
Facultad de Ingeniería - UdelaR
Proyecto de Grado para optar por el título
de Ingeniero Agrimensor

Estudio de la técnica de batimetría, errores asociados a la metodología e instrumental empleado y generación de un modelo digital del fondo de un cuerpo de agua.

Bach. Micaela Gracia Maldonado y Bach. Franco Santos Curbelo

Año 2021

Tutora: Ing. Agrim. Magali Martinez / Cotutor: Ing. Agrim. Martin
Wainstein

Página de Aprobación

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba el Proyecto de Grado:

“Estudio de la técnica de batimetría, errores asociados a la metodología e instrumental empleado y generación de un modelo digital del fondo de un cuerpo de agua.”

1. Autores: *Micaela Gracia Maldonado y Franco Santos Curbelo.*
2. Tutor: *Ing. Agrim. Magali Martinez*
3. Cotutor: *Ing. Agrim. Martin Wainstein*
4. Carrera: *Ingeniero Agrimensor*

Puntaje:

Tribunal:

Profesor: (Nombre y firma)

Profesor: (Nombre y firma)

Profesor: (Nombre y firma)

Agradecimientos

A las instituciones, Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada, y al Yacht Club Uruguayo de Montevideo, nuestro más sincero agradecimiento por su participación y por su apoyo, que contribuyó significativamente a nuestros estudios.

A los docentes, que sus palabras y conocimientos llevaremos con nosotros en nuestro transitar profesional. Gracias por su paciencia y apoyo. A la Ing. Agrimensora Magali Martinez y al Ing. Agrimensor Martin Wainstein, por compartir sus conocimientos de manera invaluable, por su dedicación, perseverancia y tolerancia.

A los Ing. Agrimensores Alfredo Marusich y Rafael Tornini, por hacer esto posible y por contar con su apoyo desde el inicio.

A nuestros amigos y compañeros, que compartimos horas de estudio y trabajo, que llevó a que hoy sea el cierre de un Capítulo.

A nuestra familia, por apoyarnos en cada elección y por ser el respaldo incondicional para culminar esta etapa de nuestras vidas.

Y a nuestros padres, que han sido el motor que impulsa nuestros sueños, quienes estuvieron siempre presentes. Se lo dedicamos a ustedes como la meta más conquistada.

Índice

Página de Aprobación	1
Agradecimientos	2
Resumen	7
Introducción	8
1. CAPÍTULO 1 - Objetivos	9
1.1. Objetivos Generales	9
1.2. Objetivos Específicos	9
2. CAPÍTULO 2 - Marco Teórico	11
2.1. Modelo Digital de Elevaciones.	11
2.2. Interpolación TIN (Red de triángulos irregulares)	11
2.3. Triangulación de Delaunay	11
2.4. Modelo Geoidal	12
2.5. Modelo Geoidal EGM-2008	12
2.6. Altura Ortométrica y Elipsoidal	13
2.7. Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS)	14
2.7.1. Efemérides	14
2.7.2. Posicionamiento con GNSS	15
2.7.3. Fuentes de error en el Posicionamiento GNSS	16
2.8. Proyección Universal Transversal Mercator -UTM-	17
2.9. IMU - Unidad de Medición Inercial	18
2.10. Hidrografía	18
2.11. Carta Náutica	18
2.12. Batimetría	18
2.13. Mareas	19
2.14. Mareógrafo	19
2.15. Plano de Reducción de Sondas	20
2.16. Plano de Referencia Hidrométrico Provisorio (Ex-Wharton)	20
2.17. Propiedades del agua	21
2.18. Ondas acústicas	22
2.19. Propagación del sonido en el agua	23
2.20. Organización Hidrográfica Internacional	23

2.21. Normas de a OHI para los Levantamientos Hidrográficos	23
2.21.1. Clasificación de los levantamientos.	24
3. CAPÍTULO 3 - Levantamientos Batimétricos	29
3.1. Generalidades	29
3.2. Especificación de levantamiento - orden especial OHI.	29
3.3. Planificación del levantamiento	30
3.4. Recolección de datos	32
3.5. Procesamiento de datos	33
3.6. Análisis de datos	33
4. CAPÍTULO 4 - Posicionamiento	35
4.1. Generalidades	35
4.2. Técnicas ópticas	35
4.2.1. Método sextante	36
4.2.2. Método de Biseccion o Intersección directa	37
4.2.3. Método de bisección con distancias o Trilateración	37
4.2.4. Método de polares con Estación Total	37
4.3. Métodos de observación y posicionamiento GNSS	38
5. CAPÍTULO 5 - Determinación de la profundidad	40
5.1. Generalidades	40
5.2. Sistemas no acústicos	41
5.2.1. Mecánicos	41
5.2.2. Láser aerotransportados	42
5.2.3. Sistemas Electromagnéticos Aerotransportados	42
5.2.4. Fotobatimetría	43
5.2.5. Sistemas Satelitales	43
5.3. Sistemas Acústicos	44
5.3.1. Generalidades	44
5.3.2. Transductor y su instalación	48
5.3.3. Calibración del instrumental	49
5.3.4. Ecosonda Multihaz	50
5.3.5. Ecosonda de haz simple	51
5.3.6. Ecosonda de Doble frecuencia	54
6. CAPÍTULO 6 - Levantamiento con ecosonda simple haz y posicionamiento GNSS	55

6.1.	Generalidades	55
6.2.	Fundamento teórico del levantamiento	55
6.2.1.	Modelo de determinación de profundidades, utilizando modelo geoidal y altura GNSS	55
6.2.2.	Modelo de determinación de profundidades, utilizando alturas de marea	59
6.3.	Líneas de Levantamiento para ambos modelos	61
6.4.	Desventajas del levantamiento con ecosonda simple haz	61
7.	CAPÍTULO 7 - Análisis de errores	63
7.1.	Generalidades	63
7.2.	Posicionamiento horizontal	63
7.3.	Posicionamiento vertical	65
8.	CAPÍTULO 8 - Levantamiento batimétrico en el Puerto del Buceo	73
8.1.	Generalidades	73
8.2.	Objetivos del relevamiento	74
8.3.	Instrumental utilizado y recursos disponibles	74
8.4.	Datos antecedentes	78
8.5.	Planificación	78
8.6.	Pre-Análisis	81
8.6.1.	Análisis posicionamiento horizontal	81
8.6.2.	Error total en la determinación de la posición horizontal	82
8.6.3.	Análisis posicionamiento vertical	83
8.6.4.	Error total en la determinación de la posición vertical	87
8.7.	Trabajo de campo	87
8.8.	Datos recabados en el levantamiento	90
8.9.	Técnicas de control de calidad	91
8.9.1.	Puntos de control	91
8.10.	Procesamiento	92
8.10.1.	Proceso de depuración	96
8.10.2.	Criterios de depuración empleados	96
8.11.	Modelo Digital de Elevaciones	96
8.12.	Generación de carta náutica	98
8.13.	Análisis de resultados	100
9.	CAPÍTULO 9 - Comparación y análisis de Modelos Digitales de Ele-	

vaciones	103
9.1. Generalidades	103
9.2. Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada . .	103
9.2.1. Departamento de Hidrografía	104
9.2.2. Procesamiento de datos efectuado por el SOHMA	104
9.3. Instancia de intercambio con el SOHMA	104
9.4. Primer comparación de superficies	105
9.4.1. Análisis de resultados	108
9.5. Segunda comparación de superficies	110
9.5.1. Análisis de resultados	113
10. CAPÍTULO 10 - Conclusiones	116
10.1. Técnica de Batimetría	116
10.2. Errores asociados a la metodología e instrumental empleado	117
10.3. Generación de un modelo digital del fondo de un curso de agua	117
10.4. Comentarios	118
Anexo	119
Bibliografía	123
Posibles líneas de investigación futuras	124

Resumen

La motivación del proyecto parte de que, si bien es una técnica que se puede desarrollar con instrumental presente en el país y de no tan alto costo, está poco desarrollada en el ámbito académico y no existen muchos profesionales que se dediquen a ella en Uruguay. Así mismo, es un tipo de levantamiento distinto a lo que hemos estudiado, ya que se está relevando una superficie no visible, lo que genera una incertidumbre adicional; dicho esto surgió el interés de investigar detalladamente la base teórica de la batimetría, metodologías, implicancias, eficiencias y resultados en la tarea.

En consecuencia, el presente proyecto de grado se centrará en el estudio y análisis de la técnica batimétrica, los errores asociados a las metodologías e instrumentales y su influencia en los resultados obtenidos; en particular el cuerpo de agua a estudiar será un sector del Río de la Plata.

En cuanto a la metodología de relevamiento, se desarrollará lo relacionado con posicionamiento satelital mediante método diferencial y determinación de la profundidad con ecosonda simple haz, siendo ésta la técnica más utilizada por los profesionales que realizan estas tareas en el país hoy en día.

Se realizará un relevamiento batimétrico aplicando la metodología e instrumental mencionados anteriormente en una zona en el Puerto del Buceo, Montevideo, Uruguay -Yacht Club Uruguay-; como producto de esto, se generará un modelo digital del fondo del cuerpo de agua, que a su vez servirá de insumo para futuras tomas de decisiones de la Comisión del Yacht Club.

Como valor agregado de este proyecto, podemos mencionar el intercambio con el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA), compartiendo conocimientos y generando nueva información.

Introducción

Durante nuestra formación académica, si bien el tema batimetría fue abordado desde una perspectiva teórica, no tuvimos instancias de aplicación práctica que nos permitiera interiorizarnos en la planificación, el relevamiento de campo (captura de datos) o el procesamiento de datos, ni de las diferentes componentes que hacen a la aplicación de la técnica.

Esto despertó en nosotros el interés en profundizar sobre la técnica, su aplicación y el instrumental asociado, así como evaluar la posibilidad de llevar adelante un relevamiento de campo que nos permitiera interiorizarnos en todos los aspectos involucrados.

El enfoque fundamental parte de describir las metodologías, los instrumentales utilizados y el alcance que estos levantamientos tienen.

El siguiente informe se centrará en describir en que se basa concretamente un levantamiento batimétrico. Se indagará la existencia de órganos reguladores que establezcan ciertas normas para la realización de éstos levantamientos y los instrumentales que a la actualidad se utilizan, el alcance que estos tienen en cuanto a precisiones, forma de empleo de los mismos, etc.

1. CAPÍTULO 1 - Objetivos

1.1. Objetivos Generales

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de la técnica de batimetría, analizando los errores asociados al instrumental a utilizar, los errores debido a la metodología a emplear y los errores generados en función al cuerpo de agua en cuestión.

Realizar un relevamiento batimétrico en el Puerto del Buceo, contrastando y aplicando lo estudiado mediante levantamiento continuo de puntos, empleando una ecosonda simple haz y posicionamiento satelital, generando a partir del levantamiento un Modelo Digital de Elevaciones del fondo del cuerpo de agua.

Realizar comparaciones de superficies producidas mediante metodologías diferentes y en diferente espacio temporal, con la finalidad de demostrar coherencia de los datos relevados para este proyecto.

1.2. Objetivos Específicos

- Instrucción en la técnica de batimetría;
- Estudio de errores asociados;
- Investigación de los distintos instrumentales, con mayor enfoque en las ecosondas de simple haz;
- Realizar un levantamiento batimétrico;
- Análisis de los resultados obtenidos en puntos de control;
- Generación de un Modelo Digital de Elevaciones del fondo del cuerpo de agua;
- Generación de una carta náutica;
- Estudiar si el Modelo Digital de Elevaciones del fondo del cuerpo de agua, es representativo de la realidad;

- Analizar los resultados de los productos obtenidos.

2. CAPÍTULO 2 - Marco Teórico

El presente trabajo consiste en la investigación de una técnica de relevamiento, por lo cual se elaborará un marco teórico con la finalidad de establecer un contexto.

A continuación, quedando establecida la formulación del trabajo, se expondrán conceptos, teorías, estudios, referencias y definiciones que guiarán al mismo. Se establecerán antecedentes en general que referirán al objetivo de la investigación.

2.1. Modelo Digital de Elevaciones.

“Un modelo digital de elevaciones (MDE) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. De forma general, la unidad básica de información en un MDE es un valor de altitud, z , al que acompañan los valores correspondientes de x e y , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial.”¹

2.2. Interpolación TIN (Red de triángulos irregulares)

Una red TIN, se constituye por la triangulación de un conjunto de puntos. Estos puntos serán los vértices de triángulos que estarán conectados mediante las aristas, formando así una red.

Una superficie TIN es la representación de una superficie continua, generada a partir de un proceso de triangulación y utilizando un conjunto de datos espaciales. Cada uno de los triángulos conforman un plano y representan a una parte de la superficie. También, compartirán uno de sus lados con otros planos para formar una superficie continua.

2.3. Triangulación de Delaunay

“Dada una nube de puntos del plano, hallar una triangulación en la que los puntos próximos estén conectados entre si por una arista, o sea, en la que los triángulos sean lo más regulares posible.

¹FELICÍSIMO, Angel M. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales.

Propiedades: Sea $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ un conjunto de puntos en el plano P .

1. Tres puntos p_i, p_j, p_k pertenecientes a P son vértices de la misma cara de la triangulación de Delaunay de P si y solo si el círculo que pasa por los puntos no contiene puntos p_i, p_j, p_k de P en su interior.
2. Los puntos p_i, p_j pertenecientes a P forman un lado de la Triangulación de Delaunay de P si y solo si existe un círculo que contiene a p_i, p_j en su circunferencia y no contiene en su interior ningún punto de P .²

2.4. Modelo Geoidal

Un Modelo Geoidal es la representación matemática del geoide para una zona en particular o para toda la Tierra.

“La superficie equipotencial utilizada como superficie de referencia en Geodesia es el geoide.”³

El objetivo principal de la geodesia física es estudiar la forma de la Tierra, así como también el campo de gravedad existente y el geoide, siendo este último una superficie equipotencial de la gravedad.

“Es la superficie matemática de la Tierra, se define como una superficie equipotencial de la gravedad para un valor especial de constante W_0 ”³

2.5. Modelo Geoidal EGM-2008

“El modelo gravitacional EGM2008 ha sido publicado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA).

Los cálculos del geoide local se han basado tradicionalmente en la filosofía de Helmert de condensación: la topografía se condensa en una capa delgada sobre el geoide.

Numéricamente, esto se hace mediante la sustitución de la anomalía de la gravedad por la anomalía de Faye.

²La triangulación de Delaunay aplicada a modelos digitales de terreno- Depto. de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad Politécnica de Valencia.

³BENAVIDEZ SOSA, A. Año 2004, Fundamentos de Geodesia Física.

Este modelo ofrece una resolución y precisión sin precedentes, exponiendo hasta el más mínimo error de incompatibilidad. El logro de mejores resultados en los cálculos, utilizando el geoide EGM08, dependerá de la forma en que las reducciones topográficas y de gravedad se lleven a cabo.”⁴

2.6. Altura Ortométrica y Elipsoidal

“A la cota referida al Geoide se le denomina altura ortométrica (H), es por lo tanto, la distancia medida sobre la vertical entre la superficie física de la Tierra y el Geoide. La línea de plomada no es una línea recta, ya que tiene una leve curvatura y giro, debido a que la dirección de la gravedad varía dependiendo de las características de densidad local.

La altura elipsoidal es la distancia medida a lo largo de la normal al elipsoide entre la superficie topográfica y el elipsoide. Esta altura es de tipo matemático, pues no responde a ningún principio físico. La altura es positiva por encima del elipsoide y negativa por debajo de él. La distancia medida sobre la normal elipsoidal que separa a la superficie elipsoidal de la superficie geoidal se le llama Ondulación Geoidal (N)”⁴

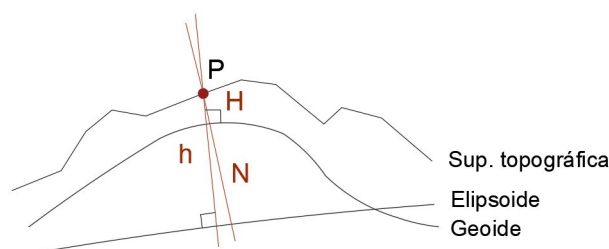


Figura 1: Esquema de alturas.

Siendo,

h: altura elipsoidal

H: altura ortométrica

N: ondulación geoidal

⁴BONILLA J. FORMOSO P. PERDOMO G. Tutor: FAURE J. Año 2019, Proyecto de Grado Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería UDELAR, Modelo de transformación de alturas en el departamento de Maldonado.

2.7. Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS)

Es uno de los Sistemas fundamentales en Geodesia Espacial que permite trabajar con precisiones centimétricas. Ésta fue desarrollada por las Fuerzas Armadas de Estados Unidos con fines militares en la década de 1960. GNSS engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite que proporcionan un posicionamiento con cobertura global siendo GPS, GLONASS, GALILEO y BeiDou los sistemas GNSS más utilizados a la fecha.

A modo de introducción, el sistema GNSS proporciona un posicionamiento geoespacial basado en la medición de la distancia a un mínimo de 4 satélites en simultáneo que transmiten sus posiciones estimadas mediante una señal generada por un oscilador o reloj. Para ello, el oscilador genera ondas portadoras con una frecuencia patrón y sobre ellas se apoya ó modula - en forma binaria - la información que es necesaria transmitir.

La distancia entre el satélite y el receptor en la época de transmisión y recepción de la señal se puede hallar en función del tiempo medido en la propagación de la señal. Dicho tiempo resulta de comparar la señal recibida por el receptor del satélite y la réplica de ésta que genera el receptor.

2.7.1. Efemérides

La trayectoria descrita por los satélites pertenecientes a las constelaciones no es una Órbita Kepleriana, ésto se debe a que se producen alteraciones por fuerzas perturbadoras existentes -gravitacionales y no gravitacionales-.

Las efemérides son un conjunto de parámetros que permiten calcular la órbita que recorre cada satélite y su posición dentro de la misma.

- Efemérides transmitidas: son datos obtenidos del mensaje de navegación, que sirven para determinar la posición del satélite en la órbita. Son enviadas en tiempo real, por lo que son predicciones que se actualizan cada 2 horas generalmente.
- Efemérides precisas: son datos de la posición del satélite en la órbita (X, Y, Z) - coordenadas geocéntricas -.

Se distribuyen 3 tipos de efemérides precisas:

- Ultrarrápidas: 3cm de precisión, actualización 4 veces al día.
- Rápidas: 2.5cm de precisión, actualización 1 vez por semana.
- Finales: 2.5cm de precisión, actualización cada 13 días aprox.

2.7.2. Posicionamiento con GNSS

El principio del posicionamiento satelital se rige en determinar una cantidad desconocida (X_R, Y_R, Z_R) -posición del receptor-, mediante una cantidad mensurable ρ -distancia satélite receptor - y una cantidad conocida (X_S, Y_S, Z_S) -posición del satélite-; ésta última se obtiene a partir de las efemérides. En otras palabras, para determinar la posición del receptor es suficiente conocer la posición de al menos cuatro satélites en simultáneo y determinar la distancia entre el satélite y el receptor.

La determinación de esta distancia D , se basa en la propagación de ondas electromagnéticas -propagadas en el vacío, a la velocidad de la luz- y del cálculo del tiempo que tarda en viajar la señal desde el centro de fase de la antena del satélite hasta el centro de fase de la antena del receptor.

Los métodos utilizados son:

- *Medición de código*: el receptor replica el código que recibe desde el satélite y se observa el desplazamiento temporal necesario para que exista una sincronización entre ambos códigos, determinando así el tiempo de propagación.

$$D = v.t$$

- *Medición en fase*: el receptor replica la onda recibida, se determina el número entero N de longitudes de onda λ y se compara la diferencia de fase entre ambas φ -parte no entera-

$$D = \lambda.(N + \varphi)$$

Siendo,

λ : longitud de onda;

N : número entero de longitudes de onda;

φ : parte no entera de longitud de onda.

2.7.3. Fuentes de error en el Posicionamiento GNSS

La medida de distancia receptor-satélite realizada a un único receptor se ve afectada por errores tanto aleatorios como sistemáticos -así sea medición con código o con fase-. Dichos errores se pueden clasificar según su procedencia en errores que involucran al satélite, al medio de propagación de la onda y al receptor.

Clasificación:

- *Errores asociados al Satélite:*
 - Errores orbitales: ligeros errores en las efemérides transmitidas. Los satélites se desvían de su órbita teórica a causa de la variación del campo gravitatorio, efectos producidos por el sol y la luna, etc.
 - Offset del reloj: error producido por la falta de sincronización del tiempo atómico GPS en el satélite y en el receptor; la oscilación en el satélite y en el receptor no es la misma.
 - Errores relativistas: error producido por comportamientos distintos de los osciladores dada la diferencia gravitacional existente entre los satélites y el receptor.
- *Errores asociados al Medio de Propagación:*
 - Refracción Ionosférica: medio dispersivo, la velocidad de propagación en esta capa de la atmósfera depende de la densidad de electrones, (efecto de ionización provocado por el Sol principalmente). Afecta tanto mediciones en código como en fase, generando un retardo o un avance en la propagación de la señal respectivamente.
 - Refracción Troposférica: medio no dispersivo, genera un retardo tanto en la me-

dición en código como en fase; depende de la presión atmosférica, la temperatura y presión de vapor de agua.

- Pérdidas de ciclo: solo afecta a medidas de fase y es provocado por la pérdida de la señal enviada por el satélite.

■ *Errores asociados al Receptor*

- Variación del centro de fase: retardos producidos en las antenas, cables y filtros utilizados en los receptores.

- Desfasaje y variación del centro de fase de la antena: desfasaje entre el punto de referencia de la antena y punto de medida de la altura del instrumental, afectando la altura del instrumento. También se puede presentar una diferencia entre el punto de referencia de la antena y los centros de fase de recepción de las portadoras.

- Multi-camino: error provocado por múltiples reflexiones de la señal emitida por el satélite, siempre más largas. Generalmente ocurre por presencia de árboles, edificios, superficie de agua, etc.

2.8. Proyección Universal Transversal Mercator -UTM-

“Proyección cilíndrica conforme en la que el cilindro es secante al elipsoide y el eje del cilindro está sobre el ecuador. Esta proyección divide a la Tierra en 60 husos de 6 grados sexagesimales de longitud cada uno, numerados a partir del antimeridiano de Greenwich de Oeste a Este. Las coordenadas se miden en metros referidas a un meridiano central con respecto de X, mientras que las coordenadas Y, desde el ecuador hacia el Norte y hacia el Sur”⁵

⁵IIEG, Año 2009, Glosario del Instituto de Información Estadística y Geográfica

2.9. IMU - Unidad de Medición Inercial

Los Sensores Inerciales IMU, son los sensores que se utilizan generalmente para la medición de los movimientos de la embarcación. Ya sea, el cabeceo, bandeo o el de oleaje. Su funcionamiento principalmente se basa en aplicar las leyes de Newton para el movimiento, donde hay 3 acelerómetros montados sobre ejes tri ortogonales, además de 3 sensores angulares. El resultado de este sistema da una buena estimación del vector de gravedad, además la dirección de los pequeños desplazamientos de la embarcación.⁶

2.10. Hidrografía

“Es la rama de las ciencias aplicadas que se ocupa de la medición y descripción de las características físicas de los cuerpos de agua (océanos, mares, zonas costeras, lagos y ríos), así como de la predicción de su cambio en el tiempo.”⁷

2.11. Carta Náutica

Una carta náutica es una representación del fondo de un cuerpo de agua y de regiones o costa adyacente, a escala y orientada, para permitir una navegación segura. Es un mapa con la finalidad de mostrar la profundidad en el lugar, zonas de peligro y demás elementos de ayuda a la navegación.

La profundidad se representa mediante líneas isobáticas, que son líneas que unen puntos de igual profundidad.

2.12. Batimetría

Según la Real Academia Española se define como “el arte de medir las profundidades..”.

Al igual que un levantamiento convencional, la finalidad de esta es el levantamiento de puntos con coordenadas (x,y,z) , con la particularidad de que estos puntos se encuentran en el fondo de un medio acuático.

⁶Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

⁷Extraído de presentación proporcionada por el SOHMA, Junio 2021.

La profundidad de un punto se determina midiendo la distancia vertical entre el nivel del agua y la superficie del fondo. Una carta batimétrica representa el fondo del terreno o del cuerpo de agua mediante isolíneas o curvas que conectan los puntos con un valor constante.

Las batimetrías remontan al antiguo Egipto, en donde se realizaban atando una piedra a una cuerda y arrojándola al agua. La longitud de la cuerda sumergida era la profundidad.

Los métodos con el correr del tiempo han ido avanzando y se han desarrollado tanto para el posicionamiento horizontal como la determinación de la profundidad. Estos han transcurrido desde los métodos topográficos tradicionales de medición, con Teodolitos o Estación Total, hasta la actualidad donde se ha podido relevar utilizando posicionamiento GNSS y ecosondas para calcular profundidades o tecnología LIDAR.

2.13. Mareas

“Las mareas observadas en cualquier puerto dado son el resultado de muchos factores, incluyendo la respuesta del fondo del océano a las fuerzas de producción de mareas, a las modificaciones de la marea debido a los efectos de agua poco profundas de bahías y ríos locales, a los efectos regionales y locales del clima en los niveles de agua”.⁸

Algunas de las fuerzas intervinientes son, por ejemplo, la fuerza gravitacional de la Luna y el Sol, y la fuerza centrífuga producida en el centro de masa de la Tierra por la rotación de la misma.

2.14. Mareógrafo

Es un instrumento utilizado para medir y registrar las variaciones de las mareas, permite registrar automáticamente las variaciones del nivel del mar o de agua embalsada en un puerto, presa o punto dado cualquiera.

Los aspectos que se toman en cuenta para medir las mareas son:

⁸Normas de la OHI para los Levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

- La altura del nivel del mar y su evolución en función del tiempo con respecto a un nivel de referencia fijo, (se debe tener en cuenta que se debe eliminar el efecto del oleaje).
- Se debe registrar el momento (tiempo) en que se realiza cada medición de la altura del nivel del mar.

