– Metodología para la evaluación geoestadística de los datos

La evaluación geoestadística realizada a los datos batimétricos y valores de retrodispersión acústica (Sv) utilizados para la creación de modelos de superficie mostrados en los capítulos III y IV, fue hecha siguiendo los pasos mostrados en el *Geostatistical Wizard* del programa *ArcGis v.8.3* (ESRI, 2004). Solamente se evaluó los conjuntos de datos por el método Kriging Ordinario para la producción de mapas de Predicción (*Method Ordinary Kriging with Prediction map*).

Los conceptos que se muestran en esta sección son básicos y en ningún momento se pretende abordar un rigor matemático. Si se desea tener una visión mas amplia acerca de la información matemática y estadística utilizada por los procesos geoestadísticos para la evaluación de un conjunto de datos, por favor, se recomienda consultar la bibliografía citada en esta sección (ver el capítulo VII, Referencias Bibliográficas).

– Introducción

En los años 60, Matheron acuñó el término de “Geoestadística”. Reconocido como el padre de esta disciplina, Matheron formalizó y generalizó matemáticamente un conjunto de

técnicas desarrollada por D.G. Krige (1941) (citado por Díaz, 2002) que explotaban la correlación espacial para hacer predicciones en la evaluación de reservas de las minas de oro en Sudáfrica. Matheron definió a la Geoestadística como “la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales” (Matheron, 1962; citado por Díaz, 2002).

La Geoestadística es una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo, tales como ley de metales, porosidades, concentraciones de un contaminante, etc. Aunque el prefijo geo- es usualmente asociado con geología, sin embargo, la geoestadística tiene sus orígenes en la minería (Díaz, 2002).

– **Definiciones**

La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Journel y Huijbregts, 1978; citado por Bosque, 1992). Su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Myers, 1987; citado por Bosque, 1992).

La geoestadística ofrece una manera de describir la continuidad espacial, que es un rasgo distintivo esencial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks y Srivastava, 1989; citado por Hu, 1998). Petitgas (1996) (citado por Tinoco, 1999), la define como una aplicación de la teoría de probabilidades a la estimación estadística de variables espaciales.

El modelamiento espacial es la adición más reciente a la literatura estadística. Geología, ciencias del suelo, agronomía, ingeniería forestal, astronomía o cualquier disciplina que trabaja con datos colectados en diferentes locaciones espaciales necesita desarrollar modelos que indiquen cuando hay dependencia entre las medidas de los diferentes sitios. Usualmente este modelamiento concierne con la predicción espacial, pero hay otras áreas importantes como la simulación y el diseño muestral (Cressie, 1989; citado por Bosque, 1992).

- **Objetivo de la evaluación geoestadística**

Actualmente, la geoestadística es un conjunto de técnicas usadas para analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en espacio o tiempo. En contraposición con la estadística clásica o convencional, tales valores no se consideran independientes, por el contrario se suponen de manera implícita que están correlacionados unos con otros, es decir que existe una dependencia espacial. Intuitivamente esto indica que mientras mas cercanos estén situados dos puntos están más correlacionados y mientras más separados hay menos relación entre estos.

El proceso de estimación y modelación de la función que describe la correlación espacial es conocido como “análisis estructural”. Una vez realizado el análisis estructural, la predicción de valores en puntos no muestrales se puede hacer aplicando la técnica de interpolación *kriging* o simulándolos a través de “simulaciones condicionales”.

En resumen, a groso modo un análisis geoestadístico esta compuesto de tres etapas: la primera etapa es el análisis exploratorio de los datos, la segunda etapa es el análisis

estructural y, la tercera etapa son las predicciones (llamadas también etapa *Kriging* o simulaciones).

La primera etapa, conocida como el análisis exploratorio de los datos, esta basada en técnicas estadísticas convencionales que nos permitan obtener todo un conjunto de información, desconocida *a priori* sobre la muestra bajo estudio, que es imprescindible para realizar “correctamente” cualquier análisis estadístico y en particular, un análisis geoestadístico.

