



BENTOS
SERVICIOS Y EQUIPOS MARINOS LTDA.

**FIPA N° 2016 - 05: REALIZACIÓN DE ESTUDIOS
BATIMÉTRICOS DE AMPLIA COBERTURA EN APOYO A
ESTUDIOS DE MODELACIÓN (REGIÓN DE LOS LAGOS)**

INFORME FINAL

**FONDO DE INVESTIGACIÓN PESQUERA Y DE ACUICULTURA
SUBSECRETARÍA DE PESCA Y ACUICULTURA**



Código BENTOS del estudio	Revisión del informe	Fecha emisión informe	Nº Páginas
1604	Rev. 00	06/08/2017	1 de 95

RESUMEN EJECUTIVO

En respuesta a la Licitación ID: 4728-16-LQ16 FIPA N° 2016-05, publicada por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura y denominada (SUBPESCA) "Realización de estudios batimétricos de amplia cobertura en apoyo a estudios de modelación (Región de Los Lagos)", BENTOS Servicios y Equipos Marinos Ltda., presenta el Pre Informe Final, cuyo objetivo es dar cuenta de las actividades realizadas en el período de julio de 2016 a abril de 2017. Asimismo detallar la metodología seguida para: la elaboración de un modelo batimétrico, en base a información existente proporcionada por SUBPESCA; el desarrollo de una batimetría multihaz que levante información de al menos 45.000.000 hectáreas; el análisis y procesamiento de la información batimétrica levantada; y finalmente el desarrollo de un modelo batimétrico mejorado del área de interés.

El estudio se inició el 7 de julio de 2016. Las primeras actividades fueron: formalización del contrato; planificación general del proyecto y reunión inicial de coordinación. Posteriormente se recibió información batimétrica existente de la zona, proporcionada por SUBPESCA. Dicha información fue analizada, normalizada y procesada, a fin de generar modelos batimétricos preliminares del área de interés con distintos métodos de interpolación (Topo a Ráster, IDW, Kriging ordinario, Kriging universal, TIN a Ráster y Vecino Natural). Una vez generados los modelos se compararon mediante técnicas cualitativas y estadísticas. Con los datos existentes, el modelo generado con el método de interpolación Vecino Natural es el que mostró mejor resultado. El detalle de esta etapa del estudio fue presentado en el primer informe técnico del proyecto denominado "Informe de Avance Corregido Rev. 01".

La información analizada en la primera etapa del proyecto constituyó un elemento de entrada para la planificación de la etapa siguiente, levantamiento batimétrico multihaz. La definición del área de levantamiento y de la metodología de trabajo a seguir fue revisada y aprobada por la Profesional Sectorialista de SUBPESCA a cargo del Proyecto, previo al inicio de los trabajos de campo.

Los trabajos de campo (autorizados por SHOA Res. 13270-24-575), se realizaron entre el 3 de noviembre de 2016 y el 5 de febrero de 2017. El levantamiento batimétrico se realizó a bordo de la embarcación Bentos (Matrícula PMO 6257), en la que se instaló un sistema multihaz cuyos principales componentes son: ecosonda multihaz, sensor movimiento, perfilador de velocidad del sonido, sensor rumbo, DGPS, entre otros. El software de navegación y adquisición usado es Hypack y Hysweep 2015. Una vez instalado el sistema multihaz en la embarcación, se realizó su calibración (Prueba de Parche), con el objeto de determinar las desviaciones angulares para introducir factores de corrección en el software de adquisición.

La adquisición de datos batimétricos propiamente tal se realizó en dos campañas entre las fechas 02 de diciembre del 2016 al 30 de enero del 2017. Durante la adquisición se midió diariamente la velocidad de propagación del sonido en el agua con el fin de corregir las lecturas de profundidades. Adicionalmente, con el fin de referir los datos de batimetría a un plano de referencia estandarizado, se determinó el Nivel de Reducción de Sondas (NRS), en 3 estaciones de marea, en las cuales se midió el nivel del mar durante el período del sondeo. En estos mismos sectores se generaron 3 vértices geodésicos vinculados a la red geodésica nacional. En términos de extensión, el levantamiento batimétrico multihaz cubrió una superficie de 63.000 hectárea, un 40% más del área de levantamiento planificada.

Finalmente, a fin de generar un Modelo Batimétrico Mejorado (MBM) del área de estudio, los datos inicialmente proporcionados por SUBPESCA (obtenidos a partir de Cartas SHOA) se combinaron con aquellos los datos levantados durante este trabajo, con el fin de generar una base de datos batimétricos mejorada de la zona. A partir de esa base de datos mejorada se generó un MBM utilizando el método de interpolación Vecino Natural que fue el que mostró mejor ajuste en la etapa inicial de proyecto. El MBM desarrollado permite observar morfologías hectométricas que previamente no era posible distinguir, como canales submarinos, montículos y depresiones de origen natural y morfologías de menor orden que sólo se distinguen en el MBM. Además es posible apreciar claramente los límites de las plataformas insulares en las zonas de levantamiento batimétrico.

El análisis espacial de ambos modelos permite apreciar diferencias con zonas de sobreestimación y subestimación de profundidad, que oscilan entre 68 y 102 metros, respectivamente. Adicionalmente al comparar el MBM con la información de las Cartas SHOA utilizadas, es posible determinar que el 89% de las sondas en la zona de levantamiento presenta diferencias con el MBM entre 0 y 10 m, y el 73% del total diferencias entre 0 y 5 metros. No obstante, existe un 0,5% de los puntos que presentan diferencias mayores a 50 m.

Conclusiones:

- La información preliminar ha permitido elaborar modelos batimétricos que integran la información batimétrica existente.
- Los modelos batimétricos elaborados a partir de información existente muestran que el resultado es sensible al método de interpolación utilizado y también a la densidad y distribución de los datos. No obstante, se destaca que existe consistencia entre todos los modelos generados y los datos de origen (Cartas SHOA).

- Con la información batimétrica existente, el modelo que mostró mejores resultados estadísticos (menor RSME y mayor R2) y una mejor representación gráfica es el generado a partir del método de interpolación Vecino Natural.
- En lo referido al levantamiento batimétrico multihaz, los equipos, procedimientos, y metodología en general utilizada, permitieron cumplir con el objetivo planteado. Los resultados obtenidos, son consistentes con los datos provenientes de fuentes oficiales como las Cartas SHOA, lo que valida la metodología utilizada.
- A partir de la Información preliminar disponible y la levantada en terreno fue posible crear un MBM, que muestra consistencia con el modelo preliminar y coherencia con las Cartas SHOA.
- El MBM permite observar la batimetría con mayor detalle, que previamente no era posible distinguir.
- La comparación del MBM con la información de las Cartas SHOA muestra que 89% de los datos presenta diferencias entre 0 y 10 m y sólo un 0,5% de los puntos diferencias mayores a 50 m.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	2
1 INTRODUCCIÓN	11
2 OBJETIVO GENERAL	12
3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.1 PORCENTAJE DE CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS.....	13
4 ANTECEDENTES	14
5 METODOLOGÍA DE TRABAJO	15
5.1 METODOLOGÍA PARA GENERACIÓN DE MODELOS BATIMÉTRICOS EN BASE A INFORMACIÓN EXISTENTE.....	15
5.1.1 RECOPIACIÓN Y NORMALIZACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE.....	15
5.1.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA.....	15
5.1.3 ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE MODELOS BATIMÉTRICOS GENERADOS EN BASE A DATOS EXISTENTES.....	16
5.2 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO MULTIHAZ.....	18
5.2.1 ÁREA DE LEVANTAMIENTO.....	19
5.2.2 EMBARCACIÓN, EQUIPOS E INSTRUMENTOS.....	21
5.2.3 INSTALACIÓN DE EQUIPOS A BORDO.....	23
5.2.4 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA O PRUEBAS DE PARCHE.....	27
5.2.5 VELOCIDAD DE LEVANTAMIENTO.....	27
5.2.6 CORRECCIÓN DE VELOCIDAD PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN EL AGUA.....	27
5.2.7 POSICIONAMIENTO Y GEODESIA.....	28
5.2.8 ADQUISICIÓN DE DATOS.....	29
5.2.9 PROCESAMIENTO DE DATOS MULTIHAZ.....	29
5.2.10 MEDICIÓN DE NIVEL DEL MAR.....	33
5.3 METODOLOGÍA DE GENERACIÓN DE MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO (MBM)....	36
5.3.1 INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN.....	36
5.3.2 GENERACIÓN DE MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO (MBM).....	37
6 RESULTADOS	38
6.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE.....	38
6.2 MODELO BATIMÉTRICO CON DATOS EXISTENTES.....	45
6.3 RESULTADOS BATIMETRIA MULTIHAZ.....	52

6.3.1	CALIBRACIÓN DEL SISTEMA MULTHAZ.....	52
6.3.2	ADQUISICIÓN DE DATOS MULTHAZ.....	62
6.3.3	PERFILES DE VELOCIDAD DEL SONIDO.....	64
6.3.4	VINCULACIÓN GEODÉSICA.....	71
6.3.5	MEDICIÓN DE NIVEL DEL MAR.....	75
6.4	RESULTADOS MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO (MBM)	80
6.5	RESUMEN DE PRODUCTOS GENERADOS	81
7	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	83
7.1	MODELO PRELIMINAR.....	83
7.2	LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO	84
7.3	MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO (MBM).....	87
8	CONCLUSIONES	90
9	ESTADO DE AVANCE DEL PROYECTO Y PRÓXIMAS TAREAS.....	91
10	EQUIPO DE TRABAJO	93
11	BIBLIOGRAFÍA	93
12	ANEXOS	94

ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y ANEXOS

TABLAS

Tabla 1:	Porcentaje de avance de los objetivos del proyecto.	13
Tabla 2:	Sectores planificados para el levantamiento batimétrico multihaz y superficie asociada a éstos.	21
Tabla 3:	Características generales de la embarcación de levantamiento.	22
Tabla 4:	Componentes del sistema multihaz.....	22
Tabla 5:	Resumen de información proporcionada por SUBPESCA.	38
Tabla 6:	Resultados del análisis detallado, sonda a sonda, donde se seleccionaron todas las sondas coincidentes entre 2 cartas.	44
Tabla 7:	Listado de cartas seleccionadas para el desarrollo del estudio.	45
Tabla 8:	Detalles de las propiedades y parámetros utilizados en la generación del modelo batimétrico.	46

Tabla 9: Resultados del análisis de validación cruzada entre valores medidos y estimados a través de cada método de interpolación. RMSE = raíz del error cuadrático medio.	49
Tabla 10: Antecedentes generales del del Vértice LLING 1.	73
Tabla 11: Antecedentes generales del del Vértice LEMU1.	74
Tabla 12: Antecedentes generales del del Vértice TALC 1.	75
Tabla 13: Aspectos generales de la medición del nivel del mar.	76
Tabla 14: Resultados estadísticos de comparación de valores puntuales de profundidad entre sondas de cartas náuticas y el modelo batimétrico mejorado.	84
Tabla 15: Actividades planificadas y el porcentaje de avance de las mismas.	92
Tabla 16: Equipo de trabajo principal.	93

FIGURAS

Figura 1: Área general de estudio definida en las Bases de Licitación.	12
Figura 2: Área de levantamiento propuesta por BENTOS y aprobada por SUBPESCA. Las áreas seleccionadas en la Figura 2, son aquellas coloreadas en celeste, azul, lila y verde. Aquellas áreas de color café, fueron excluidas del levantamiento por sugerencia de SUBPESCA, dado que se presentan una gran densidad de estructuras de cultivos marinos que impedirían el trabajo (Plano adjunto en Anexo 1).	20
Figura 3: Embarcación usada para el levantamiento.	21
Figura 4: Soporte y transductor instalados en la proa de la embarcación.	23
Figura 5: Antenas del sensor de rumbo o Gyro (círculos amarillos) y DGPS (recuadro) sobre mástil de la embarcación.	24
Figura 6: Sensor de movimiento.	24
Figura 7: Equipos integrados en sala de trabajo de la embarcación.	25
Figura 8: Separación de los distintos sensores, vista superior.	26
Figura 9: Separación de los distintos sensores, vista lateral.	26
Figura 10: Edición de datos, Etapa 1.	30
Figura 11: Edición de los datos en base al barrido, Etapa 2.	31
Figura 12: Edición de datos en base al área, Etapa 3.	32

Figura 13: Sensor de nivel del mar, marca HOB0, instalado en el fondo marino.	33
Figura 14: Muestra la ubicación y cobertura de las cartas incorporadas.	40
Figura 15: Densidad de sondas en el área de estudio.	41
Figura 16: Zona de intersección entre Carta 7300 y Carta 7370. Los 4 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas en posición geográfica similar.	42
Figura 17: Zona de intersección entre Carta 7300 y Carta 7390. Los 4 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.	42
Figura 18: Zona de intersección entre Carta 7300 y Carta 7410. Los 4 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.	43
Figura 19: Zona de intersección entre Carta 7410 y Carta 7430. Los 4 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.	43
Figura 20: Zona de intersección entre Carta 7370 y Carta 7430. Los 2 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.	44
Figura 21: Zona de intersección entre Carta 7400 y Carta 7410. Los 2 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.	44
Figura 22: Modelos batimétricos generados según método de interpolación. A) Topo a ráster; B) IDW; C) Kriging universal; D) Kriging ordinario; E) Ráster de TIN; y F) Vecino Natural.	47
Figura 23: Perfiles comparativos entre la superficie generada a través de cada método de interpolación y los datos originales de las Cartas SHOA (puntos negros).	48
Figura 24: Resultados del análisis de comparación entre los distintos métodos de interpolación utilizados para generar modelo batimétrico. Gráficos de dispersión entre valores de profundidad medida y estimada. La línea negra representa línea de tendencia y línea roja el ajuste perfecto.	51
Figura 25: Esquema de la prueba de Latencia.	53
Figura 26: Resultado gráfico de la desviación de Latencia corregida.	54
Figura 27: Esquema de la prueba de Rolido sin corregir.	55
Figura 28: Esquema de la prueba de Rolido corregido.	55
Figura 29: Resultado gráfico de la desviación de Rolido estribor corregido.	56
Figura 30: Resultado gráfico de la desviación de Rolido babor corregido.	57
Figura 31: Prueba de Cabeceo.	58
Figura 32: Resultado gráfico de Cabeceo corregido.	59

Figura 33: Esquema de la calibración de Guiñada (Yaw).....	60
Figura 34: Resultado gráfico de Guiñada corregido.....	61
Figura 35: Resultado gráfico de Guiñada corregido.....	62
Figura 36: Ubicación de las estaciones de medición de la velocidad de propagación del sonido mediante SVP y CTD.....	64
Figura 37: Perfiles VS estaciones SVP 1, SVP 2 y SVP 3.....	65
Figura 38: Perfiles VS estaciones SVP 4, SVP 5 y SVP 6.....	66
Figura 39: Perfiles VS estaciones SVP 7, CTD 1 y CTD 2.....	66
Figura 40: Perfiles VS estaciones CTD 3, CTD 4 y CTD 5.....	67
Figura 41: Perfiles VS estaciones CTD 6, CTD 7 y CTD 8.....	67
Figura 42: Perfiles VS estaciones CTD 9, CTD 10 y CTD 11.....	68
Figura 43: Perfiles de VS estaciones CTD 12, CTD 13 y CTD 14.....	68
Figura 44: Perfiles VS estaciones CTD 15, CTD 16 y CTD 17.....	69
Figura 45: Perfiles VS estaciones CTD 18, CTD 19 y CTD 20.....	69
Figura 46: Perfiles VS estaciones CTD 21, y CTD 22.....	70
Figura 47: Ubicación general del Vértice LLING 1.....	72
Figura 48: Ubicación general del Vértice LEMU1.....	73
Figura 49: Ubicación general del Vértice TALC 1.....	74
Figura 50: Sitios de medición del nivel del mar en islas Llingua, Lemuy y Talcán.....	76
Figura 48: Altura de nivel del mar registrado en isla Llingua.....	77
Figura 49: Altura de nivel del mar registrado en isla Lemuy.....	78
Figura 50: Altura de nivel del mar registrado en isla Talcán.....	78
Figura 54: Modelo batimétrico mejorado.....	80
Figura 55: Histogramas de diferencias entre valores de profundidad de sondas de cartas náuticas con valores puntuales de profundidad del modelo mejorado en las mismas ubicaciones (datos batimétricos de levantamiento).....	86
Figura 56: Detalle del MBM (arriba) con modelo preliminar (abajo) y gráfico comparativo de perfiles topográficos correspondientes.....	88

Figura 57: Mapa de diferencias de profundidades entre MBM y modelo preliminar. Valores positivos indican mayores profundidades en MBM y valores negativos mayores profundidades en modelo preliminar. 89

Figura 58: Sondas de cartas náuticas sobrepuestas a mapa de diferencias. 90

ANEXOS

- Anexo 1: Acta reunión de inicio, Memorándum técnicos y plano del área de levantamiento planificada.
- Anexo 2: Permiso SHOA.
- Anexo 3: Especificaciones de equipos usados.
- Anexo 4: Mediciones de velocidad del sonido y caracterización de la columna de agua.
- Anexo 5: Vinculación geodésica, monografías de vértice, proceso de líneas base y datos.
- Anexo 6: Estudio de marea, monografías, nivelación de cotas y datos.
- Anexo 7: Modelos Batimétricos preliminares.
- Anexo 8: Productos Batimétricos.
- Anexo 9: Modelo Batimétrico Mejorado y base de datos.
- Anexo 10: Material audiovisual.
- Anexo 11: Taller de presentación de resultados.
- Anexo 12: Resumen del proyecto en inglés.
- Anexo 13: Personal actividad.

1 INTRODUCCIÓN

En respuesta a la Licitación ID: 4728-16-LQ16/ FIPA N° 2016-05, publicada por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (en adelante **SUBPESCA**) y denominada "Realización de estudios batimétricos de amplia cobertura en apoyo a estudios de modelación (Región de Los Lagos)", BENTOS Servicios y Equipos Marinos Ltda. (en adelante BENTOS) presentó una oferta que le fue adjudicada mediante Resolución Exenta N° 1517 de fecha 18 de mayo de 2016.

En el contexto del desarrollo del estudio antes mencionado, se presenta a continuación el informe técnico denominado Pre Informe Final. Éste da cuenta de las siguientes actividades:

- Revisión, análisis, normalización y proceso de información batimétrica existente proporcionada por SUBPESCA al inicio del proyecto.
- Compilación, análisis y revisión de la información batimétrica existente proporcionada por SUBPESCA.
- Generación de modelos batimétricos preliminares en base a distintos métodos de interpolación de la información batimétrica existente.
- Evaluación de los modelos batimétricos obtenidos a partir de distintos métodos de interpolación de la información batimétrica existente.
- Definición de área de levantamiento batimétrico multihaz y planificación de trabajos de terreno (**Anexo 1: Memorándum técnicos y área de levantamiento**).
- Levantamiento batimétrico multihaz y proceso datos levantados.
- Generación de un modelo batimétrico mejorado.
- Evaluación de los resultados obtenidos.

Las tareas antes descritas se desarrollaron dentro del área de estudio definida en las Bases de Licitación (Figura 1). La etapa de levantamiento de datos batimétricos fue autorizada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, SHOA, en Resolución N° 13270-24-575 (**Anexo 2: Permiso SHOA**).

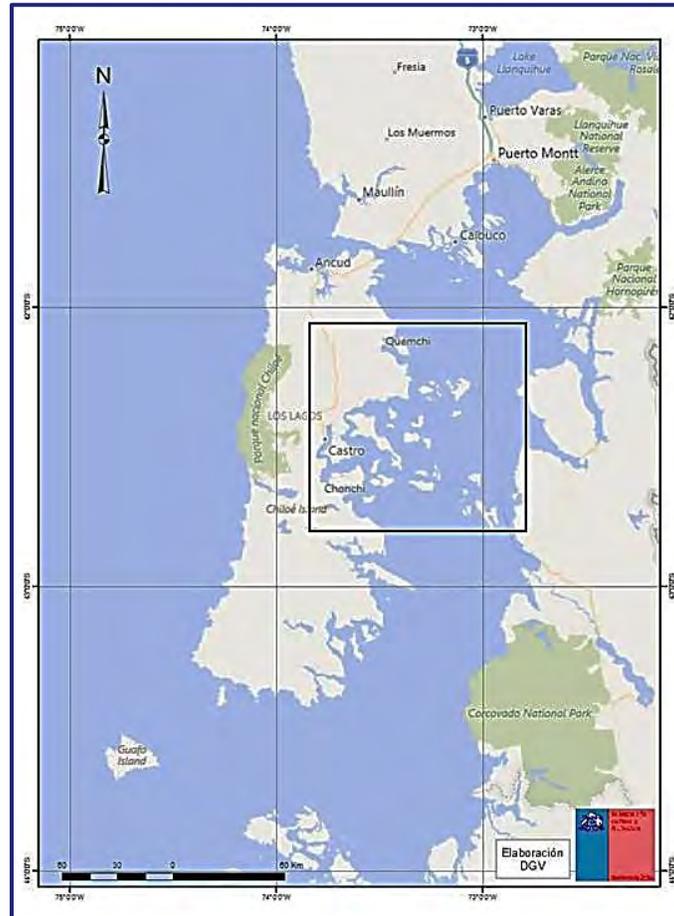


Figura 1: Área general de estudio definida en las Bases de Licitación.

2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del estudio, definido en las Bases de Licitación, es determinar la batimetría costera en las islas y canales aledaños entre Quemchi, Chonchi e Islas Desertores, ubicados en Chiloé Central, Región de los Lagos. Logrando un levantamiento batimétrico multihaz de 45.000 hectáreas, dentro del área demarcada en la Figura 1.

3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del estudio, definidos en las Bases de Licitación, son:

- Efectuar un levantamiento batimétrico multihaz de las zonas previstas, llegando a la más alta resolución disponible para esas zonas.
- Desarrollar los estudios y mediciones hidrográficas y geodésicas para proveer a ese levantamiento una calidad compatible con la cartografía náutica disponible hoy en día.
- Proveer un Modelo Batimétrico Mejorado (MBM) sobre la base de datos disponibles, la cartografía accesible y el levantamiento batimétrico efectuado.
- Proporcionar toda la información obtenida en un formato compatible con los actuales en uso en la Subsecretaría de Pesca, incorporando dicho sistema toda la información cartográfica disponible para el área.

3.1 PORCENTAJE DE CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

En la Tabla 1 se presenta el porcentaje de avance de los objetivos antes descritos.

Tabla 1: Porcentaje de avance de los objetivos del proyecto.

OBJETIVO	AVANCE
El objetivo general del estudio es determinar la batimetría costera en las islas y canales aledaños entre Quemchi, Chonchi e Islas Desertores, ubicados en Chiloé Central, Región de los Lagos. Logrando un levantamiento batimétrico multihaz de 45.000 hectáreas, dentro del área demarcada en la Figura 1.	100%
Efectuar un levantamiento batimétrico multihaz de las zonas previstas, llegando a la más alta resolución disponible para esas zonas.	100%
Desarrollar los estudios y mediciones hidrográficas y geodésicas para proveer a ese levantamiento una calidad compatible con la cartografía náutica disponible hoy en día.	100%
Proveer un Modelo Batimétrico mejorado sobre la base de datos disponibles, la cartografía accesible y el levantamiento batimétrico efectuado.	100%
Proporcionar toda la información obtenida en un formato compatible con los actuales en uso en la Subsecretaría de Pesca, incorporando dicho sistema toda la información cartográfica disponible para el área.	100%

4 ANTECEDENTES

El archipiélago de Chiloé se formó hace 13.000 años al momento del retiro del hielo de la última glaciación, hace 13.000 años debido a un rápido aumento de las temperaturas¹. Luego el mar invadió las cuencas y depósitos glaciales previamente labrados por el hielo. De esta manera, la zona del Archipiélago de Chiloé constituye una región de gran complejidad topo-batimétrica.

La batimetría, al igual que la marea de origen astronómico, posee influencia en la hidrodinámica marina y en consecuencia en el intercambio de materia y energía. En consideración a lo anterior, y a la actual demanda que las aguas de canales y fiordos Chilotes poseen para la acuicultura, resulta necesario conocer detalladamente la batimetría del sector.

La batimetría del área de estudio ha sido levantada históricamente para fines de navegación, de manera que la fuente esencial de datos batimétricos actuales, son las cartas náuticas realizadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Si bien estas cartas cubren una gran proporción del área de estudio, por su objetivo presentan una densidad de datos insuficiente para otros fines, o directamente, áreas que no han sido cubiertas, pues no se usan para navegación.

En este contexto, el presente proyecto consideró en una primera instancia, recabar los datos disponibles en las Cartas SHOA, compilarla en una sola base de datos, y en base a esta información determinar los sectores no cubiertos, o bien, aquellos que requieren ser densificados. En una segunda etapa del proyecto, se realizó un levantamiento batimétrico multihaz de esos sectores, para finalmente combinar toda la información en una base de datos batimétricos que integra los datos existentes y los levantados para el sector.

Finalmente se desarrolló un Modelo Batimétrico Mejorado (MBM) del área de estudio.

¹ En: Chilotan piedmont glacier in the Southern Andes during the last glacial maximum. Revista Geológica de Chile 17: 3-18.

5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

5.1 METODOLOGÍA PARA GENERACIÓN DE MODELOS BATIMÉTRICOS EN BASE A INFORMACIÓN EXISTENTE

5.1.1 Recopilación y normalización de información existente

La información batimétrica disponible para el área, está constituida principalmente por cartas náuticas realizadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y archivos digitales del borde costero del sector (SUBPESCA). Adicionalmente, SUBPESCA posee algunos archivos batimétricos de origen distinto (no SHOA) disponibles para el área de estudio.

Durante la primera reunión de coordinación² desarrollada para este proyecto, se acordó que SUBPESCA entregaría la información batimétrica y del borde costero existente, para su uso en el proyecto.

Se ha descartado la incorporación de otras fuentes de información batimétrica tales como IHO-DCDB (*International Hydrographic Office-Data Centre for Digital Bathymetry*) o GEBCO pues corresponden a bases de datos de gran escala y dado que el área cuenta con cobertura a menor escala, el uso de estos datos no es útil para los fines del proyecto.

5.1.2 Análisis de la información recopilada

Con el objetivo de estandarizar los archivos recibidos se utilizan herramientas informáticas tales como: GlobalMapper 13, Hypack 2015 y Excel, con las cuales se despliegan y normalizan los archivos, llevándolos al mismo formato, específicamente: UTM Norte, UTM Este y Profundidad (en metros), en Datum WGS-84.

Posteriormente los archivos normalizados se archivan en formato *.XYZ.

² La reunión fue llevada a cabo en dependencias de SUBPESCA, el 22 de julio de 2016 (acta de la reunión inicial se presenta en **Anexo 1**).

5.1.3 Elaboración y evaluación de modelos batimétricos generados en base a datos existentes

Un modelo batimétrico, o modelo de profundidad digital, corresponde a una representación digital de la batimetría de un sector específico. Existen modelos ráster (donde la distribución de los datos es una matriz regular) y modelos vectoriales (donde los datos se distribuyen en puntos, líneas o polígonos).

La elaboración del modelo digital, a partir de datos discretos, cuya distribución es irregular, requiere desarrollar un proceso de interpolación a fin de generar una matriz de datos regulares. En este contexto, mientras mayor es la densidad de datos discretos existentes, más fiel será el modelo a la batimetría real.