2.15. Plano de Reducción de Sondas

“Una superficie, establecida como permanente a la cual se refieren los sondeos o alturas de mareas, usualmente a bajamares. También denominado datum, datum de nivel, nivel de referencia, plano de referencia. Este plano está relacionado con las bajamares. Se busca que sea un plano tan bajo que la marea raramente descienda por debajo de él. Se procura con ello mostrar la profundidad mínima que un navegante puede llegar a encontrar en un lugar en condiciones meteorológicas normales, o dicho de otra forma, que casi siempre tendrá más profundidad que la mostrada por la carta, dando con ello más confiabilidad en el uso de este documento”.⁹

2.16. Plano de Referencia Hidrométrico Provisorio (Ex-Wharton)

“Es el plano horizontal provisorio de referencia para los ceros de escalas hidrométricas del País (Decreto del Poder Ejecutivo del 20/V/49). Dicho plano pasa a 23,88 m debajo de un marcador colocado en el interior del edificio del Cabildo de Montevideo en el año 1894. Este plano coincide con el nivel de reducción de sondas para el Río de la Plata, determinado en el siglo pasado por el Capitán Wharton (Oficial de la Armada Británica). Fue adoptado posteriormente como referencia para las obras del Puerto de Montevideo; referencia que se mantiene hasta nuestro días. Este mismo plano es el nivel de reducción de sondas adoptado por el SOHMA (Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la armada) para el Puerto de Montevideo. El Nivel Medio del Mar pasa a 22,97 m por debajo del marcador descrito anteriormente; y es el de referencia para las alturas del territorio nacional. Está a 0,91 m sobre el Plano Hidrométrico

⁹Normas de la OHI para los Levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición,

Provisorio (Ex Wharton)”¹⁰

2.17. Propiedades del agua

■ Densidad

Esta propiedad se define como la relación entre la masa y el volumen de una sustancia.

La densidad del agua depende de la temperatura, la presión y la salinidad. Dicha densidad cuando el agua se encuentra en estado líquido es muy estable; aproximadamente en agua dulce es de unos 1000 kg/m^3 , mientras que en agua salada es de 1026 kg/m^3 aproximadamente, por lo que el agua dulce es menos densa que el agua salada.

■ Temperatura

La temperatura es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, es la magnitud referida a la noción de calor medible en un cuerpo. “La temperatura de la superficie del agua varía según la posición geográfica en la Tierra, fundamentalmente con la latitud - a mayor latitud menor temperatura -, según la estación del año, hora del día, etc.”¹¹ Esto lleva a que definir el comportamiento de la temperatura en la columna de agua sea un factor complejo, difícil de determinar y que no pueda predecirse con suficiente precisión para los levantamientos batimétricos.

Cuando la temperatura aumenta 1° C , **la velocidad del sonido aumenta 4.5 m/s** , según la OHI (Organización Hidrográfica Internacional).

En particular la temperatura del agua en Uruguay supera los 20° C .

■ Presión

La presión afecta la variación de la velocidad del sonido sobre todo en aguas

¹⁰Mareas - Puertos de Uruguay, SOHMA, Publicación N.º 3

¹¹Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

profundas -a mayor profundidad mayor presión aumentando la velocidad de propagación del sonido-.

Cuando la presión tiene una alteración de 10 atm, la velocidad del sonido cambia 1.6 m/s, según la OHI.

En los primeros 50m de profundidad la velocidad del sonido no se ve afectada por la presión y como la temperatura tiende a mantenerse constante, lleva a que no se perciba un incremento en la velocidad.

Entre los 50m a 300m, el incremento de la velocidad de propagación dado al aumento de presión se ve contrarrestado por el efecto provocado por la disminución de la temperatura.

- Salinidad

“La salinidad es la medición de la cantidad relativa de sales disueltas y otros minerales.”¹²

Si la salinidad varía en 1 ‰, la velocidad aumentará en 1.3 m/s, según la OHI.

2.18. Ondas acústicas

Onda

Una oscilación que se propaga a través de un medio recibe el nombre de onda. “Una onda representa el movimiento de propagación de una perturbación de un punto a otro sin que exista un transporte neto de materia”¹³

Una vibración que se extiende a través de un medio recibe el nombre de onda. Dependiendo de la relación que exista entre el sentido de la oscilación y el de la propagación, se denominan ondas longitudinales o transversales.

¹²Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

¹³VERGES HEDZ, José A. Clasificación de Ondas

Onda Sonora

Una onda sonora es una onda longitudinal que transmite lo que se asocia con sonido. Por lo tanto, el sonido está formado por ondas mecánicas elásticas longitudinales que necesitan acceder a un material - un medio elástico - para transmitir la perturbación.

El modo de transmisión de dicha perturbación se basa en que las variaciones de presión, temperatura o humedad del medio, producen el desplazamiento de las moléculas que lo forman, cada molécula transmite la vibración a las que se encuentren en cercanía, creando un movimiento en sucesión.

2.19. Propagación del sonido en el agua

En el agua, los sonidos se propagan con mayor rapidez y menor pérdida de energía que en el aire. La perturbación que se propaga en consecuencia de una vibración inicial, en agua, los diferentes puntos de la superficie se desplazan verticalmente, con una amplitud que depende del tiempo y de la posición.

En promedio la propagación del sonido en un cuerpo de agua varía entre 1500 m/s (agua salada) y 1435 m/s (agua dulce).

2.20. Organización Hidrográfica Internacional

“La Organización Hidrográfica Internacional (OHI) es una organización intergubernamental que está compuesta por 94 Estados miembros. El objetivo principal de la OHI es asegurar que las aguas navegables del mundo estén debidamente registradas y cartografiadas.

Esto lo hace mediante el establecimiento de normas internacionales.”¹⁴

2.21. Normas de a OHI para los Levantamientos Hidrográficos

Las normas OHI “constituye una de la serie de estándares desarrollados por la Organización Hidrográfica Internacional para ayudar a mejorar la seguridad de la navegación

¹⁴Extraído de presentación proporcionada por el SOHMA, Junio 2021.

... Esta publicación es diseñada para proporcionar un conjunto de normas en la ejecución de los levantamientos hidrográficos para la recolección de datos que primariamente serán utilizados para compilar cartas de navegación.”¹⁵

2.21.1. Clasificación de los levantamientos.

A continuación se describirán los **órdenes del levantamiento batimétrico** que permitirán navegar con seguridad a través de áreas ya relevadas. Los requisitos para clasificar en cada orden varían en función a la profundidad del agua y por los tipos de embarcaciones que se espera que naveguen en el área.

Orden Especial

Es el más estricto de los órdenes y su uso se destina únicamente para aquellas áreas donde es crítica la separación entre la quilla de las embarcaciones y el fondo marino (quilla-fondo); donde esta separación es crítica se requiere un conocimiento completo del fondo.

Dado que la separación quilla-fondo es crítica, se considera imposible que los levantamientos de orden especial sean empleados en aguas más profundas a 40m. Los ejemplos de las áreas que justifican levantamientos de orden especial son: áreas de atraque, puertos y áreas críticas de los canales de navegación.

Para considerar,

- *THU*: incertidumbre total horizontal;
- *TVU*: incertidumbre total vertical
- *a y b* parámetros para cada orden.

¹⁵Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

Estándar Mínimo para Levantamientos Hidrográficos	
Características	Orden Especial
Descripción de áreas	<i>Áreas donde la separación quilla-fondo es crítica</i>
Máximo THU permitido 95 % nivel de confianza	<i>2m</i>
Máximo TVU permitido 95 % nivel de confianza	<i>a= 0.25m b= 0.0075</i>
Búsqueda completa del fondo marino	<i>Requerido</i>
Máximo espaciamiento recomendado entre líneas principales	<i>No definido (se requiere una búsqueda completa del fondo marino)</i>

Orden 1a

Este orden se destina para áreas donde la profundidad existente permita que elementos naturales o artificiales en el fondo marino constituyan una preocupación para el tráfico marítimo, pero donde la separación quilla-fondo es menos crítica que para el Orden Especial. En zonas donde puedan existir rasgos artificiales o naturales que sean de preocupación para la navegación se requiere un conocimiento completo del fondo marino. Los levantamientos de Orden 1a se aplican hasta profundidades no mayores a los 100m.

Estándar Mínimo para Levantamientos Hidrográficos	
Características	Orden 1a
Descripción de áreas	<i>Áreas de profundidades menores de 100m donde la separación quilla-fondo es menos crítica.</i>
Máximo THU permitido 95 % nivel de confianza	<i>5m+ 5 % de profundidad</i>
Máximo TVU permitido 95 % nivel de confianza	<i>a= 0.5m b= 0.013</i>
Búsqueda completa del fondo marino	<i>Requerido</i>
Máximo espaciamiento recomendado entre líneas principales	<i>No definido (se requiere una búsqueda completa del fondo marino)</i>

Orden 1b

Este Orden es para zonas de hasta 100m de profundidad, y donde una descripción general del fondo marino es adecuada para el tipo de embarcaciones que se espera transiten por el área.

No se requiere un conocimiento completo del fondo marino, lo que significa que algunos rasgos pueden ser obviados, aunque la máxima separación entre líneas admitidas limitará el tamaño de los rasgos que probablemente permanecerán indetectados.

Este Orden de levantamiento se recomienda solamente donde la separación quilla-fondo no sería considerado un problema.

Se aplica además para zonas donde las características del fondo sean tales que la probabilidad de que exista un rasgo artificial o natural que represente un peligro para la navegación sea baja.

Estándar Mínimo para Levantamientos Hidrográficos	
Características	Orden 1b
Descripción de áreas	<i>Áreas de profundidades menores de 100m donde la separación quilla-fondo no se considera de interés para los buques que se esperan transiten.</i>
Máximo THU permitido 95 % nivel de confianza	<i>5m+5 % de profundidad</i>
Máximo TVU permitido 95 % nivel de confianza	<i>a= 0.5m b= 0.013</i>
Búsqueda completa del fondo marino	<i>No requerido</i>
Máximo espaciamiento recomendado entre líneas principales	<i>3 x prof. promedio</i>

Orden 2

Este Orden es el menos estricto y se destina para aquellas zonas donde la profundidad es tal que una descripción general del fondo marino se considera adecuada. Debido a esto no se requiere un conocimiento completo del fondo marino.

Se recomienda que los levantamientos de Orden 2 estén limitados para zonas más profundas que 100m, ya que una vez que la profundidad supere los 100m, “la existencia de elementos artificiales o naturales que sean lo suficientemente grandes como para afectar a la navegación y que todavía permanezcan indetectados por un levantamiento de orden 2, se considera improbable.”¹⁶

¹⁶Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

Estándar Mínimo para Levantamientos Hidrográficos	
Características	Orden 2
Descripción de áreas	<i>Áreas más profundas a 100m donde se considera adecuada una descripción general del fondo marino.</i>
Máximo THU permitido 95 % nivel de confianza	<i>20m+10 % de profundidad</i>
Máximo TVU permitido 95 % nivel de confianza	<i>a= 1.0m b= 0.023</i>
Búsqueda completa del fondo marino	<i>No requerido</i>
Máximo espaciamiento recomendado entre líneas principales	<i>4 x prof. promedio</i>

3. CAPÍTULO 3 - Levantamientos Batimétricos

3.1. Generalidades

Los levantamientos batimétricos o hidrográficos, se realizan con la finalidad de obtener datos de interés de la topografía del fondo de un cuerpo de agua, para diversos estudios o funciones. Una de ellas es para permitir la navegación fluvial; es fundamental asegurar el despeje debajo de la quilla en los canales de acceso, áreas de maniobra o amarres y atracaderos, garantizando así una navegación segura.

Dichos levantamientos “se ocupan de la configuración del fondo y de las áreas terrestres adyacentes a los océanos, lagos, ríos, puertos y otras formaciones de agua en la Tierra. El levantamiento hidrográfico es definido simplemente como el levantamiento de un espacio acuático.”¹⁷

Otros motivos por los cuales se realizan levantamientos hidrográficos pueden ser: determinar la línea de costa, los peligros para la navegación existentes, la composición del fondo marino, mareas y corrientes, producción de mapas temáticos y cartas náuticas, definición de límites marinos, colocación de cables y tuberías, etc.

3.2. Especificación de levantamiento - orden especial OHI.

Según la Norma S-44 de la OHI, se definen cuatro órdenes de levantamiento; dicha clasificación varía con respecto a la profundidad del agua y el tipo de embarcación con la que se espera navegar, para realizar una navegación segura.

A continuación desarrollaremos las incertidumbres en las condiciones de un levantamiento de orden especial.

En el campo hidrográfico, el posicionamiento horizontal cumple el rol de enmarcar geográficamente el territorio costero.

Como se expuso en capítulos anteriores, la determinación horizontal se puede obtener

¹⁷Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

mediante técnicas ópticas o métodos de posicionamiento satelital.

Enfocándonos en los levantamientos de orden especial, la posición horizontal debe determinarse con una incertidumbre total horizontal (THU) de 2m con un nivel de confianza de un 95 % según la OHI.

Por otra parte, la determinación de la profundidad puede realizarse mediante Sistemas Acústicos o no Acústicos; en los levantamientos de orden especial, para el cálculo de la incertidumbre de las profundidades hay que combinar los errores cometidos en la determinación de la profundidad, por lo que la incertidumbre total vertical (TVU) con un 95 % de confianza que según la OHI se expresa de la siguiente manera:

$$\pm\sqrt{a^2 + (b.d)^2}$$

Siendo:

a - error constante de profundidad

b - coeficiente del error dependiente de la profundidad

d - profundidad promedio.

Para los levantamientos de orden especial, los parámetros a y b quedan definidos según la norma con un valor de

$$a= 0.25m \text{ y } b= 0.0075$$

Luego, conociendo la profundidad media de la zona a efectuar el relevamiento, se calcula la TVU admitida para el tipo de levantamiento hidrográfico escogido.

3.3. Planificación del levantamiento

Se considera que un levantamiento comienza antes de que se empiece a recoger datos, por lo que, la planificación engloba una serie de componentes que deben ser tomados en consideración antes de ejecutar el levantamiento. Estos componentes son de suma importancia para poder cumplir y realizar la tarea práctica en condiciones óptimas.

Algunos de los elementos que deben evaluarse son:

- objetivo del levantamiento (indicar densidad, cobertura y precisión);
- área y límites del levantamiento;
- características de la zona (profundidad, datos del medio, etc.)
- presupuesto;
- permisos necesarios para realizar el levantamiento;
- recursos humanos requeridos;
- plataforma a utilizar (bote, lancha, etc.);
- instrumental disponible (ecosonda, barra de chequeo, escandallo, instrumental GNSS, Estación total, etc.);
- metodología de trabajo (recolección de datos, procesamiento de datos, etc.);
- sistema de referencia a emplear;
- información de la zona disponible (trabajos anteriores, informes, cartas náuticas existentes, fotografías aéreas, información de mareas o cualquier dato adicional que pueda aportar o afectar al levantamiento).
- factores limitantes (existencia de elementos naturales o artificiales que alteren y/o incidan en la elección de la metodología a emplear en el relevamiento)
- requerimiento de datos y resolución;
- fecha estimada de entrega de los resultados;

Considerando esto, es necesario planificar y analizar cada aspecto del plan de levantamiento hidrográfico para eliminar la posibilidad de obstáculos existentes o limitantes, y así optimizar tiempos, costos y resultados en los levantamientos.

3.4. Recolección de datos

La recolección de los datos dependerá de varios factores como por ejemplo, los requerimientos del trabajo o investigación, la plataforma que se empleará para el levantamiento hidrográfico y el equipo e instrumental disponible.

También el tiempo específico para cada actividad en particular determinará la cantidad de datos que se debe computar.

Por otro lado, la recolección de los datos debe ser hecha de una manera metódica comenzando en un extremo del área y terminando en el otro, buscando de esta forma cubrir la totalidad de la superficie a explorar; el objetivo del levantamiento determinará la densidad, cobertura y precisión requerida de los datos. De igual forma, el tipo de levantamiento define la redundancia o solapamiento de los datos.

Por otra parte, la cantidad de datos a relevar surge de la relación costo/beneficio, si no genera un impacto en el costo, se puede recoger la mayor cantidad de datos posibles durante el levantamiento; a mayor cantidad de datos relevados mejor será la precisión de los resultados generados, siempre y cuando los datos se tomen con iguales precisiones.

“Se debe notar que la redundancia de los datos y la densidad no son la misma cosa. La densidad de los datos es el número de sondeos por unidad de área, mientras que la redundancia se refiere al solapamiento de los datos recolectados en un diferente momento en la misma posición.”¹⁸

Para asegurarse que las características u obstrucciones del fondo del cuerpo de agua sean localizadas en los levantamientos de mayor extensión, es necesario tener una mayor cobertura de la zona obteniendo así una mayor densidad de datos relevados.

Todos los factores anteriormente nombrados deben estar claros para los planificadores y ejecutores del levantamiento así como para los solicitantes del mismo, con el objetivo de asegurar la concordancia con los estándares establecidos por la OHI.

¹⁸Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

3.5. Procesamiento de datos

Lo fundamental en cuanto al procesamiento de los datos es la generación de datos válidos; se debe tener cuidado al manipular los datos crudos y asegurar que se han eliminado errores groseros, corregido los errores sistemáticos, y que se han realizado los ajustes o modificaciones necesarias.

Por otra parte, el procesamiento de datos esta relacionado con la recolección de datos, ya que cuanto mayor sea el volumen de datos relevados, más requerimientos informáticos se necesitan.

3.6. Análisis de datos

En cada observación se introducen errores dado que ningún instrumental está libre de éstos; a continuación se deja constancia de los errores, sus magnitudes y como es su tratamiento:

Errores groseros

Generalmente son de valores considerables (valores numéricos altos), dichos errores deben ser eliminados y en su defecto repetir su levantamiento.

Errores Sistemáticos

Dichos errores dependen de una ecuación matemática, lo que lleva a la posibilidad de que sean calculados y corregidos.

Errores aleatorios

Se encuentran en todas las observaciones, tienden a ser tanto positivos como negativos. La estimación de los errores aleatorios requiere de conocimiento de la técnica y desarrollo matemático, que permita determinar el impacto de cada uno de los factores de influencia, sobre la medida. La identificación de cada uno de éstos y su impacto, permite cuantificar la incertidumbre de los valores medidos.

Los resultados nunca son exactos y ningún método de ajuste dará una solución exacta

a las observaciones imprecisas, por esto se debe realizar el tratamiento previo de los errores, antes de comenzar con el manejo de los datos para los objetivos del trabajo.

4. CAPÍTULO 4 - Posicionamiento

4.1. Generalidades

La determinación de los parámetros mínimos necesarios para poder ubicar un punto y que quede referido a un Sistema de Referencia Local o Global en Tierra, es uno de los problemas fundamentales que se desarrollará en este Capítulo.

Cada uno de los métodos tienen dos cuestiones a definir, estas son como obtener las coordenadas planimétricas por un lado y las altimétricas por otro. Este Capítulo se enfocará en la determinación de las coordenadas planimétricas. La base metodológica para el posicionamiento horizontal en una batimetría, es realizar un relevamiento en forma de malla para lograr una distribución homogénea que permita una correcta interpolación entre los puntos a la hora de generar un modelo matemático de la superficie.

Para esto es necesario definir puntos conocidos en tierra, que serán usados como base, para las campañas de relevamiento ya sea como referencias de levantamientos futuros como para realizar controles. Estas pueden servir aparte para correlacionarlas con el Sistema de Referencia a utilizar.

Existen distintos tipos de técnicas e instrumentos para determinar la posición de un punto, todo va a depender de la finalidad del trabajo, tolerancias establecidas, costos, etc.

En este proyecto se desarrollarán técnicas ópticas, y por posicionamiento GNSS, sin desconocer que existen otras técnicas que no serán desarrolladas en esta instancia.

4.2. Técnicas ópticas

Son técnicas que se utilizan desde hace tiempo. Van desde instrumentos que miden únicamente ángulos y distancias, hasta la utilización de la Estación Total, donde se pueden obtener coordenadas planimétricas (X,Y) automáticamente.

Las desventajas que pueden presentar respecto a técnicas GNSS, es el tiempo de ope-

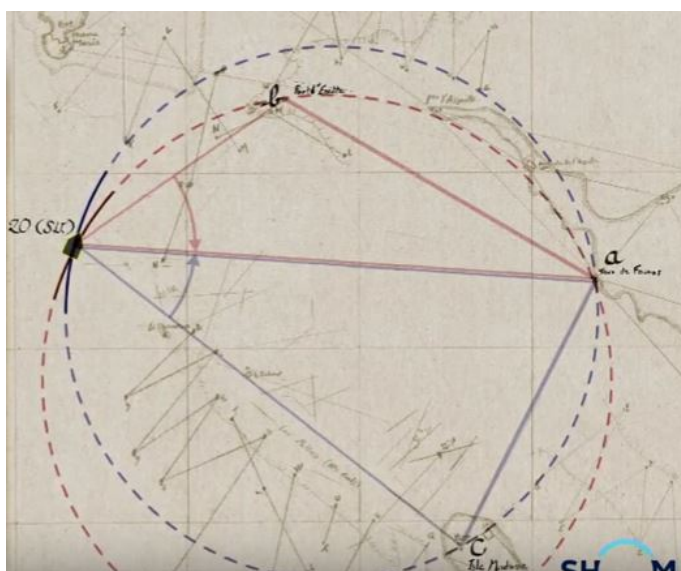
ración, la cantidad de personal para realizar el trabajo y la necesaria visualización de puntos conocidos en tierra para poder vincular el relevamiento a un Sistema de Referencia dado.

4.2.1. Método sextante

Es uno de los métodos más antiguos, en desuso actualmente, a no ser que simplemente se quiera hacer una rápida aproximación. Este instrumento se utiliza para medir ángulos desde la superficie del barco.

Se puede utilizar si conocemos y podemos ver tres puntos de referencia en la costa y conocemos sus coordenadas.

Es necesario medir los dos ángulos que forman nuestro punto con los tres puntos de referencia, obteniéndose las coordenadas de nuestro punto por intersección inversa.¹⁹



En esta imagen se puede apreciar los dos ángulos formados entre la ubicación que se encuentra la embarcación y los tres puntos ubicados en tierra.

¹⁹ESTEBAN, V. AGUILAR J. SERRA J. MEDINA J. Levantamientos y seguimientos Topo-Batimétricos en Ingeniería de costas, Universidad Politécnica de Valencia

4.2.2. Método de Bisección o Intersección directa

Es un método donde se necesitan dos teodolitos.

La toma de datos en cada perfil se realiza desde dos puntos (Base B1, Base B2) con coordenadas conocidas, y por ende distancia (d) conocida.

De esta manera se miden los ángulos (b_1, b_2) que forman con los dos puntos conocidos y la embarcación, quedando esta posicionada.

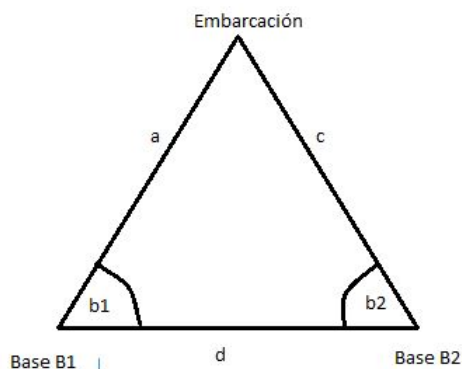


Figura 2: Método de bisección.

4.2.3. Método de bisección con distancias o Trilateración

Es muy similar al método anterior en su procedimiento de observación y cálculo. La diferencia está en la utilización de instrumentos de medidas de distancias. Consiste en medir las distancias (a, d, c) de los tres lados que forman el triángulo en la Figura 2.

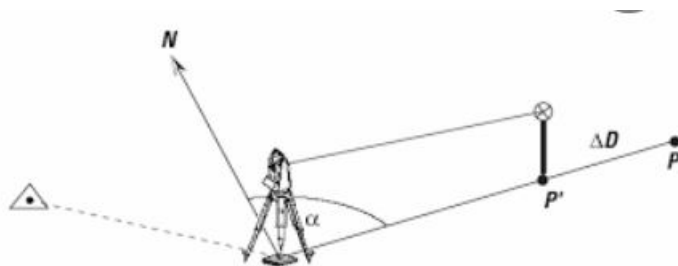
Luego mediante fórmulas trigonométricas se determina la posición de la embarcación.

4.2.4. Método de polares con Estación Total

Este método se basa en la utilización de una estación total, donde se orienta a una referencia determinada y luego se marca el ángulo determinado para la línea que se va a querer relevar.

Los ángulos y distancias se toman respecto a un prisma colocado en la embarcación. Teniendo ambos datos para una posición dada, mediante sistema de polares se calcula

la posición planimétrica (X,Y).²⁰



4.3. Métodos de observación y posicionamiento GNSS

Este es el método de posicionamiento más utilizado en la actualidad, por su facilidad a la hora de trabajar con él, por las suficientes precisiones que garantiza para los trabajos utilizados y por sus prestaciones a la hora de la vinculación automática con equipos de sondeo. Por otra parte, como ventajas se destacan la velocidad de operación y la reducción de recursos humanos a la hora de levantar datos.

El hecho de no requerir la visualización de puntos de referencia ubicados en tierra para la vinculación del trabajo a un sistema de referencia, es un factor muy importante para la elección de esta metodología.

Existen diferentes métodos de posicionamiento GNSS, estos van a depender del contexto en donde nos encontremos y los requerimientos solicitados a la hora del trabajo.

Como anteriormente se expresó, según la OHI para la generación de cartas náuticas la tolerancia horizontal (THU), está en el entorno de los 2m; lo que permite en esos casos utilizar equipos con posicionamiento de no muy alta precisión. Pero también tenemos la posibilidad de realizar levantamientos con precisiones centimétricas si las condiciones del trabajo así lo requieren. Estas hoy en día se pueden realizar en tiempo real sin tener un costo adicional más que la disponibilidad de un equipo con las especificaciones adecuadas.

A continuación, detallaremos los siguientes métodos de observación y posicionamiento

²⁰ESTEBAN, V. AGUILAR J. SERRA J. MEDINA J. Levantamientos y seguimientos Topo-Batimétricos en Ingeniería de costas, Universidad Politécnica de Valencia

GNSS que entendemos ser los de más utilidad a la hora de un levantamiento batimétrico:

- Absoluto: consta de un solo receptor recibiendo la señal de los satélites. Se obtiene la posición del receptor (ΔX , ΔY , ΔZ) a través de medidas de pseudodistancias, (obtenidas mediante código o fase), en un sistema geocéntrico.
- Diferencial: El método se basa en calcular diferencia de vectores. Se necesitan dos receptores A y B, el receptor A con coordenadas conocidas. Las coordenadas del receptor B se obtendrán de realizar la diferencia de los vectores **satélite-receptorA** y **satélite-receptorB**, dando como resultado el vector **receptorA-receptorB**. Este cálculo se puede realizar a post proceso en gabinete (Método PPK Cinemático) o en tiempo real (Método RTK- Real Time Kinematic) mediante protocolo NTRIP, correcciones satelitales o mediante conexión de radio entre ambos receptores.

5. CAPÍTULO 5 - Determinación de la profundidad

5.1. Generalidades

En el presente Capítulo se estudiarán los diferentes métodos para determinar la coordenada altimétrica de un punto sobre el fondo de un curso de agua.