La segunda etapa es el análisis estructural, en la cual se describe la correlación promedio entre dos puntos en el espacio. El análisis estructural en el desarrollo de una evaluación geoestadística es la determinación de la dependencia espacial entre los datos medidos de una variable.

El análisis estructural es uno de los tópicos más importantes de la geoestadística puesto que se encarga de la caracterización de la estructura espacial de una propiedad o fenómeno regionalizado. Es el proceso en el marco del cual se obtiene un modelo geoestadístico para la función aleatoria que se estudia. En pocas palabras podemos decir que el análisis estructural consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada a partir de la adopción razonada de la hipótesis mas adecuada acerca de su variabilidad (Díaz, 2002). Esto quiere decir, que en dependencia de las características de estacionaridad del fenómeno se modelara la función de covarianzas o la de semivarianzas. En esta etapa se lleva a cabo con base en la información muestral, donde se calcula el semivariograma (*semivariogram*). El semivariograma, conocido también como variograma, es la herramienta central de la geoestadística. Cuando se evalúa conjunto de datos, el semivariograma calcula cuatro parámetros que determinan, donde, según cada

modelo del semivariograma (p.e., modelo Esférico, modelo Exponencial, Modelo Gaussiano, etc.); los valores de los parámetros pueden variar (ver Díaz, 2002 y referencias dentro). Los parámetros estimados por cada modelo del semivariograma son Intervalo (*Lag*), Alcance (*Range*), Meseta (*Sill*) y el efecto Pepita (*Nugget*). Estos se definen como:

- ▶ Intervalo (*Lag*), son los intervalos de distancia de la clase usada para calcular el variograma.
- ▶ Alcance (*Range*), es la distancia para la cual el semivariograma alcanza su meseta.
- ▶ Meseta (*Sill*), es el límite superior de cualquier modelo de semivariograma acotado, al que tiende asintóticamente para grandes distancias.
- ▶ Efecto Pepita (*Nugget*), es el punto o valor en el eje de las ordenadas (eje Y) de donde nace el semivariograma. El semivariograma por definición es nulo en el origen, pero en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar discontinuidad en el origen.

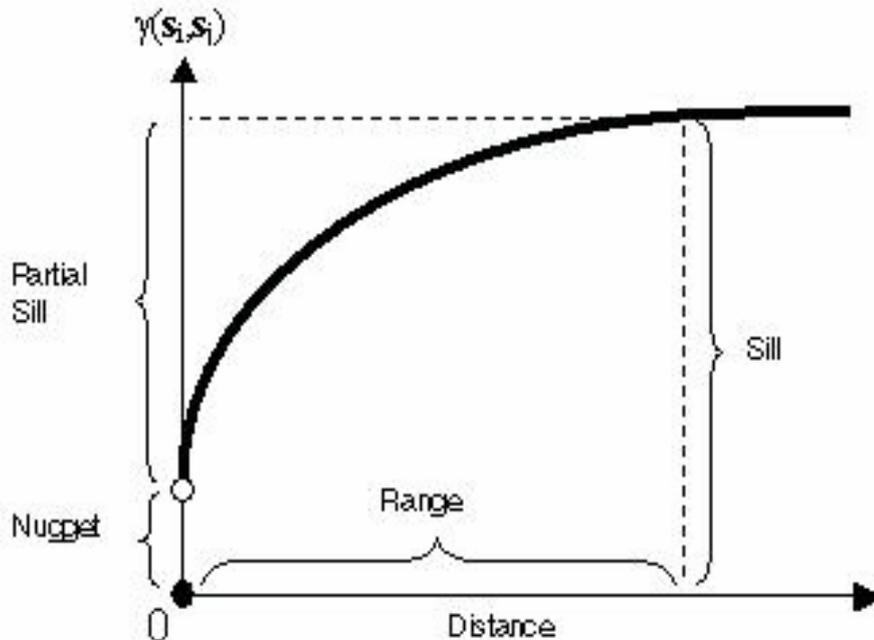


Figura 64. Parámetros del semivariograma (Fuente: ESRI, 2002).