Existen varios métodos de interpolación (Li & Heap, 2008)³ y su aplicabilidad dependerá de factores tales como la irregularidad del terreno, la densidad de los datos discretos, la distribución de los datos, la resolución de la matriz requerida, entre otros. Por lo anterior, una comparación de modelos con diferentes técnicas de interpolación se suele realizar para elegir un modelo batimétrico (Bello-Pineda & Hernández-Stefanoni, 2007⁴; El-Hattab, 2014⁵ y; Curtarelli et al., 2015⁶).

En el presente estudio, y con el fin de buscar la mejor representación, se aplicaron diferentes métodos de interpolación para generar modelos a partir de los datos batimétricos existentes (cartas), específicamente:

- **Topo a Ráster.** Método que interpola una superficie hidrológicamente correcta a partir de datos de punto, línea y polígono. Está basado en el programa ANUDEM.
- **IDW (*Inverse Distance Weighted*).** Método determinístico que interpola una superficie ráster a partir de puntos, utilizando la técnica de distancia inversa ponderada. El supuesto que

³ En: A review of spatial interpolation methods for environmental scientists.

⁴ En: Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform.

⁵ En: Single beam bathymetric data modeling techniques for accurate maintenance dredging.

⁶ En: Assessment of spatial interpolation methods to map the Bathymetry of an Amazonian hydroelectric Reservoir to aid in decision making for water management.

utiliza el modelo es que los puntos más cercanos al punto no muestreado son más similares a este que los puntos más lejanos. El método requiere un valor para el parámetro de potencia (*power parameter p*) y para el sector a analizar (radio de búsqueda).

- **Kriging ordinario.** Kriging es un método geo-estadístico que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos. El método Kriging ordinario interpola valores de una variable primaria en ubicaciones no muestreadas y también genera un modelo de la incertidumbre o del error en la superficie estimada. Para desarrollar este método se debe determinar el semivariograma a utilizar y un radio de búsqueda.
- **Kriging universal.** Es un modelo kriging multivariable, también llamado kriging con tendencia, que presupone que hay un componente estructural presente y que la tendencia local varía de una ubicación a otra. Para desarrollar este método se debe determinar el semivariograma a utilizar y un radio de búsqueda.
- **TIN a Ráster.** Interpolación de un modelo TIN (*Triangulated Irregular Network*) a ráster.
- **Vecino Natural.** Método no geo-estadístico que combina las mejores características del modelo de interpolación de vecinos cercanos y TIN.

Posteriormente los resultados obtenidos mediante los métodos de interpolación indicados se comparan mediante un análisis topográfico/geomorfológico, incluyendo perfiles batimétricos; y mediante implementación de un método estadístico descrito más adelante.

En el análisis topográfico/geomorfológico se comparan los relieves generados a partir de los modelos y de perfiles batimétricos, para determinar la consistencia con un relieve submarino natural.

El método estadístico utilizado corresponde al método de retención (*hold-out method* o *split-sample method*). Este método consiste en separar los datos en dos subsets de datos, un set de datos de entrenamiento (*training set*) y un set de prueba (*test set*). Cada interpolación se realiza con los datos de entrenamiento y luego se comparan los valores estimados por cada método con los valores de prueba.

Posteriormente, se realiza una comparación del comportamiento de las técnicas de interpolación usando estadísticos asociados al error de la interpolación. Se calculan el error medio (*mean error*

- ME), el error absoluto medio (*mean absolute error* - MAE), la raíz del error cuadrático medio (*root mean square error* - RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2), entre las profundidades medidas (del set de prueba) y las estimadas. Las fórmulas asociadas se muestran a continuación:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{Z}(x_i) - Z(x_i) \quad \text{Ec. 1}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)| \quad \text{Ec. 2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(x_i) - Z(x_i))^2} \quad \text{Ec. 3}$$

En donde:

$\hat{Z}(x_i)$ = Valor medido.

$Z(x_i)$ = Valor interpolado.

n = Número de puntos empleados en la interpolación.

5.2 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO MULTIHAZ

En el período de julio a septiembre de 2016, paralelamente a la recopilación de datos batimétricos existentes, al análisis de los mismos y al desarrollo de modelos batimétricos del área; se avanzó en la planificación de la fase de levantamiento batimétrico.

En lo referido a planificación logística: se revisaron los equipos, se realizaron las pruebas previas de funcionamiento y solicitud de permiso a la autoridad pertinente, SHOA, para el desarrollo de investigación científica y/o tecnológica marina (D.S.711); además de coordinación de operación con la Autoridad Marítima Local.

En lo referido a planificación técnica, BENTOS propuso a la Sectorialista de SUBPESCA a cargo del Proyecto, el área de levantamiento y metodología de trabajo para la siguiente etapa. A

continuación se presenta el área de levantamiento acordada y se detalla la metodología de trabajo acordada para el desarrollo del levantamiento multihaz.

5.2.1 Área de levantamiento

Sobre la base de datos compilada, se aplicó los criterios indicados en las Bases Técnicas de la Licitación, así como los acordados con SUBPESCA en la 1ª reunión de trabajo y comunicaciones posteriores. Estos son:

- Privilegiar áreas someras en torno a las islas, siempre considerando la seguridad en la navegación y la profundidad mínima asociada a ésta.
- No considerar el sector de Chiloé continental.
- No considerar sector central de aguas abiertas localizado entre isla Butachauques - costa continental - Isla Desertores, pues cuenta con buena cobertura batimétrica.
- Intentar incorporar cuerpos de agua completos (canales, fiordos).
- Considerar las limitaciones operativas del método de levantamiento (calado de la embarcación, posibilidad de maniobrar, cobertura del multihaz, etc.).

Revisando la base de datos disponible y aplicando los criterios de selección indicados, se acordó el siguiente plan de levantamiento:

- Levantar, en torno a cada isla, una franja de 1.000 metros de ancho a partir del veril de los 10 metros.
- Levantar sectores de baja cobertura batimétrica, adicionales a la franja de 1.000 metros definida arriba.
- Levantar algunos canales relevantes.
- Se descartó el levantamiento en esteros interiores de islas por motivos de seguridad, pues la mayoría son muy bajos, pero además poseen escasa importancia en la dinámica del sector.
- La profundidad mínima de levantamiento se definió en 10 metros, por motivos de seguridad en la navegación.

En la Figura 2 se muestra el área de levantamiento planificada, que fue revisada y aprobada por la Sectorialista de SUBPESCA a cargo del proyecto. Este plano se presenta con mayor detalle en el **Anexo 1**.

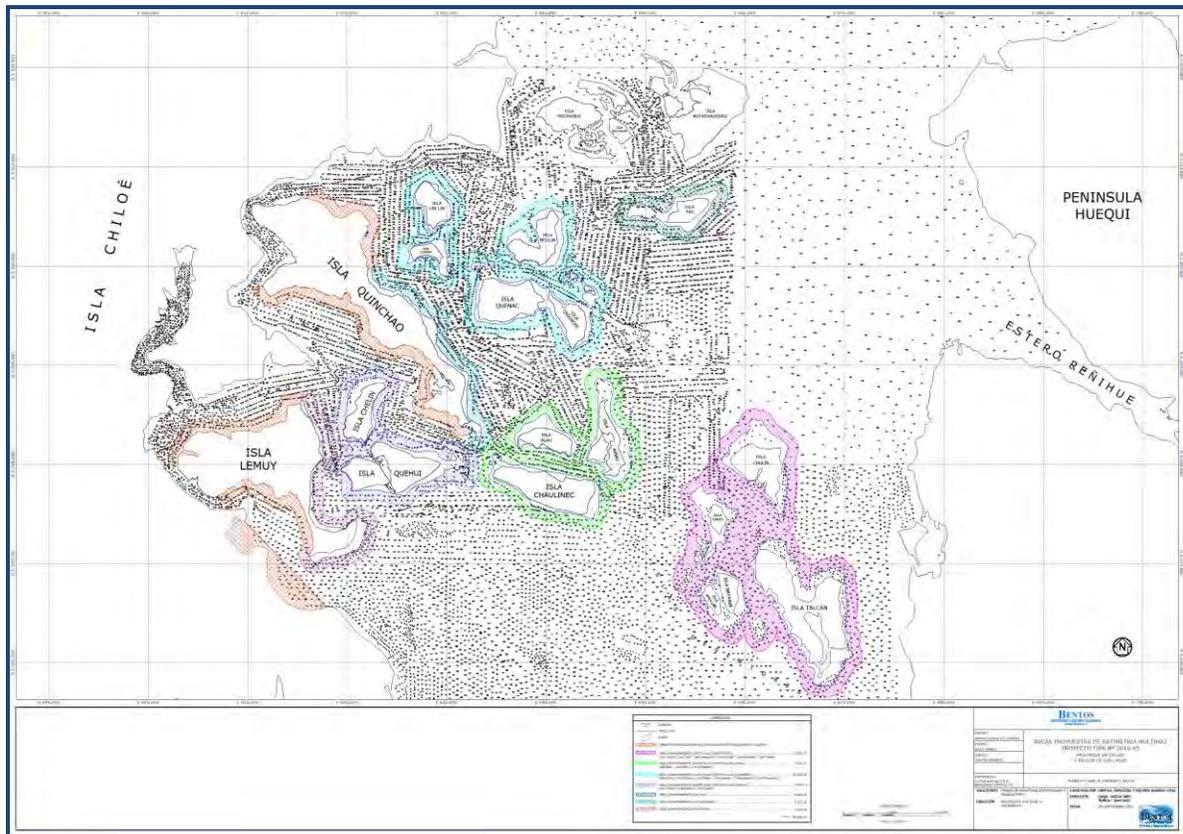


Figura 2: Área de levantamiento propuesta por BENTOS y aprobada por SUBPESCA. Las áreas seleccionadas en la Figura 2, son aquellas coloreadas en celeste, azul, lila y verde. Aquellas áreas de color café, fueron excluidas del levantamiento por sugerencia de SUBPESCA, dado que se presentan una gran densidad de estructuras de cultivos marinos que impedirían el trabajo (Plano adjunto en Anexo 1).

La superficie de levantamiento planificada por sector se detalla en la Tabla 2. Se destaca que la suma total de las superficies a levantar excede las requeridas en el contrato, esto dado que en terreno se espera que se presenten sectores que no se puedan cubrir según lo planificado, lo que será deducido del total teórico.

Tabla 2: Sectores planificados para el levantamiento batimétrico multihaz y superficie asociada a éstos.

IDENTIFICACIÓN DE SECTORES PROPUESTOS	SUPERFICIE EN HECTÁREAS
Grupo Islas Desertores	15.530,0
Grupo Islas Canal Apiao	7.829,1
Grupo Islas Canal Quinchao	10.798,0
Grupo Islas Canal Quehui	5.599,1
Isla Tac	2.642,9
Isla Quinchao	3.112,5
Isla Lemuy	2.514,0
TOTAL	48.025,6

5.2.2 Embarcación, equipos e instrumentos

Esta sección presenta un resumen de los principales elementos que se utilizaron para el desarrollo del levantamiento multihaz. El **Anexo 3: Especificaciones de equipos**, presenta las especificaciones de los principales equipos o instrumentos usados. La plataforma utilizada corresponde a la embarcación BENTOS (Matricula PMO 6257) cuyos componentes y características principales se presentan en la Figura 3 y Tabla 3.



Figura 3: Embarcación usada para el levantamiento.

Tabla 3: Características generales de la embarcación de levantamiento.

CARACTERÍSTICAS GENERALES LANCHA BENTOS	
<p>GENERAL</p> <p>Construcción: 1990 Casco: GRP Astillero: Duffy & Duffy Fiberglass Boats, Inc. USA Eslora: 12.81 m Manga: 4.42 metros TRG: 24.59 tons. Registro: 6257 Puerto Montt Estación Radio: CB – 4426</p>	<p>PROPULSIÓN</p> <p>Motor Principal: Detroit Diesel 8V92 600 HP Caja: Twin Disc MG 5111 2:1 Caña: Hidráulica dentro y fuera Baterías: 3 bancos individuales de 200AH para servicio, stand by y motor Achique: (x4) y Manual (x1) Energía eléctrica: 12VDC, 24VDC y 220 VAC/6 KW Capacidad combustible: 2200 L Agua potable: 400 L</p>
<p>ACOMODACIONES</p> <p>6 camas en dos camarotes Sala 2 baños Sala trabajo Calefacción aire forzado diésel</p>	<p>RADIOS Y EQUIPOS NAVEGACIÓN</p> <p>Radar: Furuno FR-1940 Radio HF: ICOM ICM-700 Radio VHF: Sailor RT-2047 Ecosonda y Plotter Garmin</p>
<p>SEGURIDAD</p> <p>Balsa: D.S.B. Continental x 8 Salvavidas : Solas (8x) Extintor: CO2 4X Extintor máquina: Haloclean</p>	<p>CUBIERTA</p> <p>Winche ancla hidráulico y manual Ancla con 60 metros cadena y 60 metros cabo nylon 19 mm Pluma proa: 150 K A frame: 200 kW Winche Oceanográfico 400k/2000 metros cable 3 mm Bote Auxiliar: Zodiac MKI Honda 25 HP</p>

Los componentes principales del sistema multihaz utilizados en este levantamiento se presentan en Tabla 4.

Tabla 4: Componentes del sistema multihaz.

COMPONENTE	MARCA / MODELO
Ecosonda multihaz	Elac Seabeam 1185 (180 kHz).
Sensor movimiento	TSS DMS 05
DGPS	Hemisphere AtlasLink con corrección diferencial satelital H10 (10 cm de error).
Sensor de velocidad del sonido en línea	Valeport Mini SVS
Sensor Rumbo	Hemisphere VS 111
Perfilador de velocidad del sonido	Valeport Midas, CTD RBR XR 420
Software adquisición y proceso multihaz	Hypack® Max & Hypweed® 2015

5.2.3 Instalación de equipos a bordo

Los componentes detallados en la sección precedente fueron instalados a bordo de la embarcación, integrados física y lógicamente para luego proceder a la medición de sus desplazamientos (posición relativa de transductor, DGPS, sensor de movimiento y de rumbo); para finalmente terminar con la configuración del software de adquisición (Hypack® Max & Hysweep®). La siguiente sección presenta la forma de instalación de estos componentes.

El transductor del sistema multihaz se instaló en un soporte a proa, solidario a la estructura del casco (Figura 4).

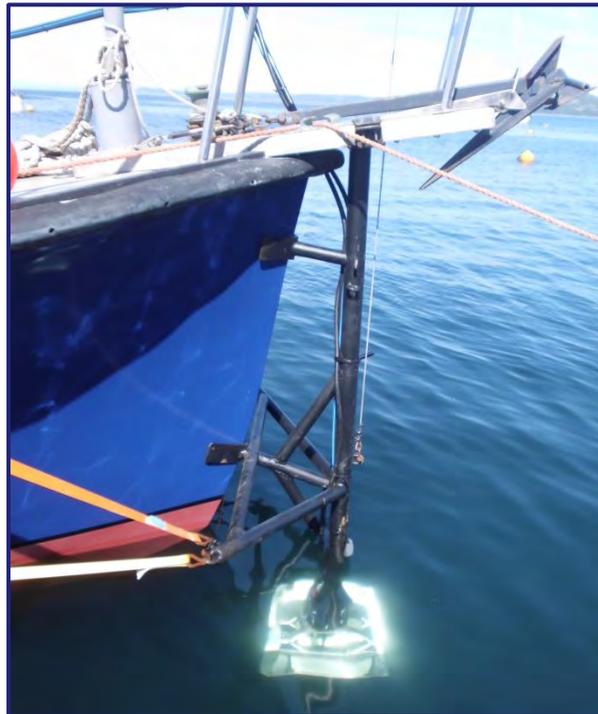


Figura 4: Soporte y transductor instalados en la proa de la embarcación.

Las dos antenas del sensor de rumbo o Gyro (separación de 2 metros entre sí) y DGPS, se instalaron en el mástil (Figura 5).



Figura 5: Antenas del sensor de rumbo o Gyro (círculos amarillos) y DGPS (recuadro) sobre mástil de la embarcación.

El sensor de movimiento, TSS DMS 05, se instaló en el interior de la embarcación, cercano a la línea de crujía y al centro de gravedad (Figura 6).



Figura 6: Sensor de movimiento.

En la sala de trabajo de la embarcación se instaló el resto de infraestructura computacional que permite controlar la navegación, el sonar y sensores anexos (Figura 7).



Figura 7: Equipos integrados en sala de trabajo de la embarcación.

Con el fin de saber la posición relativa de cada uno de estos sensores en la embarcación, se midieron sus desplazamientos con respecto a un punto de referencia, que corresponde a la posición del sensor de movimiento (coincidente aproximadamente con el centro de gravedad de la embarcación). Estos desplazamientos fueron ingresados al software hidrográfico con el fin de que éste calcule adecuadamente, la posición real de cada sonda (medición de profundidad). Las Figuras 8 y 9 presentan un esquema de la distribución y el desplazamiento real de los sensores en la embarcación.

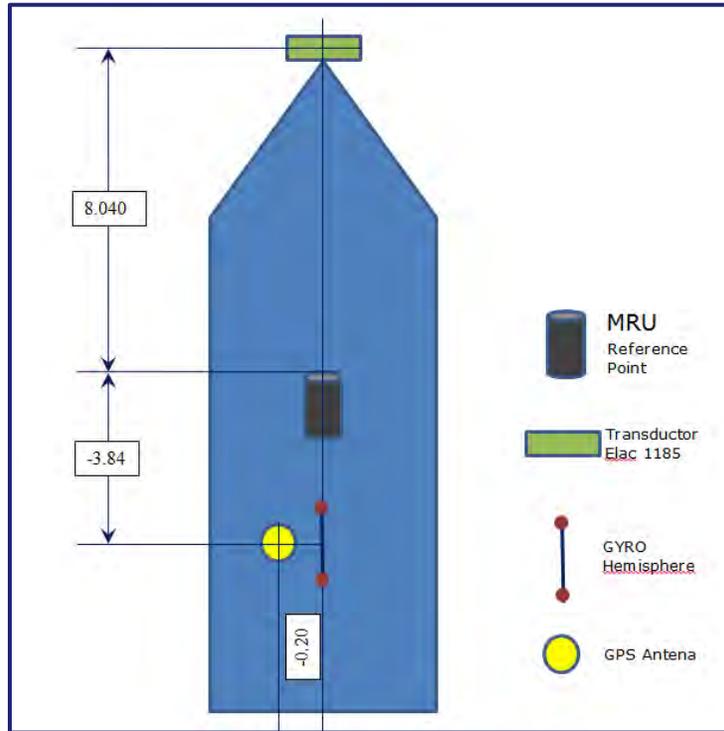


Figura 8: Separación de los distintos sensores, vista superior.

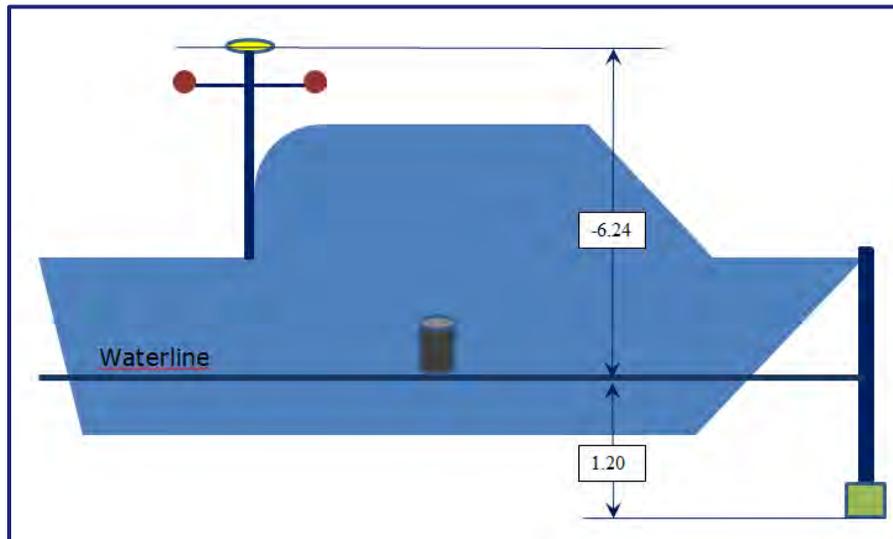


Figura 9: Separación de los distintos sensores, vista lateral.

5.2.4 Calibración del sistema o Pruebas de Parche

Dado que la instalación de los sensores, por prolija que sea, introduce desviaciones (verticales, horizontales y angulares) en los equipos, es necesario realizar una verificación y corrección de su **posición, denominado "Prueba de Parche"**. Este permite determinar la magnitud de las desviaciones e introducir los factores de corrección en el software de adquisición. Las pruebas realizadas se detallan a continuación:

- Prueba de Latencia (demora de recepción desde el GPS).
- Calibración de Rolido (inclinación lateral).
- Calibración de Guiñada (desvío respecto al eje de crujía o rumbo).
- Calibración de Cabeceo (inclinación proa - popa).

Este procedimiento, estándar para un levantamiento multihaz, se realiza antes de comenzar las mediciones y posteriormente durante el levantamiento cuando se sospeche que algún elemento pueda haberse movido. Los resultados obtenidos en cada prueba se ingresan al software hidrográfico Hysweep® 2015.

5.2.5 Velocidad de levantamiento

La velocidad del levantamiento está relacionada con la calidad de los datos y su cobertura. En profundidades altas, la velocidad se disminuyó para lograr una buena cobertura; en profundidades bajas (<100 m) sin embargo, esta variable resulta menos crítica. En términos generales, la velocidad de levantamiento varió entre 4 y 8 nudos.

5.2.6 Corrección de velocidad propagación del sonido en el agua

En esta sección se presenta un resumen de la metodología empleada para este fin. El informe detallado de las mediciones de velocidad de propagación del sonido en el agua está contenido en el **Anexo 4: Velocidad de propagación del sonido en el agua**.

La medición de las profundidades en base a ondas acústicas, requiere conocer la velocidad de la propagación del sonido en el agua y el tiempo de retorno de la señal acústica emitida desde la superficie, razón por la cual es necesario medir esta variable en la columna de agua (perfiles). Para este efecto, se utiliza un sensor de velocidad del sonido en el agua (SVP o CTD). Las mediciones de velocidad del sonido fueron realizadas al menos diariamente (salvo algún impedimento) y/o cuando se detectó a algún cambio relevante en los datos producto de este parámetro.

Los perfiles fueron realizados en base a los procedimientos estándar de BENTOS y consideran programar la tasa de adquisición de datos, equilibrar el sensor en el agua durante al menos 1 minuto (permitir que la temperatura del sensor y la temperatura externa se estabilicen) y luego, mediante el winche hidrográfico, bajar el sensor a una velocidad media de 1 m/s, hasta llegar cerca del fondo marino. Al recuperar el perfilador, los datos se descargan desde la memoria interna, y se incorporan en el software de adquisición.

Cabe destacar en esta sección, que el sistema multihaz, además del perfilador de velocidad del sonido, posee un sensor que mide permanentemente este parámetro en el transductor (sensor en línea).

5.2.7 Posicionamiento y geodesia

Según lo establecido en las Bases de la propuesta, el levantamiento fue referido al Datum WGS 84. Con el fin de posicionar adecuadamente el levantamiento batimétrico, se utilizó GPS diferencial, el que, de acuerdo a las Bases de Licitación, deberá tener precisión sub métrica. Para este efecto, durante el levantamiento, se utilizó el sistema ATLASLINK H10 de Hemisphere. Este método de corrección transmite la señal de corrección diferencial (RTCM) satelitalmente a la unidad móvil, a través de la banda L. La corrección utilizada (H10) posee precisión es decimétrica, es decir, aproximadamente 10 veces más precisa que lo exigido en las Bases.

Adicionalmente y con el fin de generar vértices geodésicos vinculados a la red geodésica nacional, se efectuó la georreferenciación de tres vértices geodésicos en el área de estudio. El **Anexo 5: Vinculación geodésica**, se presenta un detalle de la georreferenciación de 3 vértices a partir de vértices oficiales (SHOA) existentes en las inmediaciones del área de estudio.

5.2.8 Adquisición de datos

Con el fin de abarcar toda el área de estudio, el levantamiento consideró una superposición de datos entre cada barrido, de aproximadamente 30%. Esta superposición aumenta la densidad de datos, además facilita la discriminación y edición de datos espurios o erróneos y aumenta la resolución espacial; por tanto, mejora la calidad del levantamiento batimétrico realizado.

Para minimizar el riesgo de perder la información registrada en terreno, al final de cada día de mediciones, los datos se almacenaron en 3 medios digitales independientes. Una vez que los datos fueron respaldados, se realizó un pre-proceso de la información, con el fin de verificar la calidad de los datos obtenidos en la jornada y verificar el avance (cobertura) diario.

5.2.9 Procesamiento de datos multihaz

El procesamiento de datos multihaz, se efectuó mediante el programa hidrográfico Hyseewp® 2015 siguiendo una secuencia que considera 3 etapas:

Etapas 1: Verificación de los parámetros de levantamiento.

Los archivos de datos crudos fueron cargados en el programa de procesamiento para verificar los desplazamientos angulares, de distancia y tiempo, asegurando de esta forma que la información contenida en el archivo concuerde con la obtenida en la calibración realizada (Prueba de Parche).

En esta etapa se configuraron los filtros de picos y de dualidad topográfica. El filtro de picos se programó para eliminar datos con diferencia igual o mayor a 5 metros respecto del dato adyacente. El filtro de dualidad topográfica, por su parte, para eliminar la profundidad de mayor valor para una misma posición.

Además, en esta etapa se visualizaron y editaron los datos registrados por los sensores y se visualizó la disposición de las líneas de derrota (Figura 10).

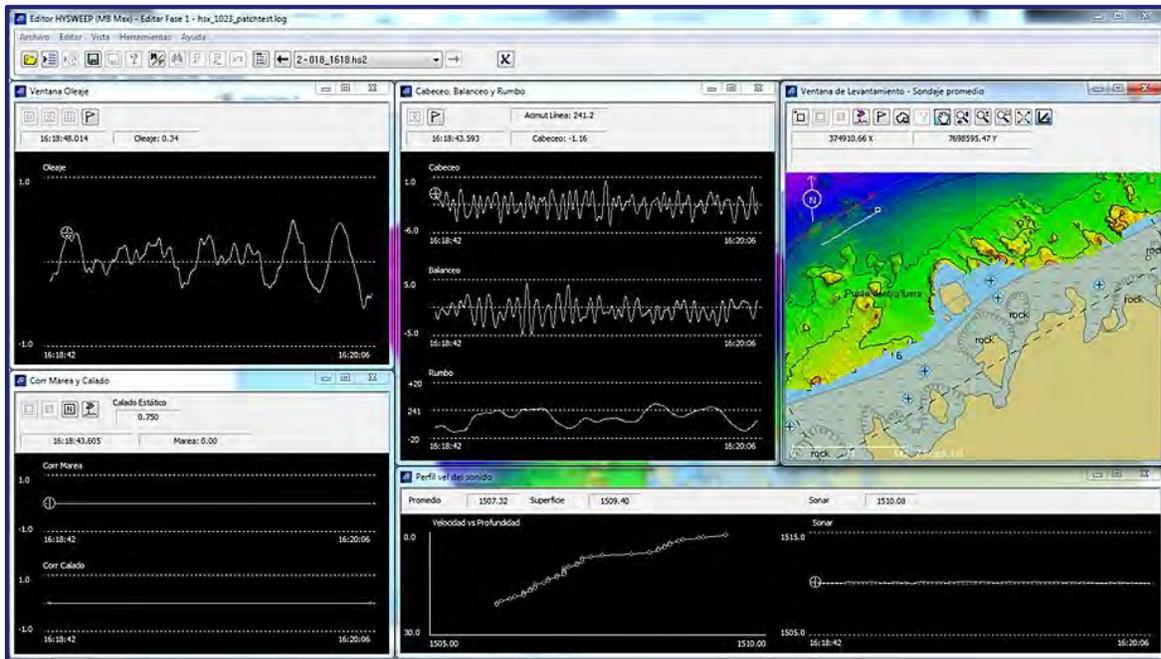


Figura 10: Edición de datos, Etapa 1.