Puntos que, como ya se ha desarrollado son inaccesibles, por lo que dicha coordenada no puede determinarse utilizando los diferentes métodos de nivelación propios de la topografía clásica.

La coordenada altimétrica de un punto de estas características, queda determinada por la distancia vertical entre el pelo de agua y el fondo del curso de agua. Esta distancia se denomina profundidad, objetivo fundamental a desarrollar en este Capítulo.

Para la determinación de la profundidad se requiere conocer el medio en el cual se va a trabajar (temperatura, salinidad, etc), la acústica submarina, los dispositivos disponibles en el mercado para la medición de la profundidad, los sensores complementarios para determinar la posición o medir los movimientos de la embarcación, y los procedimientos apropiados para alcanzar y cumplir con los estándares recomendados internacionalmente para la precisión y cobertura.

Igual que para la determinación de la posición planimétrica, dependiendo de los objetivos del trabajo, tolerancias establecidas y costos, van a existir diferentes sistemas para determinar la profundidad.

Los diferentes sistemas se clasifican en: acústicos y no acústicos.

A continuación se desarrollarán cada una de ellas, dándole un enfoque más detallado a las sondas acústicas, principalmente las de tecnología con sonar de simple haz.

5.2. Sistemas no acústicos

5.2.1. Mecánicos

Estos sistemas son de mano, puede ser una mira graduada para utilizar en condiciones de poca profundidad y una zona de trabajo no muy extensa, midiendo desde la superficie con un nivel, o con un prisma utilizando Estación Total.

Otra opción sería el escandallo, éste básicamente trata de una cuerda graduada (sondaleza), en donde en su extremo inferior se le amarra una plomada de forma tronco-cónica que permite hacer llegar hasta el fondo y mantener prácticamente vertical la cuerda graduada, allí se toma la medida que marca la cuerda contra el pelo de agua, obteniéndose la profundidad.

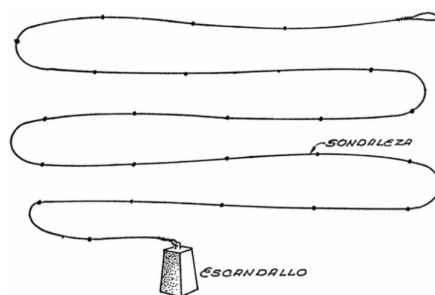


Figura 3: Escandallo con forma troncocónica.

Se recomienda para zonas no muy extensas. Es importante comprobar que no existen grandes corrientes, ya que eso podría provocar que la cuerda pierda su verticalidad y generar un error en la determinación de la profundidad que no sería detectable.

Hoy en día el escandallo es usado principalmente para estudios previos de la zona, también en la toma de puntos de control necesarios para chequear posibles errores en el levantamiento con otros instrumentales.

La medición directa de la profundidad debe ser hecha con la embarcación detenida, nunca en movimiento, y si es posible evitar toda corriente u onda generada por nuestra embarcación o por otras que pasen por la zona.

5.2.2. Láser aerotransportados

Este equipo está compuesto por un sistema de barrido LÁSER LIDAR, un sistema de posicionamiento GNSS, una unidad interna de control de movimiento IMU. Todo esto colocado sobre una aeronave.

Es un sistema que se basa principalmente en emitir pulsos láser en dos frecuencias (azul-verde e infrarroja) transmitido desde el sistema al cuerpo de agua.

A medida que sobrevuela la zona, el sistema graba las señales de llegada del pulso de luz reflejadas por el fondo del cuerpo de agua. La diferencia de tiempo medido entre los dos retornos es convertida en distancia.

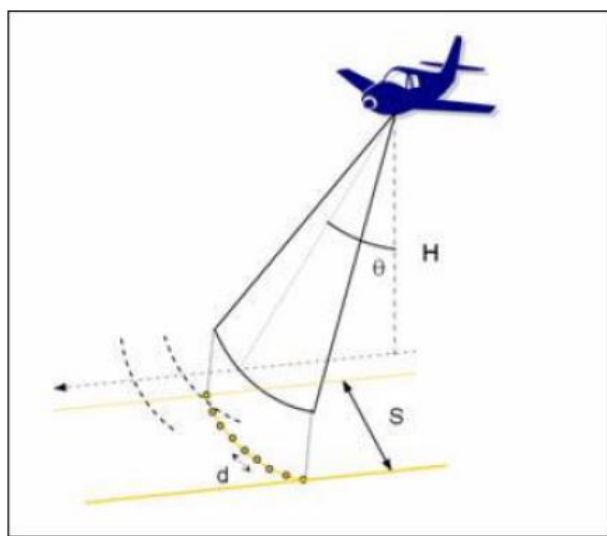


Figura 4: Geometría de mediciones LIDAR. *Fuente: Normas de la OHI.*

La ventaja de este sistema es la gran cobertura y velocidad del levantamiento. Las desventajas son el alto costo y además es un sistema muy sensible al material que se encuentra en suspensión en el cuerpo de agua. Para obtener buenos resultados, las profundidades no pueden ser superiores a los 70m. ²¹

5.2.3. Sistemas Electromagnéticos Aerotransportados

Este método está basado en los levantamientos geofísicos, donde el fin es medir la conductividad eléctrica del medio subacuático.

²¹Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

Un transmisor magnético es colocado en un avión o helicóptero donde produce un campo magnético, detectando de esta manera un segundo campo magnético inducido en la superficie, que será registrado por un receptor. Actualmente este sistema es para fines exploratorios únicamente.

5.2.4. Fotobatimetría

Este método estima la profundidad mediante una fotografía aérea y la altimetría satelital.

Los procesadores de imagen satelital pueden estimar profundidades a partir de la intensidad de luz de las imágenes. Este método se usa principalmente en la etapa de planificación de trabajos.²²

5.2.5. Sistemas Satelitales

Este sistema consta de satélites equipados con altímetros de alta resolución, donde con imágenes propias de los satélites aplicando en cierta parte fotobatimetría y con un apropiado procesamiento de los datos se puede graficar la superficie marina y estimar profundidades.²³

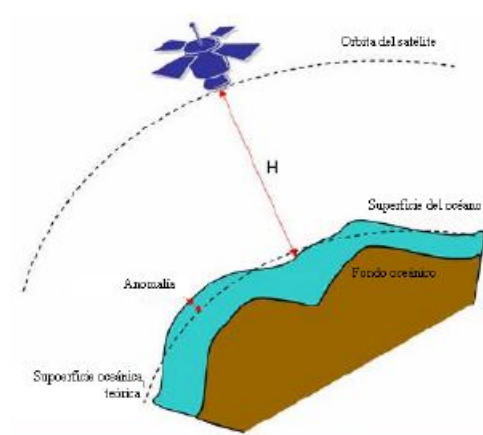


Figura 5: Batimetría Satelital *Fuente: Normas de la OHI.*

²²Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

²³Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

5.3. Sistemas Acústicos

5.3.1. Generalidades

Para hacer un estudio de los sistemas acústicos intervinientes en las mediciones hidrográficas, es necesario primero tener el conocimiento del medio, de las propiedades físicas del agua y de la propagación de las ondas acústicas.

Los sistemas acústicos se realizan a partir de un SONAR que es una sigla en inglés (Sound Navegation and Range), que traducida al idioma español sería navegación y distancia por sonido.

En general, estos dispositivos se dividen de acuerdo a su construcción en sonares activos, sistemas que emiten y a la vez detectan ondas sonoras y los sonares pasivos, que únicamente pueden detectar perturbaciones sonoras.

Este proyecto se enfocará en los sonares activos. Estos se basan en una señal acústica generada por una fuente que tiene un determinado nivel de energía (SL).

Esta señal viaja hasta el fondo del cuerpo de agua donde va perdiendo energía debido a la pérdida de transmisión (TL); una vez que la señal llega al fondo se refleja, y una parte de esta señal (TS) llega a la fuente.

En el trayecto que recorre hasta llegar a la fuente se pierde transmisión (TL) nuevamente. A esto hay que sumarle otros factores que inciden, como lo es el nivel de ruido (NL), el umbral de detección (DT), índice de directividad (DI).

Con todos estos factores, obtenemos la ecuación del sonar:

$$“SL \geq 2TL + DI + NL + DT - TS”^{24}$$

Visto esto, para poder detectar una señal acústica se debe de cumplir la ecuación anterior.

“La ecuación del sonar es usada para estudiar y expresar la capacidad de detección y el desempeño de las ecosondas como una función de las condiciones de operación”.
Urick, 1975.

²⁴Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

Conocimientos del medio.

Para realizar una correcta batimetría empleando sistemas acústicos es necesario conocer las características del medio en el cual vamos a trabajar; así sea en agua dulce o salada.

Para eso debemos estudiar las propiedades físicas que esta presenta, las cuales serán la temperatura, presión, densidad, salinidad.

En lugares poco profundos es posible medir con mayor exactitud estos factores determinando así la distancia que recorre el sonido con buena precisión; en zonas donde la profundidad es alta, surgen errores a considerar.

Velocidad del sonido

Existen diferentes instrumentos que permiten determinar la velocidad del sonido en función de las características anteriormente nombradas, estos son:

- Perfilador de la velocidad del sonido: Este instrumento por un lado cuenta con un sensor de presión para registrar profundidades.

Por otro lado cuenta con un transductor y un reflector a una distancia d ; para medir la velocidad del sonido c , que se calcula como $c = 2d/\Delta t$. Donde Δt es el doble del tiempo que demora la señal en viajar del transductor y el reflector.

Los datos de profundidad y velocidad del sonido luego son comparados para así poder confirmar la similitud entre ambos y evitar errores en la determinación de la velocidad.²⁵

- CTD (conductividad, temperatura y profundidad): Es un instrumento electrónico que posee sensores para registrar datos de conductividad, temperatura y salinidad. Con estos es posible calcular la velocidad del sonido mediante ecuaciones empíricas.²⁶

²⁵Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

²⁶Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

Propagación del sonido en el agua: refracción y reflexión

“La refracción es el proceso en el cual la dirección de propagación de la onda es alterada debido a un cambio en la velocidad del sonido dentro del medio de propagación, o a medida que la energía pasa a través de una interfase, representando una discontinuidad de velocidad del sonido entre dos medios.

Considerando dos medios diferentes A y B, con velocidades c_1 y c_2 respectivamente, aplicando la Ley de Snell:

- Si $c_1 > c_2$, el ángulo de refracción θ_2 será menor que el ángulo de incidencia θ_1 , por lo que la dirección de propagación de la onda cambia.
- $c_1 < c_2$, el ángulo de refracción θ_2 será mayor que el ángulo de incidencia θ_1 , por lo que la dirección de propagación de la onda cambia.”²⁷

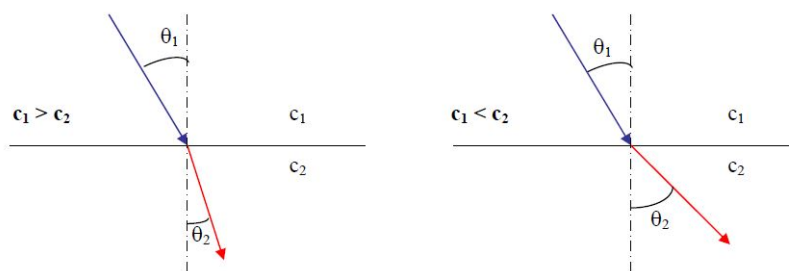


Figura 6: Principio de Refracción. *Fuente: Normas de la OHI.*

Si el ángulo de incidencia es normal, no ocurre refracción.

Parámetros acústicos: frecuencia

“La frecuencia de las ecosondas es el parámetro que determina el alcance y penetración del sonido en los sedimentos ubicados en el fondo del agua.”²⁸

A más alta frecuencia, menor será el alcance y penetración en el fondo; por ende la frecuencia y el alcance son inversamente proporcionales.

²⁷Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos 5ta Edición, Febrero 2005

²⁸Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

Las frecuencias comúnmente utilizadas por las ecosondas batimétricas según la OHI son:

1. Profundidades menores a 100m, frecuencias mayores a 200 kHz.
2. Profundidades menores a 1500m, frecuencias entre 50 y 200 kHz.
3. Profundidades mayores a 1500m, frecuencias entre 12 y 50 kHz.

Sensores de movimiento

Una embarcación está sometida a tres posibles rotaciones en los tres ejes ortogonales definidos para ésta. El sistema de coordenadas queda definido como el sistema de la mano derecha, donde el eje x apunta la proa, el eje y apunta al estribor y el eje z apuntando hacia abajo.

Según la OHI, una vez fijo el sistema de referencia, el rolido corresponde a la rotación del eje x, el cabeceo corresponde a la rotación del eje y, y el rumbo corresponde a la rotación del eje z.

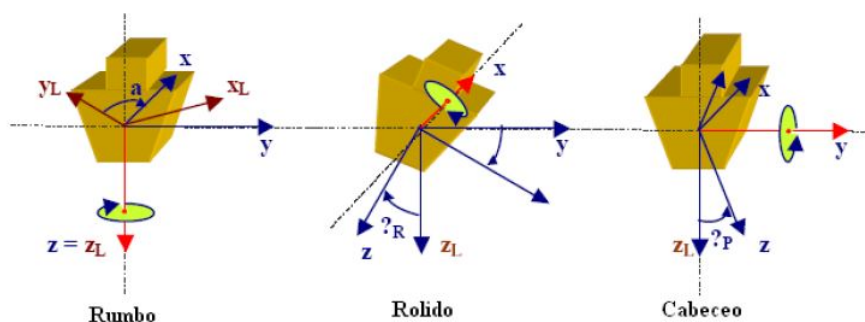


Figura 7: Comportamiento de la embarcación. *Fuente: Normas de la OHI.*

También, la embarcación presenta el efecto causado por la acción del cuerpo de agua y del oleaje, denominado bandeo. Éste movimiento es medido con sensores internos o compensadores de bandeo.

Según la OHI, desde la década de los 90' los sensores de movimiento han sido utilizados para los levantamientos batimétricos, considerados ahora un requisito esencial al

momento de recolectar datos de manera automática ya sea con ecosondas multi haz o de haz simple. La finalidad de dichos sensores es compensar el movimiento de la embarcación -rolido, cabeceo y rumbo- provocado por vientos, corrientes, oleaje, etc. La precisión del rolo, cabeceo y rumbo, debe ser tan alta como sea posible.

5.3.2. Transductor y su instalación

Transductores

Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada -en este caso eléctrica-, en otra diferente de salida -en este caso mecánica-. Los transductores son uno de los componentes de las ecosondas; determinan algunas características de las mismas, como pueden ser el ancho del haz y la cobertura, motivo por el cual es necesario abordar su estudio. “Los transductores son los equipos utilizados para la transmisión y recepción de los pulsos acústicos.”²⁹

El ancho de haz de una ecosonda, está relacionado con las dimensiones del transductor y con la frecuencia de los pulsos; la medición de la profundidad será efectuada en cualquier dirección dentro del cono definido por el ancho del haz y donde el pulso de sonido encuentre el fondo del cuerpo de agua primero.

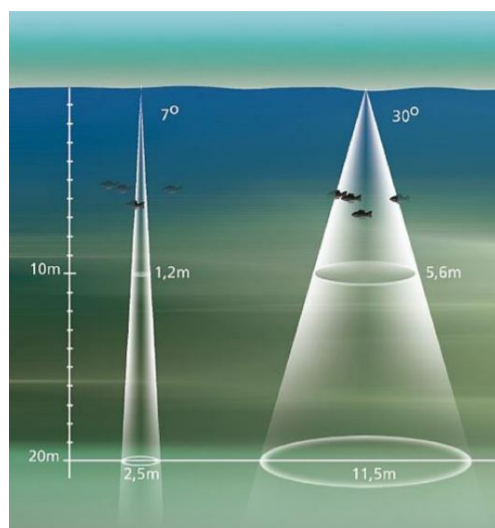


Figura 8: Cobertura del haz en función del ancho del mismo. *Fuente: Presentación SOHMA*

²⁹Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

Por otra parte, la cobertura del fondo marino es el área dentro del haz, por lo que depende también del transductor.

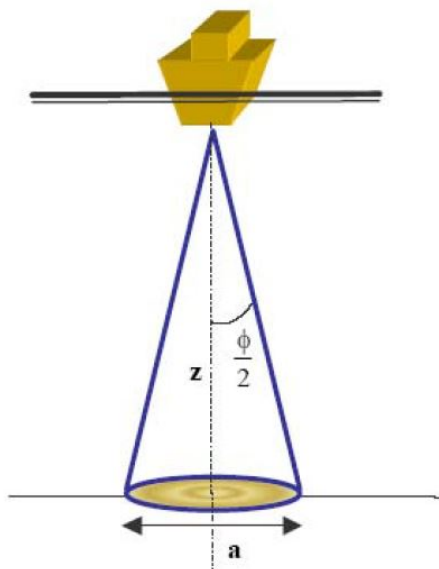


Figura 9: Cobertura de haz simple. *Fuente: Normas de la OHI.*

Instalación del Transductor

El transductor debe ser ubicado de forma tal que quede lejos de las fuentes de ruido de la nave, a una profundidad que permita evitar el ruido generado en la superficie y además permanezca constantemente sumergido; cumplido esto el transductor debe estar asegurado y orientado verticalmente y, puede ser fijado bajo el casco o montado en el lado o sobre la proa. Otra consideración importante, es que el compensador del balanceo y la antena de posicionamiento, deben estar situados en el mismo eje vertical del transductor.

5.3.3. Calibración del instrumental

La calibración de la ecosonda consiste en ajustar el equipo para asegurar la medición correcta de las profundidades, con la finalidad de fijar el parámetro de la velocidad del sonido. La calibración puede ser hecha con lo que se denomina una barra de chequeo.

Barra de chequeo: Consiste en bajar una barra bajo el transductor en varias profun-

didades forzando a que la ecosonda grave la profundidad correcta ajustando así los parámetros de la velocidad del sonido. También se pueden grabar los datos y aplicar correcciones correspondientes en post-proceso.

5.3.4. Ecosonda Multihaz

La ecosonda multihaz es un instrumento que puede llevar a cabo el levantamiento de una zona del fondo del mar, con alta precisión horizontal y vertical.

Este sistema trata de la emisión de varios haces angostos de sonido en diferentes direcciones, ordenados en forma de abanico que barren transversalmente en el sentido que avanza la embarcación a una determinada frecuencia, cubriendo así una mayor zona y posibilitando la corrección de errores mediante la interpolación de los resultados obtenidos.

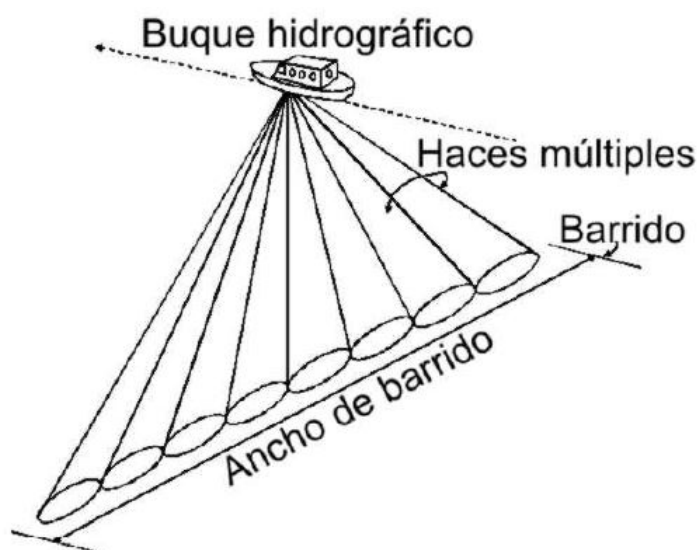


Figura 10: Ancho de barrido ecosonda multihaz. Fuente: Normas de la OHI.

Además la distribución de estos haces permite el levantamiento de una franja de puntos normal a la dirección de avance de la embarcación.

La dimensión de esta franja se puede definir en función del ángulo que abarca o de la longitud que barre. Esta longitud depende del ángulo de barrido, de la profundidad y del alcance máximo.

Haciendo una síntesis la ecosonda multihaz puede asimilarse a una serie de ecosondas de simple haz, introduciendo el concepto de dirección del haz comentado anteriormente.

Como se puede observar, este sistema da un nivel de operatividad más elevado que el de simple haz, lo que se traduce en un precio más elevado de este equipo comparado al de haz único. Por estos motivos, los equipos se utilizan para trabajos de escalas grandes y de altas profundidades, ya que el costo de los mismos se compensan con el tiempo de operación.

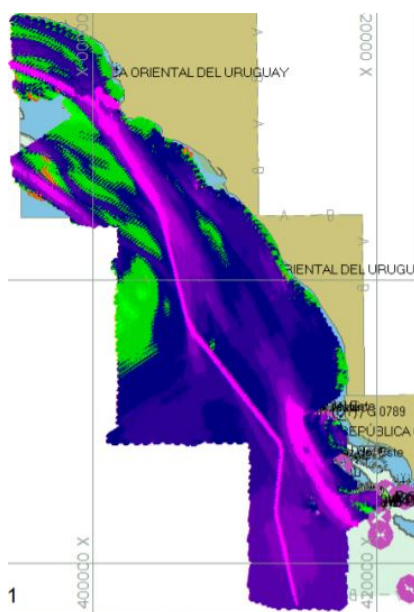


Figura 11: Levantamiento efectuado con ecosonda multihaz. *Fuente: Presentación SOHMA*

5.3.5. Ecosonda de haz simple

Estas ecosondas son equipos para la determinación de la profundidad al medir el intervalo de tiempo entre la emisión de un pulso de onda longitudinal sonora y el retorno de su eco desde el fondo marino.

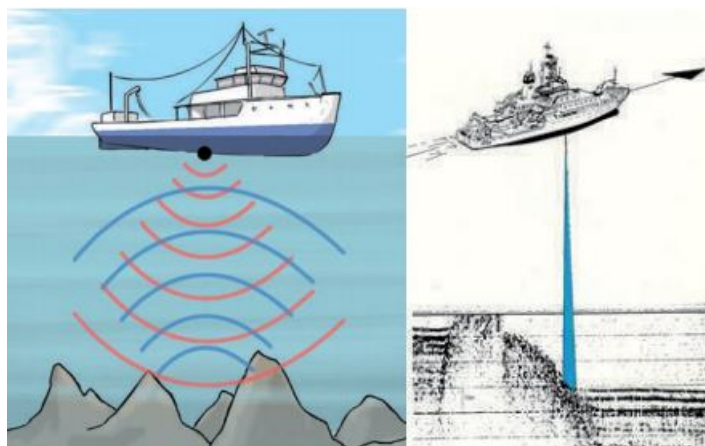


Figura 12: Imagen representativa del ecosonda monohaz. *Fuente: Normas de la OHI.*

El principal propósito de la ecosonda es producir una resolución constante y alta de la vertical respecto al perfil del fondo marino en el trazado del eco. La ecosonda funciona mediante un transductor que convierte un pulso de energía eléctrica en un pulso de energía acústica. Ésta es proyectada en el agua en forma de un haz orientado verticalmente donde se proyecta en la columna de agua hasta llegar al fondo. La interacción con el fondo resulta en una reflexión, transmisión y reflexión.

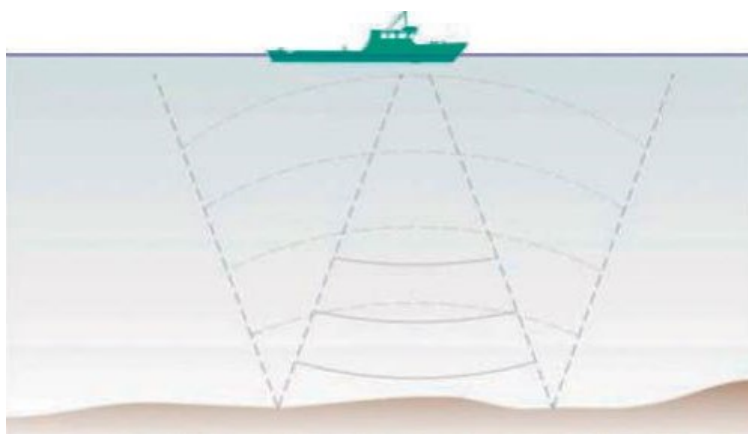


Figura 13: Onda acústica reflejada desde el fondo marino. *Fuente: Normas de la OHI.*

La energía que es reflejada regresa al transductor, en donde éste, la vuelve a transformar ahora en eléctrica. El dato de interés aquí es el tiempo en que el pulso llegó al fondo y regreso al transductor.

El resultado observable es el intervalo de tiempo entre la transmisión y la recepción del eco, t , siendo la profundidad medida dada por:

$$z_m = \frac{1}{2} \cdot t \cdot \bar{c}$$

donde c es la media de la velocidad del sonido en el medio. Se divide entre dos ya que t es el tiempo de ida y vuelta.

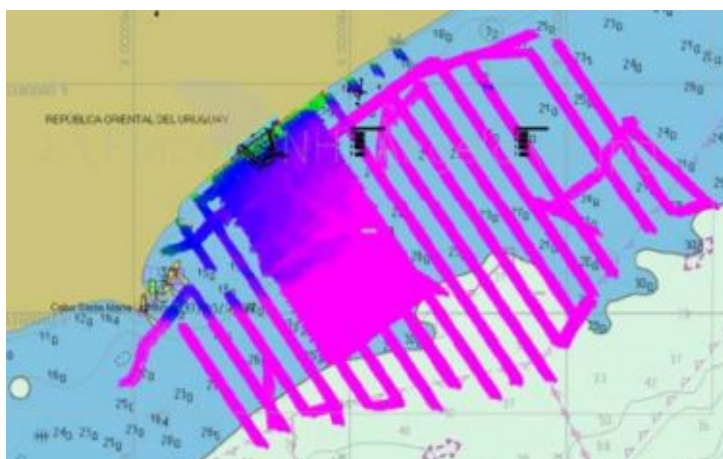


Figura 14: Levantamiento efectuado con ecosonda simple haz y multi haz. *Fuente: Presentación SOHMA*

El valor medio de la velocidad del sonido en agua dulce es de 1435m/s y de 1500m/s (valor estándar) para agua de mar. La salinidad, la presión y sobretodo la temperatura son las variables que intervienen para conseguir el valor real de la velocidad.

Cabe decir que este valor se puede modificar luego en el procesamiento de los datos (pos-proceso), si se obtienen datos de la velocidad del medio con un perfilador de velocidad de sonido.

“Las ecosondas de simple haz alcanzan una precisión sub-decimétrica en aguas poco profundas”.³⁰

³⁰Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

5.3.6. Ecosonda de Doble frecuencia

Las ecosondas de doble frecuencia fueron diseñadas originalmente para poder detectar y diferenciar sedimentos no consolidados del fondo real del cuerpo de agua y para una navegación más precisa en cuerpos de agua con poca profundidad.