Los parámetros calculados y presentados por el *Geostatistical Wizard* del programa *ArcGis v. 8.3* son: *Lag Size*, *Major Range*, *Partial Sill* y *Nugget*.

En la tercera etapa, también llamada etapa *Kriging*, se hace la predicción en puntos de la región no muestreados por medio de la técnica *Kriging*. Este es un proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales. Los pesos asignados a los valores muestrales son apropiadamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de muestreo (Petitgas, 1996; citado por Tinoco, 1999). Cuando se miden simultáneamente varias variables en cada sitio de muestreo y se hace predicción de una de ellas con base en información de las otras, se denota a esta técnica de predicción *Cokriging*.

Actualmente existen herramientas comerciales que permiten predecir con seguridad valores para superficies usando el método *Kriging*, errores estadísticos, umbrales y modelamiento de probabilidad (p.e., *ArcGis*).

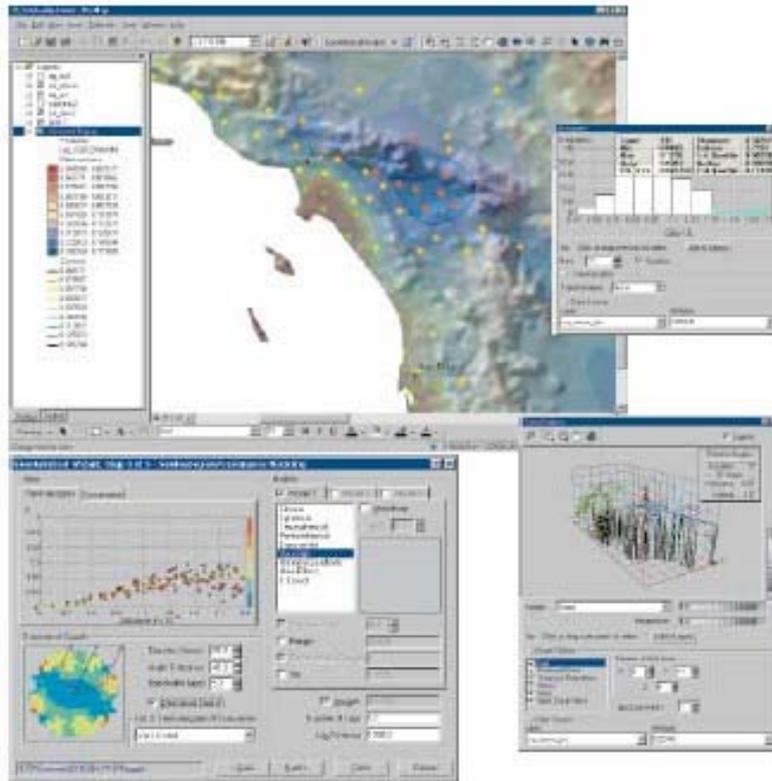


Figura 65. Ejemplo de evaluación geoestadística de un conjunto de datos (Fuente: ESRI, 2004).

XIII. Vita

Datos personales

Nombre completo : Gerardo Manuel Herbozo Jiménez

Teléfono : (511) 9772-1972

Correo electrónico : gamejihou@hotmail.com

Datos de Investigación

Especialización : Geología Marina, Geofísica Marina y Oceanografía
Geológica

Temas de Interés : Batimetría y morfología de suelo marino, Investigación en geofísica y geoacústica marina, Hidratos de gas y su distribución y evaluación e influencia en la estabilidad del suelo marino y el cambio climático, Estudio de riesgos y peligros geológicos marinos asociados con recursos minerales marinos, Sedimentología, Tectonismo e historia geológica de las cuencas de antearco, Influencia de flujos submarinos y montañas submarinas en la distribución y abundancia de recursos hidrobiológicos en la columna de agua, SIG y software dedicados a la investigación en geofísica y geología marina, Manejo y construcción de equipos para estudios en geología marina.