Etapa 2: Edición de datos en base al barrido.

En esta etapa se aplicaron los filtros previamente configurados. Para luego desplegar cada barrido y cada pulso (dato), los que fueron analizados individualmente.

En esta etapa de edición se aplican varias y herramientas para visualizar, manipular y seleccionar los datos (Figura 11) de manera manual y automática. Con estas herramientas se eliminan los datos de mala calidad y se seleccionan los datos de buena calidad.

Cabe señalar que los datos de mala calidad o dudosos, no son eliminados de la base de datos general, sino que son marcados con un código que los invalida y los separa de los datos seleccionados, dejándolos disponibles en caso de requerirse un nuevo análisis.

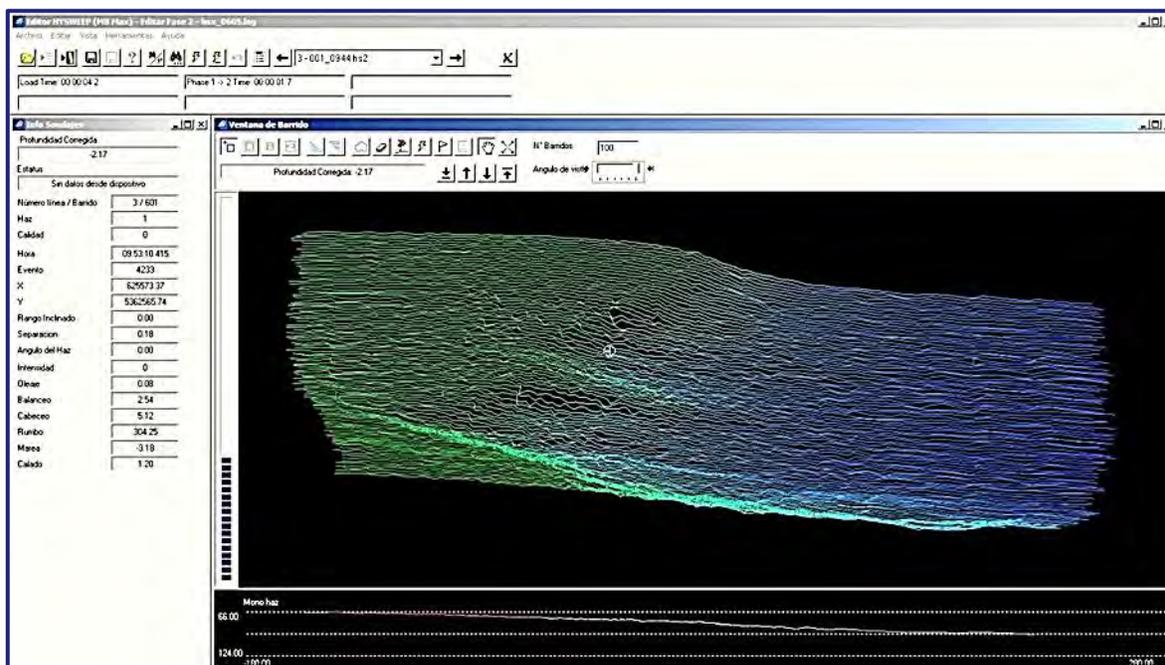


Figura 11: Edición de los datos en base al barrido, Etapa 2.

Etapa 3: Edición de datos en base al área.

En esta etapa, los datos son cargados en una matriz que los despliega espacialmente, permitiendo una inspección desde otra perspectiva, además de visualizar con mayor exactitud la real cobertura de los datos y su ubicación geográfica respecto al terreno.

Además en esta etapa, se cargaron todos los datos de cada línea de derrota, visualizándolas separadamente (Figura 12).

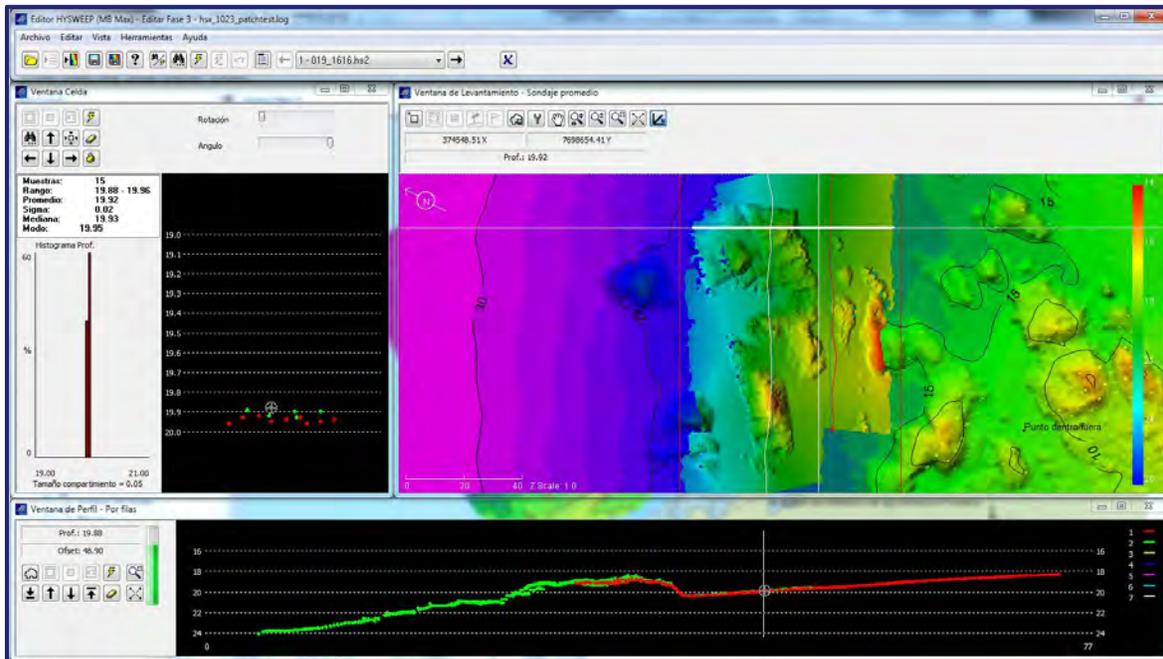


Figura 12: Edición de datos en base al área, Etapa 3.

Finalizada esta tercera fase de edición, se generó una matriz de datos regular y, a partir de ella, el archivo de posiciones y profundidades (*.XYZ). Esta matriz se construye de manera tal que la profundidad de cada a celda, corresponde al promedio aritmético de las sondas reales contenidas en ella y su posición corresponde al centro de la celda.

Durante el proceso se probaron varios tamaños de celda entre 10 y 100 metros, pero dado el volumen de datos, la extensión del área y el rango de profundidades registradas, se determinó que una matriz regular de 20 metros (datos cada 20 metros) por un lado representa adecuadamente la batimetría del sector, y por otro permite un manejo informático eficiente dado el volumen de datos.

5.2.10 Medición de nivel del mar

La presente sección contiene un resumen de la metodología utilizada para el estudio de mareas. El estudio detallado se presenta en **Anexo 6: Estudio de Marea**.

La medición de las variaciones que experimenta la superficie del mar durante la ejecución de cualquier sondaje de precisión, permite posteriormente referir las profundidades (sondas) medidas en una localidad a un plano de referencia estandarizado, en este caso, el Nivel de Reducción de Sondas (NRS), definido, según Publicación SHOA 3202, como aquel plano determinado por la mayor bajamar en sicigias estando la Luna en perigeo.

Los aspectos metodológicos del estudio de mareas, son los siguientes:

- Análisis no-armónico.
- Análisis armónico de marea.
- Régimen mareal.
- Definición de principales planos de referencia del nivel del mar.
- Análisis relación marea meteorológica vs presión barométrica.

Las mediciones del nivel del mar se realizaron empleando tres mareógrafos marca HOBO, modelo U20, con un rango de operación de 0 a 31 m. Los equipos fueron configurados para almacenar un registro cada 5 minutos. Cada dispositivo fue instalado en una carcasa protectora y adosado a un bloque de concreto sobre el lecho marino (Figura 13).



Figura 13: Sensor de nivel del mar, marca HOBO, instalado en el fondo marino.

A fin de compensar el efecto de la presión barométrica sobre la presión absoluta registrada por cada mareógrafo, se instaló en el sector tierra de cada localidad, un sensor de presión barométrica de la misma marca.

Una vez descargados los datos registrados, estos fueron compensados barométricamente obteniendo de esta manera así las variaciones de altura real del nivel del mar.

Al no existir un Nivel de Reducción de Sondas (NRS) oficial en cada localidad, se estableció un sistema de referencia vertical instalándose 3 cotas de marea, de acuerdo a lo indicado en la Publicación SHOA 3105. Las observaciones del nivel del mar fueron vinculadas a las cotas de marea instaladas mediante nivelación del pelo de agua.

Análisis de datos

Los datos registrados (cada 5 minutos) del nivel del mar, referidos al "cero del sensor", son sometidos a dos tipos de análisis: Análisis No-Armónico y Armónico; este último se ejecutó empleando la rutina para Matlab Robust T_Tide (Leffler y Jay, 2009).

Análisis No Armónico de Marea

El análisis no-armónico de marea corresponde a un análisis estadístico de los promedios y diferencias del nivel del mar. Este análisis suministra diversos niveles característicos de la elevación del nivel del mar, proporcionando planos mareales que permiten referenciar las sondas. Este tipo de análisis se realizó de acuerdo a lo indicado en las Instrucciones Oceanográficas N° 2 (SHOA Pub. 3202, 1999).

Las cotas de marea (tres) instaladas en cada localidad fueron referidas a las observaciones de marea, mediante el método de nivelación diferencial; para esto se determinó la diferencia de altura entre el cero del sensor y cada una de estas cotas.

Análisis Armónico de Marea

El análisis armónico asume que la marea observada corresponde a la sumatoria de un número determinado de constituyentes armónicos. Estos constituyentes armónicos, representativos de una onda de marea particular, se caracterizan por la amplitud, atraso de fase y velocidad angular, las cuales son determinadas a partir de argumentos astronómicos.

La cantidad de constituyentes armónicos identificados en el registro de marea dependerá de la longitud de las observaciones. En este caso se utilizó el criterio de Rayleigh que requiere que los constituyentes vecinos sean separados por, al menos, un ciclo completo sobre la longitud del registro.

Para la determinación del régimen de marea en el área de estudio se utilizó el criterio definido por el coeficiente de Courtier (F). Este coeficiente se obtiene del cociente de las amplitudes de cuatro de los principales constituyentes armónicos, obtenidos mediante el análisis armónico del nivel del mar.

Planos de Referencia

Los planos de referencia de la marea se infieren en base al ascenso y descenso del nivel del mar registrado, con respecto al cero del instrumento.

Asimismo, para el establecimiento del Datum de sondaje batimétrico, nivel al cual se refieren las sondas insertas en un plano batimétrico, se utilizará el criterio sugerido por la Organización Hidrográfica Internacional (OHI), es decir, seleccionar un plano tan bajo que la marea rara vez descienda bajo éste. Esta condición se obtendrá al determinar el nivel más bajo pronosticado en un extenso período de tiempo. El cálculo del Nivel de Reducción de Sondas (N.R.S.) o altura mínima esperable, se realizó a partir de la metodología expuesta en las Instrucciones Hidrográficas N°5: Especificaciones Técnicas para la Ejecución de Sondajes (SHOA Pub. 3105, 2005), es decir, considerando las 5 principales constituyentes de la marea:

$$NRS = Z_0 - (H_{M_2} + H_{S_2} + H_{N_2} + H_{K_1} + H_{O_1})$$

Dónde:

- Z_0 : Nivel medio del mar.
 H_{M_2} : Semiамplitud constituyente lunar principal semidiurno.
 H_{S_2} : Semiамplitud constituyente solar principal semidiurno.
 H_{N_2} : Semiамplitud constituyente lunar eclíptica mayor semidiurno.
 H_{K_1} : Semiамplitud constituyente lunisolar declinacional diurno.
 H_{O_1} : Semiамplitud constituyente lunar declinacional diurno.

Las amplitudes de estos constituyentes fueron determinadas mediante análisis armónico de la serie registrada del nivel del mar.

Análisis de la Relación Marea Meteorológica y Presión Barométrica

Las series de presión barométrica fueron obtenidas de forma simultánea junto con las observaciones de nivel del mar. Para relacionar ambos procesos, se determina la incidencia de la presión barométrica sobre el nivel residual del mar (marea meteorológica) mediante la correlación cruzada entre ambas series. Este análisis se realizó empleando datos horarios.

5.3 METODOLOGÍA DE GENERACIÓN DE MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO (MBM)

5.3.1 Integración de información

Para obtener una base de datos única, se combinaron las 3 bases de datos individuales disponibles:

- Archivo con datos resultantes del levantamiento batimétrico, con distribución en forma de una grilla regular de 20 metros.
- Archivo consolidado de información proporcionada por SUBPESCA generado en la fase anterior del proyecto.

- Archivo de costa (puntos con profundidad 0), proporcionada por SUBPESCA.

Durante el proceso de integración de datos y con el fin de obtener una base de datos única, en las zonas donde se superponen 2 bases de datos, se dio prioridad a los valores de profundidad obtenidos en la campaña y eliminan, por ejemplo aquellos valores de las cartas náuticas.

5.3.2 Generación de modelo batimétrico mejorado (MBM)

El MBM se generó a partir de la base de datos integrada, utilizando el método de interpolación del tipo Vecino Natural. Este método de interpolación se utilizó en el desarrollo del modelo basado en información existente (presentado en Informe de Avance Corregido), y es el que mejor se ajusta a los datos preexistentes.

Con el fin de comparar el modelo preliminar (obtenido en la fase previa del proyecto) y el MBM, generado en esta fase del proyecto, se realizó una comparación espacial de los resultados de ambos modelos, según la siguiente metodología:

- El modelo preliminar, cuyas celdas son de 100 metros, fue re muestreado a celdas de 20 metros, utilizando la técnica de interpolación vecino más cercano.
- El ráster generado en la fase previa fue restado al ráster del nuevo modelo (también con celdas de 20 metros) Modelo Batimétrico Mejorado.
- El ráster que presenta las diferencias (positivas o negativas) entre ambos modelos fue luego utilizado para evidenciar la variación de profundidad entre ambos modelos.

Esta metodología (diferencia de rásters de cada modelo), permitió detectar aquellos sectores con más o menos diferencias y realizar de esta manera un análisis geográfico de ellas.

Adicional a lo anterior, y para realizar un análisis estadístico entre las sondas de las cartas náuticas y los valores de profundidad obtenidos en este levantamiento batimétrico (MBM), se realizó una comparación entre:

- Diferencias entre valores de la batimetría modelo mejorado) y los valores de las sondas de las cartas náuticas;
- Diferencias absolutas entre los mismos puntos; y

- Diferencia ponderada de las profundidades, es decir, la diferencia de los valores de profundidad de la batimetría, con los valores de profundidad de las sondas, dividido por el valor de la profundidad puntual del modelo mejorado (Ec. 4).

$$Diferencia\ Ponderada_i = \left(\frac{Profundidad\ MM_i - Profundidad\ CN_i}{Profundidad\ MM_i} \right) \quad (Ec. 4)$$

En dónde:

MM=Modelo Mejorado

CN=Valor sonda de cartas náuticas.

Para facilitar la comparación se efectuaron histogramas de los resultados y se obtuvieron estadísticos, como: moda, mediana, máximos, mínimos, asociados a las diferencias de profundidad puntuales.

6 RESULTADOS

6.1 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE

La entrega de la información (de SUBPESCA a BENTOS) se realizó en cuatro etapas en fechas 26 de julio de 2016, 01 de agosto de 2016, 25 de agosto de 2016 y 06 de septiembre de 2016, completando con esto con los antecedentes necesarios para iniciar su análisis (Tabla 5).

Tabla 5: Resumen de información proporcionada por SUBPESCA.

FECHA DE ENTREGA	NOMBRE Y EXTENSIÓN DE ARCHIVOS
26/7/2016	Batimetría Chequian/.XYZ
26/7/2016	Batimetría CRodrigo Chiloé /.XYZ
01/8/2016	Batimetría Ancud_Chacao/.XYZ
01/8/2016	Batimetría Comau/.XYZ
01/8/2016	7300 Golfo Ancud/.xlsx
01/8/2016	Carta 7370/ .XYZ y .txt
25/8/2016	Carta 7210.XYZ
25/8/2016	Carta 7300.XYZ
25/8/2016	Carta 7320.XYZ
25/8/2016	Carta 7321.XYZ
25/8/2016	Carta 7330.XYZ

FECHA DE ENTREGA	NOMBRE Y EXTENSIÓN DE ARCHIVOS
25/8/2016	Carta 7370.XYZ
25/8/2016	Carta 7390.XYZ
25/8/2016	Carta 7400.XYZ
25/8/2016	Carta 7410.XYZ
25/8/2016	Carta 7430.XYZ
25/8/2016	Carta 7440.XYZ
06/9/2016	Líneas de Costa.DWG

Posteriormente, la información fue sometida a un análisis con el fin de evaluar su consistencia, cobertura espacial y densidad. Mediante la utilización de software Hidrográfico Hypack® se efectuó la compilación de los archivos disponibles, desde donde se seleccionaron aquellos que abarcaban el área de trabajo (descartándose aquellos fuera del área de trabajo) y seleccionando las cartas de menor escala disponible (mayor detalle). La Figura 14 muestra la cobertura de las cartas que cubren el área de estudio.

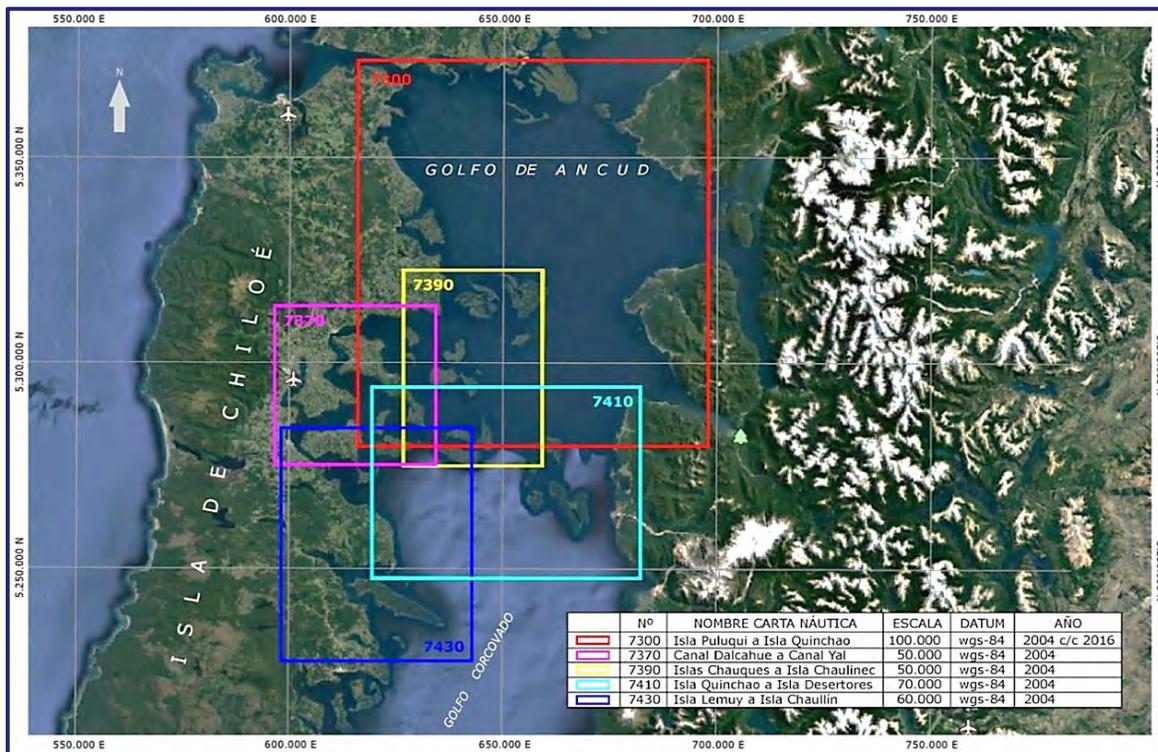


Figura 14: Muestra la ubicación y cobertura de las cartas incorporadas.

Las cartas disponibles para el área poseen escalas que varían entre 1:50.000 a 1:100.000, lo que implica que poseen distinta densidad de sondas. Por ejemplo, en una carta 1:50.000, la densidad promedio es de 1 sonda cada 500 metros, con algunas excepciones en las zonas de bajas profundidades, y una carta de escala 1:100.000 la densidad de sondas esperada es de 1 sonda cada 1.000 metros. La Figura 15 muestra la diversidad de densidades de datos (sondas) existentes para el área.

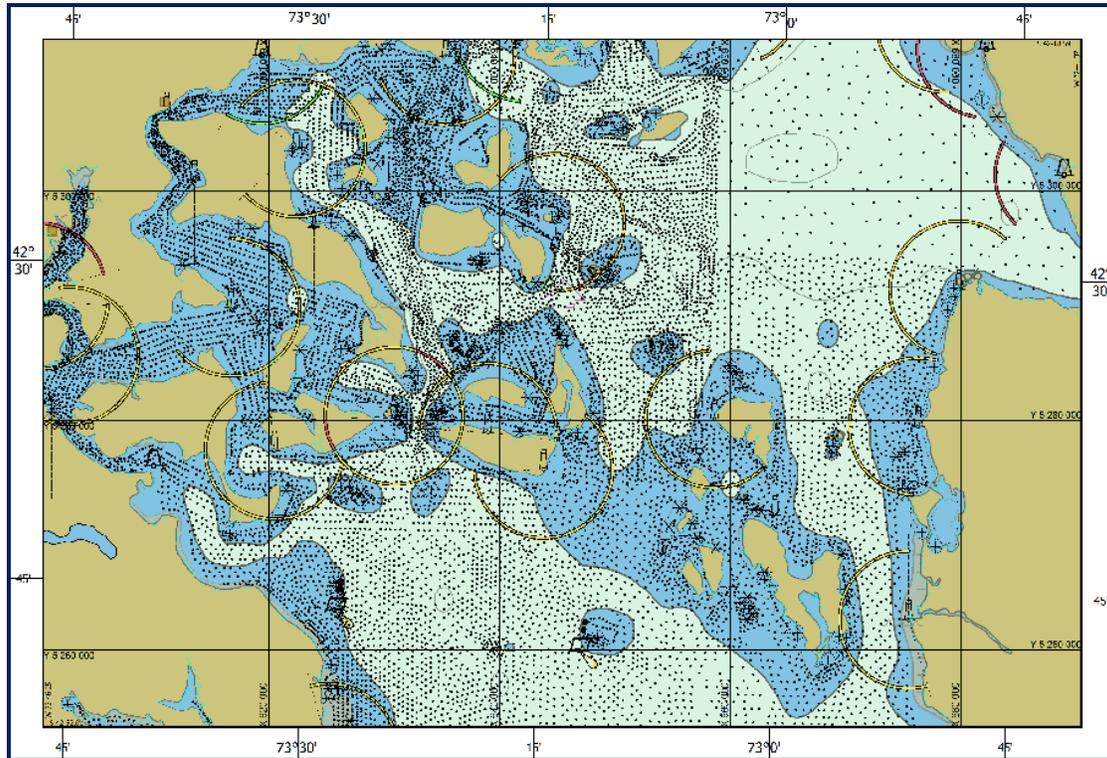


Figura 15: Densidad de sondas en el área de estudio.

Considerando que los datos analizados provienen de cartas náuticas, el Datum vertical utilizado corresponde, en todas al Nivel de Reducción de Sondas (NRS). Por otra parte, según lo consignado en las cartas, el Datum horizontal corresponde al WGS-84.

Las cartas seleccionadas según su escala y cobertura fueron luego analizadas con el fin de determinar la homogeneidad de los datos. Para esto, se tomaron las áreas de intersección de 2 de cartas y se trazaron perfiles donde existieran sondas coincidentes para ambas cartas (gráficos en Figuras 16 a 21). En estos gráficos es posible ver que la mayoría de las sondas coincidentes geográficamente para cada par de cartas, poseen valores de profundidad semejantes, y además mantienen el patrón del perfil batimétrico del lugar.

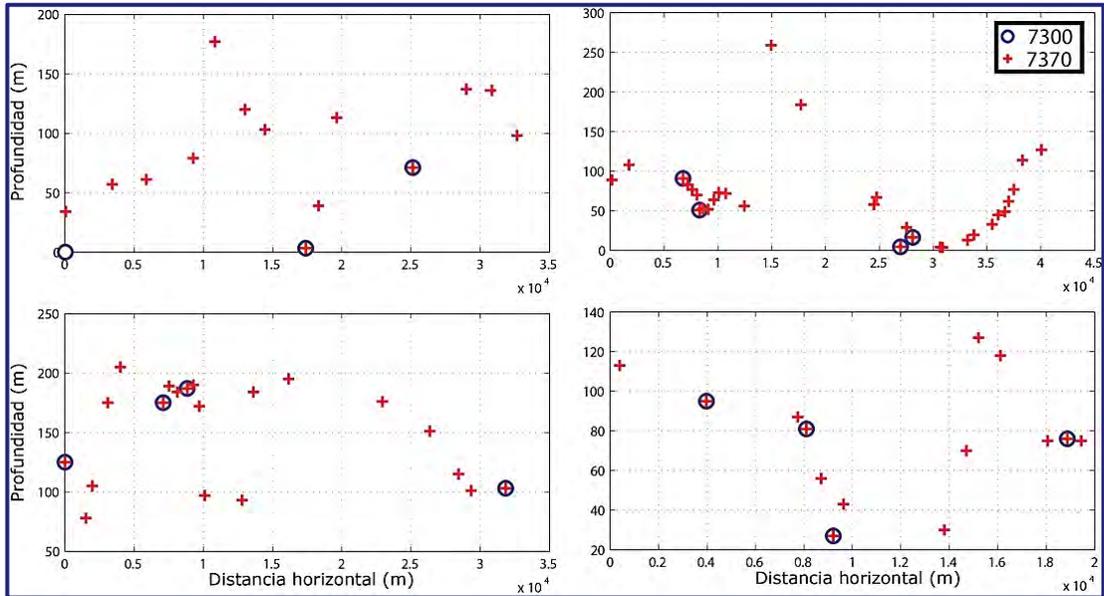


Figura 16: Zona de intersección entre Carta 7300 y Carta 7370. Los 4 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas en posición geográfica similar.