Dichos sedimentos, son detectados generalmente por ecosondas de alta frecuencia; en levantamientos poco profundos es aconsejable utilizar dos frecuencias en simultáneo.

6. CAPÍTULO 6 - Levantamiento con ecosonda simple haz y posicionamiento GNSS

6.1. Generalidades

La finalidad de este Capítulo es exponer de forma general, la técnica de levantamiento batimétrico empleando instrumentos GNSS y una ecosonda de simple haz. Como se desarrolló en capítulos anteriores, existen diferentes metodologías de levantamiento; una de ellas es utilizando datos de posición con el instrumento GNSS y profundidad con la ecosonda, y otro utilizando datos de posición planimétrica con el instrumento GNSS, alturas con nivel de marea y profundidad con la ecosonda.

En lo que compete a la forma de recorrer la zona para el levantamiento de puntos o recaudos a tener en cuenta, son para ambas metodologías iguales; a lo largo del Capítulo serán desarrollados.

6.2. Fundamento teórico del levantamiento

Como se mencionó en capítulos anteriores, el principio de la ecosonda de haz simple consiste en la determinación de la profundidad transmitiendo pulsos de energía acústica y calculando el intervalo de tiempo entre la emisión y el retorno del mismo.

El principio de GNSS para estos levantamientos como ya se desarrolló es poder conocer la posición planimétrica de un punto, y también poder inferir su posición Z si es necesario.

La magnitud de distancia medida por los instrumentos se ve reflejada en las siguientes láminas de cada Modelo de determinación de profundidades.

6.2.1. Modelo de determinación de profundidades, utilizando modelo geoidal y altura GNSS

Este modelo se basa en la determinación de las posiciones tridimensionales del fondo del cuerpo de agua, utilizando la altura medida con el GNSS, referida en este caso a

un Modelo Geoidal, y el valor de profundidad obtenida por la ecosonda.

Se considera conveniente utilizar RTK para el levantamiento, dado que se podrá acceder a buenas precisiones en tiempo real.

La utilización de un Modelo Geoidal, responde al hecho de que para los levantamientos batimétricos hay que referir las alturas a un plano de referencia hidrométrico. El presente Proyecto estará referido al Cero Wharton, ya que la regla que se encuentra en el puerto donde se realizó el trabajo se encuentra en el mismo sistema. Dado esto se considera necesario que la altura que se obtenga con el GNSS sea física.

El uso del Modelo Geoidal es más crítico al aplicarlo en levantamientos de grandes extensiones, pero para áreas pequeñas si se utilizan alturas referidas al elipsoide, las diferencias del valor N de ondulación Geoidal para cada punto va a ser ínfima, entonces relativamente los puntos tomados van a tener coherencia en las alturas. Esta afirmación proviene de experiencias transmitidas y mencionadas en el curso de Geodesia 3 y por intercambios con profesionales. No se profundizará en el tema debido a que no es el objetivo del trabajo.

La idea de esta metodología es hacer un levantamiento de posiciones tridimensionales del pelo de agua con el GNSS, y la profundidad existente del pelo de agua al fondo medida con la ecosonda. Ambos datos tienen que tomarse de manera sincronizada.

La gran ventaja de este modelo de levantamiento es que el error por oleaje sería compensado, lo que no sucede con la metodología de levantamiento utilizando la altura de marea. Esto se debe a que al situarnos sobre la cresta de una ola, la altura registrada por el GNSS y el valor de la profundidad registrada por la ecosonda se incrementan en igual magnitud, entonces al restar ambos valores según la ecuación mostrada en la Lámina 1, se compensan y anulan así el efecto de la ola (bandeo). Otros errores que se compensan de igual manera son el error de asentamiento y calado de la embarcación.

Para poder referir las alturas del levantamiento al sistema local solo basta con medir con el GNSS uno o más puntos con cota conocida en el Sistema Local, donde se puede hallar la diferencia de alturas entre ambos, y mediante una traslación queda referido al sistema local.

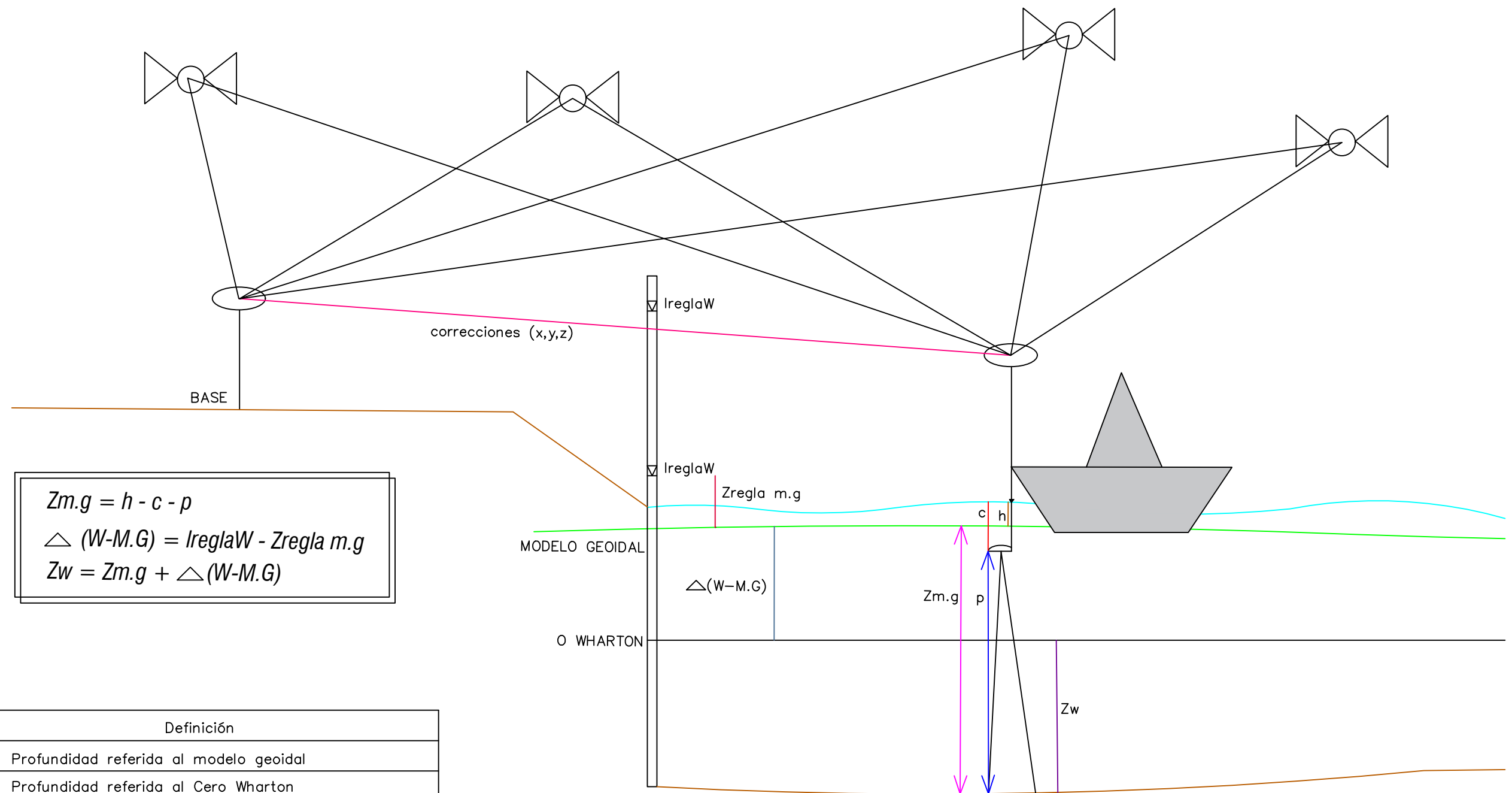
Un control que se recomienda hacer para comprobar que los datos estén en el sistema hidrométrico del puerto, es chequear que la altura de la marea tenga un valor similar a las alturas del pelo de agua que se obtienen en el mismo período de tiempo. Al menos al inicio del levantamiento, a la mitad y al final del mismo.

Por lo general para la altura de marea se observa la regla que se encuentra en el puerto.

Los cuidados a considerar para estos levantamientos es medir y chequear todos los *desfasajes* que se van a inferir, ya sea el de altura de la antena GNSS y el calado del transductor, entre otros.

MODELO DE DETERMINACIÓN DE PROFUNDIDADES:

UTILIZANDO MODELO GEOIDAL Y ALTURAS DE GNSS



$$Z_{m.g} = h - c - p$$

$$\Delta (W-M.G) = l_{reglaW} - Z_{regla m.g}$$

$$Z_w = Z_{m.g} + \Delta (W-M.G)$$

Color	Sigla	Definición
	Z _{m.g}	Profundidad referida al modelo geoidal
	Z _w	Profundidad referida al Cero Wharton
	h	Altura GNSS referida al modelo geoidal
	p	Distancia transducer-fondo del cuerpo de agua
	c	Calado del transducer
	l _{reglaW}	Lectura de regla referida al Cero Wharton.
	Z _{regla m.g}	Lectura de regla referida al modelo geoidal.
	Δ(W-M.G)	Diferencia entre (0 wharton - Modelo Geoidal).

PROYECTO DE GRADO: Estudio de la técnica de batimetría, errores asociados a la metodología e instrumental empleados y generación de un modelo digital del fondo de un cuerpo de agua.
 - Micaela Gracia Maldonado - Franco Santos Curbelo -

PROYECTO DE GRADO	
	UdelaR - Facultad de Ingeniería - Instituto de Agrimensura
	DEPARTAMENTO <i>Montevideo</i>
	FECHA <i>OCTUBRE 2021</i>
	ESCALA <i>Sin escala</i>
Micaela Gracia Maldonado, Franco Santos Curbelo	

6.2.2. Modelo de determinación de profundidades, utilizando alturas de marea

Es el método de levantamiento de datos a partir de alturas de nivel de marea.

Se basa en tener un registro de las alturas de marea, respecto al plano de referencia hidrométrico a utilizar, donde se vinculan las alturas de marea a los datos de profundidad que se obtiene de la ecosonda y la posición planimétrica que del instrumento GNSS, en un tiempo dado.

Las ventajas de este método es que no es necesario hacer una vinculación a un modelo geoidal ni tomar las precauciones necesarias cuando se miden alturas con GNSS.

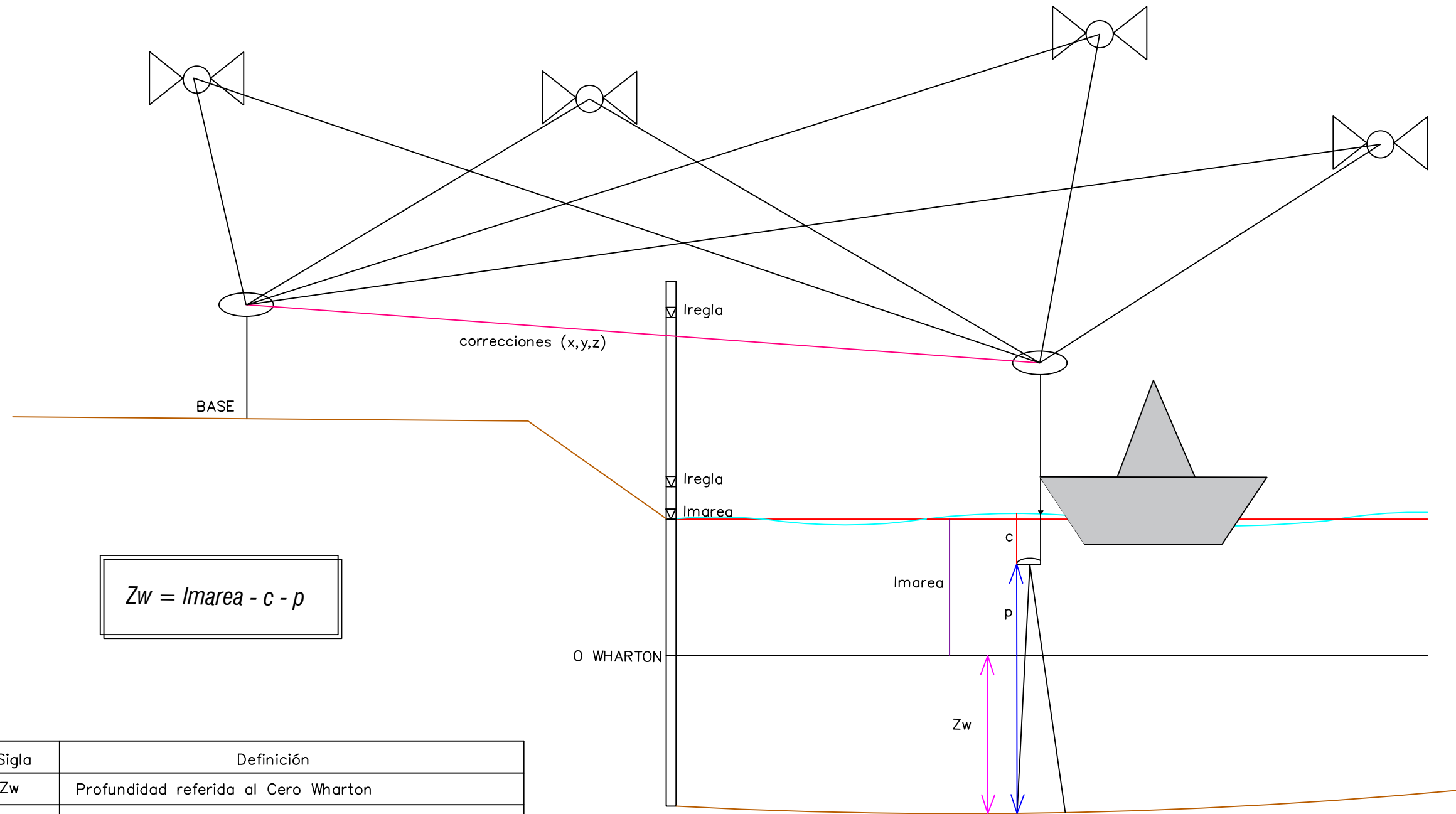
Los datos de altura de marea son alturas físicas que están vinculadas al sistema de trabajo y no necesitan ninguna traslación.

Las desventajas que se pueden encontrar son que se definen para cada altura de marea un plano colimador al que se le resta la profundidad que se obtiene de la ecosonda para encontrar la posición Z del fondo del curso de agua. Aquí van a incidir algunos errores, como el del oleaje o el asentamiento de la embarcación.

De igual forma, como para todo trabajo cada modelo va a ser más o menos preciso dependiendo del objetivo que se solicite. Por ejemplo, para la generación de cartas náuticas para una segura navegabilidad este método es eficiente, mientras que para otro tipo de relevamiento deberán ser estudiados los cuidados y las precisiones requeridas.

MODELO DE DETERMINACIÓN DE PROFUNDIDADES:

UTILIZANDO ALTURAS DE MAREAS



$$Z_w = I_{\text{marea}} - c - p$$

Color	Sigla	Definición
—	Zw	Profundidad referida al Cero Wharton
—	p	Distancia transducer-fondo del cuerpo de agua
—	c	Calado del transducer
<input checked="" type="checkbox"/>	IreglaW	Lectura de regla referida al Cero Wharton.
<input checked="" type="checkbox"/>	ImareaW	Altura de marea referida al Cero Wharton

PROYECTO DE GRADO: Estudio de la técnica de batimetría, errores asociados a la metodología e instrumental empleados y generación de un modelo digital del fondo de un cuerpo de agua.

- Micaela Gracia Maldonado - Franco Santos Curbelo -

PROYECTO DE GRADO	
	UdelaR - Facultad de Ingeniería - Instituto de Agrimensura
	DEPARTAMENTO <i>Montevideo</i>
	FECHA <i>OCTUBRE 2021</i>
	ESCALA <i>Sin escala</i>
Micaela Gracia Maldonado, Franco Santos Curbelo	

6.3. Líneas de Levantamiento para ambos modelos

Una embarcación con ecosonda de haz simple cubrirá la zona de levantamiento mediante pasadas lineales.

Como se puede apreciar en la imagen el levantamiento tiene la forma de malla, donde se establece la distancia de separación entre líneas paralelas.

Esto se hace para tener puntos de control donde se tienen posiciones tomadas en diferentes periodos de tiempo ya que a lo largo del levantamiento al estar infiriendo una posición como ha sido desarrollado, se entiende que se pueden producir errores por cambio de condiciones del medio, del instrumental, algún error de desfase, que con estas pasadas se podrían encontrar y poder corregir llegado al caso.

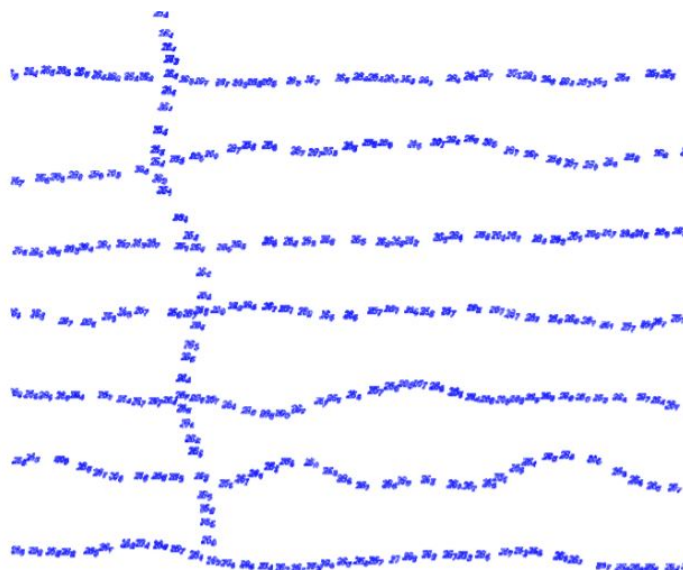


Figura 15: Simulación de líneas de levantamiento. Fuente: Presentación SOHMA.

6.4. Desventajas del levantamiento con ecosonda simple haz

Al referirnos a un levantamiento topográfico de la superficie del terreno cubierto por agua, es no poder ver la superficie a relevar, por lo que puede surgir la dificultad de caracterizar accidentes naturales o artificiales en el modelo de terreno. Por este motivo la OHI recomienda que junto al levantamiento con ecosonda simple haz también se haga un escaneo con un sonar de barrido lateral, de manera de poder identificar dichos

accidentes.

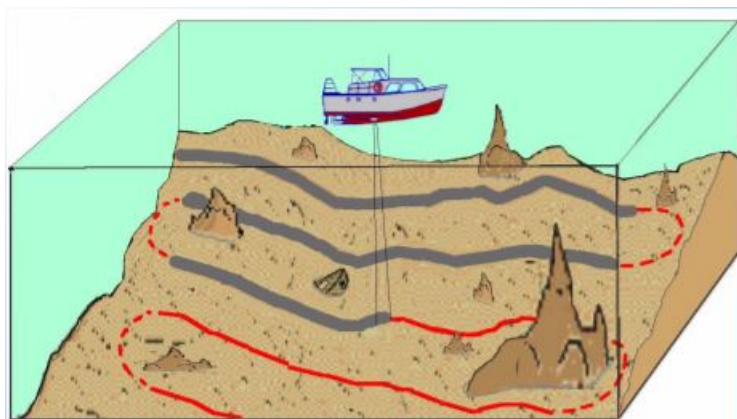


Figura 16: Representación de accidentes naturales y artificiales. *Fuente: Presentación SOHMA.*

7. CAPÍTULO 7 - Análisis de errores

7.1. Generalidades

En el presente Capítulo se desarrollarán los errores asociados a la metodología e instrumental utilizado y su incidencia en los resultados finales, debido a errores enumerados en apartados anteriores.

Desde el punto de vista instrumental, se considerará el posicionamiento mediante el uso del instrumental GNSS y determinación de la profundidad mediante sistema acústico, empleando un sonar de simple haz.

Los errores en la determinación de la profundidad, se dividen en errores por equivocación o groseros, sistemáticos y aleatorios.

Los errores por equivocación son debidos a un error del instrumental (por ejemplo, falla de funcionamiento en un momento determinado) o un error humano, estos errores no pueden ser corregidos por lo cual son eliminados.

Los errores sistemáticos son errores que mantienen un patrón constante, éstos pueden ser fáciles de identificar y corregir, o remover en todo caso.

Luego de estudiar y definir los errores sistemáticos y groseros pasamos a los aleatorios, los cuales son ocasionados por factores que quedan fuera del control del observador - obedecen las leyes de la probabilidad - éstos no serán eliminados, sino que se quedarán y serán tratados utilizando técnicas estadísticas de control de calidad de los mismos.

Se utilizó como guía tanto para el análisis de errores como para las fórmulas empleadas en la siguiente sección, el Capítulo 3 del Manual de Hidrografía de la OHI.

7.2. Posicionamiento horizontal

El error final en las coordenadas (X,Y), se verá influenciado por el posicionamiento planimétrico y por la inclinación de la embarcación.

1. Error debido al posicionamiento planimétrico

Éste error es generado en el posicionamiento con instrumental GNSS, dependiendo del estilo de levantamiento empleado.

$$\sigma_{GNSS}$$

2. Error debido al rolido y cabeceo

Éstos errores surgen cuando por la presencia de oleaje, acción del cuerpo de agua o por el viento, la embarcación presenta cierta inclinación o movimiento, provocando que la antena GNSS se incline y no mida la posición de manera vertical, sino de manera inclinada.

$$\sigma_x = z_m \cdot \text{sen} \left(\theta_R - \frac{\phi}{2} \right)$$

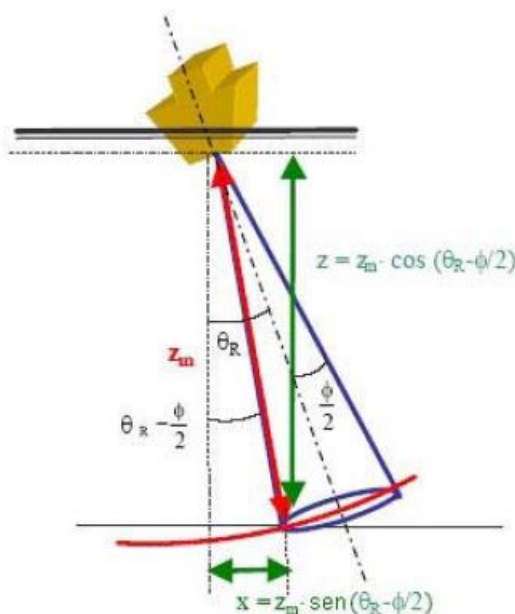


Figura 17: Efecto del ancho del haz y de la inclinación de la embarcación en el posicionamiento. *Fuente: Normas de la OHI.*

Por otro lado, ambos movimientos afectan en la medición de la planimetría de igual forma y de igual magnitud, pero se tratan de errores diferentes.

$$\sigma_{mov} = \sqrt{2} z_m \cdot \cos\left(\theta_R - \frac{\emptyset}{2}\right)$$

Error total en la determinación de la posición horizontal

En función de los errores enumerados en esta sección, podemos calcular la varianza del error en la determinación de las coordenadas (X,Y), que será la suma cuadrática de los siguientes errores:

$$\sigma_{X,Y}^2 = \sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{mov}^2$$

$$\sigma_{X,Y} = \sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{mov}^2}$$

7.3. Posicionamiento vertical

Consta decir que el error final en la coordenada Z, va a tener de influencia factores como, la ecosonda, el instrumental GNSS, tipo de embarcación y el medio.

A continuación se identifican varias fuentes que contribuyen al error en la determinación de la profundidad.

1. Error debido a la inclinación del fondo:

Este error surge de la pendiente que puede presentar el fondo de un curso de agua, donde produce que el haz no incida en forma vertical, generando una distancia inclinada.

$$\text{Si } \zeta < \frac{\emptyset}{2}, \quad \text{entonces } z = z_m \cdot \cos(\zeta)$$

$$\sigma_{incl} = \frac{dz}{d\zeta} = -z_m \cdot \text{sen}(\zeta)$$

$$\text{Si } \zeta > \frac{\phi}{2}, \text{ entonces } z = z_m \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

$$\sigma_{incl} = \frac{dz}{d\phi} = -\frac{z_m}{2} \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

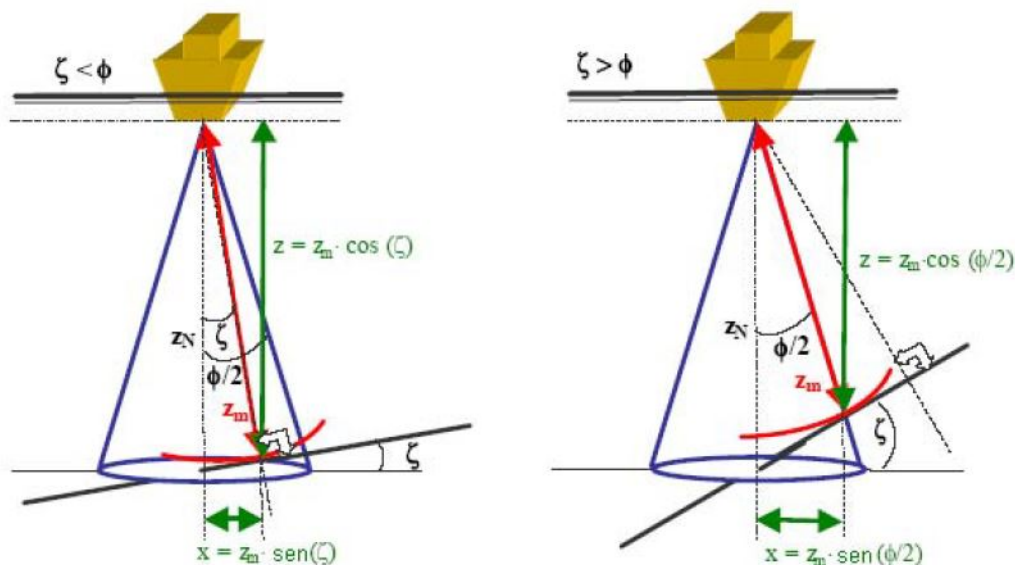


Figura 18: Efecto del ancho del haz y de la inclinación del fondo marino en la medición de la profundidad. *Fuente: Normas de la OHI.*

2. Error debido a la velocidad del sonido:

Este error es debido a las variaciones que presenta el medio en donde se propaga la onda de sonido. La velocidad del sonido en un medio de propagación varía con la temperatura, presión y salinidad, de este medio.