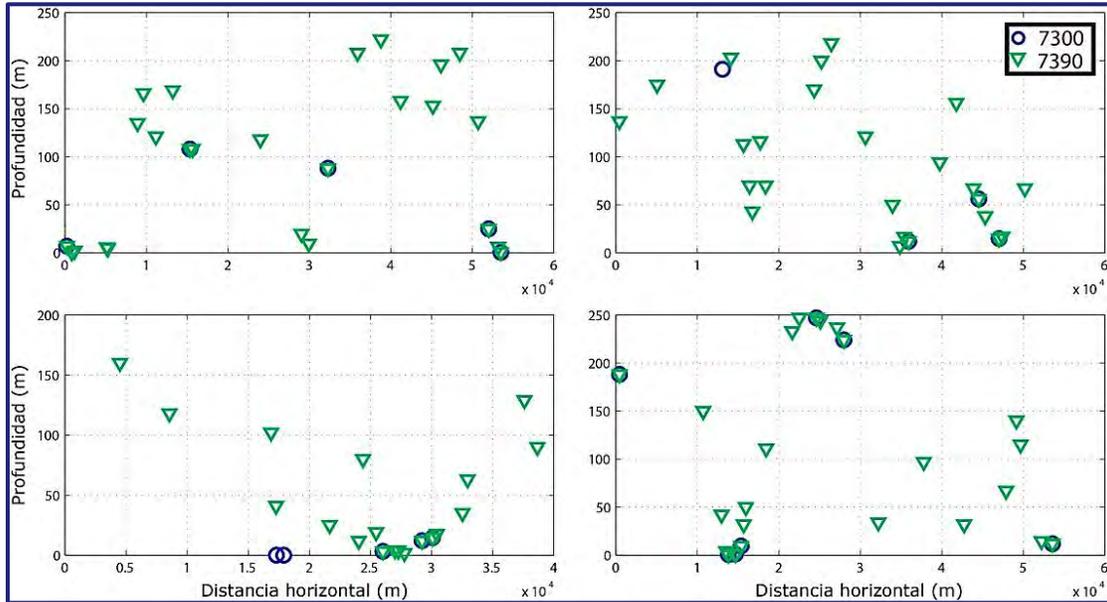


Figura 17: Zona de intersección entre Carta 7300 y Carta 7390. Los 4 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.

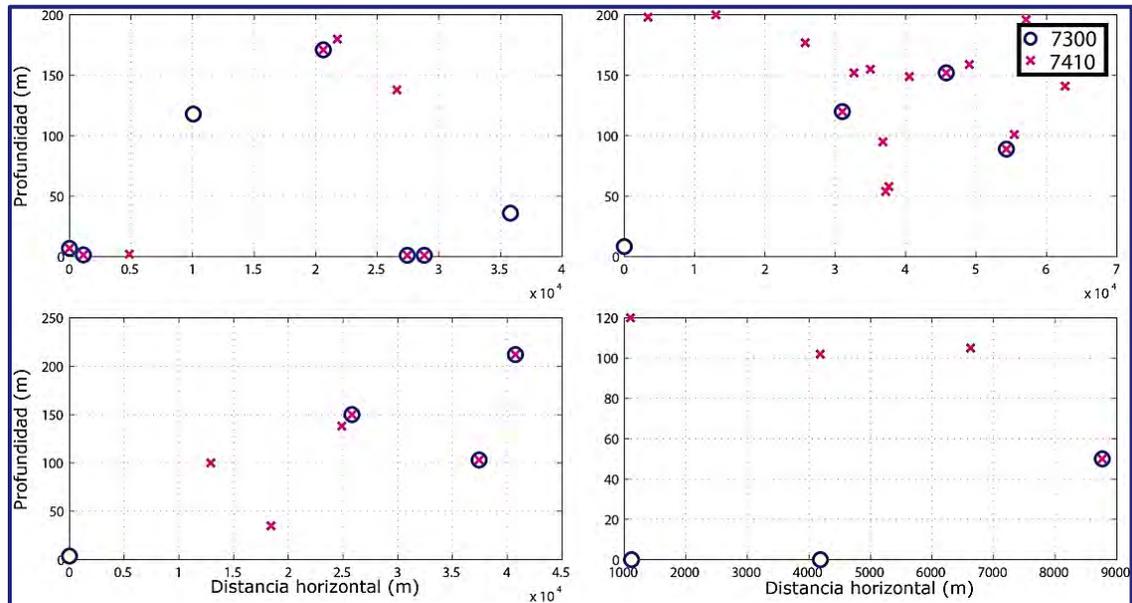


Figura 18: Zona de intersección entre Carta 7300 y Carta 7410. Los 4 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.

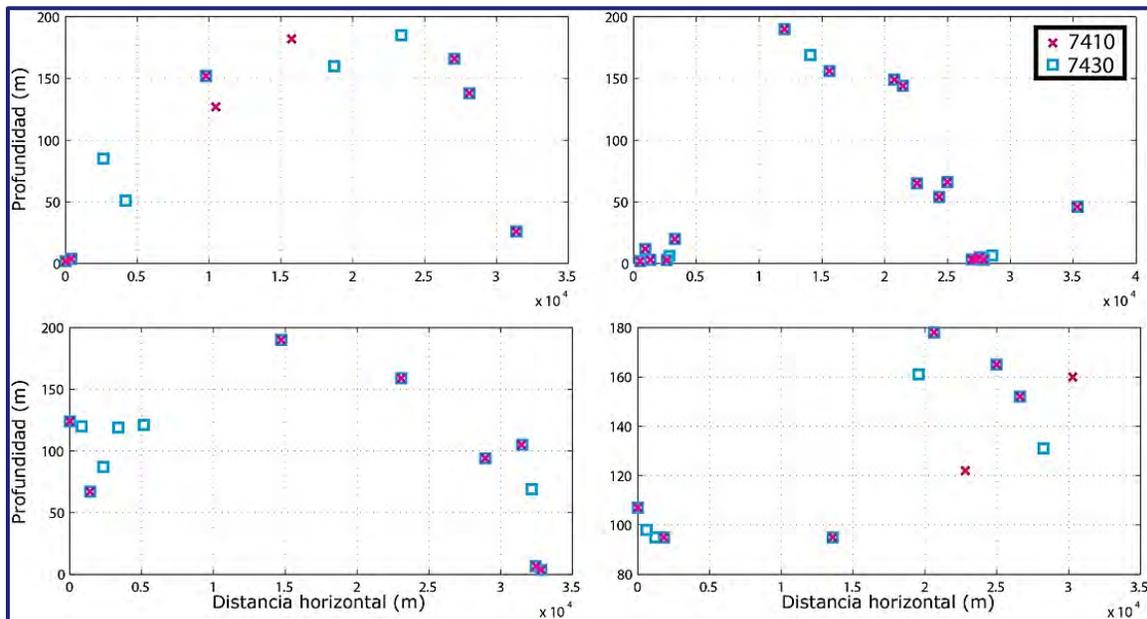


Figura 19: Zona de intersección entre Carta 7410 y Carta 7430. Los 4 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.

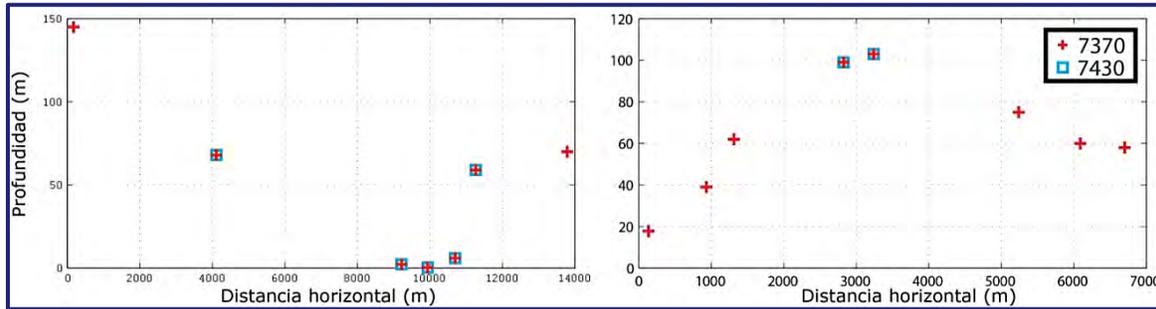


Figura 20: Zona de intersección entre Carta 7370 y Carta 7430. Los 2 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.

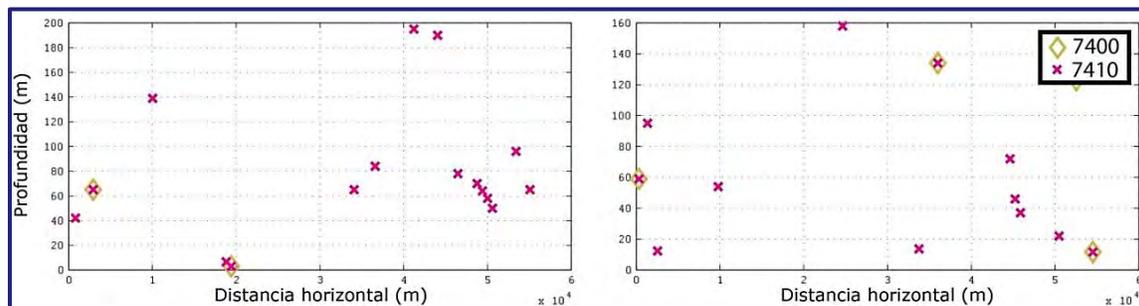


Figura 21: Zona de intersección entre Carta 7400 y Carta 7410. Los 2 perfiles desarrollados en esta área de superposición muestran las sondas de cada carta localizadas posición geográfica similar.

Si bien es cierto el análisis gráfico desarrollado permite detectar que existe una gran consistencia entre las distintas cartas, un análisis detallado sonda a sonda, donde se seleccionaron todas las sondas coincidentes entre 2 cartas, permitió determinar la existencia de diferencias en la profundidad. La Tabla inferior presenta los resultados de este análisis.

Tabla 6: Resultados del análisis detallado, sonda a sonda, donde se seleccionaron todas las sondas coincidentes entre 2 cartas.

INTERSECCIÓN CARTAS	N° SONIDAS SUPERPUSTAS GEOGRÁFICAMENTE	N° SONIDAS CON DIFERENCIAS ENTRE SÍ
7300-7370	317	11
7300-7390	574	1
7300-7410	495	2

7300-7430	61	0
7370-7390	1401	0
7370-7410	372	0
7370-7430	496	0
7390-7410	1242	0
7390-7430	334	0
7400-7410	53	0
7400-7430	29	0
7410-7430	1042	0
Total	6416	14

En base a este análisis se detectó que el número de sondas dudosas es relativamente menor, y en consecuencia, fueron eliminadas de la base de datos.

Como resultado y según lo expuesto, las cartas a ser utilizadas en el desarrollo del modelo batimétrico preliminar, luego de eliminar las 14 sondas dudosas, se detallan en la Tabla 5. Dicha información se presenta en formato, *XYZ en **Anexo 7: Modelos batimétricos preliminares**⁷.

Tabla 7: Listado de cartas seleccionadas para el desarrollo del estudio.

CARTA N°	NOMBRE	ESCALA	DATUM	AÑO
7300	Golfo de Ancud - Isla Puluqui a Isla Quinchao	1 : 100.000	WGS-84	2004
7370	Canal Dalcahue a Canal Yal	1 : 50.000	WGS-84	2004
7390	Golfo de Ancud - Islas Chauques a Is. Chaulinec	1 : 50.000	WGS-84	2004
7410	Golfos de Ancud - Corcovado Is. Quinchao a Is. Desertores	1 : 70.000	WGS-84	2004
7430	Golfo Corcovado Isla Lemuy a Isla Chaullín	1 : 60.000	WGS-84	2004

6.2 MODELO BATIMÉTRICO CON DATOS EXISTENTES

Los detalles de las propiedades y/o parámetros utilizados en la generación de cada modelo batimétrico se presentan en la Tabla 8. Todos los modelos fueron creados con celdas de 100 x 100 metros y con un radio de búsqueda de 12 puntos.

⁷ Esta información fue presentada previamente en el Informe de Avance Corregido, Rev. 01.

Tabla 8: Detalles de las propiedades y parámetros utilizados en la generación del modelo batimétrico.

INTERPOLACIÓN	PROPIEDADES Y PARÁMETROS
Topo a ráster	Aplicación de drenaje: Enforce with Sink
IDW	Parámetro de potencia $p=2$
Kriging Ordinario	Semivariograma: esférico
Kriging Universal	Semivariograma: linear con tendencia linear
TIN a ráster	Interpolación: linear

Los resultados se muestran en un cuadro comparativo de las superficies generadas por cada modelo (Figura 22). Estos presentan, en mayor o menor manera, buen ajuste a los datos existentes. Sin embargo, algunos de ellos introducen ciertos artefactos (picos/valles, superficies angulosas, etc.) que no parecieran representar una topografía submarina natural.

La Figura 23 muestra perfiles comparativos entre la superficie generada por cada método de interpolación y los datos originales de las Cartas SHOA. De ellos se desprende que, en mayor o menor medida, existe consistencia de los datos de origen (Cartas SHOA) con las superficies del fondo marino generadas.

En **Anexo 7** se presentan los archivos *.XYZ del resultado de cada interpolación⁸. El archivo en formato *.XYZ contiene coordenadas UTM N, UNTM E y Profundidad en metros.

⁸ En la reunión de inicio del proyecto se acordó que el formato para entrega de bases de datos es *.XYZ. Se destaca que esta información fue presentada anteriormente en el informe de Avance Corregido Rev. 01.

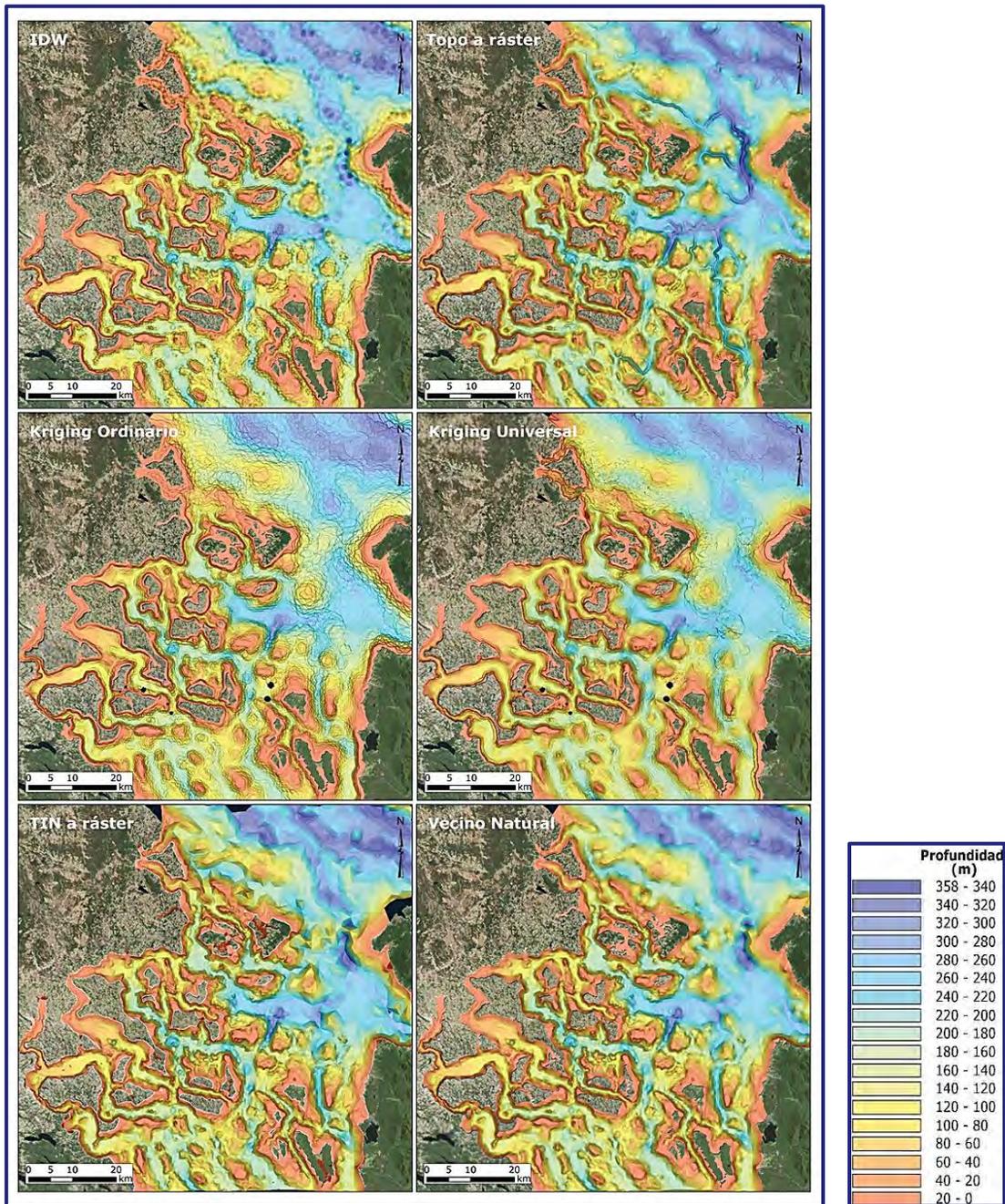


Figura 22: Modelos batimétricos generados según método de interpolación. A) Topo a ráster; B) IDW; C) Kriging universal; D) Kriging ordinario; E) Ráster de TIN; y F) Vecino Natural.

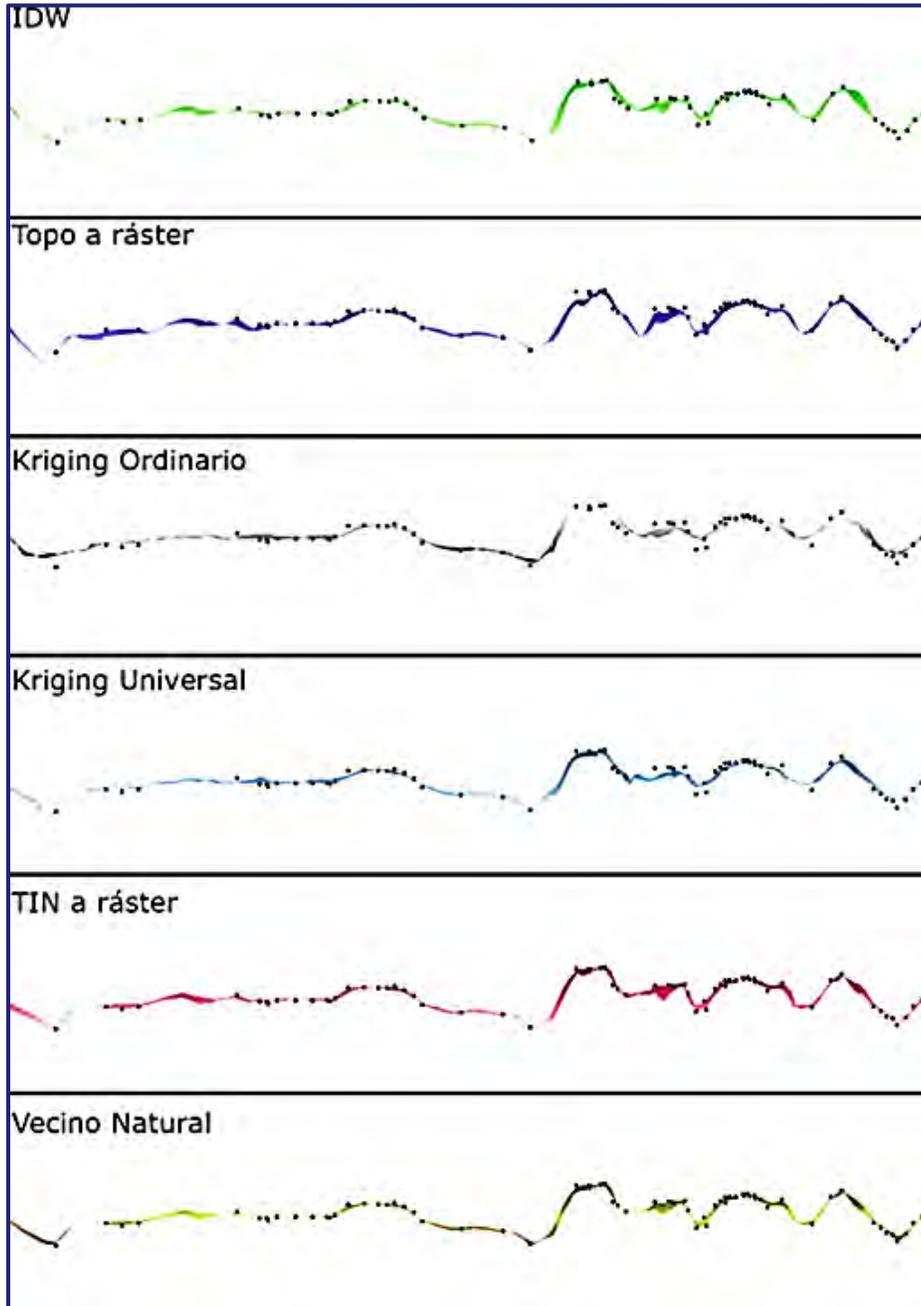


Figura 23: Perfiles comparativos entre la superficie generada a través de cada método de interpolación y los datos originales de las Cartas SHOA (puntos negros).

En base al análisis topográfico/geomorfológico se observa que el método IDW entrega valores consistentes con el de las cartas, sin embargo, genera un relieve con pequeñas depresiones y elevaciones artificiales. A su vez, las superficies generadas a partir de Kriging, tanto ordinario como universal, se ajustan menos que los otros métodos a las sondas (Figura 23). Por su parte, las superficies generadas mediante las técnicas de interpolación Topo a Ráster, Vecino Natural y el Ráster del TIN representan de mejor manera las sondas SHOA aunque, en sectores específicos, pueden generar valores de profundidad muy diferentes. El método TIN, por su parte, no resulta topográficamente realista debido a la triangulación formada por la baja densidad de datos de origen (esto es particularmente evidente en el sector NE del modelo donde la densidad de datos era de aproximadamente 1 cada 2000 m). Comparativamente, el método de interpolación Vecino Natural muestra consistencia con los datos de las sondas. Además, presenta un relieve más realista debido a que no se distinguen grandes artefactos y presenta un relieve suavizado acorde a las características de la zona.

Por otro lado, para la comparación estadística, se considera un set de entrenamiento con el 90% de los datos (19.510 datos) y el set de prueba con el 10% restante (2.168 datos). La Tabla 9 presenta los resultados estadísticos de la comparación realizada, resaltando los menores errores obtenidos para cada caso.

Tabla 9: Resultados del análisis de validación cruzada entre valores medidos y estimados a través de cada método de interpolación. RMSE = raíz del error cuadrático medio.

MODELO	ERROR MEDIO (m)	ERROR ABSOLUTO MEDIO (m)	RMSE (m)	R ²
Topo a ráster	-1,92	6,79	14,58	0,95
IDW	1,61	7,28	13,66	0,96
Kriging ordinario	0,63	13,21	18,66	0,93
Kriging universal	0,59	11,31	16,65	0,94
Vecino Natural	0,57	6,00	11,31	0,97
TIN a ráster	0,67	5,92	11,60	0,97

En **Anexo 7**: Modelos batimétricos preliminares, se presentan los resultados estadísticos detallados⁹.

⁹ Información presentada previamente en el Informe de Avance Corregido Rev. 01.

Se observa que los modelos Vecino Natural y TIN a ráster son los que presentan los mejores resultados estadísticos, puesto que presentan los menores valores del error absoluto medio (MAE) y de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), y los mayores valores en el coeficiente de determinación (R^2). Por su parte, los distintos estadígrafos correspondientes a las interpolaciones IDW y Topo a ráster presentan ambos valores similares. Los métodos Kriging ordinario y universal generaron una superficie batimétrica interpolada de mayor discrepancia (menor exactitud), con un RMSE (m) de 18,66 y 16,65 y un coeficiente de determinación de 0,93 y 0,94, respectivamente.

En la Figura 24 se muestran los gráficos de dispersión entre los valores de profundidad (m) medidos versus los estimados. En ellos también es posible apreciar que los modelos TIN a ráster y Vecino Natural presentan una menor dispersión y los valores de error son menores y más cercanos a la línea de ajuste perfecto, en comparación a los otros métodos.

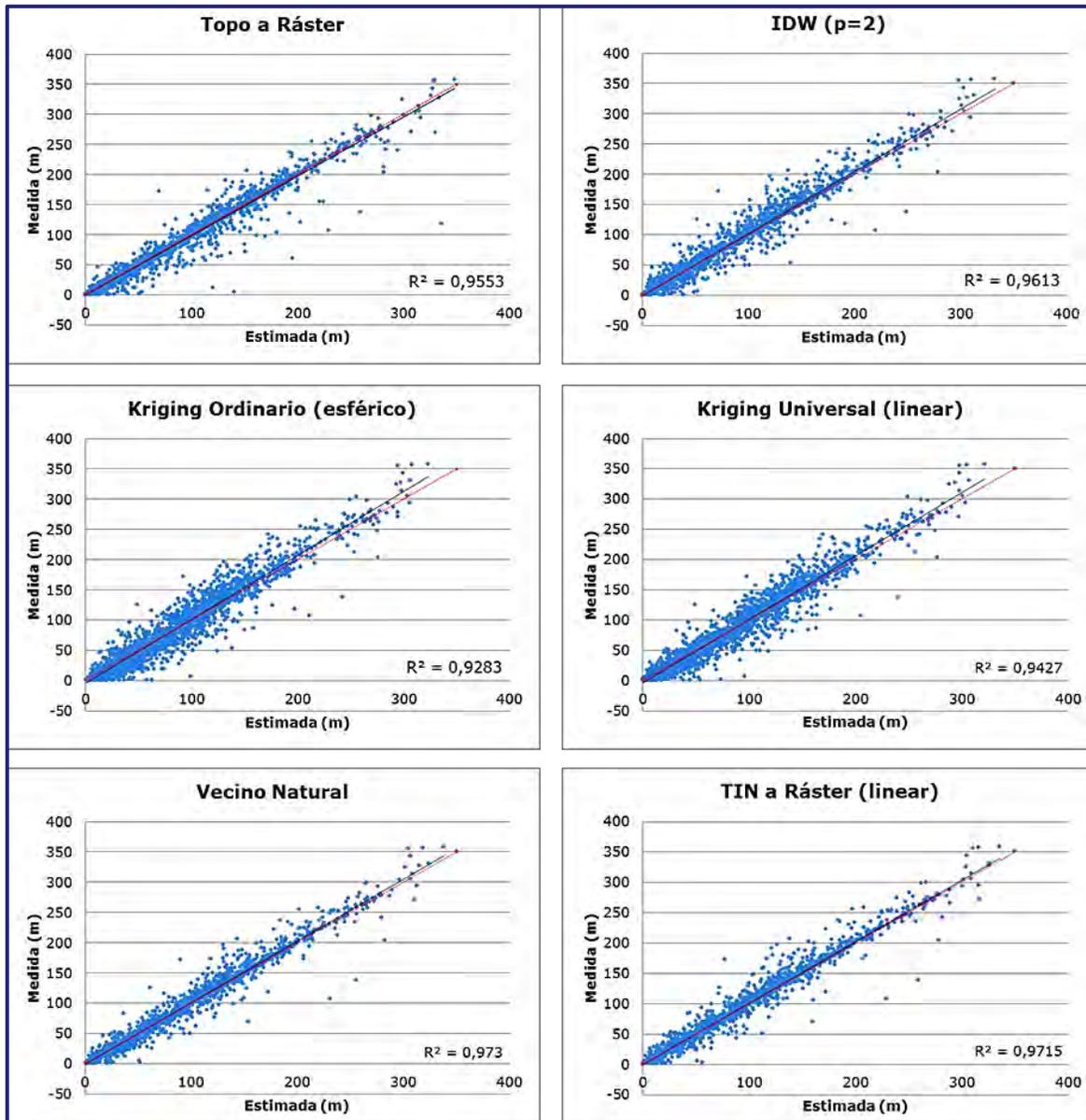


Figura 24: Resultados del análisis de comparación entre los distintos métodos de interpolación utilizados para generar modelo batimétrico. Gráficos de dispersión entre valores de profundidad medida y estimada. La línea negra representa línea de tendencia y línea roja el ajuste perfecto.

6.3 RESULTADOS BATIMETRIA MULTHAZ

La realización de actividades fue autorizada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), mediante Ordinario N°13270/24/575/VRS (**Anexo 2**). La campaña de terreno se realizó entre el 3 de Noviembre de 2016 y el 5 de Febrero de 2017, periodo que se desarrolló la instalación de equipos, el abastecimiento de combustible, agua y víveres, las pruebas de parche, los desplazamientos por mar, vinculaciones geodésicas, el levantamiento batimétrico propiamente tal y la desmovilización de equipos y personal.

A continuación se presentan los resultados del levantamiento batimétrico, medidas de velocidad del sonido, registro y estudio de mareas y de la vinculación geodésica.

El sistema multihaz se instaló en la embarcación según lo detallado en la sección 5.3 del presente informe. Posteriormente se probó su funcionamiento y la comunicación de los componentes y se realizó la calibración del mismo (prueba de parche). Una vez calibrado el sistema se inició la adquisición de datos para posteriormente procesarlos.

6.3.1 Calibración del sistema multihaz

Según se ha explicado en las secciones precedentes, previo al inicio del levantamiento, se realizó la calibración del sistema multihaz mediante la prueba de parche. A continuación se presentan los resultados de esta tarea (en **Anexo 8: Productos batimétricos**, se presentan datos de la calibración).

Latencia:

Para determinar el retardo de la señal de posición, se realizó la navegación de una línea de sondaje sobre una pendiente, en una misma dirección a velocidad de navegación y a máxima velocidad. Con esto, se obtiene un valor en segundos del retardo en la posición (Figuras 25 y 26), cabe notar que las nuevas generaciones de equipos GPS poseen una electrónica mucho más rápida, que antes, de manera tal que la latencia es hoy muy cercana a cero.

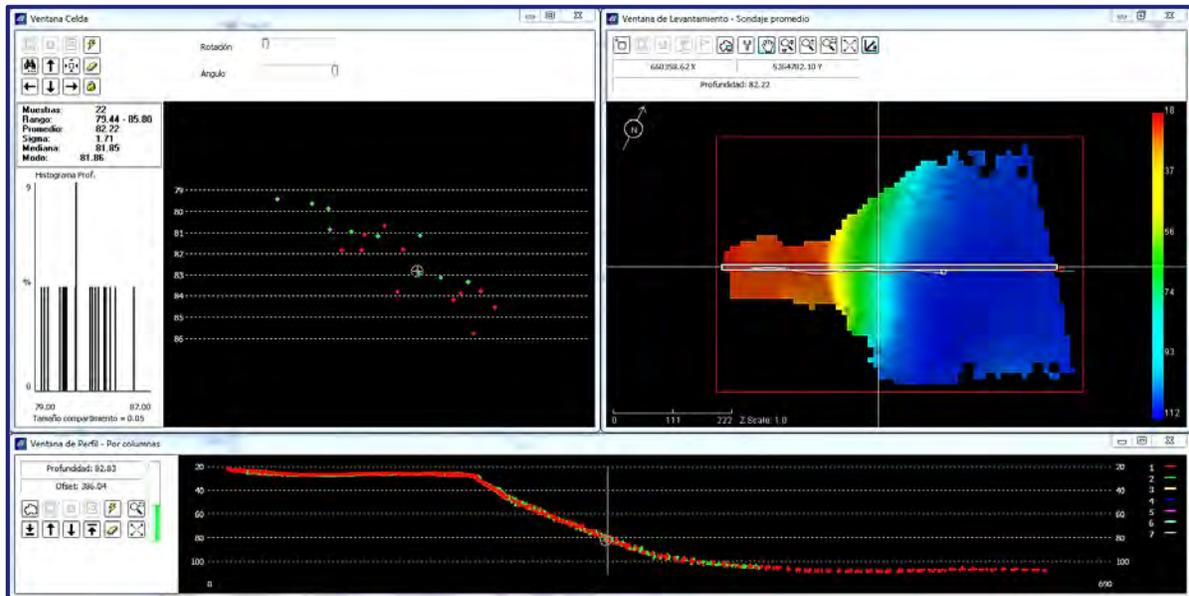


Figura 25: Esquema de la prueba de Latencia.

Los archivos utilizados en la prueba de Latencia fueron los siguientes: 001_0948.hsx; 001_0953.hsx.

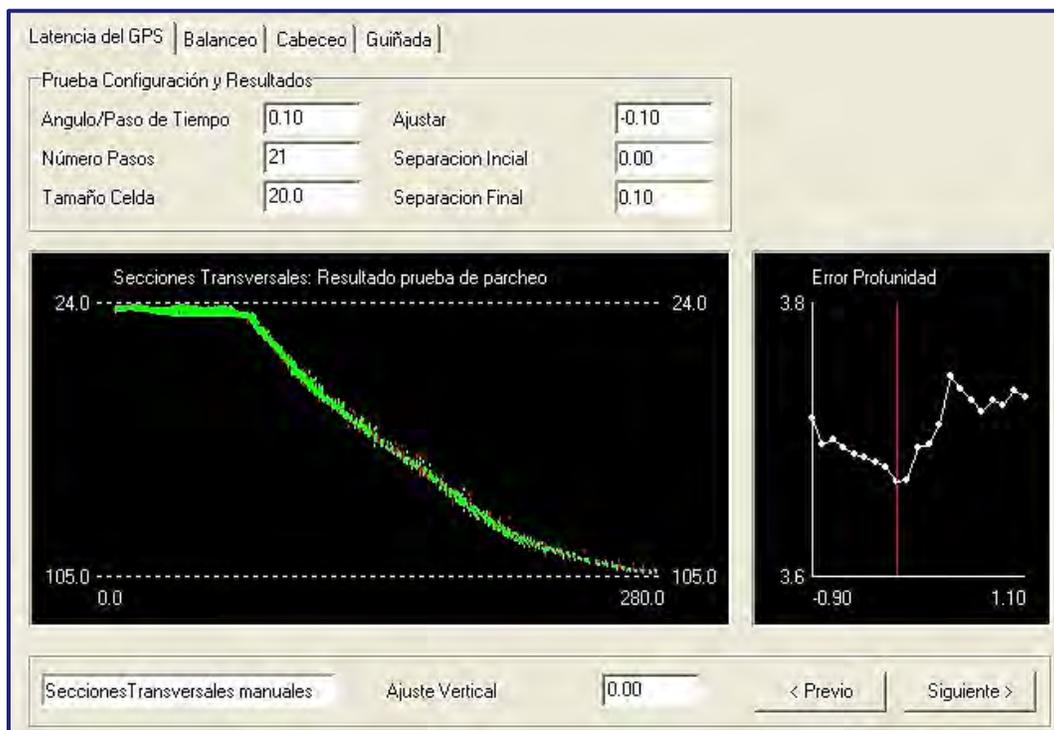


Figura 26: Resultado gráfico de la desviación de Latencia corregida.

Rolido

La desviación de Rolido fue corregida a partir la navegación realizada sobre un fondo con mínima pendiente, navegado en forma recíproca (Figura 27 y 28).

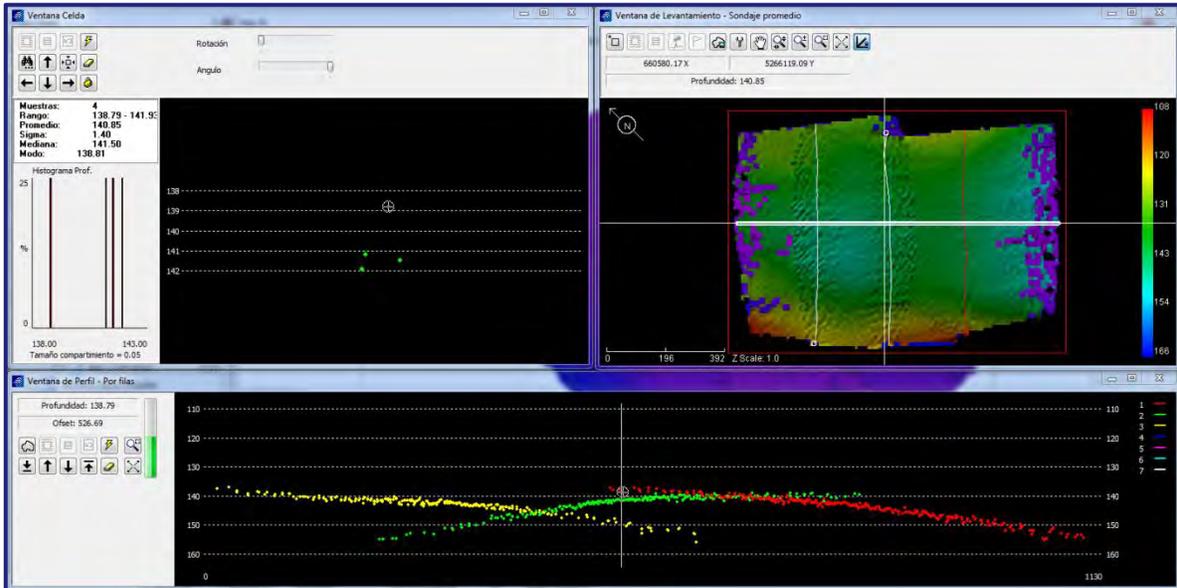


Figura 27: Esquema de la prueba de Rolido sin corregir.

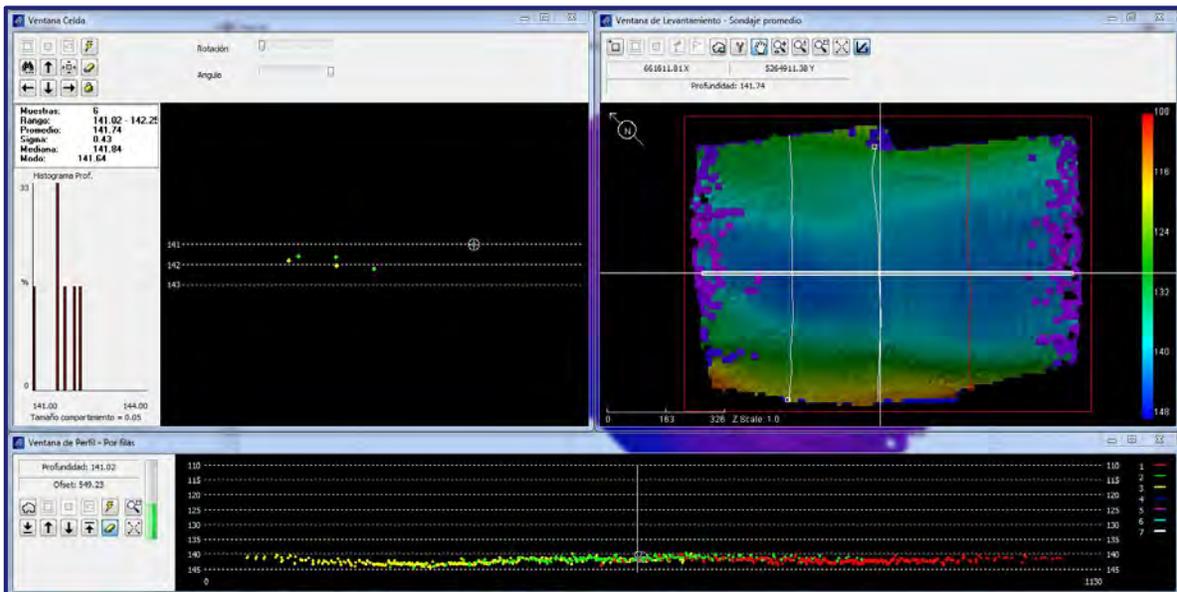


Figura 28: Esquema de la prueba de Rolido corregido.

Dado que el sistema multihaz utilizado posee de 2 transductores (dos cabezas), se efectuaron 3 líneas para determinar la desviación de Rolido. Estas líneas fueron procesadas independientemente con el objeto de determinar el valor a corregir para cada transductor (Figura 29 y 30).

Los archivos utilizados en la prueba de Rolido estribor fueron los siguientes: 002_0842.hsx, 003_0848.hsx.

Los archivos utilizados en la prueba de Rolido babor fueron los siguientes: 001_0836.hsx, 002_0842.hsx.

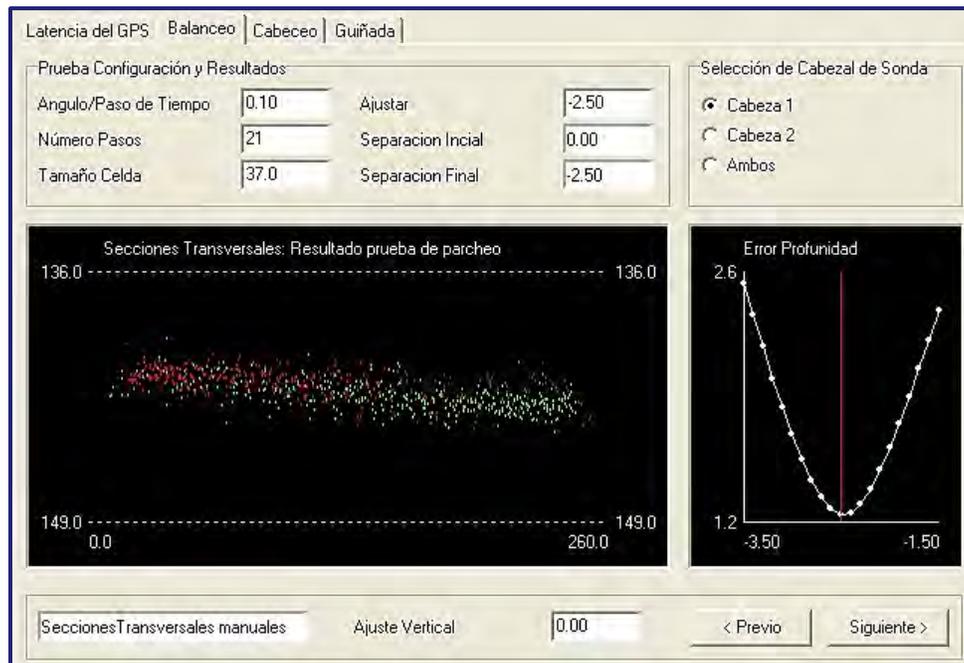


Figura 29: Resultado gráfico de la desviación de Rolido estribor corregido.

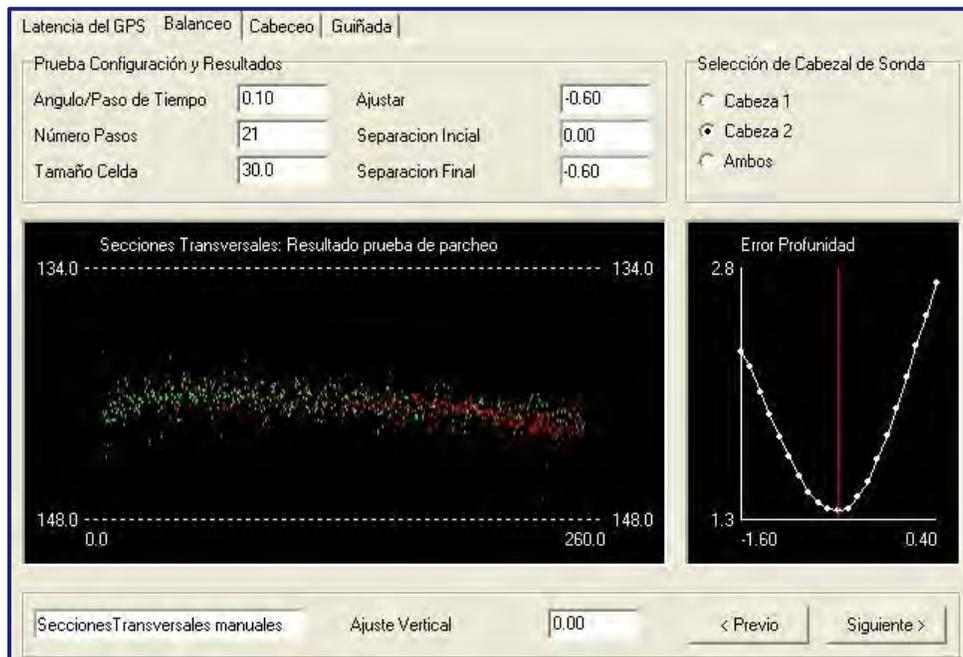


Figura 30: Resultado gráfico de la desviación de Roldo babor corregido.

Cabeceo

Para esta prueba se navega sobre un fondo con pendiente, en forma recíproca a una velocidad constante (Figura 31 y 32).

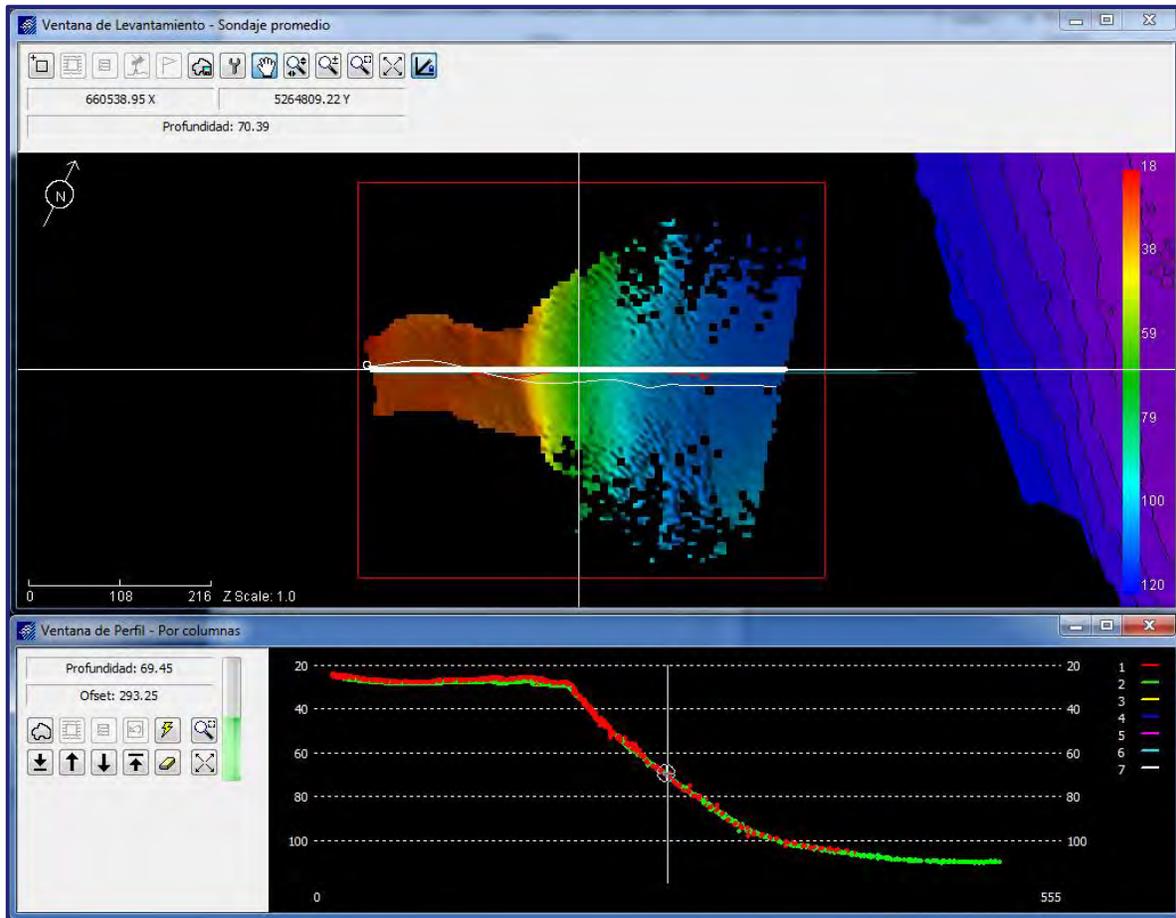


Figura 31: Prueba de Cabeceo.

Los archivos utilizados en la prueba de Cabeceo (Pitch) fueron los siguientes: 001_1012.hsx, 001_1045.hsx.

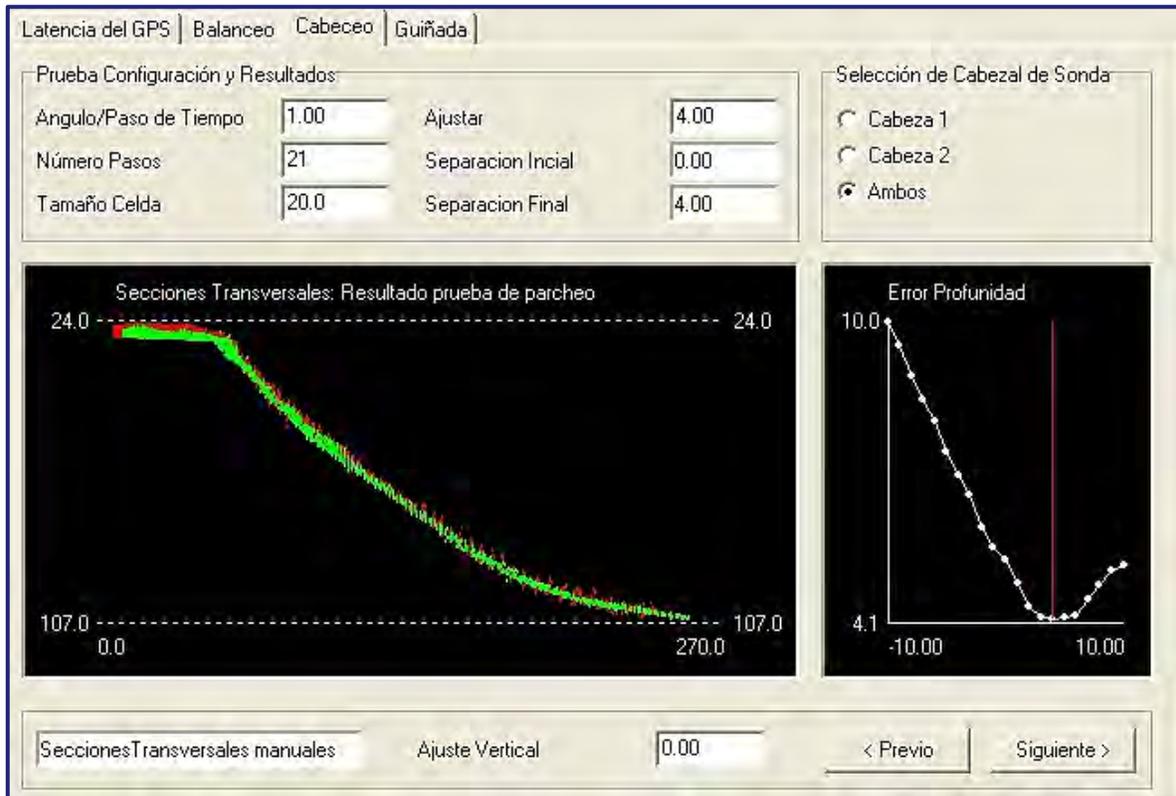


Figura 32: Resultado gráfico de Cabeceo corregido.

Guiñada

Para ajustar esta desviación, se navega de manera paralela sobre un fondo que presente un elemento conspicuo (e.g. pendiente abrupta, roca o naufragio). Es crítico que entre ambas líneas, exista un buen traslape de datos (Figura 33 a 35).

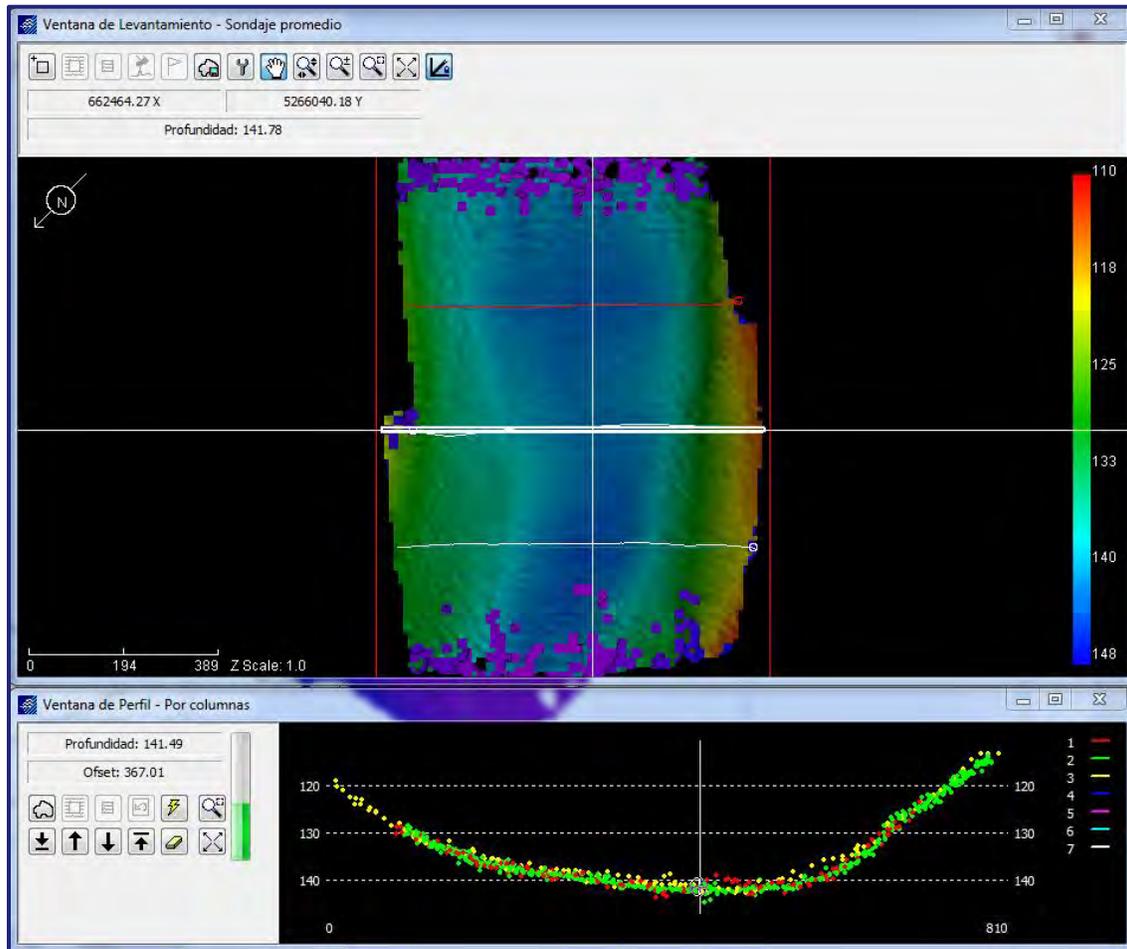


Figura 33: Esquema de la calibración de Guiñada (Yaw).

Los archivos utilizados en la prueba de Guiñada estribor fueron los siguientes: 002_0842.hsx, 003_0848.hsx.

Los archivos utilizados en la prueba de Guiñada babor fueron los siguientes: 001_0836.hsx, 002_0842.hsx.