El error en la medición de la velocidad del sonido se podrá determinar mediante puntos de control tomados con una barra de chequeo. Y podrá ser cuantificado dependiendo de la cantidad que se hayan levantado.

$$z = \frac{1}{2} \cdot t \cdot c$$

$$\sigma_{vel} = \frac{dz}{dc} = \frac{1}{2} \cdot t \cdot \sigma_c$$

3. Error debido al rolo y cabeceo :

Como se expresó anteriormente, éstos errores surgen del movimiento de la embarcación, provocado por la acción del cuerpo de agua y el efecto del oleaje.

El rolo y el cabeceo contribuyen al error en la medición de la profundidad cuando la magnitud de aquellos ángulos es mayor a la mitad del ancho del haz.

$$z = z_m \cdot \cos\left(\theta_R - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$\sigma_{mov} = \frac{dz}{d\theta_R} = -z_m \cdot \sin\left(\theta_R - \frac{\phi}{2}\right)$$

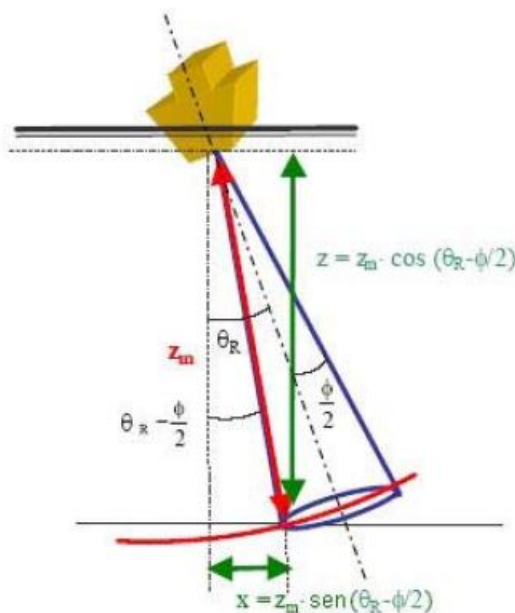


Figura 19: Efecto del ancho del haz y de la inclinación de la embarcación en la medición de la profundidad. *Fuente: Normas de la OHI.*

4. Error debido al bandeo:

Cuando no se dispone de un sensor o compensador de bandeo, estos errores se pueden compensar manualmente mediante una suavización del trazado del recorrido de la eco, trazando una línea entre medio de las crestas y valles. Este

error no va a ser considerado para el Modelo de determinación de profundidades, utilizando modelo geoidal y altura GNSS por lo mencionado en sección 6.2.1.

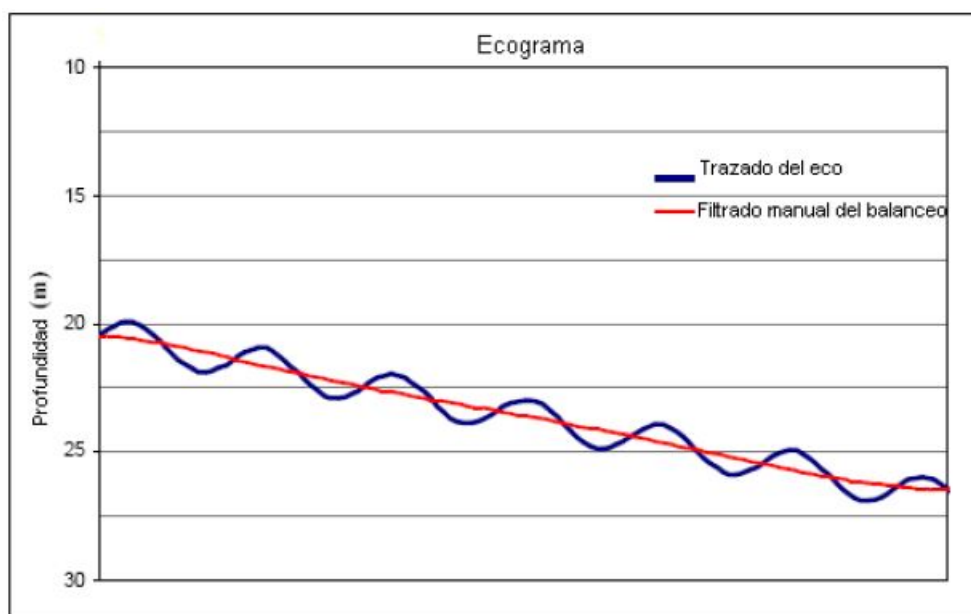


Figura 20: Filtrado manual de bandeo. *Fuente: Normas de la OHI.*

5. Error de Calado:

El calado consiste en la profundidad del transductor, para grabar la profundidad con referencia al nivel del agua instantáneo.

Tener la medida exacta del calado es fundamental para la determinación de la profundidad, ésta a su vez tiene que ser medida más de un vez en el relevamiento, debido a que puede haber alguna variación ya sea por la carga que el barco tenga, pérdida de combustible, etc.

6. Error de asiento:

“El asiento es la rebaja en el nivel de una nave en movimiento, relativa a su nivel en estado de inmovilidad. Este efecto, particularmente notable en aguas pocas profundas, es debido a la depresión regional de la superficie del agua en la que se mueve la nave.”³¹

³¹Normas de la OHI para los levantamientos Hidrográficos, Febrero 2005, 5ta Edición

Se deduce que éste error es sistemático, por lo que deberá ser corregido. Este error no va a ser considerado para el Modelo de determinación de profundidades, utilizando modelo geoidal y altura GNSS por lo mencionado en sección 6.2.1.

7. Error de interpretación:

Éste error es de interpretación del personal que procesa los datos, consiste en distinguir ecos falsos, que se pueden deber a cambios bruscos en el medio, algún objeto como algas, peces, etc.

Cabe destacar que la habilidad o pericia de los técnicos actuantes, es determinante para distinguir estos errores.

Estos errores son groseros, por lo que tienen que ser identificados y eliminados.

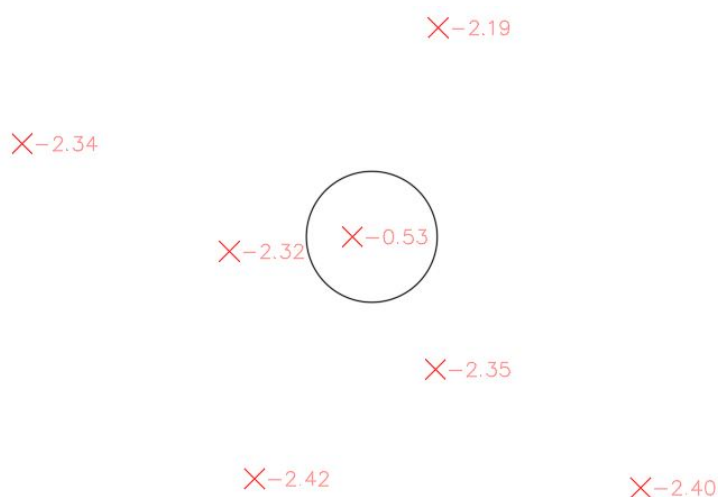


Figura 21: Ejemplo eco falso.

La Figura 21, ilustra un claro ejemplo de un eco falso, donde el valor -0.53 no coincide con la profundidad característica de la zona y donde difiere 1.79m de altura con un punto ubicado a una distancia de 0.50cm aprox.

8. Error por sedimentos no consolidados:

Son detectados normalmente por ecosondas de alta frecuencia, que tienen la particularidad de mayor penetración de la superficie. En aguas poco profundas, es

recomendable utilizar ecosondas de doble frecuencia, para luego en el procesado de los datos, identificar si la profundidad que relevo la ecosonda es del lecho marino o de un sedimento no consolidado. Estos errores no pueden ser corregidos, se los trata como un error grosero y deberán ser eliminados del levantamiento.

También estas ecosondas de doble frecuencia sirven para diferenciar lechos suaves de rocosos.

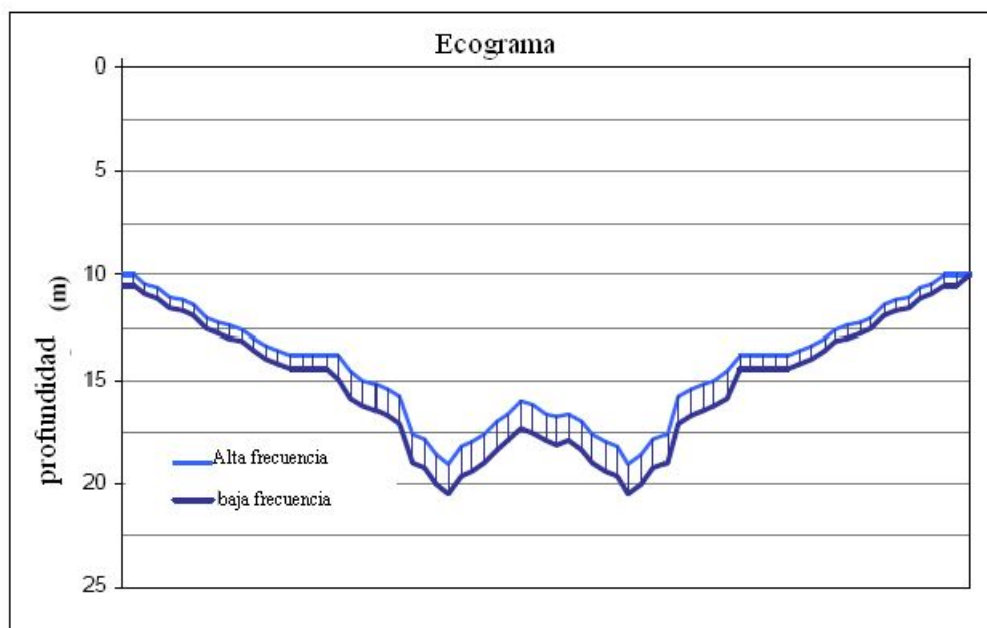


Figura 22: Ecograma de ecosonda de doble frecuencia. *Fuente: Normas de la OHI.*

9. Error en la medición de la marea:

Es un error muy importante ya que define la referencia de las profundidades medidas para ciertos métodos de levantamientos, detallados en Capítulo 6.

Éste es un factor a considerar en aguas poco profundas, aunque consta decir que el error no depende de la profundidad.

El error en la determinación de la altura de la marea se conforma por la estimación en el instrumento de medida utilizado y la corrección de co-marea.

La corrección de co-marea es el error más importante, ya que se constituye por los errores aleatorios intervinientes en el proceso para tener una lectura de marea

verdadera.

“The allowable contribution of the error for tides and water levels to the total survey error budget falls between 0.10 m and 0.45 m (at the 95 percent confidence level) depending on the complexity of the tides”.(La contribución de error de mareas y nivel del agua en el presupuesto total de errores para el relevamiento van entre los 0.10 metros y los 0.45 metros (para un 95 por ciento de confianza) dependiendo de la complejidad de las mareas).³²

A continuación se desarrolla la medida de varianza de la marea, considerando esta y la co-marea mencionada.

$$\sigma_{marea} = \sigma_{lectura\ marea} + \sigma_{co-marea}$$

Este error no va a ser considerado para el Modelo de determinación de profundidades, utilizando modelo geoidal y altura GNSS por lo mencionado en sección 6.2.1.

10. Error de latencia

Latencia, es la diferencia de tiempo entre la medición de la profundidad efectuada por la ecosonda y la medición del posicionamiento realizada mediante GNSS.

11. Error de posicionamiento vertical GNSS

Este error es en la determinación de la posición Z del pelo de agua para el Modelo de determinación de profundidades utilizando modelo geoidal y alturas GNSS.

El mismo puede ser mayor o menor, dependiendo la metodología de posicionamiento y instrumental GNSS a utilizar.

$$\sigma_{Z-GNSS}$$

³²Hydrographic Surveys, Specifications and Deliverables - U.S. Department of Commerce - National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service.

Error total en la determinación de la posición vertical

De acuerdo a los errores enumerados en esta sección, podemos hacer una estimación de la varianza de error en la determinación de la coordenada Z, que será la suma cuadrática de los siguientes errores:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{incl}^2 + \sigma_{vel}^2 + \sigma_{Z-GNSS}^2 + \sigma_{mov}^2 + \sigma_{marea}^2 + \sigma_{calado}^2 + \sigma_{aciento}^2 + \sigma_{latencia}^2$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{incl}^2 + \sigma_{vel}^2 + \sigma_{Z-GNSS}^2 + \sigma_{mov}^2 + \sigma_{marea}^2 + \sigma_{calado}^2 + \sigma_{aciento}^2 + \sigma_{latencia}^2}$$

8. CAPÍTULO 8 - Levantamiento batimétrico en el Puerto del Buceo

8.1. Generalidades

El Yacht Club Uruguayo es un club náutico ubicado en Puerto del Buceo, Montevideo, Uruguay. El Club fue fundado en 1906 con el fin de fomentar prácticas marinas; actualmente cuenta con aproximadamente 300 embarcaciones en amarras.



Figura 23: Logo institucional Yacht Club Uruguayo.

La zona destinada a realizar el levantamiento hidrográfico es un sector de aproximadamente 20hás ubicado en el Río de la Plata, al sureste de Montevideo.



Figura 24: Zona destinada al levantamiento hidrográfico.

8.2. Objetivos del relevamiento

El objetivo principal del trabajo es obtener, a partir de un levantamiento batimétrico, un Modelo Digital de Elevaciones y generar una carta náutica con sus características específicas.

8.3. Instrumental utilizado y recursos disponibles

Posicionamiento satelital

Especificaciones instrumental GNSS, según manual:

- Marca: Trimble
- Modelo: R8s
- Precisión RTK: 8mm Horizontal / 15mm Vertical
- Antena: Integrada
- Posicionamiento: Diferencial, RTK/protocolo NTRIP
- Almacenamiento: Memoria interna de 56MB
- Rastrea rango completo de sistemas satelitales: GPS, GLONASS.



Figura 25: Instrumental GNSS-Trimble R8s.

Ecosonda

Especificaciones equipo Ecosonda, según manual:

- Marca: SonarMite
- Modelo: DFX.
- Ancho del haz: 8° - 20°
- Doble frecuencia: 200kHz - 28kHz
- Rango: 0.3cm - 200m
- Exactitud de profundidad: 1cm / 0.1% de la profundidad
- Formato de salida: ASCII, NMEA
- Compatibilidad: todos los GNSS

Los datos utilizados fueron extraídos del Manual proporcionado por Ing. Mauro Romani, importador de equipos hidrográficos para Latinoamérica, en Seafloor Systems, Inc.



Figura 26: Ecosonda y batería empleados.

Transductor

Con forma de gota de agua.



Figura 27: Transductor utilizado.

Controladora

- Marca: Trimble
- Modelo: ZUMA
- Dimensiones: 25cmx18cm



Figura 28: Controladora utilizada.

Escandallo

El escandallo cuenta en una punta con una pesa de metal amarrado a una cuerda, y en esta última atada una cinta métrica y cada 1m una marca con cinta pato para facilitar la lectura de la misma.



Figura 29: Escandallo.

Embarcación

Tanto la embarcación utilizada como el timonel, fueron proporcionados por la institución Yatch Club Uruguay.

- Nombre: Centenario
- Dimensiones: 4.40mx2.60m
- Calado: 40cm



Figura 30: Embarcación utilizada para el levantamiento.

8.4. Datos antecedentes

Se accedió a una carta náutica de una batimetría realizada por el SOHMA -Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada-, en Diciembre 2020, a escala 1:1000 (ver Anexo).

Dicha carta, fue efectuada luego de que el Yatch Club realizara un dragado en la zona de las marinas.

8.5. Planificación

En particular, se puede notar zonas diferenciadas con características propias, importantes a tener en cuenta para realizar correctamente el levantamiento y análisis estipulado.

Existe un sector con corriente (boca o entrada al puerto), una zona con marinas (donde hay presencia de lodo debido a reciente dragado) y zonas donde el fondo es de roca o arena.



Figura 31: Zonas diferenciadas según su fondo.

En estas zonas se medirán puntos de control distribuidos uniformemente.

La profundidad en estos puntos será determinada mediante dos métodos diferentes de levantamiento, para luego realizar los análisis de datos correspondientes; se utilizará un escandallo y una ecosonda de simple haz. Por otra parte, se resaltarán las características de la zona (tipo de material en el fondo, existencia de corrientes o vientos, etc.)

PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA

Figura 32: Planilla de apoyo para el levantamiento

Los datos a completar en la planilla son el número de punto, observaciones, hora del levantamiento, altura de la marea, temperatura, profundidad medida con el escandallo, profundidad medida con la ecosonda.

Con respecto al procedimiento del levantamiento, se efectuará mediante una malla de puntos tomados sobre líneas de navegación.

Para determinar el espaciamiento de las líneas se utilizó como guía las especificaciones de Orden Especial de la OHI, donde se aclara que el máximo espaciamiento recomendado entre líneas principales no se define ya que se requiere un conocimiento completo del fondo marino.

Dado que ya existe un conocimiento completo de la zona (por existencia de antecedentes gráficos recientes, por ser dentro de un Puerto, por personal experimentado, etc.), se procedió a definir mediante consulta al Ing. Agrim. Alfredo Marusich con experiencia en estos levantamientos, el mejor espaciamiento entre líneas de navegación, el cual fue de 20m.

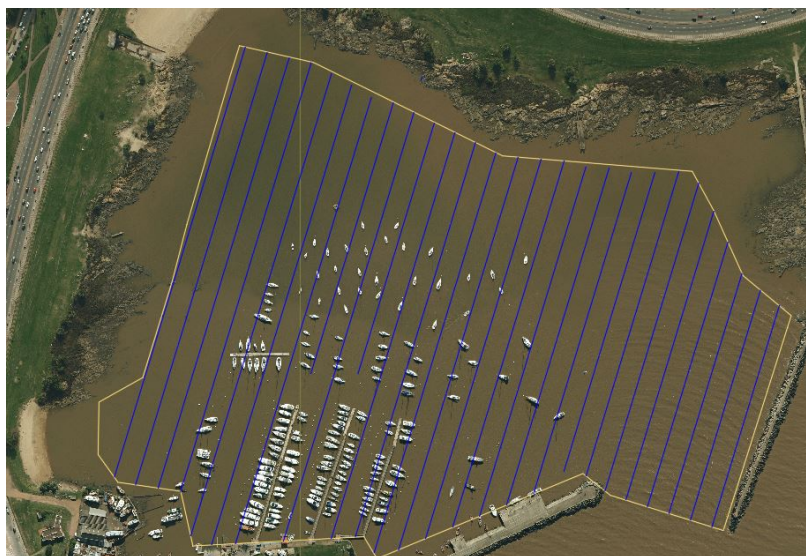


Figura 33: Líneas de navegación planificadas

Luego de finalizado el levantamiento, se procederá a “coser”, navegando y relevando en sentido transversal al que se navegó inicialmente, con el fin de poder controlar que los puntos relevados no presentan errores groseros, y en caso de que los presenten, eliminar dichos puntos.

Para el levantamiento batimétrico se utilizó la base ubicada en el Cerro de Montevideo (UYMO).

8.6. Pre-Análisis

Por lo desarrollado en Capítulo 7, existen una serie de errores que afectan en la medida de un punto cuando se realizan levantamientos batimétricos. A continuación, se desarrollarán los errores a considerar y la magnitud de los mismos, aplicados al caso concreto del levantamiento batimétrico dentro del Puerto del Buceo.

Antes de comenzar a analizar todos los errores intervinientes, hay que establecer un espacio, contexto y finalidad del levantamiento hidrográfico al cual se va a abocar el análisis.

En cuanto al espacio, englobará un relevamiento de una zona conocida, que se encuentra geográficamente resguardada y al amparo de muelles lo que genera poco oleaje; con respecto al contexto, es una superficie ya relevada anteriormente y por último, en cuanto al fin del mismo, será la generación de un modelo digital de elevaciones.

Considerando que se obtendrán errores en el eje X, eje Y y eje Z, (que además que se pueden considerar de manera independiente), este pre-análisis estará enfocado en desarrollar y encontrar los errores en la determinación del posicionamiento (X,Y) independientemente de los errores en la determinación de la profundidad Z.

8.6.1. Análisis posicionamiento horizontal

1. Error debido al posicionamiento planimétrico

Considerando los contenidos teóricos abordados en el curso de Geodesia 3 (primer semestre 2020) y a datos empíricos recabados durante el presente trabajo, consideramos que el error generado mediante mediciones de posicionamiento satelital utilizando posicionamiento diferencial en modalidad RTK - Protocolo NTRIP y la base emitiendo a una corta distancia, dan como resultado precisiones del orden centimétrico.

$$\sigma_{GNSS} = 0.02 \text{ m} \sim 2 \text{ cm}$$

Vale destacar que ésta metodología de trabajo es utilizada principalmente para levantamientos batimétricos en zonas próximas a la costa, por lo que se ajusta a nuestro caso de estudio.

En cuanto al nivel de tolerancia horizontal, lo va a definir el profesional a cargo del levantamiento dependiendo donde se desarrollara el trabajo y el nivel de detalle que le soliciten; a modo de ejemplo, para este trabajo al ser una zona delimitada físicamente por marinas y muelles, se deberá tener un nivel de precisión planimétrico mayor al que se requiere en un relevamiento a mar abierto.

2. Error debido al rolo y cabeceo

Siendo dicho error:

$$\sigma_{mov} = \sqrt{2} z_m \cdot \text{sen} \left(\theta_R - \frac{\phi}{2} \right)$$

Para el cálculo de éste error, se consultó al Ing. Agrim. Alfredo Marusich, para que proporcionara una aproximación del ángulo máximo de inclinación que podía tener una embarcación, con las características de la zona. Dada su experiencia, afirmó que el ángulo máximo posible era de 5° .

Sustituyendo obtenemos:

$$\sigma_{mov} = \sqrt{2} * 3 * \text{sen} \left(5^\circ - \frac{8^\circ}{2} \right)$$

$$\sigma_{mov} = 0,074 \text{ m}$$

8.6.2. Error total en la determinación de la posición horizontal

La suma cuadrática de los errores será:

$$\begin{aligned}\sigma_{X,Y}^2 &= \sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{mov}^2 \\ \sigma_{X,Y} &= \sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{mov}^2} \\ \sigma_{X,Y} &= 0.076m\end{aligned}$$

Por lo que, el error en la determinación horizontal de un punto para este trabajo no superara los 8 cm.

8.6.3. Análisis posicionamiento vertical

- Error debido a la inclinación del fondo

Siendo dicho error:

$$(1) \sigma_{incl} = -\frac{zm}{2} \cdot \sin\left(\frac{\emptyset}{2}\right) \quad \text{ó} \quad (2) \sigma_{incl} = -zm \cdot \text{sen}(\zeta)$$

dependiendo de la inclinación del fondo del cuerpo de agua.

Al analizar, mediante planos antecedentes la pendiente máxima existente en el fondo del cuerpo de agua del Puerto del Buceo, se concluye que el valor máximo es de 2%, y dado el ancho del haz es de 8° corresponde al caso de la ecuación (1):

$$\sigma_{incl} = -3 \cdot \text{sen}(1.15^\circ)$$

Por lo que:

$$\sigma_{incl} = 0.06m$$

- Error debido a la velocidad del sonido

Siendo dicho error:

$$\sigma_{vel} = \frac{dz}{dc} = \frac{1}{2} \cdot t \cdot \sigma_c$$

Según SOHMA, una de las fórmulas empíricas utilizadas para calcular la velocidad del sonido en el agua es la de Mackenzie:

$$c(D, S, T) = 1448.96 + 4.591T - 5.304 * 10^{-2}T^2 + 2.374 * 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 * 10^{-2}D + 1.675 * 10^{-7}D^2 - 1.025 * 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 * 10^{-13}TD^3$$

Siendo,

T: temperatura en celsius

S: Salinidad en partes por mil (ppm)

D: Profundidad en metros

Según Artículo de Raúl A. Guerrero, “Oceanografía Física Río de la Plata”, podemos estimar que la temperatura del cuerpo de agua en cuestión varía entre los 19°C y 21°C; realizando lo mismo para la salinidad donde varía entre 15ppm y 20ppm. Por último la profundidad máxima en el Puerto del Buceo se conoce que es de 3m.

Sustituyendo los valores más elevados de temperatura y salinidad en la ecuación de MacKenzie, con el fin de obtener el mayor error que se puede obtener, nos encontramos con que:

$$c_{Mac} = 1504.49 \text{ m/s}$$

Por otra parte:

$$\sigma_c = \frac{\partial c}{\partial(D, S, T)} = \frac{\partial c}{\partial D} + \frac{\partial c}{\partial S} + \frac{\partial c}{\partial T}$$

Calculando las derivadas por separado, obtenemos:

$$\frac{\partial c}{\partial D} = 1.63 * 10^{-2} + 2D1.675 * 10^{-7} - 3D^27.139 * 10^{-13}T$$

$$\frac{\partial c}{\partial S} = 1.340 - 1.025 * 10^{-2}T$$

$$\frac{\partial c}{\partial T} = 4.591 - 2T(5.304 * 10^{-2}) + 3T^2 2.374 * 10^{-4} - 1,02510^{-2}(S - 35) - 1.139 * 10^{-13} D^3$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores, se obtiene que:

$$\frac{\partial c}{\partial D} = 0.016 \text{ m/s}$$

$$\frac{\partial c}{\partial S} = 1.135 \text{ m/s}$$

$$\frac{\partial c}{\partial T} = 2.800 \text{ m/s}$$

Por lo que:

$$\partial c = 3.951 \text{ m/s}$$

Utilizando el resultado obtenido en la ecuación de MacKenzie y la ecuación de velocidad se obtiene:

$$t = \frac{D}{c_{Mac}} = 0.002 \text{ s}$$

Por lo que, sustituyendo los valores obtenidos:

$$\sigma_{vel} = \frac{1}{2} * 0.002s * 3.951 \text{ m/s}$$

$$\sigma_{vel} = 0.004m$$

- Error debido al rolido y cabeceo

Siendo dicho error:

$$\sigma_{mov} = -z_m \cdot \sin\left(\theta_R - \frac{\emptyset}{2}\right)$$

Continuando la recomendación por experiencia del Ing. Agrimensor Alfredo Marusich, el ángulo máximo posible para este movimiento será de 5°.

Sustituyendo obtenemos:

$$\sigma_{mov} = -3 * \sin\left(5^\circ - \frac{8^\circ}{2}\right)$$

$$\sigma_{mov} = 0.05m$$

- Error de posicionamiento vertical en GNSS

Según teoría estudiada en el curso Geodesía 3 y por experiencia práctica, utilizando un posicionamiento diferencial en tiempo real mediante protocolo NTRIP y una base a una corta distancia como es nuestro caso con la base UYMO (Base en el cerro de Montevideo), el error que podemos llegar a tener es:

$$\sigma_{Z-GNSS} = 0.03m$$

- Error de latencia

Dado que, se estima que la velocidad máxima de la embarcación rondará los 3 nudos (1.5 m/s), que el instrumento GNSS estará configurado para que la toma de un punto demore 1.00s y que el tiempo que demora el sonido en recorrer la profundidad máxima 3m es de 0.004s, se considera que la diferencia de tiempo entre la medición de la profundidad y la medición del posicionamiento, es mínima y por lo tanto el error por latencia es despreciable.