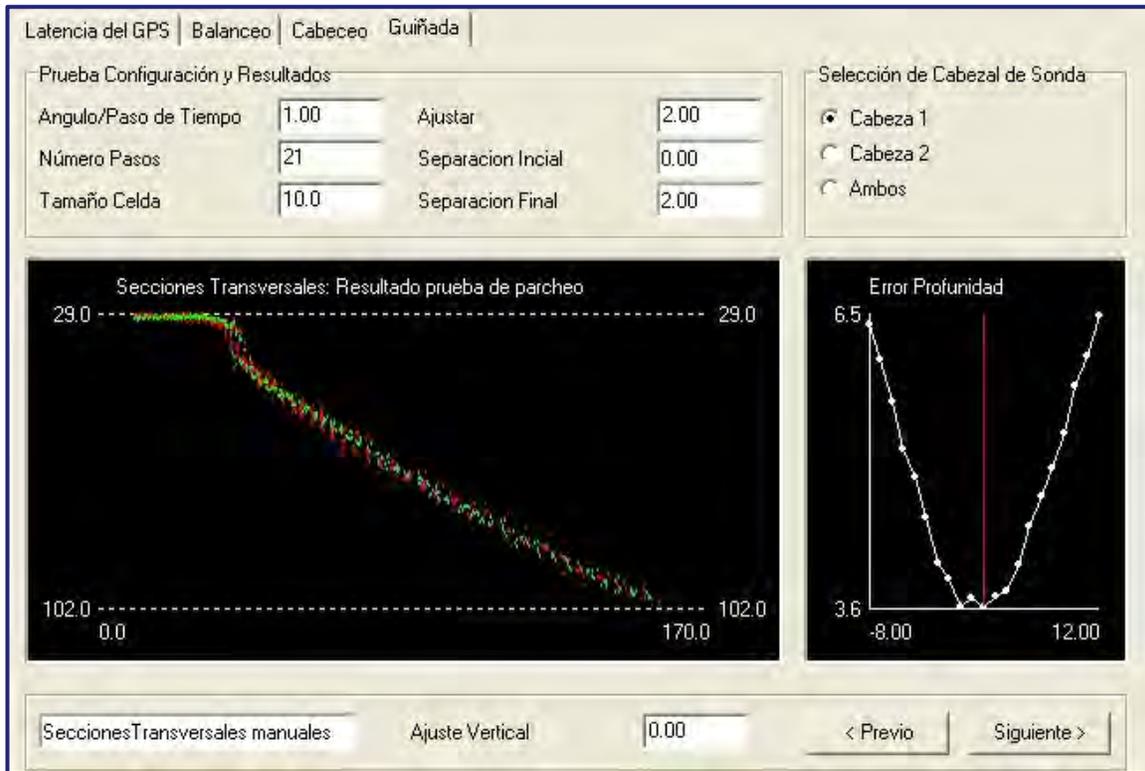


Figura 34: Resultado gráfico de Guiñada corregido.

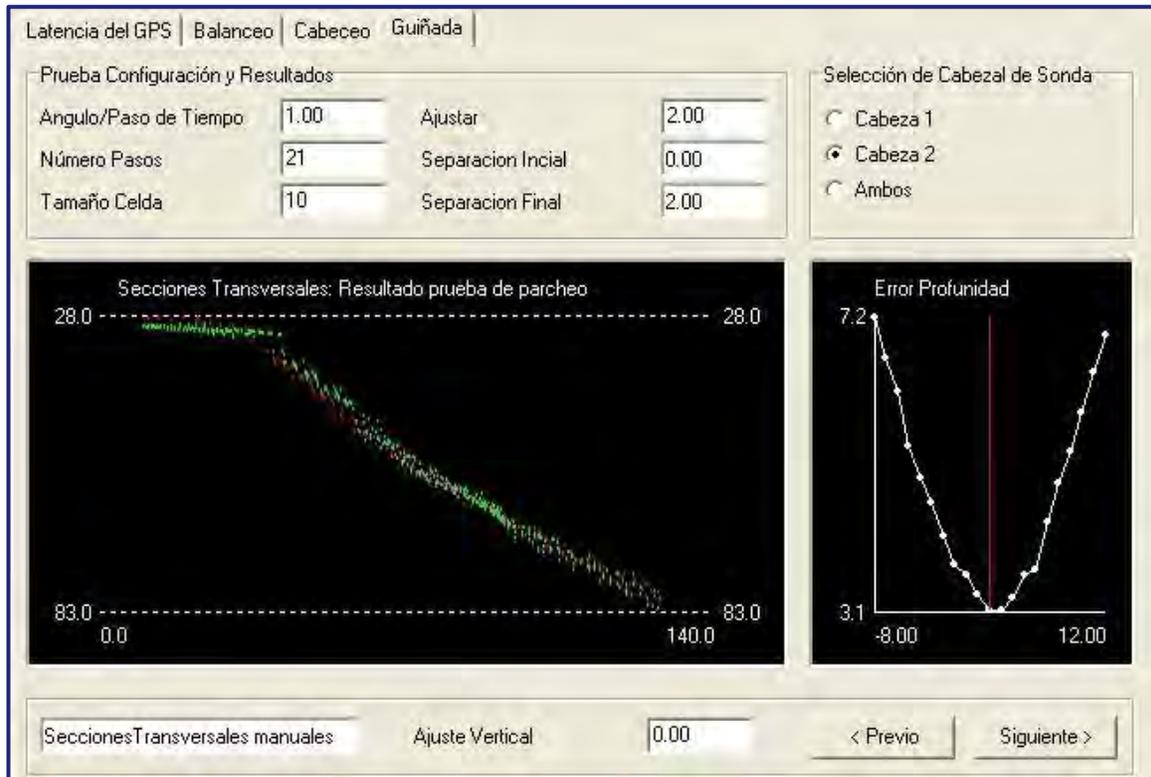


Figura 35: Resultado gráfico de Guiñada corregido.

Cada una de las pruebas antes descritas se repitió al menos dos veces o hasta que los valores de fuesen consistentes.

Antes de comenzar con la calibración o Prueba de Parche, se realizó un perfil de la velocidad de propagación del sonido en el agua, información que se ingresó al software hidrográfico y que permitió corregir este parámetro, y a su vez, corregir la medición de profundidad.

El huso horario dispuesto para la ejecución de los trabajos fue establecido en hora local (Z+3).

6.3.2 Adquisición de datos multihaz

La adquisición de datos multihaz propiamente tal se realizó entre los días 02 de diciembre de 2016 y 30 de enero de 2017.

Durante este período se realizaron perfiles de velocidad del sonido diarios, salvo en ocasiones donde por mal tiempo no se pudieron ejecutar (**Anexo 4**).

La velocidad de levantamiento se controló según la profundidad y la calidad de los datos obtenidos variando entre 2 nudos y 8 nudos aproximadamente.

Con el fin de lograr una mejor cobertura y densidad de datos, los barridos se sobrepusieron entre sí. La magnitud de esta superposición de datos varió, nuevamente, según la profundidad y condiciones particulares de cada sector (con sobre posición promedio de 30%).

El alcance del levantamiento en torno a cada isla, quedó definido como el área existente entre el veril de los 10 metros (proyectado en base a las cartas existentes) y una línea teórica a 1000 metros de distancia del veril de los 10 metros. En la práctica, el veril de los 10 metros proyectados, no siempre coincidió con los 10 metros de profundidad reales. En general, y por seguridad, el levantamiento intentó mantenerse a profundidades mayores a 10 metros, sin embargo en sectores de topografía abrupta, la cobertura del levantamiento alcanzó profundidades menores. En cuanto al límite externo, el levantamiento siempre cubrió más de lo proyectado.

Otro aspecto importante de destacar son las estructuras de cultivo presentes en el área, tanto las activas, como las abandonadas. En este contexto, BENTOS realizó todos los esfuerzos para que el área en torno y bajo las estructuras fuese cubierta. Este objetivo se logró en la mayoría de los casos, sin embargo, en alguna ocasión el personal a cargo de los centros impidió el paso, restringiendo el levantamiento bajo los centros.

En cuanto a la superficie efectivamente levantada, el área a levantar estipulada en las Bases de la Licitación corresponde a 45.000 hectáreas y el área proyectada durante las fases preliminares del proyecto, consideró 48.000 hectáreas (**Anexo 1**), asumiendo que en la práctica, no todo podría ser cubierto, y se llegaría a una cifra cercana a las 45.000 hectáreas. Finalmente, el levantamiento desarrollado cubrió un área de aproximadamente 63.000 hectáreas, es decir un 40% más de lo establecido.

En **Anexo 8** se presentan los resultados del levantamiento batimétrico multihaz que incluyen: Pruebas de calibración, archivo de sondas (*.XYZ) y un archivo Geotiff del área levantada.

6.3.3 Perfiles de velocidad del sonido

En esta sección se presenta un resumen de los resultados de las de las mediciones de velocidad de propagación del sonido en el agua. El **Anexo 4** presenta un informe detallado de los resultados de esta tarea.

La Figura 36 muestra el área de estudio y la ubicación de los perfiles de velocidad del sonido realizados durante el levantamiento.

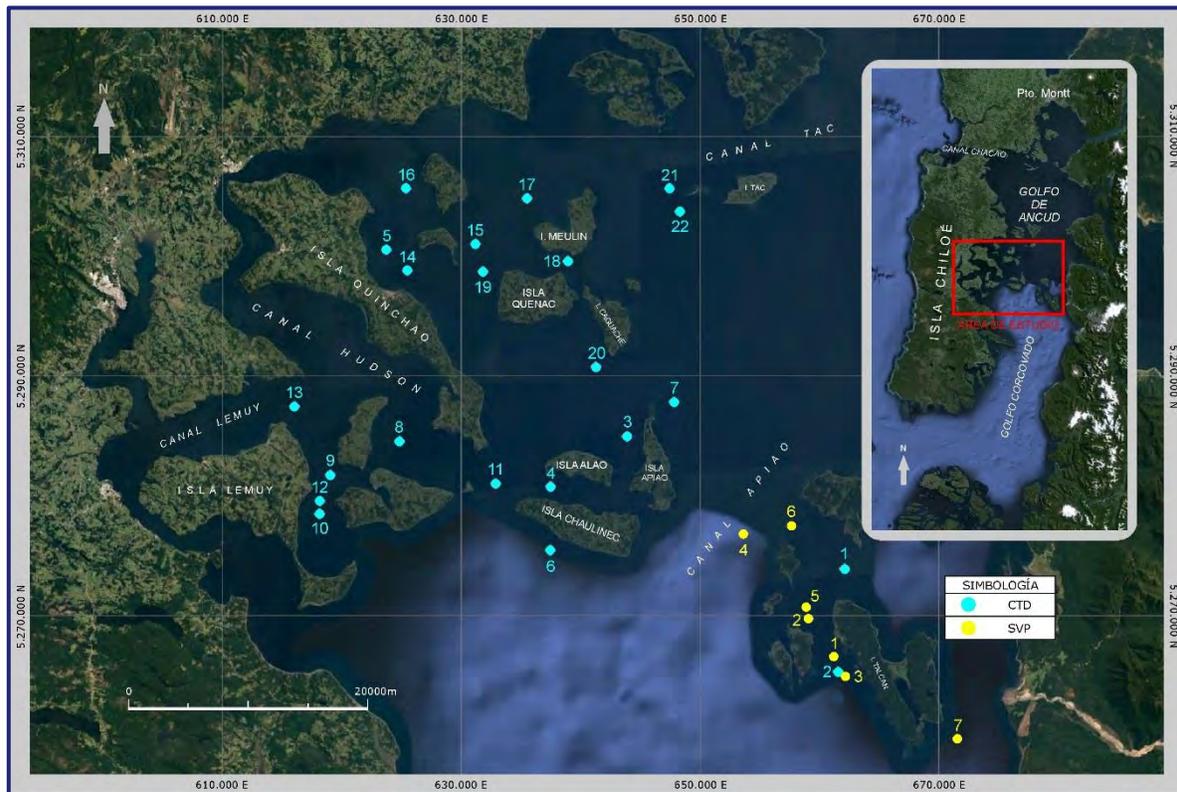


Figura 36: Ubicación de las estaciones de medición de la velocidad de propagación del sonido mediante SVP y CTD.

Los perfiles levantados, utilizados para la corrección del sondaje, indican que la velocidad del sonido presenta variación entre sectores.

El mayor gradiente vertical se presenta en el sector de Isla Quinchao, en donde la velocidad del sonido se vio afectada por la intrusión de una masa de agua superficial, registrándose un valor de 1.505,8 m/s en superficie. Las Figuras 37 a 46 presentan los perfiles de velocidad del sonido en cada estación.

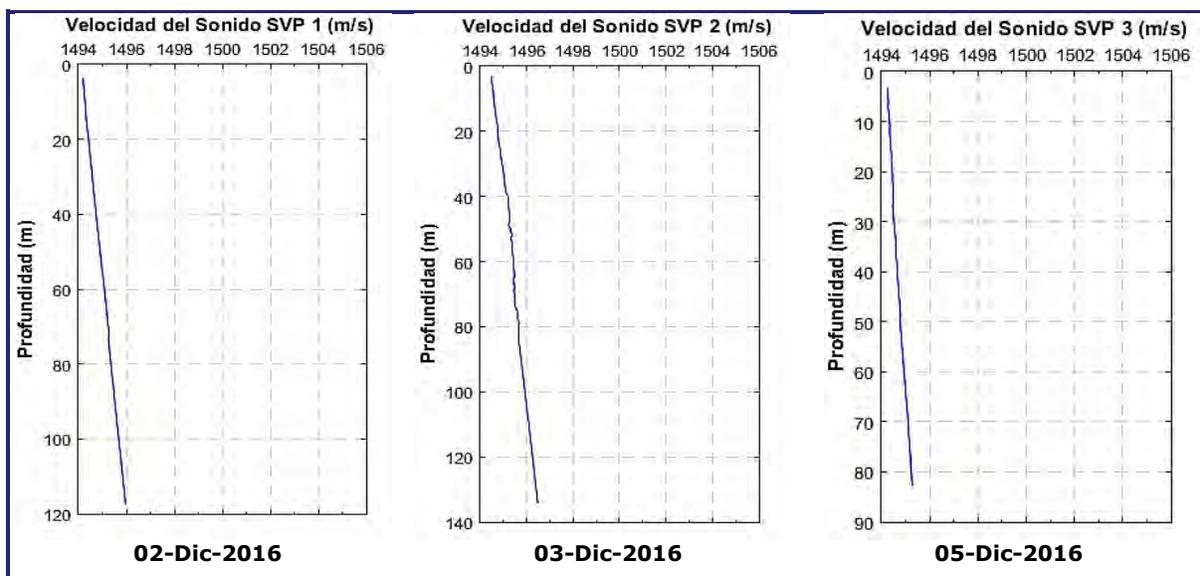


Figura 37: Perfiles VS estaciones SVP 1, SVP 2 y SVP 3.

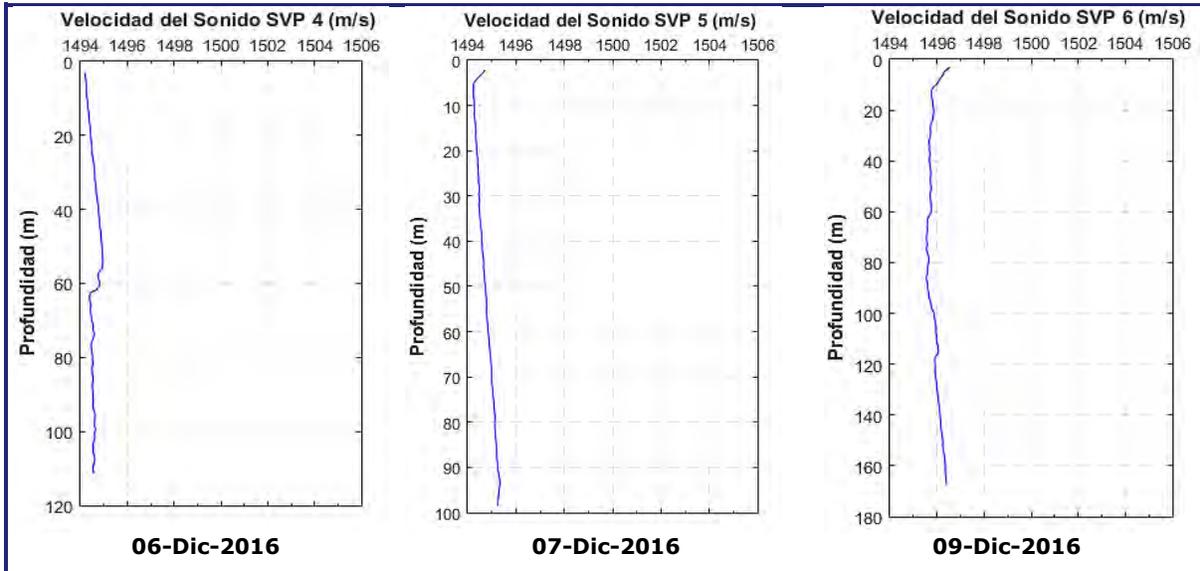


Figura 38: Perfiles VS estaciones SVP 4, SVP 5 y SVP 6.

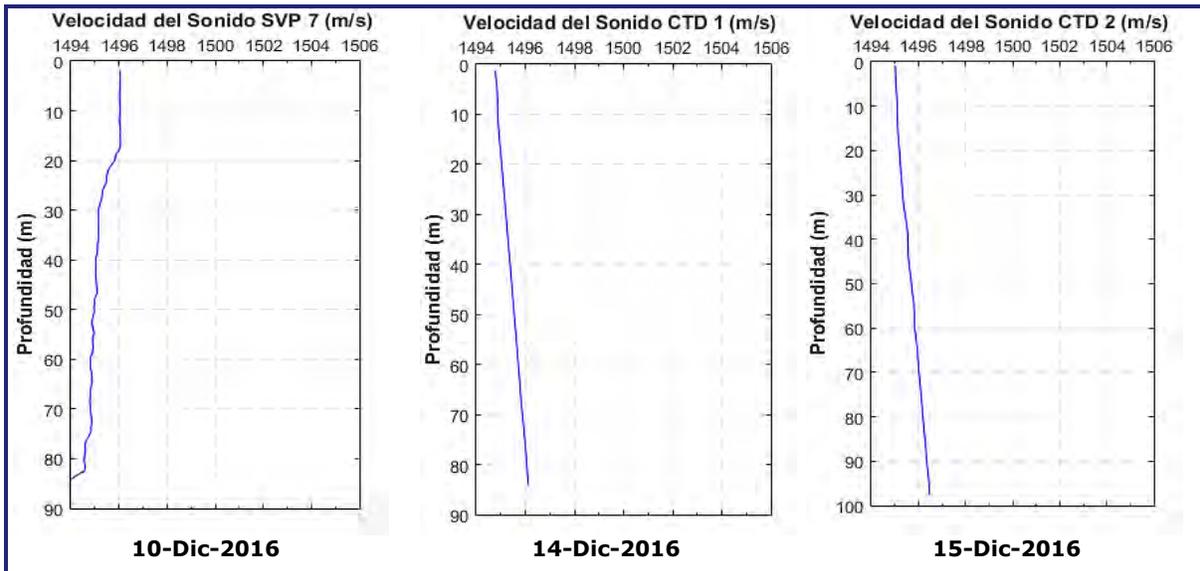


Figura 39: Perfiles VS estaciones SVP 7, CTD 1 y CTD 2.

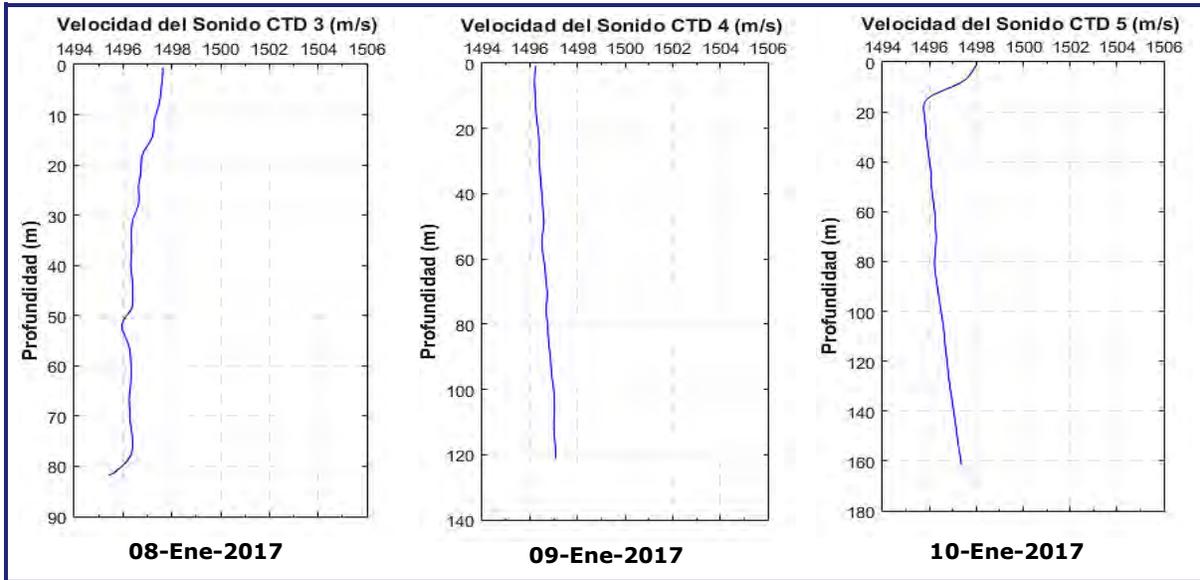


Figura 40: Perfiles VS estaciones CTD 3, CTD 4 y CTD 5.

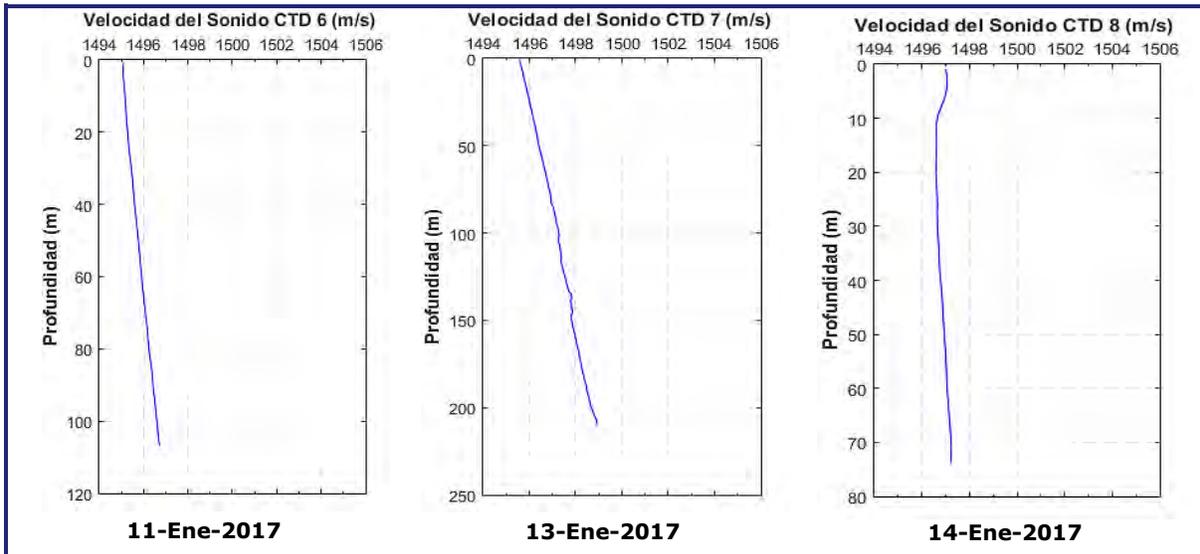


Figura 41: Perfiles VS estaciones CTD 6, CTD 7 y CTD 8.

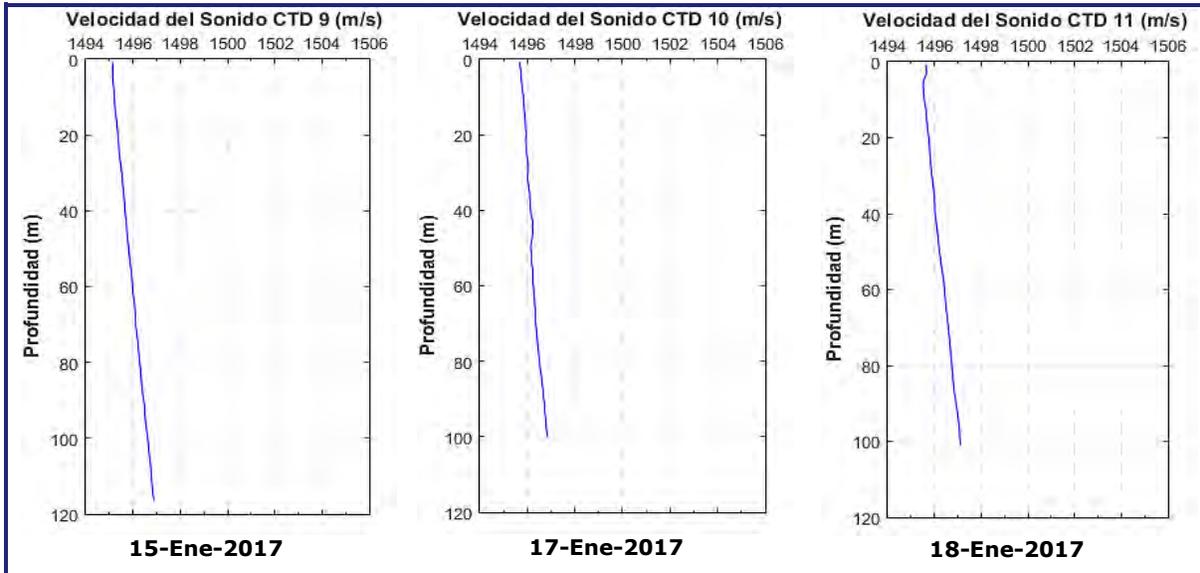


Figura 42: Perfiles VS estaciones CTD 9, CTD 10 y CTD 11.

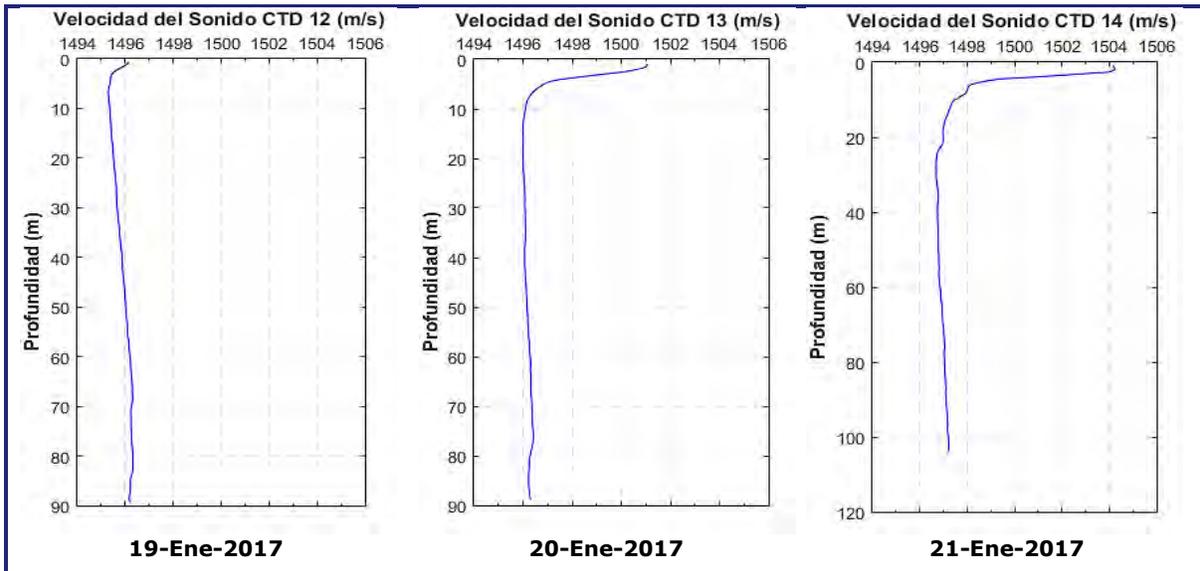


Figura 43: Perfiles de VS estaciones CTD 12, CTD 13 y CTD 14.