- Así mismo, algunos errores podrán ser despreciados, como se explico anteriormente debido al instrumental y **método de levantamiento utilizado**, (*ver sección 6.2.1*) estos son:

Error debido al bandeo

Error de calado

Error en la medición de la marea

Error de asiento

8.6.4. Error total en la determinación de la posición vertical

Suma cuadrática de los errores:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{incl}^2 + \sigma_{vel}^2 + \sigma_{Z-GNSS}^2 + \sigma_{mov}^2 + \sigma_{marea}^2 + \sigma_{calado}^2 + \sigma_{asiento}^2 + \sigma_{latencia}^2}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{incl}^2 + \sigma_{vel}^2 + \sigma_{Z-GNSS}^2 + \sigma_{mov}^2}$$

$$\sigma_z = 0.084 \text{ m} \sim 8.4 \text{ cm}$$

Por lo que, el error en la determinación de la profundidad de un punto para este trabajo sera sub-decimétrico.

A modo de comentario, si el trabajo se realizara con el objetivo de una navegabilidad segura, se cumplen con las tolerancias máximas que solicita la OHI para las características de nuestra zona, de Orden Especial, donde la separación quilla-fondo, es crítica.

8.7. Trabajo de campo

El día 9 de Mayo de 2021 se realiza el relevamiento comenzando a las 10:25hs, registrando una altura de marea de 0.48 metros y temperatura de 15.7°C.

Con la finalidad de referir el trabajo al Cero Wharton, se relevó con el instrumento GNSS “Pto común”, una lectura en la regla que se encuentra en la zona de amarre del puerto con en el mismo sistema del mareógrafo.

Con la utilización de cuerdas y tablas, se fija de forma vertical un bastón el cual en la parte inferior contará con el transductor conectado a la ecosonda, y en la parte superior se encontrará la antena GNSS.

Se procedió a medir las distancias indicadas en la Figura 34, para determinar la altura del bastón y la distancia desde el transductor al pelo del agua.

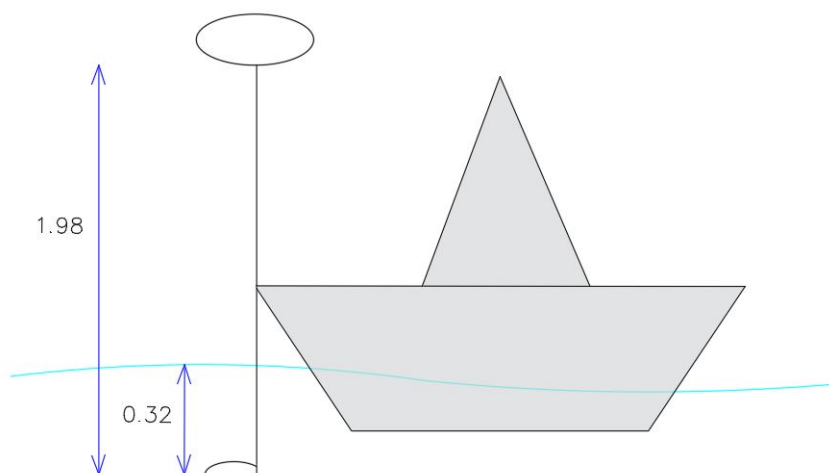


Figura 34: Medidas del instrumental efectuadas en campo.

Una vez colocado el equipo, con la barra de chequeo situada debajo del transductor a una distancia conocida, se verificó que la ecosonda estuviera calibrada y emitiendo datos verdaderos.

Es fundamental al momento de comenzar el trabajo de campo, asegurarse de que todos los equipos estén bien amarrados, que ninguno peligrara de recibir golpes, que estén expuestos a movimientos que afecten el levantamiento o incluso que provoquen la pérdida de algún equipo.

De igual forma, es importante que el transductor se sumerja en el cuerpo de agua a una profundidad no superior al calado de la embarcación y que el mismo esté posicionado de forma tal que su parte más angosta esté colocada hacia la proa.



Figura 35: Bastón con antena GNSS amarrada a la embarcación, transductor sumergido y ecosonda conectada.

Una vez instalado el equipo como se indicó y cumpliendo con lo planificado, se procedió a recabar datos GNSS mediante el Método diferencial - Protocolo NTRIP, utilizando la antena fija ubicada en el Cerro de Montevideo “UYMO”.

Los equipos fueron configurados para que realicen automáticamente la toma del punto cada 2m de distancia entre sí.

Al comenzar el levantamiento, se notó la presencia de barcos y navíos que impidieron efectuar las líneas de navegación como se había planificado en gabinete.

Así mismo, en la zona de las marinas se procedió a detener el levantamiento al momento de virar dado que la hélice de la embarcación provocaba que se levantara sedimento y éste podía afectar la toma de los puntos.

A medida que se realizaba el levantamiento, se procedió a la recolección de la informa-

ción de los puntos de control y las condiciones del relevamiento de los mismos.

Se culmina el levantamiento a las 14hs con una altura de marea de 0.64 metros y temperatura de 20.0°C.

8.8. Datos recabados en el levantamiento

Lo que se obtuvo del levantamiento fueron líneas de navegación uniformemente distribuidas en el área predispuesta, con datos relevados cada 2m, excepto en la zona de las marinas como se explicó anteriormente.

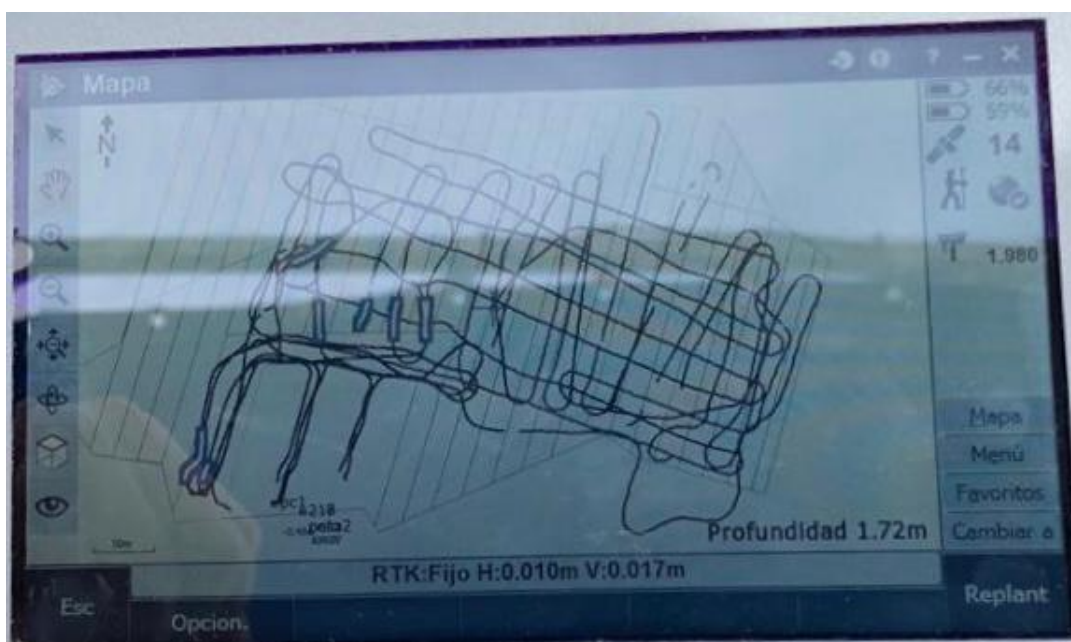


Figura 36: Levantamiento final, visualizado en la controladora.

Otros de los datos obtenidos surgieron del mareógrafo digital ubicado en el Puerto del Buceo; el mismo consta de una tabla con el registro del nivel del agua, la temperatura y la humedad cada 10 minutos (*Ver anexo*). Así mismo, se constató que dichos registros de marea están referidos al Cero Wharton.

8.9. Técnicas de control de calidad

Analizados todos los errores que se pueden presentar en el relevamiento con una ecosonda de simple haz, para realizar el control de calidad de los datos obtenidos en el análisis de errores es necesario compararlos con medidas de chequeo (puntos de control). Para el caso particular de este proyecto, los mismos tienen la finalidad de constatar si la ecosonda funcionaba de manera óptima, observar si las profundidades levantadas están dentro de las precisiones esperadas, y corroborar en que grado las diferentes condiciones del medio presentes en el puerto influyen en los datos levantados.

A modo de ejemplo, para una carta náutica, los resultados obtenidos en la comparación deben cumplir con las condiciones de exactitud de la OHI en su norma S-44.

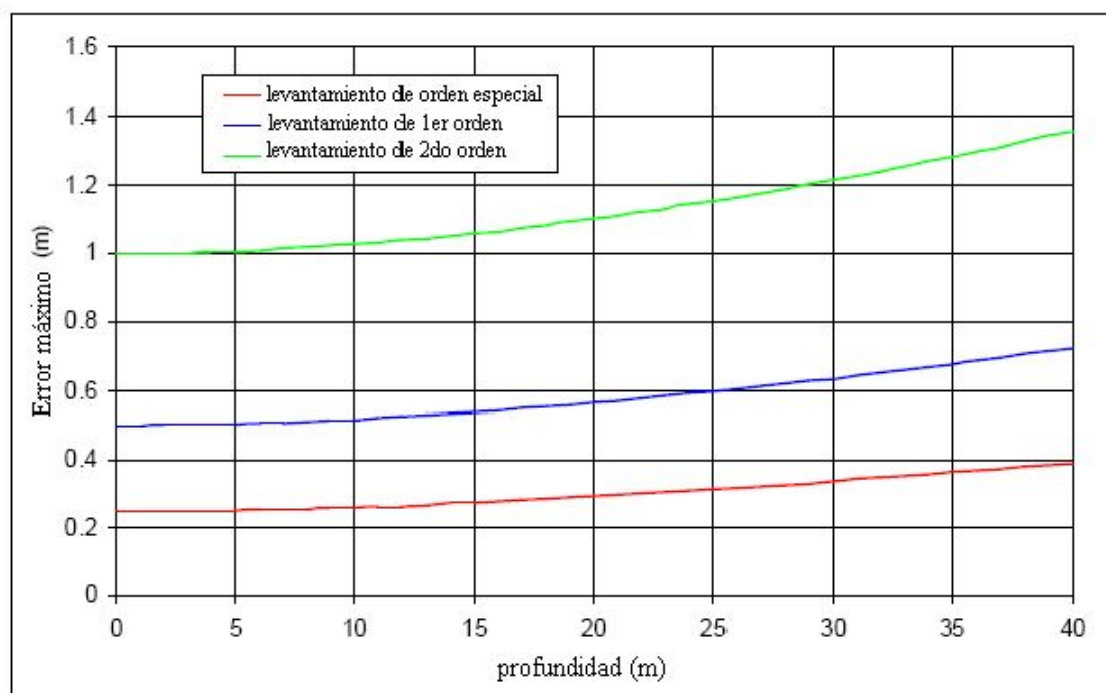


Figura 37: Requerimientos de exactitud de profundidad mínima para Orden Especial, 1er Orden y 2da Orden (S-44). Fuente: Normas de la OHI.

8.9.1. Puntos de control

Los puntos de control se levantaron de manera aleatoria, respetando cierta distancia temporal entre un punto y otro, de aproximadamente 20-40 minutos, y situados en las zonas representadas en la Figura 31.

Por otra parte, se obtuvieron planillas con datos de los puntos de control. Una de las observaciones que se recabó de éste procedimiento fue de qué tipo de material estaba constituido el fondo. *Ver tabla original en anexo*

8.10. Procesamiento

En gabinete se procedió a la descarga de los datos levantados, utilizando el software Trimble Business Center (TBC).

Pto	Norte	Este	Elevación (E)	Profundidad (P)
2000	6136654.597	579408.731	-0.500	0.560
2001	6136654.938	579407.719	-0.487	0.520
2002	6136655.198	579408.783	-0.499	0.480
2003	6136655.215	579409.820	-0.474	0.520
2004	6136655.196	579410.922	-0.476	0.580
2005	6136655.197	579412.023	-0.498	0.630
2006	6136655.196	579413.058	-0.496	0.690
2007	6136655.192	579414.148	-0.506	0.650
2008	6136655.129	579415.196	-0.490	0.600
2009	6136654.932	579416.180	-0.479	0.600
2010	6136655.357	579415.216	-0.499	0.580
2011	6136656.068	579414.445	-0.504	0.580

Figura 38: Datos crudos, unidades en metros. *Ver datos completos en anexo.*

En la Figura 38, se observa:

- Norte, Este y Elevación (E): medidos por el instrumental GNSS.
- Profundidad (P): medidos por la ecosonda.

Una vez descargados los datos crudos, se procedió, con el “Pto común” levantado para referir el trabajo al Cero Wharton, a corregir los valores de elevación y profundidad; siendo estos la cota medida por el instrumento GNSS y el valor de profundidad medido por la ecosonda, respectivamente.

	Norte	Este	Elevación	Descripción
Pto común	6136646.756	579431.611	1.403	cota en lectura regla 2m
Diferencia cota GPS - lectura regla			0.597	

Figura 39: Punto común para referir elevaciones al Cero Wharton, unidades en metros.

En la Figura 39, se observa:

- Elevación del punto común: 1.403m
- Lectura en la regla del punto común: 2m

Donde, la diferencia entre los sistemas del instrumento GNSS y el Cero Wharton, era de 0.597m.

Pto	Norte	Este	Elevación (E)	Profundidad (P)	Elevación referida 0W GNSS 0W = (E - 0.597)	Profundidad referida al 0W P 0W = (GNSS 0W - P)
2000	6136654.597	579408.731	-0.500	0.560	0.097	-0.463
2001	6136654.938	579407.719	-0.487	0.520	0.110	-0.410
2002	6136655.198	579408.783	-0.499	0.480	0.098	-0.382
2003	6136655.215	579409.820	-0.474	0.520	0.123	-0.397
2004	6136655.196	579410.922	-0.476	0.580	0.121	-0.459
2005	6136655.197	579412.023	-0.498	0.630	0.099	-0.531
2006	6136655.196	579413.058	-0.496	0.690	0.101	-0.589
2007	6136655.192	579414.148	-0.506	0.650	0.091	-0.559
2008	6136655.129	579415.196	-0.490	0.600	0.107	-0.493
2009	6136654.932	579416.180	-0.479	0.600	0.118	-0.482
2010	6136655.357	579415.216	-0.499	0.580	0.098	-0.482
2011	6136656.068	579414.445	-0.504	0.580	0.093	-0.487

Figura 40: Corrección de datos crudos, unidades en metros.

Quedando establecido entonces el sistema de coordenadas (X, Y, Z) como (**Este, Norte, Profundidad referida al Cero Wharton**) para la definición del modelo digital de elevaciones.

La cantidad de puntos levantados fue de 6168 puntos, en un área de 10hás 5800m² aproximadamente, obteniendo así una densidad de un punto cada 17m² aproximadamente.



Figura 41: Levantamiento batimétrico ejecutado.

Se puede apreciar que el área que se relevó es mucho menor que el área que se esperaba, ésto se debe a que el día del relevamiento hubo una baja en la marea, impidiendo acceder a los lugares con menor profundidad.

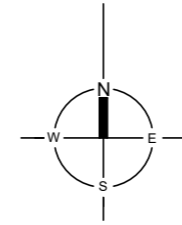
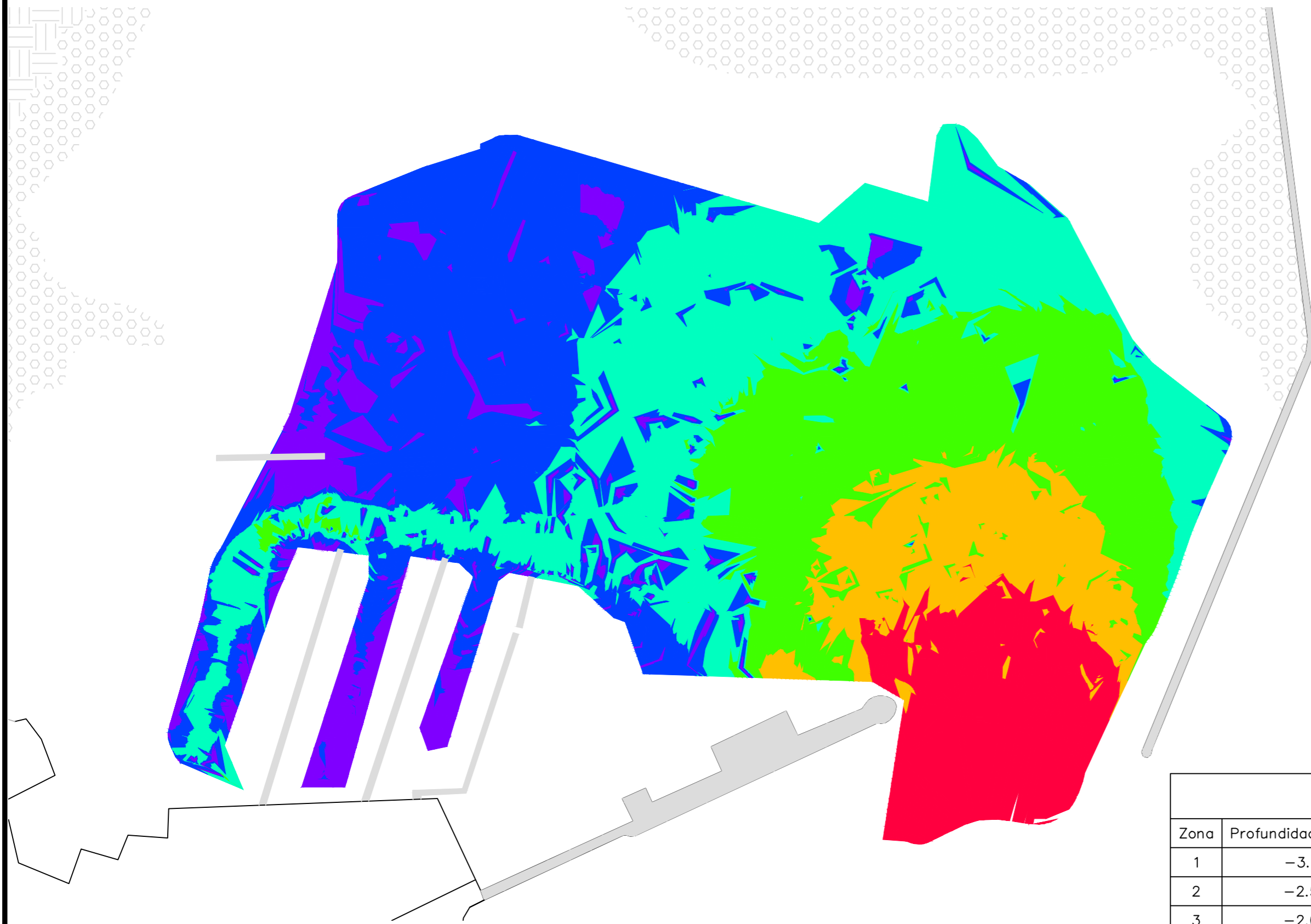
Por otra parte, el software elegido para realizar el procesamiento y análisis de datos fue AutoCAD Civil 3D.

Una vez cargados los puntos en dicho software se procede a analizar los siguientes aspectos:

- situación del levantamiento en cuanto a problemáticas presentadas en el trabajo de campo.
- situaciones a considerar en función de diferencias de profundidades.

Para esto, mediante el método de interpolación TIN, se obtuvo una representación digital de la superficie debajo del cuerpo de agua, mediante una capa raster que permite visualizar la profundidad obtenida en la zona de levantamiento.

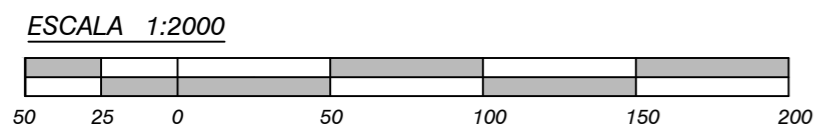
MAPA DE PROFUNDIDADES



NOTAS GENERALES:
 EL PRESENTE MAPA DE PROFUNDIDADES FUE GENERADO ANTES DE LA DEPURACIÓN DE PUNTOS QUE PRESENTAN EQUIVOCACIONES Y ERRORES GROSEROS.

Tabla de profundidades

Zona	Profundidad máxima	Profundidad mínima	Area	Color
1	-3.18	-2.50	10750.17	■
2	-2.50	-2.00	9937.17	■
3	-2.00	-1.50	20666.82	■
4	-1.50	-1.00	29222.93	■
5	-1.00	-0.50	27192.16	■
6	-0.50	0.05	7568.46	■



PROYECTO DE GRADO: Estudio de la técnica de batimetría, errores asociados a la metodología e instrumental empleados y generación de un modelo digital del fondo de un cuerpo del agua.
 - Micaela Gracia Maldonado - Franco Santos Curbelo -

P R O Y E C T O D E G R A D O

	<i>UdelaR - Facultad de Ingeniería - Instituto de Agrimensura</i>	
	DEPARTAMENTO	<i>Montevideo</i>
	FECHA	<i>MAYO 2021</i>
	ESCALA	<i>1:2000</i>

Micaela Gracia Maldonado, Franco Santos Curbelo

8.10.1. Proceso de depuración

El proceso de depuración tiene la finalidad de eliminar aquellos puntos que presentan alguna equivocación o algún error grosero.

Se eliminaron 548 puntos; quedando un relevamiento de 5620 puntos en total; esto indica que el 8.88 % de los puntos fue eliminado.

A continuación, se describirán los criterios que se consideraron para determinar si un “punto crítico” no era consistente con la realidad y si era eliminado o no.

8.10.2. Criterios de depuración empleados

- si sobre una línea de navegación, el punto crítico presenta una diferencia mayor al doble del valor obtenido en el pre-análisis de posicionamiento vertical, (0.16m) con los puntos anteriores y siguientes, se analiza si es eliminado o no.
- si en un cruce de líneas de navegación, el punto crítico presenta una diferencia mayor al valor obtenido en el pre-análisis de posicionamiento vertical, (0.08m) con puntos ubicados en un radio de 1m, se analiza si es eliminado o no.
- si el punto crítico, se ubica sobre el viraje de la embarcación, y es clara una disminución de la profundidad, se analiza si es eliminado o no.

8.11. Modelo Digital de Elevaciones

Luego del proceso de depuración, se obtuvo nuevamente una representación digital de la superficie mediante una capa raster permitiendo visualizar el resultado del levantamiento con puntos correctamente levantados y libres de errores groseros.

Por otra parte, el área final del levantamiento luego del proceso de depuración de puntos, fue de 9hás 9000m² aproximadamente.

MAPA DE PROFUNDIDADES

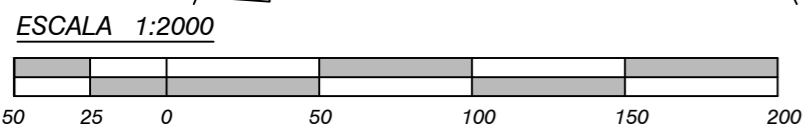
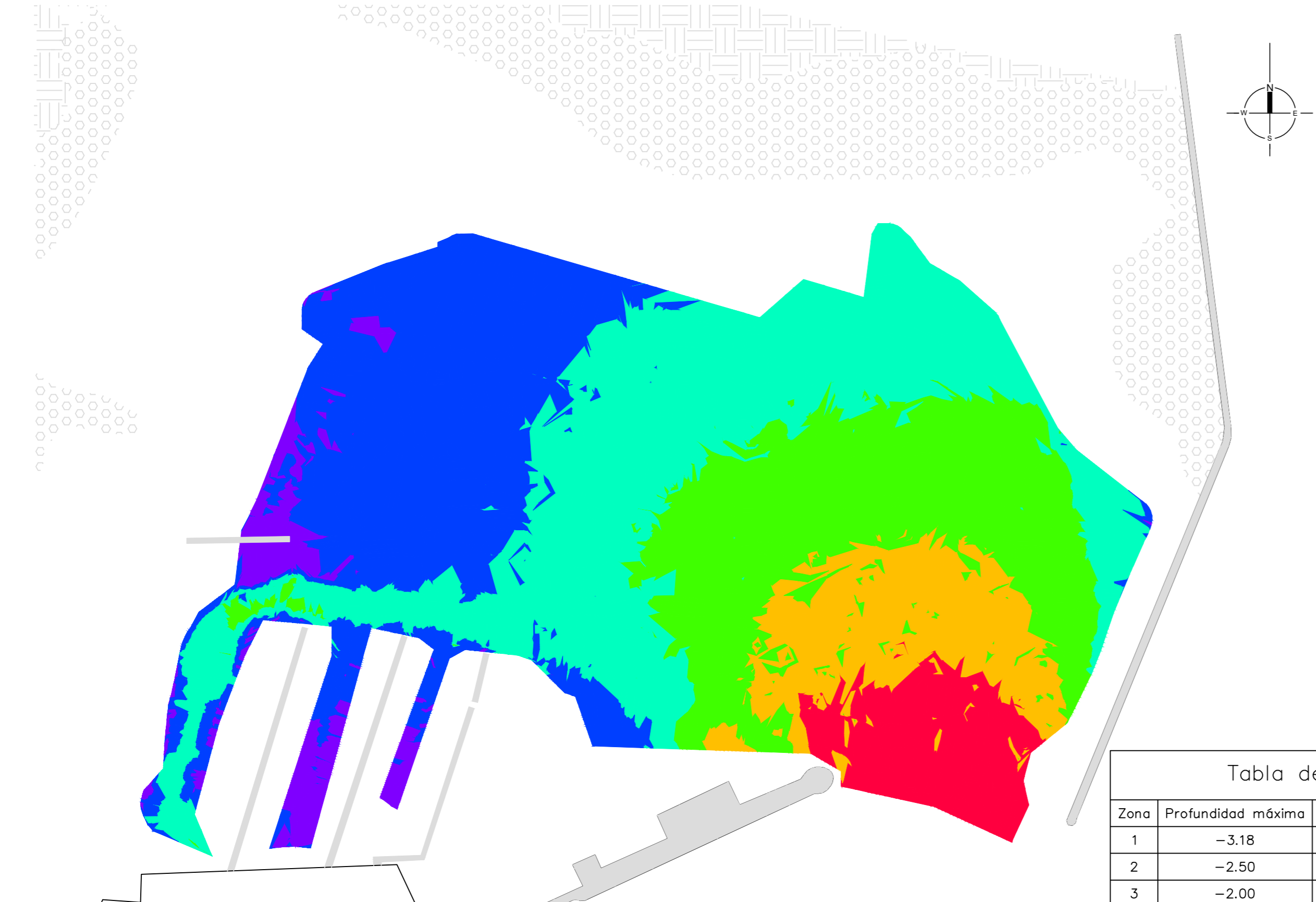


Tabla de profundidades

Zona	Profundidad máxima	Profundidad mínima	Area	Color
1	-3.18	-2.50	6727.66	■
2	-2.50	-2.00	10002.05	■
3	-2.00	-1.50	21650.63	■
4	-1.50	-1.00	32236.32	■
5	-1.00	-0.50	24932.23	■
6	-0.50	0.05	4065.66	■



NOTAS GENERALES:
 EL PRESENTE MAPA DE PROFUNDIDADES FUE GENERADO LUEGO DE LA DEPURACIÓN DE PUNTOS QUE PRESENTAN EQUIVOCACIONES Y ERRORES GROSEROS.

PROYECTO DE GRADO: Estudio de la técnica de batimetría, errores asociados a la metodología e instrumental empleados y generación de un modelo digital del fondo de un cuerpo del agua.
 - Micaela Gracia Maldonado - Franco Santos Curbelo -

P R O Y E C T O D E G R A D O	
	<i>UdelaR - Facultad de Ingeniería - Instituto de Agrimensura</i>
	DEPARTAMENTO <i>Montevideo</i>
	FECHA <i>MAYO 2021</i>
	ESCALA <i>1:3000</i>
<i>Micaela Gracia Maldonado, Franco Santos Curbelo</i>	

8.12. Generación de carta náutica

Por último, se llevo a cabo uno de los elementos básicos para cualquier representación de un cuerpo de agua destinado para la navegabilidad; una carta náutica.

Los criterios que se utilizan para la construcción de una carta se basan en que la misma se produce con la finalidad de que sea práctica para una segura navegabilidad, por lo que para el usuario tiene un rol fundamental la cómoda visualización e interpretación de la misma.

Se genera una grilla de puntos cada 10m, extraída de la superficie depurada, y se utiliza para generar otra superficie, también representativa del fondo del cuerpo de agua, pero “más suave” y más fácil de interpretar.

Por otra parte se utiliza la misma grilla de puntos, para señalar las profundidades existentes quedando gráficamente representadas. Vale destacar que si bien se obtiene una grilla interpolando puntos del levantamiento original, esto no menoscaba la precisión del producto final, dadas las precisiones y el estudio de errores mencionado anteriormente.

Luego de esto, se genera una superficie con un estilo de curvas de nivel cada 0.50m.

Por último, como la característica primordial de una carta náutica es que sea de fácil comprensión, la superficie es “suavizada” considerando siempre asegurar una navegabilidad segura.

A modo de ejemplo: se genera una pequeña curva de nivel debido a un punto y el mismo representa una depresión de la superficie, ese punto es editado para que el modelo no genere dicha curva de nivel; vale aclarar que solo es aplicado para puntos y curvas que representaran depresiones, no para aquellas que representaran crestas.

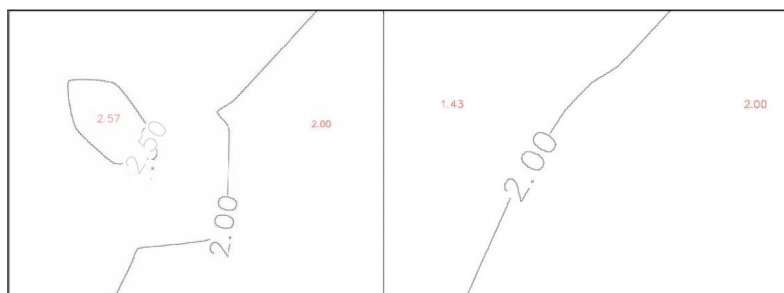
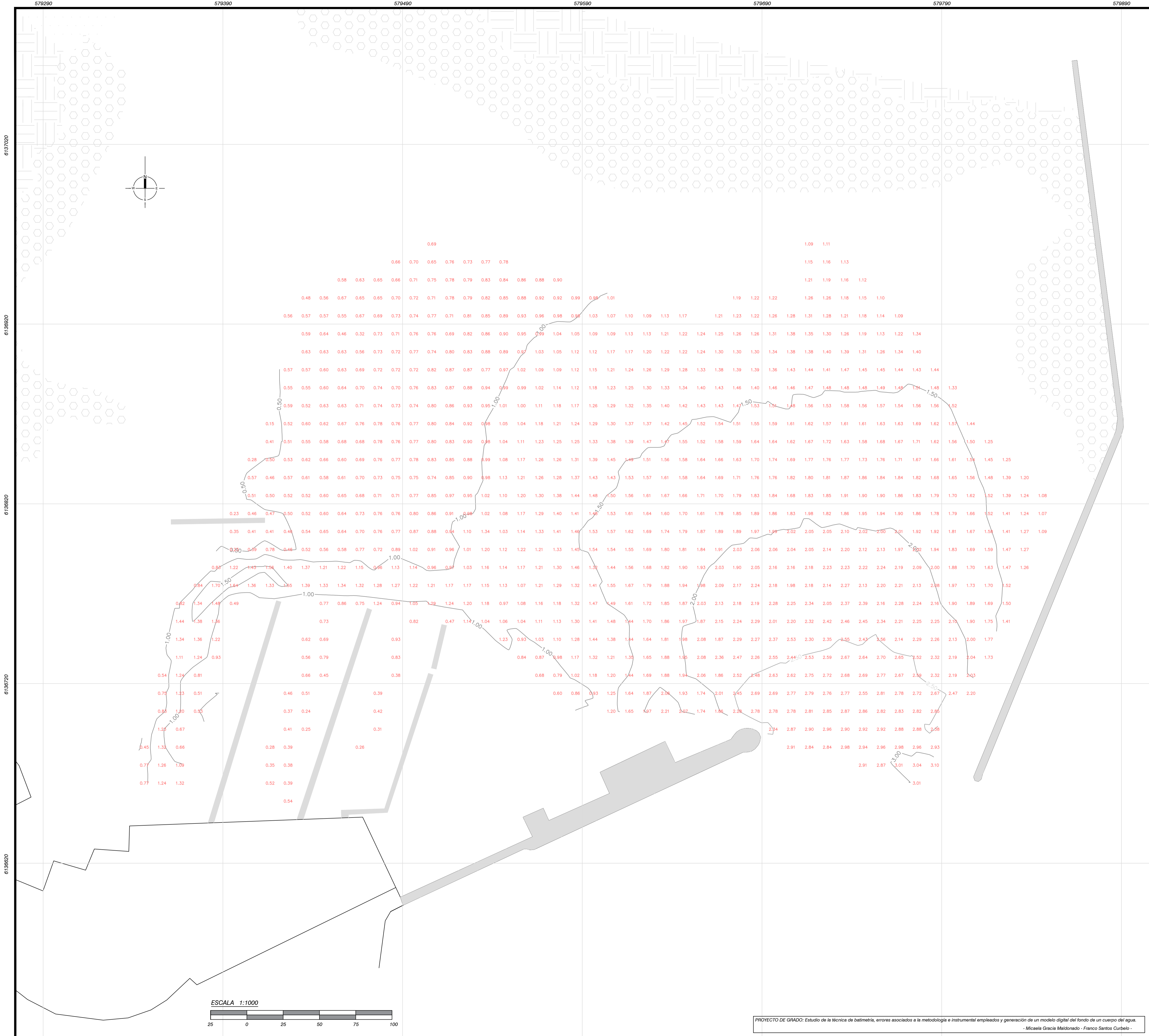


Figura 42: Curva de nivel sin suavizar / curva de nivel suavizada



EQUIPOS UTILIZADOS PARA EL LEVANTAMIENTO DE DATOS

EMBARCACIÓN	Centenario
POSICIONADOR PLANIMÉTRICO SATELITAL	GNSS – Método diferencial
NIVELES DEL RÍO	Valores obtenidos del mareógrafo, que se encuentra en el Puerto del Buceo
ECOSONDA	SonarMite– DFX
SOFTWARE DE PROCESAMIENTO	AutoCAD Civil 3D

**RÍO DE LA PLATA
BATIMETRÍA CON ECOSONDA MONOHAZ
PUERTO DEL BUCEO**

RELEVAMIENTO BATIMÉTRICO
MAYO 2021

SISTEMA DE PROYECCIÓN : UTM Zona 21S
DATUM HORIZONTAL: WGS84

ESCALA 1:1000

Datum Vertical:
Plano de reducción de sondas que coincide con el cero del mareógrafo que se encuentra en la Dársena Fluvial del Puerto del Buceo.

NOTAS:
- Todas las unidades están expresadas en metros.
- El presente levantamiento fue procesado por Bach. Micaela Gracia, Bach. Franco Santos.

PROYECTO DE GRADO

	UdelaR - Facultad de Ingeniería - Instituto de Agrimensura DEPARTAMENTO: Montevideo
	FECHA: MAYO 2021
	ESCALA: 1:1000
	Micaela Gracia Maldonado, Franco Santos Curbelo

8.13. Análisis de resultados

Levantamiento de datos

En cuanto al levantamiento de datos y las líneas de navegación, se considera que difiera de lo planificado anteriormente, pero se pudo obtener un relevamiento que cumpliera con los requerimientos originales en relación a los objetivos fijados. Algunos de los factores por lo cual existe esta diferencia es debido a presencia de barcos amarrados en la zona, una baja marea, etc.

Depuración de datos

En referencia a los puntos eliminados, consideramos que fue una cantidad considerable, pero esto se debe a que varios de estos puntos fueron levantados en zonas contra las marinas, donde surgió el problema de que la embarcación quedó encallada, y donde era visible el lodo suspendido en el agua debido a diferentes maniobras que efectuó la embarcación para salir de dicha zona, provocando que los puntos presentaran errores notables. También fueron eliminados puntos levantados en la boca del puerto, los cuales no estaban contemplados en la zona de relevamiento y no eran necesarios para realizar el modelo digital de elevaciones.

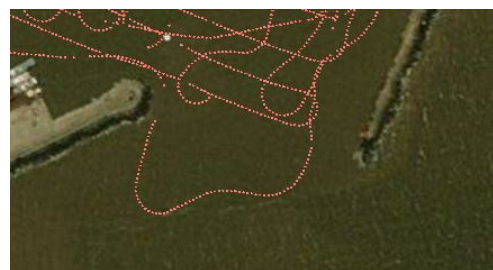


Figura 43: Zona de marinas y boca del puerto con relevamiento sin depurar.

Puntos de control

A continuación, se muestra el resumen de los datos recabados de los puntos de control:

PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP (°C)	ESCANDALLO	ECOSONDA	Diferencia
1	Limo-Barro	10:20	0.42	16.90	0.55	0.58	-0.03
2	Limo-Barro	10:47	0.42	19.10	1.83	1.65	0.18
3	Limo-Barro	11:25	0.42	18.40	0.58	0.60	-0.02
4	Arena	11:57	0.57	19.10	2.98	3.10	-0.12
5	Roca	12:15	0.53	19.30	1.28	1.30	-0.02
6	Arena	12:33	0.52	20.50	1.18	1.25	-0.07
7	Limo-Barro	12:48	0.52	20.80	1.21	1.27	-0.06
8	Arena	13:00	0.57	19.60	0.72	0.69	0.03

Los puntos relevados con el escandallo serán considerados verdaderos y a partir de esto se realizará el análisis de datos.

Dado que no se levantaron una cantidad significativa de puntos de control en función del área de trabajo, se concluyó que no es posible obtener ninguna conclusión pero si observaciones de tendencias de los datos y de errores groseros.

Observaciones generales

Se puede observar que en todos los puntos salvo uno (punto de control - PC 2), la ecosonda determina un valor de profundidad mayor que el obtenido con el escandallo, esto acompaña el concepto de que la ecosonda penetra los sedimentos no consolidados.

Además, se observa una relación entre temperatura y la diferencia entre las lecturas ejecutadas; cuando la temperatura superó los 20.0°C la diferencia superó los 3cm.

Por otra parte, no se observan diferencias a causa del tipo de material ubicado en el fondo del cuerpo de agua.

Observaciones específicas

Las diferencias de lecturas en los puntos de control PC 2 y PC4, superan el error estimado en la posición vertical al medir un punto utilizando una ecosonda simple haz, expresado en la sección 8.6.

Las diferencias de lecturas en el punto de control 2 (PC 2), supera el error estimado y se aparta notoriamente de las diferencias de los demás puntos de control, por lo que se supone un error en la lectura del escandallo.

Modelo Digital de Elevaciones

La representación raster, permite una visualización más amena de las elevaciones existentes en la zona.

El resultado del modelo digital fue una superficie con las siguientes características:

1. la zona más profunda fue en la entrada (“boca”) del Puerto.
2. la zona de la marina ubicada al noroeste con una depresión en las elevaciones debido al dragado efectuado en 2020.
3. la zona noroeste y entre las marinas ubicadas al sur, fueron los sectores con menor elevación.

Vale aclarar, que todas las características anteriormente nombradas, eran las esperadas dados los datos antecedentes.

Carta Náutica

La carta náutica fue generada únicamente para facilitar la navegación, cumpliendo con los estándares requeridos por la OHI; no tiene competencia para ser utilizada en ningún trabajo de precisión.

9. CAPÍTULO 9 - Comparación y análisis de Modelos Digitales de Elevaciones

9.1. Generalidades

La finalidad de la presente sección, es determinar si el modelo digital obtenido en el Capítulo 8, surge de un correcto procesamiento y es representativo de la realidad. Para esto, se realizarán comparaciones entre diferentes modelos digitales de elevaciones.

Por un lado, se realizará la comparación de dos modelos generados a partir de los datos del levantamiento hidrográfico, efectuado para el proyecto de grado en fecha Mayo 2021, en el Puerto del Buceo.

Dicha comparación será entre, el modelo digital de elevaciones utilizando el modelo geoidal y altura GNSS, obtenido del procesamiento explicado en la sección 8.10, y el modelo utilizando alturas de marea, generado a partir de los datos procesados por el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA).

Por último, pero no menos importante, se realizará la comparación entre el modelo digital de elevaciones utilizando el modelo geoidal y altura GNSS, y un modelo generado a partir de datos de un relevamiento de Diciembre del 2020 entregado por el SOHMA, que será desarrollado a lo largo del Capítulo.

9.2. Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada

El Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) consta de 6 departamentos que se encargan de diferentes aspectos que involucran al servicio.

- **Departamento de Oceanografía;**
- **Departamento de Hidrografía;**
- **Departamento de Meteorología;**

- Departamento de Ayuda a la Navegación;
- Departamento de Administración y Logística;
- Departamento de Informática.

9.2.1. Departamento de Hidrografía

La función básica de dicho departamento se basa en la obtención, procesamiento, actualización y conservación de datos e información hidrográfica.

También tiene por objetivo distribuir esta información en diferentes formas, algunas de ellas son mediante cartas o publicaciones náuticas.

Éste departamento está constituido por tres Divisiones que se encargan de la planificación y los levantamientos hidrográficos, procesamiento de los datos recabados en el levantamiento, confección de las cartas náuticas, entre otros deberes; estas son: *División de Cartografía, División de Procesamiento y División de Campañas*

9.2.2. Procesamiento de datos efectuado por el SOHMA

El servicio realiza este tipo de levantamientos hidrográficos empleando una ecosonda simple haz modelo “KNUDSEN”, de frecuencia 200kHz y un software de levantamiento “HyPack 2018”, el cual facilita el posterior procesamiento de datos.

Utilizan el modelo de determinación de profundidades, utilizando alturas de marea y luego, recorren cada línea de navegación recortando los “picos” o falsos ecos que se producen en el levantamiento.

9.3. Instancia de intercambio con el SOHMA

La primer instancia de intercambio con el Servicio, surge al ponernos en contacto con el Capitán de Navío (CG) José Dominguez Jefe de SOHMA, el cual nos concedió el contacto del Capitán de Fragata (CG) Niki SILVERA, Sub Jefe del SOHMA. La primer instancia, constó de una presentación referida a la organización del Servicio y su cometido, mientras que la última reunión encabezada por Matías COCCARO,

Jefe de las Divisiones Campañas y Procesamiento del Dpto de Hidrografía, constó de una introducción a la técnica de batimetría, instrumental empleado, metodologías de levantamiento y método de procesamiento.

Se generó una solicitud de intercambio de datos por ambas partes, donde se obtuvieron datos de un relevamiento realizado por el SOHMA en Diciembre 2020 y la posibilidad de que el Servicio procesara, empleando su metodología, los datos levantados en Mayo 2021, vale aclarar que los datos fueron entregados por Capitán de Corbeta (CG) Marcelo L. OLIVERA, Jefe de los Dptos de Hidrografía, Meteorología marina y ayudas a la Navegación; además nos comprometimos a entregar análisis de resultados obtenidos en el presente proyecto.

En conclusión, se trabajará en la próxima sección con las siguientes superficies:

- 1) Superficie generada con el relevamiento de datos **obtenidos por el SOHMA en Diciembre 2020**, mediante un modelo de determinación de profundidades utilizando **alturas de marea**.
- 2) Superficie generada con el relevamiento de datos obtenidos en **Mayo 2021**, mediante un modelo de determinación de profundidades utilizando **alturas de marea**.
- 3) Superficie generada con el relevamiento de datos obtenidos en **Mayo 2021**, mediante un modelo de determinación de profundidades utilizando **modelo geoidal y altura GNSS**.

Por último, el software empleado para la generación de las superficies fue AutoCAD Civil 3D.

9.4. Primer comparación de superficies

La finalidad de la comparación de las **superficies 2 y 3**, es poder analizar si las mismas son coincidentes y poder considerarlas como iguales; vale aclarar que ambas fueron obtenidas a partir del mismo levantamiento.

Para ésto, se escogió por realizar un análisis de **modelo de superposición** de las

superficies anteriormente nombradas; el software utilizado fue AutoCAD Civil 3D.

Una vez obtenido el modelo de superposición, se procedió a extraer del mismo una grilla de puntos cada 10m, extrayendo una muestra total de 987 puntos.



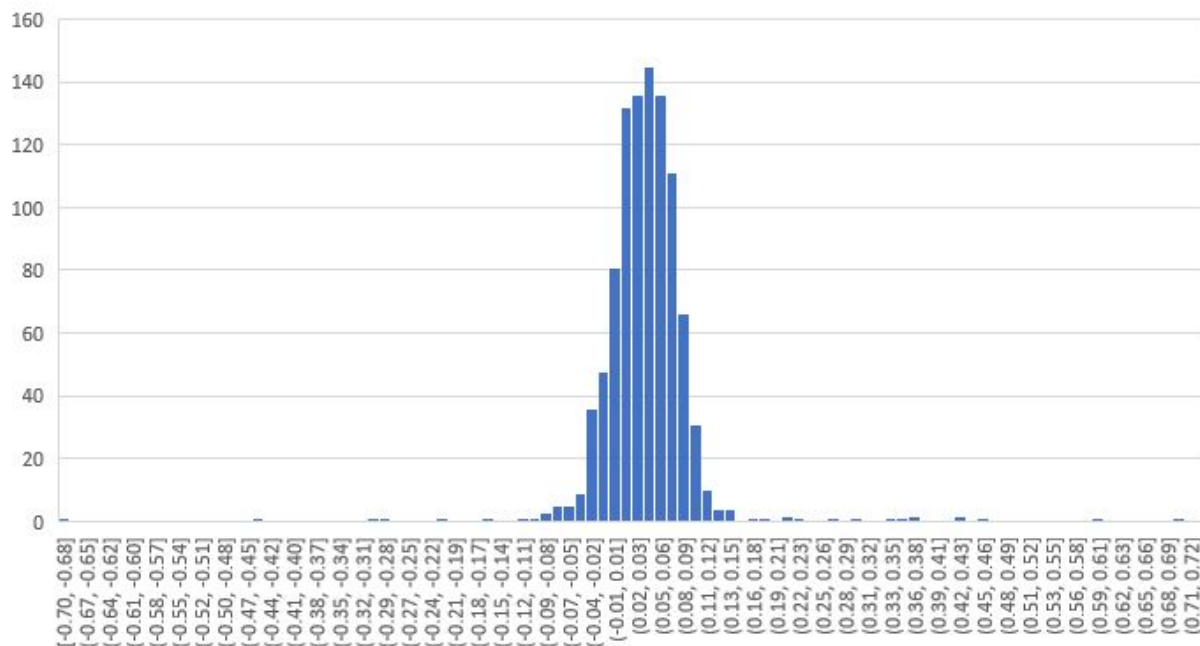
Figura 44: Grilla de puntos empleados.

Como método de análisis, se optó por realizar un estudio estadístico mediante un intervalo de confianza para las observaciones, con un 95 % de confianza. Es de interés ver qué porcentaje de área del modelo se encuentra dentro del intervalo, y así verificar la analogía de las superficies.

Definición del intervalo:

- Se parte de la base, que los datos a estudiar representan una distribución normal y continua, dado que realizando un histograma de las diferencias de elevaciones, se observa el gráfico tiene forma de campana, es simétrico y alcanza su máximo en la media (0.05m)

HISTOGRAMA DE DIFERENCIA DE ELEVACIONES



- Intervalo para las observaciones:

$$\bar{X} \pm z_{\alpha} \cdot \sigma_{OBS}$$

$$\bar{X} - z_{\alpha} \cdot \sigma_{OBS} \leq X_i \leq \bar{X} + z_{\alpha} \cdot \sigma_{OBS}$$

Siendo la desviación estándar de las observaciones:

$$\sigma_{OBS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n - 1)}}$$

Y extrayendo el valor de tablas empíricas:

$$z_{\alpha} = 1.96$$

Obteniendo así:

$$-0.07 \leq X_i \leq 0.17$$

Siendo éste, el intervalo de los datos con un 95 % de confianza.

A continuación en Figura 45, se puede apreciar como queda definido el mapa de profundidades utilizando el intervalo de confianza definido.

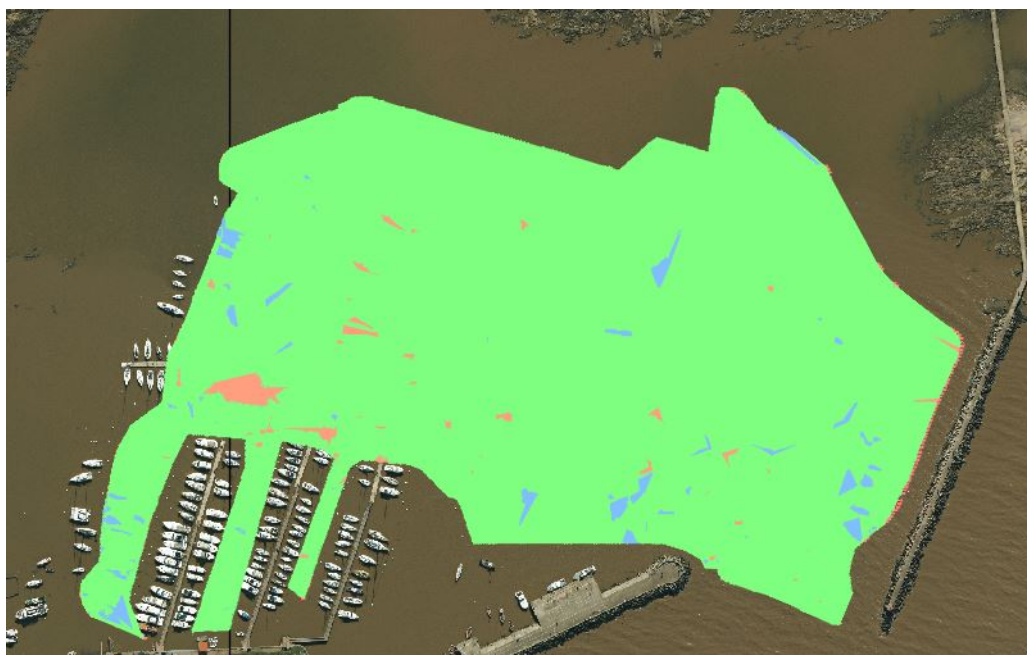


Figura 45: Modelo de diferencias de elevaciones.

REFERENCIAS			
Mín. elevación (m)	Máx. elevación (m)	Area (m ²)	Color
-0.78	-0.07	1283.88	Red
-0.07	0.17	96140.16	Green
0.17	1.46	1571.63	Blue

9.4.1. Análisis de resultados

Se consulto a la Dra. en Geoestadística Maria Noel Morales acerca de la cantidad y distribución de puntos en la grilla obtenida cada 10m; se concluyó que, al ser puntos

espaciados a una distancia no menor a 4 veces la distancia de los lados de los cuadrados que se forman entre las líneas de navegación (transversales y longitudinales), es una muestra representativa del modelo de superposición en su gran mayoría, salvo en los sectores de amarre, donde no abunda información.

Luego de realizado el intervalo de confianza y representado en el modelo de superposición, se puede observar que el intervalo para un 95 % de confianza, representa el 97 % del área.

Se deduce que, la restante cantidad de área que no pertenece al intervalo de aceptación se deben a diferencias en los criterios de depuración de datos en los procesamientos como también a diferencias en la interpolación de las superficies comparadas.

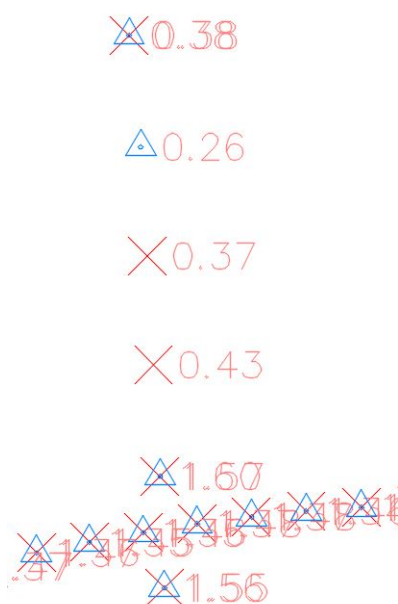


Figura 46: Ejemplo de línea de navegación con puntos depurados.

En la Figura 46, en color celeste, se observan puntos aceptados por el SOHMA y en rojo puntos aceptados por nosotros; se observa claramente que no se depuró de la misma forma.

De igual manera esta cantidad es mínima, quedando dentro de lo esperable.

Con los valores reflejados, se puede concluir que ambas superficies se pueden considerar análogas.

9.5. Segunda comparación de superficies

El objetivo de la comparación de las **superficies 1 y 3**, es poder demostrar que nuestra metodología de levantamiento y procesamiento de los datos con todas sus particularidades, se puede emplear y da resultados representativos de la realidad.