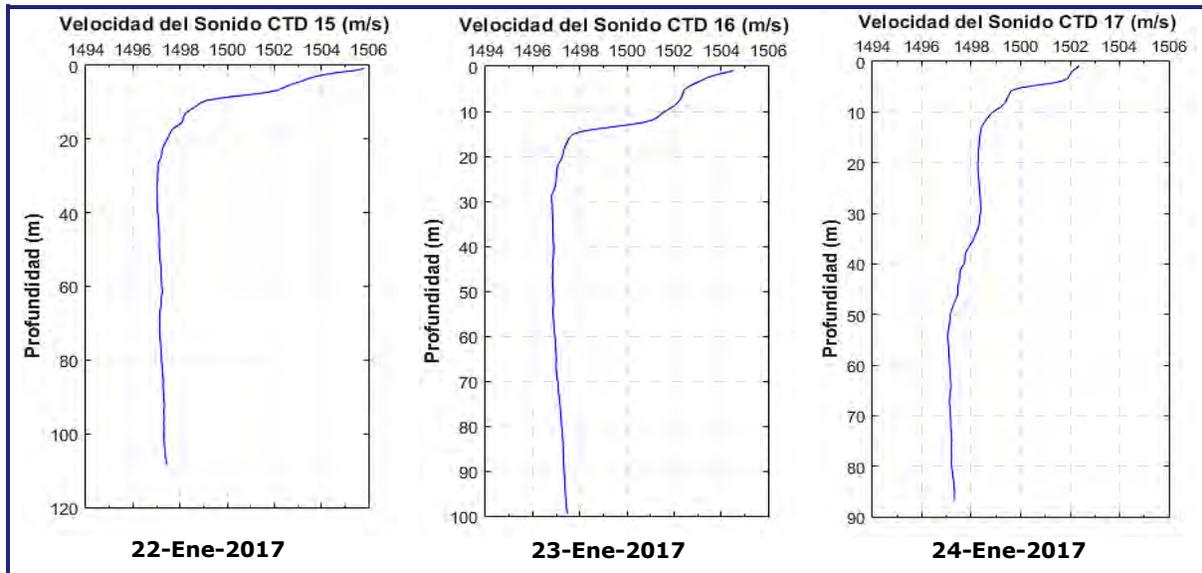


Figura 44: Perfiles VS estaciones CTD 15, CTD 16 y CTD 17.

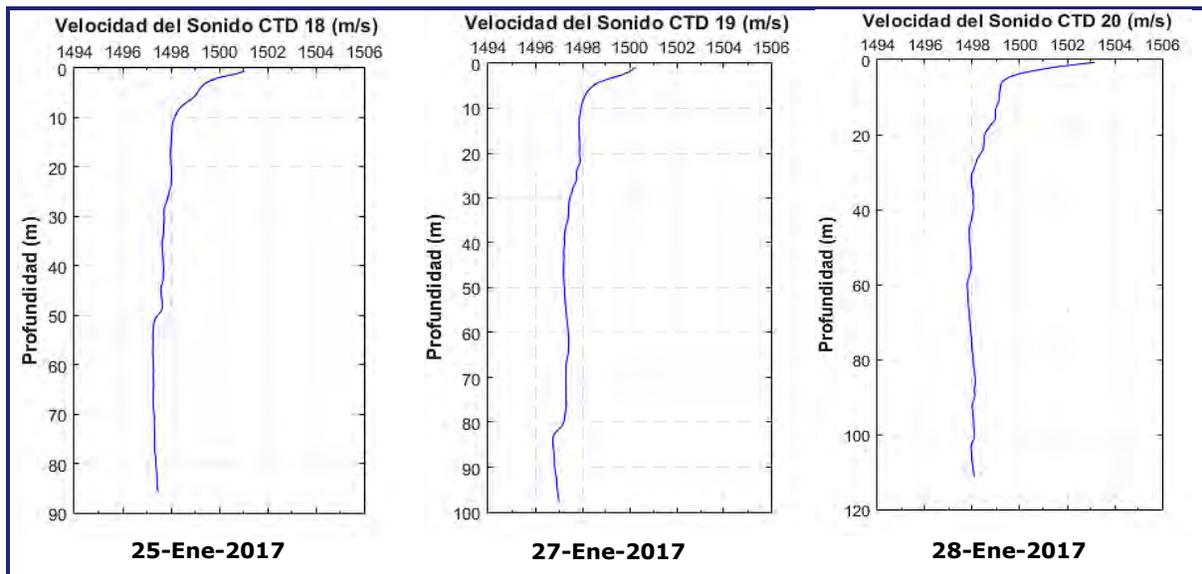


Figura 45: Perfiles VS estaciones CTD 18, CTD 19 y CTD 20.

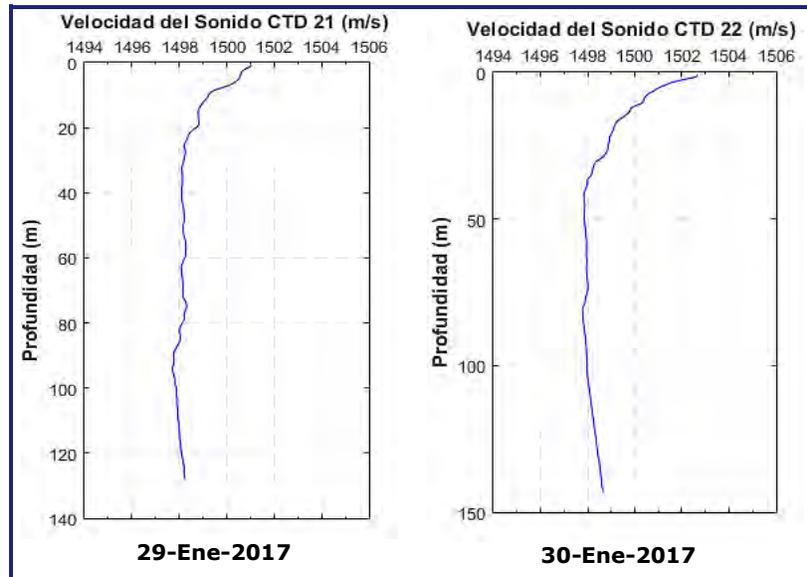


Figura 46: Perfiles VS estaciones CTD 21, y CTD 22.

Desde el punto de vista de los parámetros físico-químicos registrados (Temperatura, Salinidad, Oxígeno Disuelto y Densidad), es posible reconocer 5 sectores con diferentes características los que se agrupan de la siguiente forma:

- Sector Isla Talcan (comprende estaciones CTD 1 y 2).
- Sector Chaulinec (estaciones CTD 3, 4, 6, 7 y 11).
- Sector Lemuy (estaciones CTD 8, 9, 10, 12 y 13).
- Sector Quinchao (estaciones CTD 5, 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20).
- Sector Isla Tac (estaciones CTD 21 y 22).

En el Sector Talcán, los registros de temperatura y salinidad presentaron una distribución homogénea a través de la columna de agua, con una leve disminución de la temperatura en profundidad, presentando valores alrededor de 12,0° C y 32,8 psu. El oxígeno en esta zona presenta un 65% de saturación, equivalente a 4,0 mg/L.

Para el Sector Chaulinec, la distribución vertical de los parámetros presenta una distribución bastante homogénea al igual que el sector anterior, a excepción de la estación CTD 3, que muestra un gradiente vertical más pronunciado. Las temperaturas en superficie para este sector

alcanzaron valores de hasta 12,9° C en superficie y 11,8° C en profundidad. En cuanto a la salinidad y oxígeno disuelto estas varían entre 32,9- 33,3 psu y 75%-60% (4,5- 3,6 mg/L), respectivamente.

En el Sector Lemuy, los registros de temperatura y salinidad presentaron una distribución igualmente homogénea a través de la columna de agua, pero con valores levemente más altos tanto en temperatura como en salinidad. La temperatura y salinidad promediaron en la vertical 12,3°C y 33,2 psu, respectivamente. El oxígeno presenta a lo largo de la columna de agua un valor promedio de saturación de 62%, equivalente a 3,9 mg/L. Excepcionalmente, la estación CTD 14 ubicada al centro del canal Lemuy, presenta mayores similitudes con el sector Quinchao, mencionado a continuación.

Los registros del Sector Quinchao, presentaron una distribución homogénea en profundidad, con una marcada isoterma en superficie, entre los 5 a 20 metros de profundidad, condición que se va perdiendo a medida que avanzan los días. La presencia de esta capa de agua superficial de temperatura homogénea pudo deberse a una intrusión en el sector de una masa de agua. La temperatura máxima alcanzada es de 15,5° C el día 22 de enero, y la mínima es de 12,2° C en el nivel profundo. La salinidad presenta un mínimo de 32,2 psu entre los 5 a 10 metros de profundidad. El oxígeno alcanza niveles de sobresaturación (116,1%, 102,3% y 111,6%) en la capa superficial los días 22, 23 y 24 de enero, respectivamente. Dichos porcentajes de saturación equivalen a concentraciones de 6,5, 5,1 y 5,4 mg/L.

En el Sector Isla Tac, los registros de temperatura y salinidad presentaron un gradiente vertical moderado. La temperatura presentó un máximo de 14,3° C en superficie y un mínimo de 12,4° C a los 120 metros de profundidad. La salinidad muestra un mínimo de 32,2 psu en superficie, aumentando a 33,1 psu en el fondo. El oxígeno presenta valores de saturación promedio de 65%, equivalente a concentraciones de 3,3 a 3,9 mg/L.

6.3.4 Vinculación Geodésica

En esta sección se presenta un resumen de los resultados de las de la Vinculación geodésica desarrollada en este proyecto. El **Anexo 5** presenta un informe detallado de los resultados de esta tarea.

Con el fin de generar puntos vinculados a la red geodésica nacional en el área de estudio, se vinculó la Cota 1 de mareas de cada sector a un vértice geodésico oficial, generándose de esta manera 3 vértices nuevos en el área de estudio. A continuación se presenta la descripción general de los vértices generados.

Vértice LLING 1.

Este vértice se generó a partir del vértice geodésico oficial ACHO, localizado en Achao. Está ubicado en Isla Llingua, en una playa sin infraestructura al extremo oeste de la isla, a los pies de un acantilado, y cercana a la línea de alta marea. El vértice se monumentó con un disco de bronce de 4 cm empotrado sobre una roca estable del sector (Figura 47).



Figura 47: Ubicación general del Vértice LLING 1.

La monografía del vértice se incluye en el **Anexo 5**, pero los datos más relevantes de este punto se presentan en Tabla 10.

Tabla 10: Antecedentes generales del del Vértice LLING 1.

Este UTM	626354.860 m
Norte UTM	5301477.148 m
Alt. Elipsoidal	20.855 m
Alt. NRS.	7.156 m
M. Central	75°
Zona	18 S
Latitud	S 42°25'43.44722"
Longitud	O 73°27'50.26540"

Vértice LEMU 1

Este vértice se generó a partir del vértice geodésico oficial ACHO, localizado en Achao. Está ubicado a unos 500 metros al sur oeste de la punta Yaotal, sector de Puchilco, isla Lemuy. Específicamente en el acceso a la rampa del sector, monumentado con un disco de bronce de unos 4 cm. de diámetro, empotrado en la losa de hormigón a 1,5 metros de la luminaria (Figura 48).



Figura 48: Ubicación general del Vértice LEMU1.

La monografía del vértice se incluye en el **Anexo 5**, pero los datos más relevantes de este punto se presentan en Tabla 11.

Tabla 11: Antecedentes generales del del Vértice LEMU1.

Este UTM	617390.537 m
Norte UTM	5280395.187 m
Alt. Elipsoidal	20.832 m
Alt. NRS.	7.215 m
M. Central	75°
Zona	18 S
Latitud	S 42°37'11.80283"
Longitud	O 73°34'06.87444"

Vértice TALC 1

Este vértice se generó a partir del vértice geodésico oficial V330, localizado en Isla Talcán. El vértice TALC 1 se localiza al sur de isla Talcán, específicamente en una pequeña ensenada en el extremo sur oeste de la isla, a unos 15 metros de los requeríos del sector, y cercana a la línea de alta marea. El vértice se encuentra monumentado con un disco de bronce de 4 cm en una roca estable del sector (Figura 49).

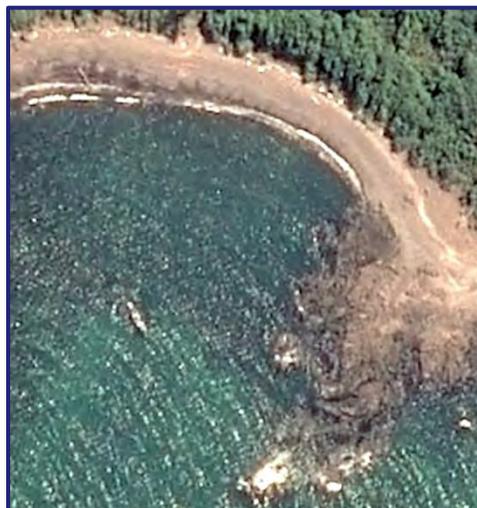


Figura 49: Ubicación general del Vértice TALC 1.

La monografía del vértice se incluye en el **Anexo 5**, pero los datos más relevantes de este punto pero los datos más relevantes de este punto se presentan en Tabla 12.

Tabla 12: Antecedentes generales del del Vértice TALC 1.

Este UTM	666838.428 m
Norte UTM	5259888.781 m
Alt. Elipsoidal	20.780 m
Alt. NRS.	6.340 m
M. Central	75°
Zona	18 S
Latitud	S 42°47'43.37874"
Longitud	O 72°57'35.65078"

6.3.5 Medición de nivel del mar

El **Anexo 6**, presenta el detalle del estudio de mareas, sin embargo a continuación se presenta un resumen de los resultados.

Para definir el Nivel de Reducción de sondas del área de levantamiento y referenciar verticalmente las profundidades, se establecieron 3 estaciones de marea, en el área de trabajo. La localización de esas estaciones (Fig. 50) fue acordada con SUBPESCA en las fases previas del estudio (**Anexo 1**).



Figura 50: Sitios de medición del nivel del mar en islas Llingua, Lemuy y Talcán.

Las estaciones definidas, las coordenadas geográficas de los mareógrafos y barómetros instalados, el intervalo y periodo de muestreo se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Aspectos generales de la medición del nivel del mar.

Estación llingua Lat: 42° 25' 44,8" S; Long: 73° 27' 56,1" W	Medición desde 17/12/2016 hasta 31/01/2017 Total registro: 45 días
Estación Lemuy Lat: 42° 37' 12,5" S; Long: 73° 34' 6,0" W	Medición desde 12/12/2016 hasta 31/01/2017 Total registro: 49 días
Estación Talcan Lat: 42° 47' 49,2" S; Long: 72° 57' 44,2" W	Medición desde 01/12/2016 hasta 30/01/2017 Total registro: 60 días

Análisis No Armónico

Las Figuras 48 a la 50 presentan la variación del nivel del mar observado durante el periodo de la medición en las localidades de Llingua, Lemuy y Talcán.

El mayor rango de la marea se registró en isla Llingua (6,11 m), seguido del registrado en Lemuy (5,88 m); esta tendencia es coincidente con lo informado en las Tablas de Marea SHOA PUB 3009, la que establece un mayor rango de marea para aquellas localidades ubicadas en aguas interiores.



Figura 51: Altura de nivel del mar registrado en isla Llingua.

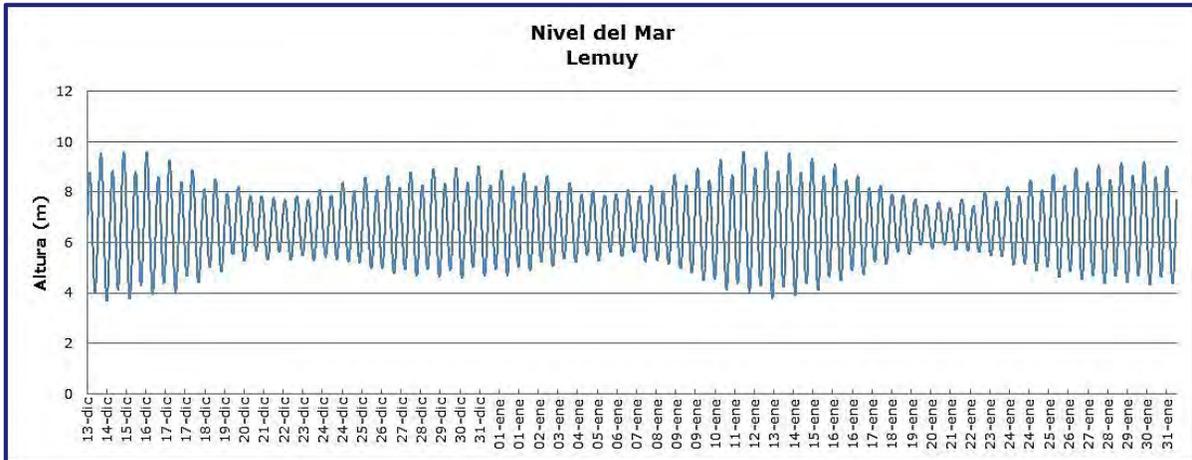


Figura 52: Altura de nivel del mar registrado en isla Lemuy.

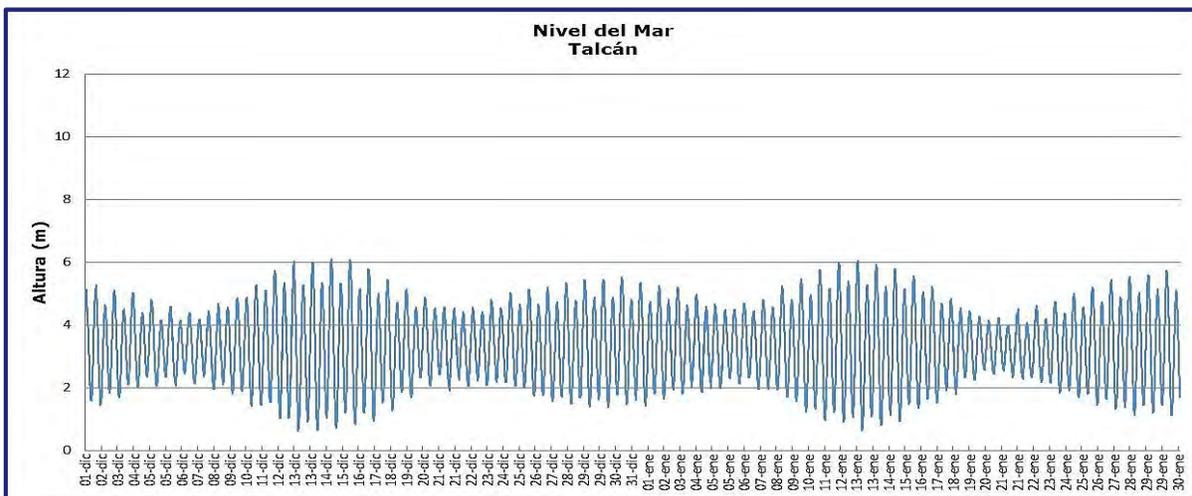


Figura 53: Altura de nivel del mar registrado en isla Talcán.

Los esquemas que contienen los principales planos de referencia del nivel del mar, así como su vinculación a las cotas de mareas instaladas en cada localidad, se presentan en el **Anexo 6** Estudio de Marea. Asimismo se incluye en dicho Anexo Monografías y nivelación de Cotas de marea y datos registrados.

Análisis Armónico

El análisis armónico realizado indica que en las tres localidades analizadas gran parte de la variabilidad total del nivel del mar registrado es explicado por la marea astronómica, siendo esta variabilidad (>86%) principalmente aportada por 3 constituyentes semidiurnos (M2, S2, N2) y 2 diurnos (K1 y O1), con un mayor aporte por parte de la principal constituyente semidiurna M2.

En base a las semi-amplitudes calculadas de las principales constituyentes diurnas (K1 y O1) y semi-diurnas (M2 y S2), se determinó el valor del coeficiente de Courtier F para cada localidad; este varió entre 0,83 (Llingua) a 0,75 (Talcán), indicativo que los regímenes de marea presentes en cada localidad corresponden al tipo semidiurno mixto.

El Nivel de Reducción de Sondas (NRS) estimado para cada localidad es inferior o igual a su respectivo valor de la bajamar mínima observada durante la medición, cumpliendo así con la condición establecida en la Publicación SHOA 3105 (Instrucciones Hidrográficas N° 5), la que indica que el datum de reducción de sondajes seleccionado deberá corresponder al plano más bajo alcanzado por la marea en dicha localidad.

Los datos obtenidos, referidos inicialmente al cero del sensor, fueron luego referidos al NRS, para su utilización en la corrección de la batimetría.

Relación Marea Meteorológica - Presión Atmosférica

El análisis de correlación cruzada realizado entre el nivel de mar residual y la presión atmosférica arrojó una relación significativa sólo para las localidades de Lemuy y Talcán, obteniéndose para esta última una relación mayor y prolongada en el tiempo. Lo anterior evidencia que en aquellos sectores más protegidos (Llingua y Lemuy), la marea meteorológica sería inducida principalmente por efectos de tensión del viento asociados al paso de frentes, generando un ascenso adicional del nivel del mar.

6.4 RESULTADOS MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO (MBM)

El resultado gráfico del modelo batimétrico mejorado (MBM) se muestra en la Figura 54. Los productos de esta tarea, incluyendo su base de datos, se presentan el **Anexo 9 Modelo Batimétrico Mejorado**.

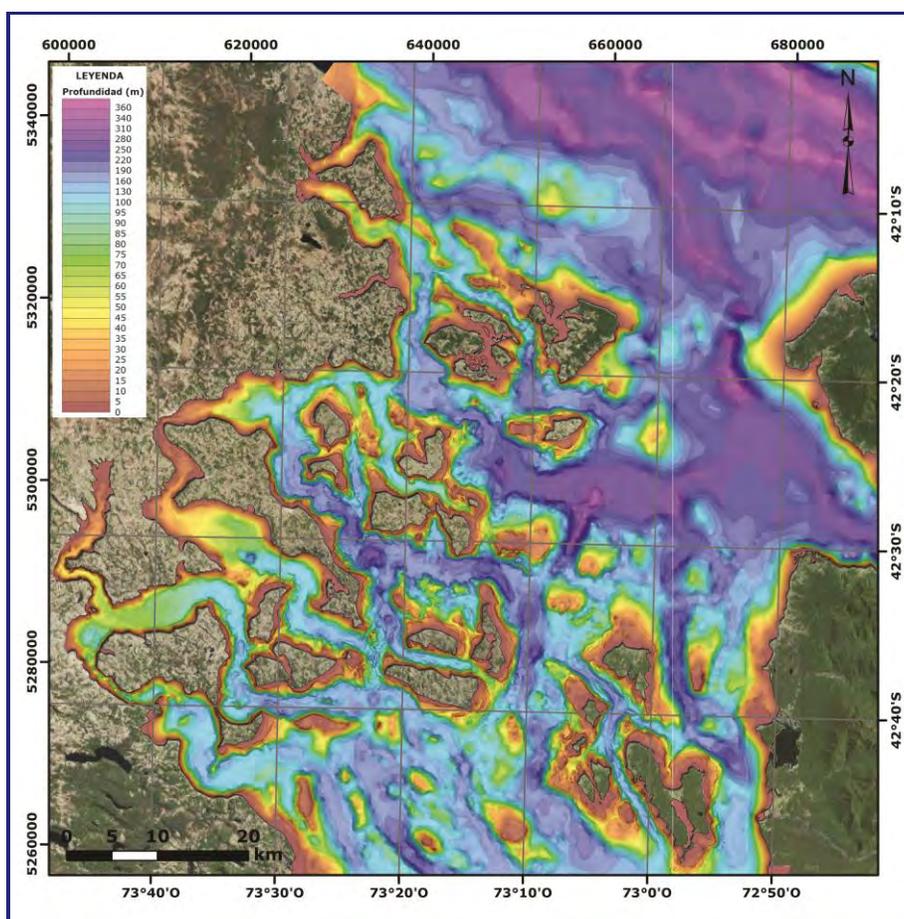


Figura 54: Modelo batimétrico mejorado.

El MBM permite observar morfologías hectométricas como canales submarinos, montículos y depresiones de origen natural. Además es posible apreciar los límites de las plataformas insulares en las zonas de levantamiento batimétrico.

6.5 RESUMEN DE PRODUCTOS GENERADOS

Los productos generados se resumen a continuación:

Informes técnicos	<ul style="list-style-type: none">• Pre Informe de Avance y anexos del informe (Rev. 00 de fecha 27/09/2016).• Informe de Avance Corregido y anexos del informe (Rev. 01 de fecha 22/12/2016).• Pre Informe Final y Anexos del informe (Rev. 00 de fecha 28/04/2017).• Informe final (Rev. 00 de fecha 06 de agosto de 2017).• Memorandos técnicos.
Velocidad de propagación del sonido y caracterización de la columna de agua.	<ul style="list-style-type: none">• Informe técnico (IT) presentado en Anexo 4.• Datos crudos de las estaciones de medición.• Datos procesados de columna de agua.• Metadatos de columna de agua.
Vinculación geodésica.	<ul style="list-style-type: none">• Informe Técnico de vinculación (presentado en Anexo 5).• Datos.• Informes de proceso.• Monografías de vértices.
Estudio de marea.	<ul style="list-style-type: none">• Informe técnico (IT) Estudio de marea (presentado en Anexo 6).• Datos.• Monografías de cotas.• Metadatos de marea.
Modelos batimétricos	<ul style="list-style-type: none">• Modelo batimétrico IDW y datos (*.xyz).• Modelo batimétrico Kriging ordinario y datos (*.xyz).

preliminares en base a información existente.	<ul style="list-style-type: none">• Modelo batimétrico Kriging Universal y datos (*.xyz).• Modelo batimétrico TIN a Raster y datos (*.xyz).• Modelo batimétrico Topo a raster y datos (*.xyz).• Modelo batimétrico Vecino natural y datos (*.xyz).• Comparación estadística de modelos. (Presentado en Anexo 7)
Levantamiento batimétrico multihaz.	<ul style="list-style-type: none">• Datos (*.xyz).• Geotiff.• Prueba de prche (Presentado como Anexo 8).• Metadatos de batimetría.
Modelo batimétrico mejorado.	<ul style="list-style-type: none">• Modelo batimétrico mejorado• Datos (*.xyz). (Presentado como Anexo 9).
Material audiovisual.	<ul style="list-style-type: none">• Fotografías del estudio. (Presentado como Anexo 10).
Taller de presentación de resultados	<ul style="list-style-type: none">• Presentación Power point.• Resultados y conclusiones del taller. (Presentado como Anexo 11).
Resumen del proyecto en ingles	<ul style="list-style-type: none">• Documento presentado en anexo 12.

7 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 MODELO PRELIMINAR

La información analizada durante esta etapa del proyecto muestra que existe amplia información batimétrica levantada para la zona de interés. Dicha información ha sido compilada previamente (Rodrigo, C. 2006¹⁰), permitiendo contar con un modelo general de la topografía submarina de la zona.

El análisis de las sondas contenidas en las Cartas SHOA, específicamente en las zonas donde dichas cartas se superponen, muestra consistencia, en este sentido y luego de eliminados los datos puntuales dudosos, es pertinente reunir los distintos archivos (Cartas) en una sola base de datos cuya consistencia ha sido verificada.

Los datos compilados permiten obtener modelos a partir de distintos métodos de interpolación. En todos esos modelos se logra visualizar el relieve general de la zona, apreciándose diferencias producto de los métodos de interpolación usados.

Los resultados gráficos y estadísticos obtenidos para cada modelo permiten inferir que los peores modelos batimétricos corresponden a los obtenidos a través de las interpolaciones Kriging ordinario y universal. El modelo generado con la técnica IDW genera un relieve poco realista en zonas de baja densidad de datos y presenta resultados estadísticos levemente peores a los obtenidos con otros métodos. La interpolación de Topo a ráster presenta resultados estadísticos intermedios y un relieve más consistente con una morfología subaérea que submarina. Por su parte, TIN a ráster presenta buenos resultados estadísticos comparativos, muy similares al modelo generado por el método del Vecino Natural, sin embargo, debido a la técnica de triangulación y a la interpolación lineal asociada a la creación del ráster, el relieve resulta muy geométrico en zonas de baja densidad de datos. Finalmente, el modelo creado con interpolación Vecino Natural resulta ser el que mejor se ajusta a la superficie real al presentar mejores

¹⁰ Rodrigo C. 2006. Topografía submarina en canales de la Patagonia norte. In: Avances del conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas. Puerto Montt a Cabo de Hornos. N. Silva & Palma (Eds.) Comité Oceanográfico Internacional – Pontificia Universidad de Valparaíso. Valparaíso pp. 19 -23.

resultados estadísticos (menor RSME y mayor R^2) y una mejor representación gráfica, por lo que es elegido como el modelo final.

7.2 LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO

Los equipos y metodología utilizada para este levantamiento batimétrico, permitieron cumplir con el objetivo planteado, de realizar un levantamiento detallado del área de estudio.

Desde el punto de vista de la ejecución, si bien se presentaron tanto inconvenientes técnicos como climáticos, el trabajo se desarrolló en los plazos estimados previstos. No así, en cuanto a la fecha final de término, toda vez que el inicio de las tareas de campo fue retrasado respecto al cronograma propuesto inicialmente.

Es necesario destacar que a pesar de la extensión del trabajo, localización remota y su naturaleza, no se produjeron accidentes.

La Tabla 14, muestra los resultados una comparación de diferencias las entre las sondas de cartas náuticas y los valores en el MBM en la misma ubicación.

Tabla 14: Resultados estadísticos de comparación de valores puntuales de profundidad entre sondas de cartas náuticas y el modelo batimétrico mejorado.

	VALORES
Promedio de Diferencias Absolutas	5 m
Mediana Diferencias	1,6 m
Rango Moda	0-5 m
Moda de valores aproximados a enteros	2 m
Diferencia Máxima de sobreestimación (Prof MP>MM)	68 m
Diferencia Máxima de subestimación (Prof MM>MP)	102 m
Porcentaje Diferencias $\leq \pm 5$ m	73%
Porcentaje Diferencias $\leq \pm 10$ m	89%
Porcentaje Diferencias $\geq \pm 50$ m	0,5%

El análisis de diferencias entre las sondas de cartas náuticas y los valores en el MBM en la misma ubicación (Figura 55) muestra que el 89% de las sondas en la zona de levantamiento presenta diferencias con el MBM entre 0 y 10 m, y el 73% del total diferencias entre 0 y 5 m. Estos resultados dan cuenta de la gran consistencia entre ambas bases de datos. Dicho lo anterior este mismo análisis indica que existe un 0,5% de los puntos que presentan diferencias mayores a 50 m, y decenas de valores con diferencias ponderadas de más del 100% (hasta al 440%).

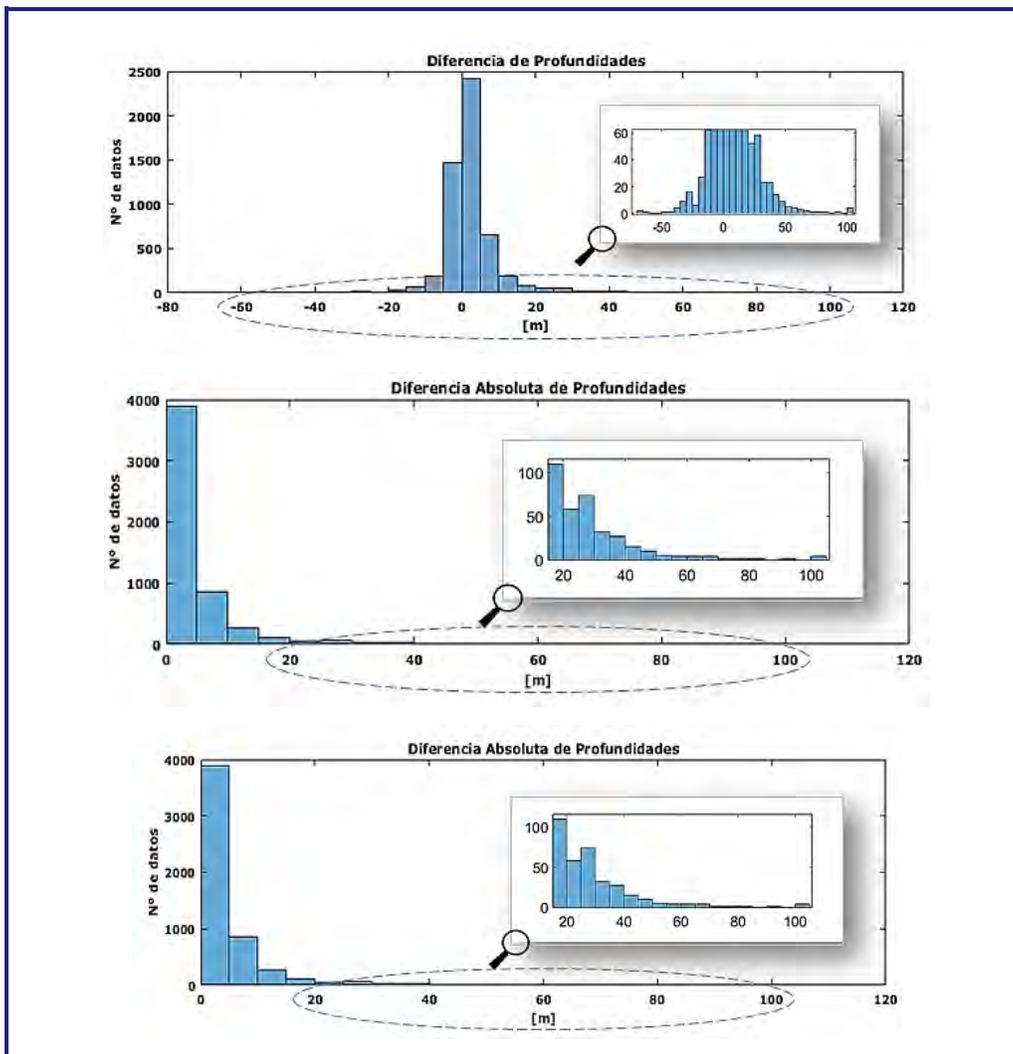


Figura 55: Histogramas de diferencias entre valores de profundidad de sondas de cartas náuticas con valores puntuales de profundidad del modelo mejorado en las mismas ubicaciones (datos batimétricos de levantamiento).

Los resultados anteriores indican que, los datos del presente levantamiento batimétrico presentan gran consistencia con la base de datos obtenida de las cartas náuticas oficiales. Por otro lado, la existencia de cierta discrepancia en una fracción de los valores es esperable considerando que las cartas náuticas corresponden al trabajo hidrográfico desarrollado a través de varias décadas por el SHOA, donde se ha aplicado una diversidad de metodologías de medición de profundidades, posicionamiento y proceso de datos.

7.3 MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO (MBM)

En la fase previa del proyecto se determinó que el método de interpolación de vecino natural es el que mejor se ajustaba a los datos existentes (base de datos de cartas SHOA). En esta nueva fase del trabajo, los datos existentes son combinados con los datos del levantamiento batimétricos, en forma de una matriz equiespaciada a 20 metros (eliminando los datos SHOA en las áreas donde hay superposición). En este contexto, al generar el modelo con celdas de 20 x 20 metros, los valores originales (de los datos nuevos) se conservan, puesto que en estas áreas, el algoritmo no requiere interpolar (todos los puntos requeridos están cubiertos). De esta manera, los criterios de interpolación aplicados para el modelo preliminar de vecino natural, son también los adecuados en esta fase.

Un aspecto relevante a al trabajar con un set de datos tan voluminoso como el de este estudio, es el rendimiento de los algoritmos de interpolación, en este contexto, el vecino natural, es más eficiente que los otros métodos considerados en las fases previas.

La Figura 56 muestra perfiles batimétricos obtenidos de ambos modelos (MBM y preliminar). Estos, aunque poseen una tendencia similar, muestran diferencias, en las profundidades máximas y mínimas, en las pendientes del relieve submarino y en su detalle. Asimismo, una comparación gráfica entre los modelos preliminar y mejorado permite distinguir morfologías de primer orden en ambos, no así estructuras de menor orden que solo se distinguen en el modelo mejorado.

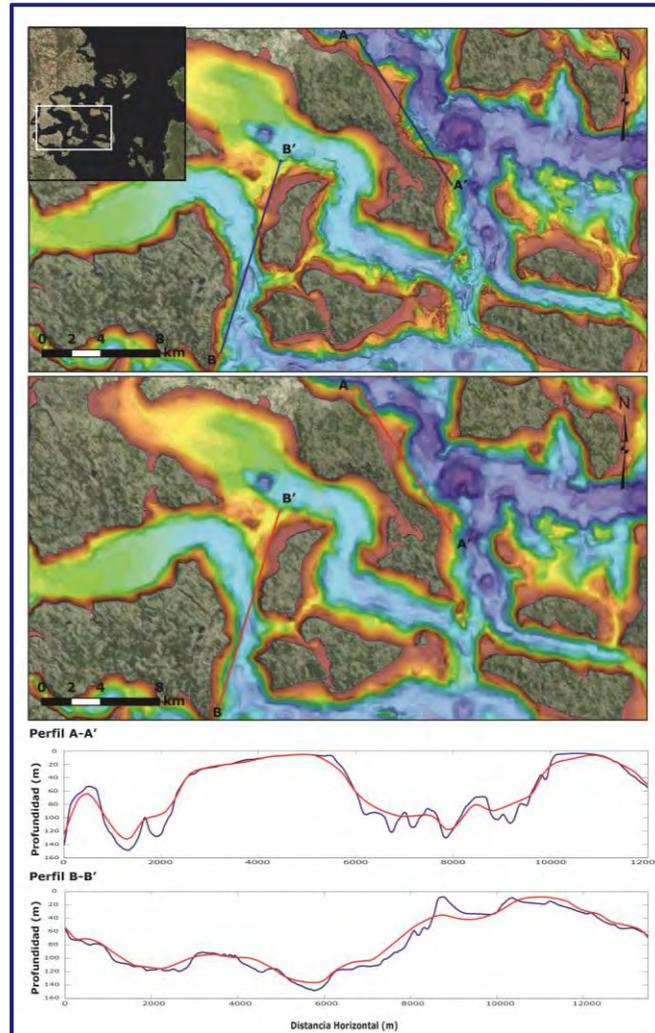


Figura 56: Detalle del MBM (arriba) con modelo preliminar (abajo) y gráfico comparativo de perfiles topográficos correspondientes.

La Figura 57, se presenta un plano de diferencias, obtenido de la resta del MBM y del modelo preliminar. En este análisis espacial, es posible apreciar diferencias con zonas de sobreestimación y subestimación de profundidad, que oscilan entre 68 y 102 m, respectivamente.

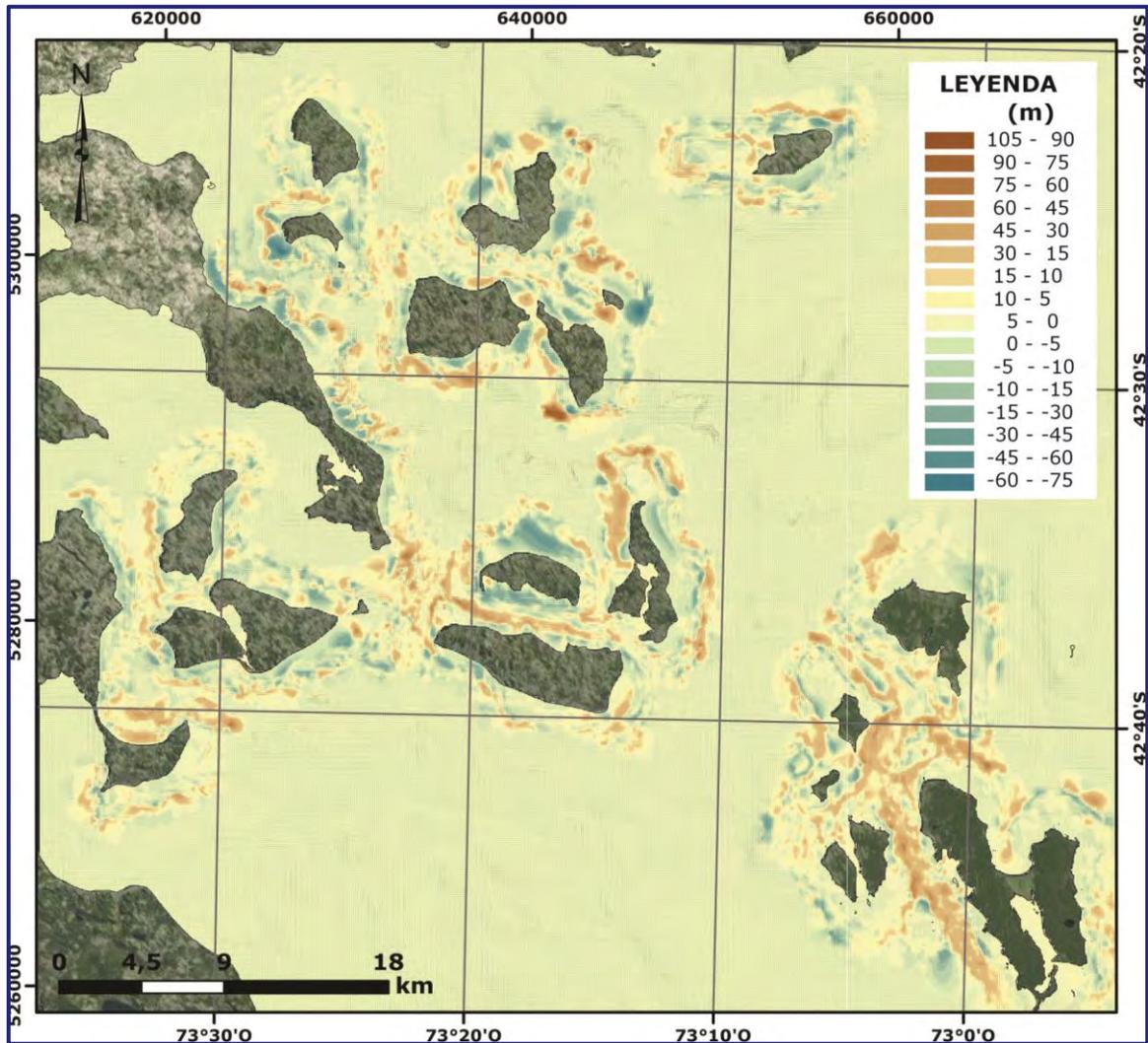


Figura 57: Mapa de diferencias de profundidades entre MBM y modelo preliminar. Valores positivos indican mayores profundidades en MBM y valores negativos mayores profundidades en modelo preliminar.

En **Anexo 9** se presenta el MBM y la base de datos utilizada para el desarrollo del mismo.

Finalmente, y en base al análisis espacial de los datos contenidos en Figura 58, donde se presentan por un lado, las sondas de las cartas náuticas, y por otra, las diferencias entre ambos modelos, es posible inferir que los sectores con mayores diferencias, ocurren en áreas donde inicialmente no hay sondas. Dicho lo anterior, también existen lugares donde los datos de las

cartas náuticas presentan diferencias relevantes alcanzando más del 100% de error respecto al levantamiento realizado.

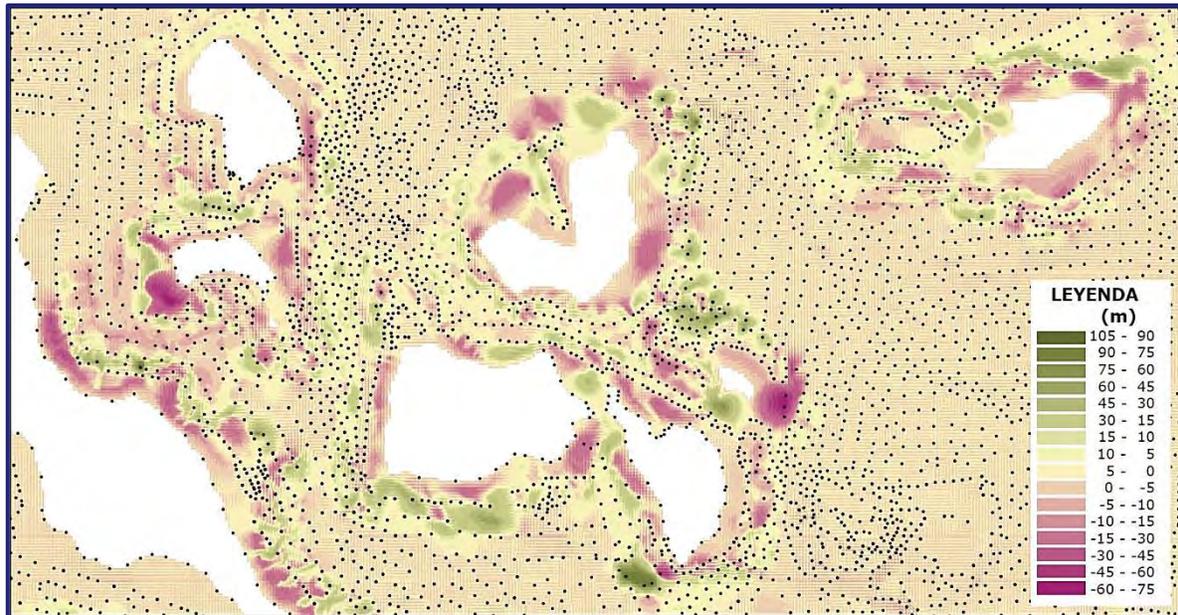


Figura 58: Sondas de cartas náuticas superpuestas a mapa de diferencias.

8 CONCLUSIONES

La información analizada ha permitido elaborar modelos batimétricos que integran la información batimétrica existente.

Los modelos batimétricos elaborados (a partir de la información disponible, obtenida para fines de navegación) muestran que el resultado es sensible al método de interpolación utilizado y también a la densidad y distribución de los datos. No obstante, existe consistencia entre todos los modelos generados y los datos de origen (Cartas SHOA).

Con la información batimétrica disponible (datos de origen), el modelo que mostró mejores resultados estadísticos (menor RSME y mayor R^2) y una mejor representación gráfica es el generado a partir del método de interpolación Vecino Natural.

En lo referido al levantamiento batimétrico multihaz, los equipos, procedimientos, y metodología en utilizada, permitieron cumplir con el objetivo planteado. Los resultados obtenidos, son consistentes con los datos provenientes de fuentes oficiales como las Cartas SHOA, lo que valida la metodología utilizada.

La combinación de información batimétrica existente y la proveniente de éste levantamiento batimétrico, permitió elaborar un modelo batimétrico mejorado (MBM).

Comparativamente el MBM presenta morfologías hectométricas que previamente no era posible distinguir, como canales submarinos, montículos y depresiones de origen natural así como estructuras de menor orden que solo se distinguen en el modelo mejorado.

La comparación del MBM con la información de las sondas de las cartas SHOA muestra que el 89% de los datos tienen diferencias entre 0 y 10 m y solo un 0,5% de los puntos presentan diferencias mayores a 50 m.

Se destaca que las mayores diferencias entre el modelo preliminar y el MBM se producen en sectores donde no existían datos. En este sentido, el resultado del presente trabajo, justifica la utilidad del levantamiento realizado y sugiere que, con el fin de elaborar de un modelo batimétrico completo y de mayor detalle de Chiloé es necesario dar continuidad a las mediciones especialmente en sectores de batimetría compleja y/o con densidad de datos insuficiente,

9 CUMPLIMIENTO DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO

En la presente sección se da cuenta del % de cumplimiento de las tareas comprometidas en la oferta técnica presentada. En la Tabla 15, se detallan las actividades planificadas y el porcentaje de avance de las mismas.

Tabla 15: Actividades planificadas y el porcentaje de avance de las mismas.

ACTIVIDADES PLANIFICADAS	% AVANCE
<p>FASE 1: INICIO DE PROYECTO</p> <ul style="list-style-type: none"> Formalización del contrato: firma contrato, entrega de garantías y antecedentes señalados en las bases a fin de formalizar la contratación el estudio. Planificación general del proyecto: revisión, preparación y gestión de recursos y equipos. Desarrollo de plan de calidad, protocolos de calidad y de herramientas de gestión. Reunión de coordinación: Reunión de inicio de los trabajos en Valparaíso. Presentación de plan de trabajo y procedimientos. Coordinación de actividades con el FIPA y SUBPESCA. 	100% Completado
<p>FASE 2: RECOPIACIÓN, PROCESO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> Elaboración de Modelo Batimétrico (MB) en base a información existente. Planificación de metodología de trabajo para la etapa siguiente. Elaboración y entrega del primer informe de avance (Mes 3). Elaboración y entrega del informe de avance corregido. 	100% Completado
<p>FASE 3: LEVANTAMIENTO MULTHAZ</p> <ul style="list-style-type: none"> Solicitud de permisos SHOA para desarrollo de las actividades de terreno. Preparación técnica y logística para el desarrollo de las actividades de terreno. Levantamiento batimétrico multihaz. 	100% Completado
<p>FASE 4: GENERACIÓN DE PRODUCTOS</p> <ul style="list-style-type: none"> Proceso y edición de datos Estudio de marea. Vinculación geodésica. Generación de base de datos. Generación de modelos batimétricos mejorados o actualizados que integren los datos levantados. Comparación de modelos generados. Elaboración y entrega de informes parciales. 	100% Completado

FASE 5: PRODUCTOS FINALES Y CIERRE

- Elaboración y entrega de informe final.
- Desarrollo de Taller de Presentación de Resultados.
- Evaluación del trabajo realizado.

100% Completado

10 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo en esta etapa del proyecto se describe en la Tabla 16.

Tabla 16: Equipo de trabajo principal.

NOMBRE	CARGO
Bruno Ladrón de Guevara (BLG)	Director de proyecto
Patricia Jollán (PJV)	Admin. y finanzas
David Gómez (DGB)	Hidrógrafo senior
Felipe Ríos (FRR)	Oceanógrafo senior
Valentina Astudillo (VA)	Geóloga analista de datos
María Rene Munizaga (MRM)	Gestión y Calidad
Loreto Jiménez (LJG)	Dibujante cartográfico

En **Anexo 13**: Personal actividad, se presenta informe de las horas Personal - actividad del proyecto.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Heusser C. 1990. Chilotan piedmont glacier in the Southern Andes during the last glacial maximum. In: Revista Geológica de Chile 17: 3-18.
- Rodrigo C. 2006. Topografía submarina en canales de la Patagonia norte. In: Avances del conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas. Puerto Montt a Cabo de Hornos. N. Silva & Palma (Eds.) Comité Oceanográfico Internacional - Pontificia Universidad de Valparaíso. Valparaíso pp. 19 - 23.

- Bello-Pineda & Hernández-Stefanoni 2007. Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. In: Pan American Journal of Aquatic Sciences. Mexico pp 247-254.
- Li Jin & Heap Andrew D. 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. In: Geoscience Australia Record 2008/23. Australia.
- SUBPESCA 2012. Determinación de las condiciones oceanográficas en las áreas Seno de Reloncaví y mar interior de Chiloé.
- SUBPESCA 2013. Estudios técnicos para la caracterización de nuevos sectores para la acuicultura, sector norte, región de Aysén etapa 1".
- El-Hattab 2014. Single beam bathymetric data modeling techniques for accurate maintenance dredging. In: The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. Egipto pp 189 – 195.
- Curtarelli et al. 2015. Assessment of spatial interpolation methods to map the Bathymetry of an Amazonian hydroelectric Reservoir to aid in decision making for water management. In: International Journal of Geo Information. Brasil pp 220-235.

12 ANEXOS

Anexo	Contenido
Anexo 1: Memorándum técnicos y área de levantamiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Acta reunión de inicio. • Se incluyen Memorándums técnicos en que se propone área y metodología de levantamiento (*.word; *.pdf). • Plano de área de levantamiento propuesta (*.pdf).
Anexo 2: Permiso SHOA y Acta de reunión de inicio de proyecto.	<ul style="list-style-type: none"> • Permiso SHOA - Res. 13270-24-575 (*.pdf).
Anexo 3: Especificaciones de equipos usados.	<ul style="list-style-type: none"> • Especificaciones de principales equipos usados (*.word; *.pdf).
Anexo 4: Medición de velocidad del sonido y caracterización de la columna de agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Informe técnico (IT) Medicion de velocidad del sonido y caracterización de la columna de agua (*.word; *.pdf). • Datos crudos.

Anexo	Contenido
	<ul style="list-style-type: none"> Metadatos.
Anexo 5: Vinculación geodésica	<ul style="list-style-type: none"> Informe técnico (IT) Vinculación geodésica (*.word; *.pdf). Monografías de vértices (*.word; *.pdf). Informes de procesamiento de líneas base (*.pdf). Datos.
Anexo 6: Estudio de marea	<ul style="list-style-type: none"> Informe técnico (IT) Estudio de marea (*.word; *.pdf). Datos de marea registrados en Islas Lemuy, Llingua, Talcan (*.xls). Monografías de cotas de marea (*.word; *.pdf). Metadatos
Anexo 7: Modelos Batimétricos preliminares.	<p>Modelos preliminares:</p> <ul style="list-style-type: none"> Modelo batimétrico IDW y datos (*.xyz). Modelo batimétrico Kriging ordinario y datos (*.xyz). Modelo batimétrico Kriging Universal y datos (*.xyz). Modelo batimétrico TIN a Raster y datos (*.xyz). Modelo batimétrico Topo a raster y datos (*.xyz). Modelo batimétrico Vecino natural y datos (*.xyz). Comparación estadística de modelos (*.xls).
Anexo 8: Productos Batimétricos.	<ul style="list-style-type: none"> Geotiff (*.tif). Prueba de Parche Datos (*.xls). Metadatos.
Anexo 9: Modelo Batimétrico Mejorado	<ul style="list-style-type: none"> Modelo mejorado*xyz.
Anexo 10: Material audiovisual	<ul style="list-style-type: none"> Documento con fotografías del proyecto (*.word; *.pdf).
Anexo 11: Taller de presentación de resultados	<ul style="list-style-type: none"> Presentación del proyecto (*.ppt; *.pdf). Programa t Lista de asistentes al Taller. Informe del taller.
Anexo 12: Resumen en inglés.	<ul style="list-style-type: none"> Documento Resumen en inglés (*.word; *.pdf).
Anexo 13: Personal actividad.	<ul style="list-style-type: none"> Documento que informa las horas Personal actividad del proyecto (*.word; *.pdf).