La información base, son datos que el SOHMA gentilmente nos concedió de una batimetría realizada posterior a un dragado, en el Puerto del Buceo en Diciembre del 2020.

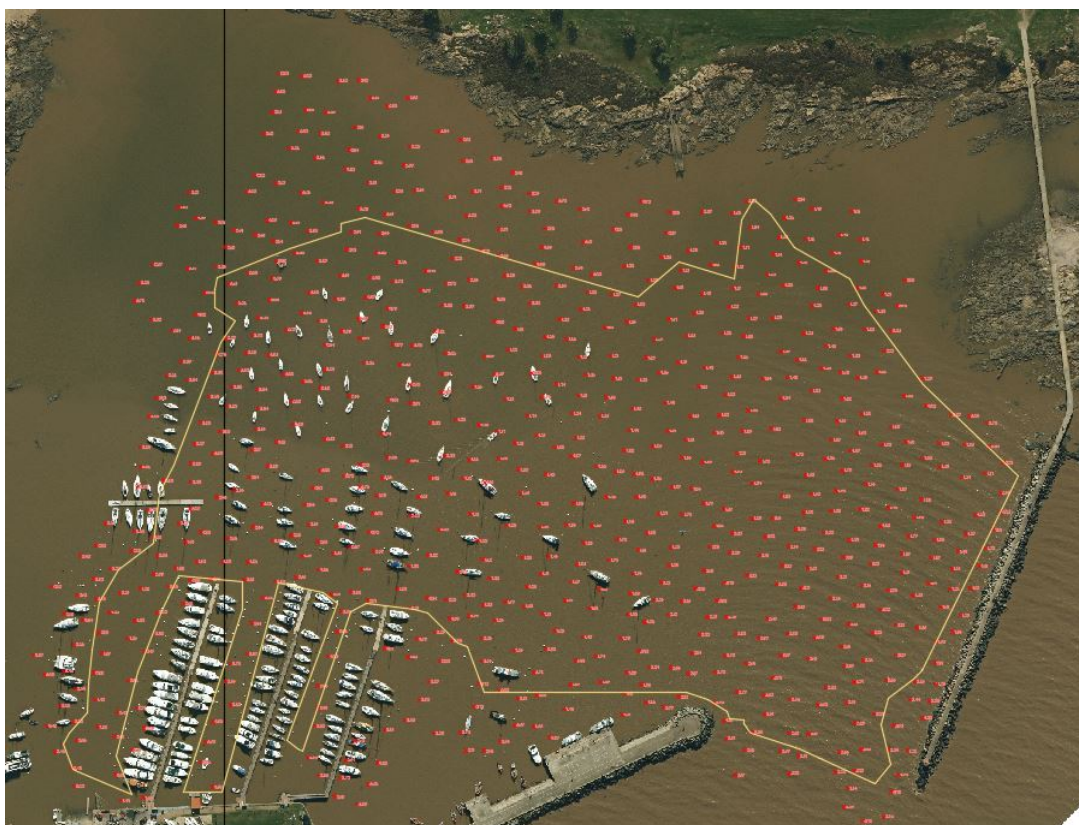


Figura 47: Levantamiento efectuado por SOHMA, Diciembre 2020.

Se puede apreciar en Figura 47, que los puntos entregados se encuentran con una distribución más uniforme que en nuestro relevamiento, aunque con mayor separación entre puntos consecutivos. Por otra parte, el procesamiento de los datos generado por el Servicio, fue efectuado con altura de marea.

Lo ideal para llegar al objetivo planteado, es que los datos tomados como base del

SOHMA fueran del mismo día; pero al ser dos levantamientos espaciados en el tiempo, se planteo una demostración partiendo de la hipótesis que va a existir una diferencia entre ambas superficies.

Vale aclarar, que este estudio de comparación entre dos superficies generadas mediante distintas metodologías, es posible dados los análisis obtenidos la sección 9.4.1.

Por otra parte, se accedió a un estudio sedimentológico realizado por el IMFIA (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental), donde analiza el grado de sedimentación de material dentro del Puerto del Buceo.

En dicho informe, generan un modelo con la superposición de dos batimetrías realizadas una en el año 1990 y otra en el año 2004 dentro del Puerto del Buceo; arrojando como uno de los resultados, el grado de sedimentación anual del Puerto. *Informe IMFIA, Análisis de la dinámica sedimentológica del puerto.*

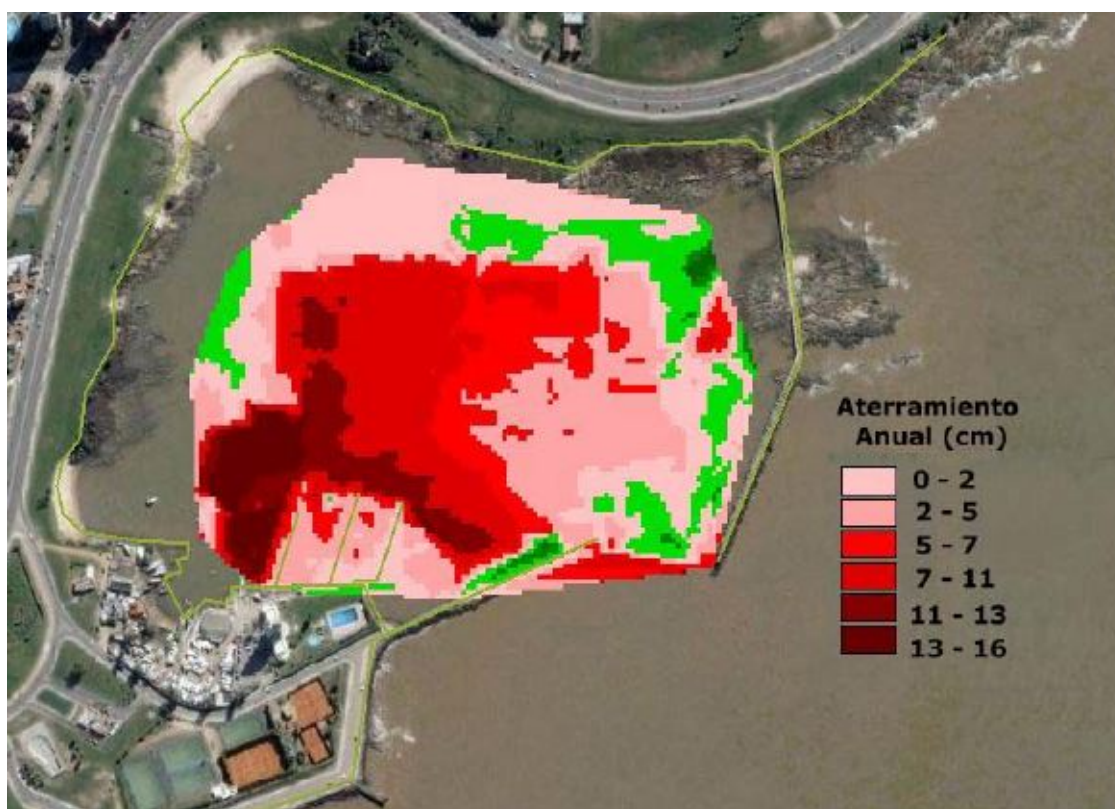


Figura 48: Estudio de sedimentación/aterramiento. *Fuente: Análisis de la dinámica sedimentológica del Puerto, IMFIA.*

Por lo anteriormente mencionado, se realizó un modelo de superposición entre las superficies 1 y 3, con el Software Autocad Civil 3D, con el objetivo de evaluar las diferencias de elevaciones, desde Diciembre (relevamiento SOHMA) hasta Mayo (relevamiento del proyecto de grado). Contrastando el modelo de sedimentación del IMFIA, con el modelo obtenido superponiendo las superficies 1 y 3, se ve una similar tendencia de comportamiento de ambos.

A continuación en Figura 49, se observa el mapa de diferencias, utilizando como intervalos los mismos que fueron aplicados por el IMFIA.

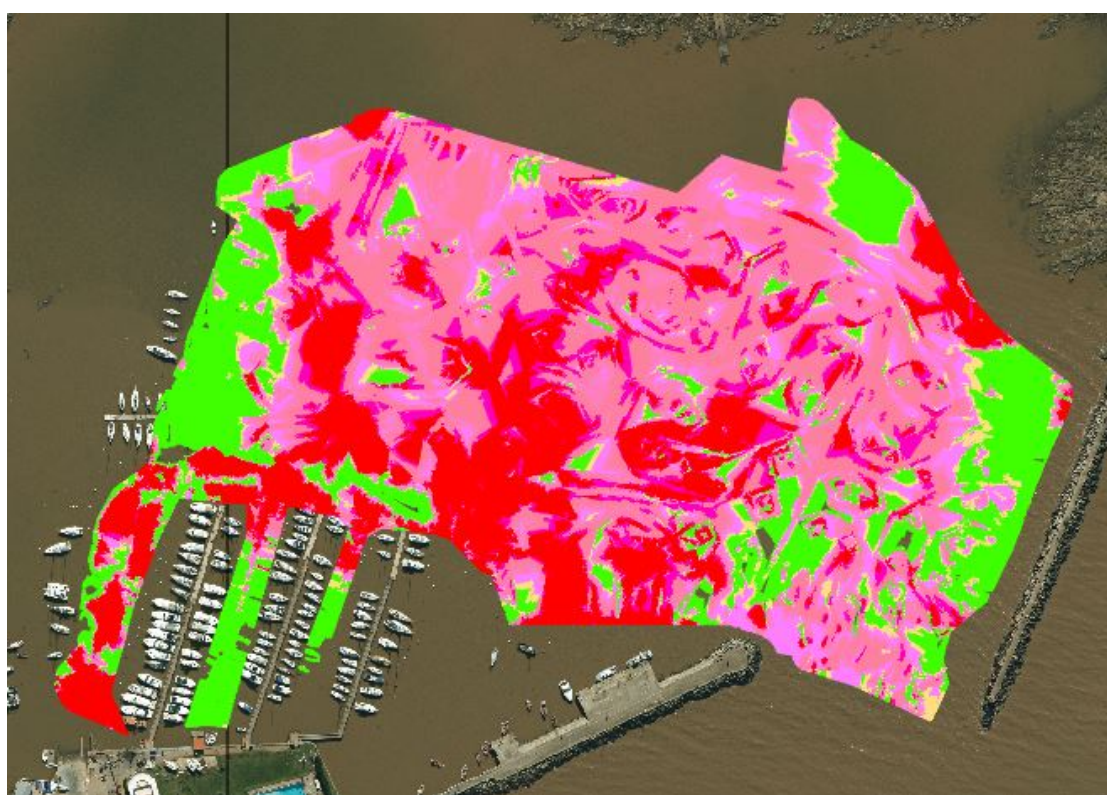









Figura 49: Modelo de comparación superficies 1 y 3.

REFERENCIAS			
Min.Elevación (m)	Max.Elevación (m)	Área (m2)	Color
-0.20	0.00	19851.20	
0.00	0.02	4398.06	
0.02	0.05	10140.05	
0.05	0.07	11090.28	
0.07	0.11	24366.46	
0.11	0.13	8263.85	
0.13	0.50	18748.51	

Dichas diferencias son adjudicadas al aterramiento de material o el factor de sedimentación, que acontece en ese período de tiempo en el Puerto del Buceo; por lo que los resultados obtenidos en los los estudios dieron valores esperados.

9.5.1. Análisis de resultados

Continuando la demostración, el primer estudio que se realizó fue una comparación entre los modelos de superposición anteriormente nombrados.

Por lo que, el grado de sedimentación anual y las zonas que se marcan en el modelo del IMFIA, en comparación con el nuestro, son muy coincidentes.

“Las zonas del Puerto del Buceo presentan distintas tasas de sedimentación anual. Se observa por ejemplo que en la zona de atraque ocurre un aterramiento de entre 13 y 16 cm anuales, mientras que en la zona cercana a la boca de acceso principal al Puerto el aterramiento anual es menor a los 5cm.”³³

Mientras que, en el modelo de comparación de superficies 1 y 3, se observa que en la zona de dragado ocurre un aterramiento entre 13 y 50cm y en la zona de acceso al puerto el aterramiento es de entre 0 y 7cm.

Se concluye que las superficies tienen el mismo comportamiento, pero los valores de sedimentación no son coincidentes; esto se puede atribuir a los tiempos de separación entre las superficies estudiadas por el IMFIA y los criterios optados para determinar

³³Análisis de la dinámica sedimentológica del Puerto, IMFIA.

dichos valores. Vale aclarar que, la sedimentación no tiene un comportamiento lineal por diversos factores, por ejemplo las corrientes.

El siguiente estudio fue empleando el reporte “fill-cut” (terraplén-desmonte) global del modelo, que se obtuvo del Software.

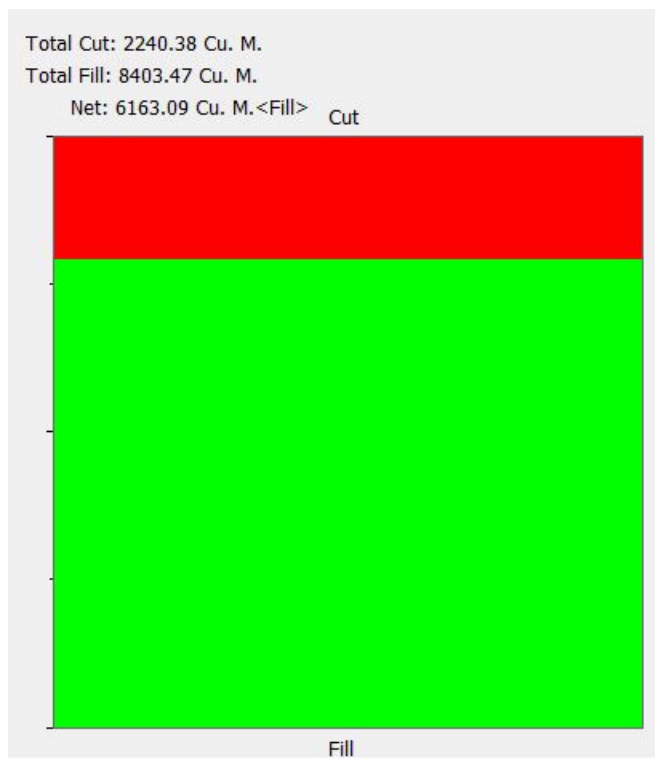
Lo que se quiere analizar es la diferencia de elevación promedio, entre una superficie y otra. Como se puede ver en el reporte tenemos el volumen en m³ de lo que se elevó (fill) y de lo que bajó (cut).

Si sumamos ambas en valor absoluto (10643,85 m³) y las dividimos entre el área total del modelo (10has aproximadamente), se encuentra la diferencia buscada que ronda los 0.10m aproximadamente.

Esa diferencia de altura entre una superficie y otra está dentro de lo esperado, y se puede atribuir a las diferencias en los procedimientos, a la sedimentación que sufre el Puerto del Buceo por lo mencionado en el primer análisis y a los errores en la determinación de la profundidad desarrollados a lo largo del proyecto.

Reporte “Fill-Cut”:

2d Area(sq.m)	Cut(adjusted)(Cu. ...	Fill(adjusted)(Cu. M.)	Net(adjusted)(Cu. ...
98998.31	2240.38	8403.47	6163.09<Fill>



Con la hipótesis planteada, y con los estudios realizados se tienen dos argumentos consistentes para demostrar que nuestro modelo es representativo de la realidad.

10. CAPÍTULO 10 - Conclusiones

10.1. Técnica de Batimetría

Se concluye que es una técnica topográfica con ciertas particularidades que se alejan de las de un relevamiento tradicional.

Las particularidades principales son, que es un relevamiento de una superficie que no es visible, que se proyecta una posición, la cual puede llegar a tener muchos errores según diversos factores que en un relevamiento convencional no sucederían.

Por otra parte, teniendo una base teórica de éstos factores y de como intervienen en la toma de un punto, con la formación profesional y la práctica, un Ing. Agrimensor tiene la formación necesaria para poder ejecutar este tipo de trabajos, desde la planificación, el levantamiento, el procesamiento y el producto final.

Otra ventaja con la que cuenta un Ing. Agrimensor, es que para realizar un levantamiento batimétrico, puede adaptar el instrumental que utiliza habitualmente en su labor profesional; solo debería invertir en una ecosonda o alquilar la misma, dependiendo el volumen de trabajo que pueda tener. Por lo que, el profesional no se vería obligado a efectuar una gran inversión en equipamiento, ya que puede ajustar los que emplea usualmente, a cualquier embarcación. En cuanto a ésta última, sucedería lo mismo que con la ecosonda, se puede alquilar una embarcación para cada trabajo.

En referencia a la planificación y el levantamiento de los datos, se concluye que si no es posible hacer perfiles transversales de forma paralela (siguiendo las líneas de navegación planificadas) o de forma continua, se recomienda hacer varias pasadas y cubrir la mayor cantidad de área posible, aunque no se siga una secuencia específica, y luego corregir la triangulación que se conforma con la generación de la superficie, en el software utilizado para el procesamiento. También se considera fundamental, que se despeje lo más posible el área de levantamiento para tener un recubrimiento de la zona a trabajar, adecuado.

Con respecto a datos antecedentes, es de gran apoyo al momento de realizar levanta-

mientos hidrográficos tener una noción de como es el fondo del cuerpo de agua, para definir los cuidados con el instrumental y las distancias de las líneas de navegación.

En cuanto al análisis de errores, debe ser claro el ámbito en el que se va a trabajar, el instrumental y el método de determinación de profundidades que se va a utilizar, para poder estudiar los errores intervinientes de manera correcta. Se recuerda, que el presente proyecto se enfocó en un levantamiento con ciertas características y queda a criterio de cada profesional analizar los errores al realizar un levantamiento hidrográfico con propiedades diferentes.

Por último, la técnica de batimetría con posicionamiento RTK, genera un practicidad muy importante, ya que no se debe controlar los cambios en el nivel de la marea, y se puede configurar el equipo para tener los datos de profundidades referidos al sistema que se desee, en tiempo real.

10.2. Errores asociados a la metodología e instrumental empleado

Considerando el valor máximo de error en la determinación de un punto (en posicionamiento vertical y horizontal) y los valores de tolerancia permitidos por la OHI, se puede generar un modelo digital del fondo de un cuerpo de agua que garantice una segura navegabilidad cumpliendo las especificaciones de la OHI para un Orden Especial.

Si el objetivo es otro producto y/o escala de trabajo queda a responsabilidad del profesional, definir si esta metodología e instrumental es la adecuada para sus requerimientos.

10.3. Generación de un modelo digital del fondo de un curso de agua

En referencia a los resultados en las comparaciones de superficies del Capítulo 9 se puede concluir que, utilizando el instrumental, metodología de relevamiento, el método de depuración, la densidad y distribución de puntos que se emplearon, y un software

no específico de levantamientos hidrográficos, se obtiene una superficie correcta y representativa de la realidad del fondo del cuerpo de agua.

Por lo que, dadas las diferencias en los resultados entre el levantamiento realizado por el SOHMA con toda su infraestructura, personal capacitado y programas específicos, y los obtenidos en este proyecto con las características desarrolladas en este proyecto, se puede concluir que un Ing. Agrimensor está plenamente capacitado para realizar un relevamiento hidrográfico de estas características y obtener a un modelo de digital válido y representativo del fondo de un curso de agua.

La generación de un modelo digital con un Software como AutoCAD Civil 3D, de gran uso en muchas ramas de la Ingeniería, Arquitectura, etc. brinda la posibilidad de que éste sea un producto con ventajas a la hora de comercializarlo.

10.4. Comentarios

Por último, no menos importante, destacar que el haber realizado una práctica de levantamiento hidrográfico, fue de gran ayuda para la formación profesional y técnica, teniendo la oportunidad de planificar y enfrentarse a las dificultades de realizar una labor con características poco comunes en comparación con las tareas habituales que realizan los estudiantes durante la formación en el área de la topografía. Permitió un acercamiento al ámbito laboral, donde desarrollamos el relacionamiento con profesionales, técnicos y trabajadores de diversos ámbitos.

Nos posibilitó también el acercamiento a instituciones que realizan una tarea valiosa y que están calificados para trabajos de estas cualidades.

Anexo

Ing. Agrim. Alfredo Marusich

Es un profesional del área de la Agrimensura, uruguayo graduado en la Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Tiene basta experiencia en relevamientos batimétricos tanto en trabajos a nivel nacional como internacional.

Ex Jefe del Departamento de Vías Navegables del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

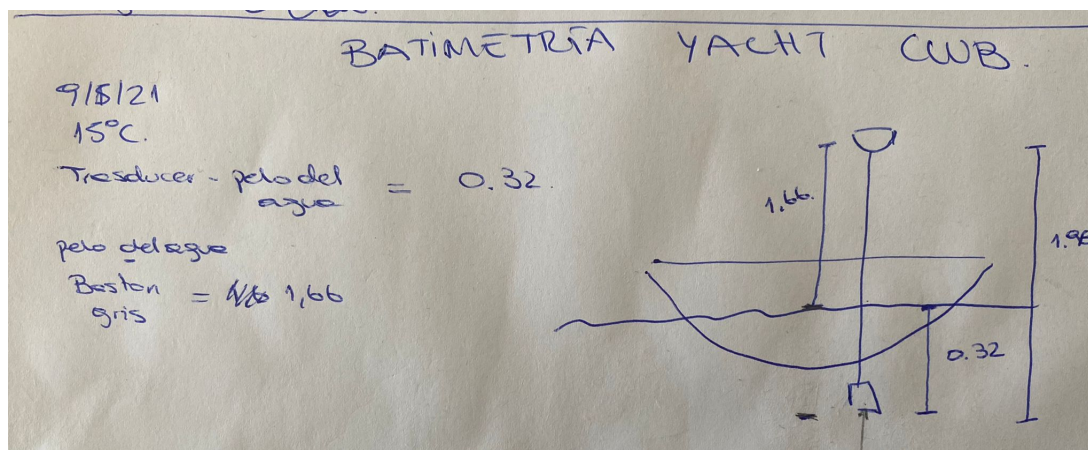
Antecedentes gráficos

Se encontrarán cartas náuticas utilizadas como antecedentes en el CD entregado al tribunal.

Datos crudos

Se encontrarán los datos crudos del relevamiento en el Puerto del Buceo efectuado en Mayo 2021, en el CD entregado al tribunal.

Notas durante el levantamiento



Comiento 10:27
9/5/21

Relo del agua

PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA	BAR CHECK
1	limo barro	real 10:20 web 10:17	0.42	16.9		0.87 -0.32 0.55	0.58	0.5 1 2 3 4 5
2	limo barro	10:47 web 10:47	0.42	19.1		2.15 -0.32 1.83	1.65	0.5 0.43/0.60 1.40 1 2 3 4 5
3	limo barro (barche dio marcha atras)	real 10:25 web 11:17	0.42	18.4		0.90 -0.32 0.58	0.60	0.5 1 2 3 4 5
4	barro arena zona de corriente	real 12:00 web 11:57	0.52	19.1		3.30 -0.32 2.98	3.40	0.5 1 2 3 4 5
5	zona de roca roca (habia presencia de limo) + corriente leve	real 12:15 web 12:07	0.53	19.3		1.60 -0.32 1.28	1.30	0.5 1 2 3 4 5
6	zona de arena	real 12:33 web 12:27	0.52	20.5		1.50 -0.32 1.18	1.25	0.5 1 2 3 4 5
7	limo y barro	real 12:48 web 12:47	0.52	20.8		1.53 -0.32 1.21	1.27	0.5 1 2 3 4 5

PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA	BAR CHECK
8	Lino Area	13:00	0,57	19,6		$\begin{array}{r} 9,07 \\ 0,22 \\ \hline 0,72 \end{array}$	0,69	0.5
								1
								2
								3
								4
								5
PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA	BAR CHECK
								0.5
								1
								2
								3
								4
								5
PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA	BAR CHECK
								0.5
								1
								2
								3
								4
								5
PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA	BAR CHECK
								0.5
								1
								2
								3
								4
								5
PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA	BAR CHECK
								0.5
								1
								2
								3
								4
								5
PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA	BAR CHECK
								0.5
								1
								2
								3
								4
								5
PC:	OBS.	HORA	MAREA	TEMP	MIRA	ESCANDALLO	ECOSONDA	BAR CHECK
								0.5
								1
								2
								3
								4
								5

Puerto Buceo - Registro de nivel agua, temperatura y humedad
(byACO)

DIA	HORA	NIVEL(mts)	TEMP (°C)	HUMEDAD (%)
09-05-2021	14:19:48	0.63	20.2	83.0
09-05-2021	14:09:48	0.64	20.0	> 90
09-05-2021	13:59:48	0.62	20.1	> 90
09-05-2021	13:49:48	0.58	20.0	> 90
09-05-2021	13:39:48	0.58	19.6	> 90
09-05-2021	13:29:48	0.59	19.5	> 90
09-05-2021	13:17:48	0.56	19.5	> 90
09-05-2021	13:07:48	0.52	19.2	> 90
09-05-2021	12:57:48	0.57	19.6	> 90
09-05-2021	12:47:48	0.52	20.8	> 90
09-05-2021	12:37:48	0.55	20.5	> 90
09-05-2021	12:27:47	0.52	19.6	> 90
09-05-2021	12:17:47	0.55	19.5	> 90
09-05-2021	12:07:47	0.53	19.3	> 90
09-05-2021	11:57:47	0.57	19.1	> 90
09-05-2021	11:47:46	0.49	20.0	> 90
09-05-2021	11:37:46	0.47	19.2	> 90
09-05-2021	11:27:46	0.42	19.0	> 90
09-05-2021	11:17:46	0.42	18.4	> 90
09-05-2021	11:07:46	0.50	18.9	> 90
09-05-2021	10:57:45	0.43	19.8	> 90
09-05-2021	10:47:45	0.42	19.1	> 90
09-05-2021	10:37:45	0.48	17.8	> 90
09-05-2021	10:27:45	0.45	16.2	> 90
09-05-2021	10:17:45	0.42	15.7	> 90
09-05-2021	10:07:44	0.44	15.7	> 90
09-05-2021	09:57:44	0.44	15.2	> 90
09-05-2021	09:47:44	0.46	14.8	> 90
09-05-2021	09:37:44	0.46	15.2	> 90
09-05-2021	09:27:44	0.48	17.2	> 90
09-05-2021	09:17:44	0.50	16.5	> 90
09-05-2021	09:07:43	0.48	17.3	> 90
09-05-2021	08:57:43	0.47	16.3	> 90
09-05-2021	08:47:43	0.51	14.5	> 90
09-05-2021	08:37:43	0.51	14.4	> 90
09-05-2021	08:25:43	0.53	13.7	> 90
09-05-2021	08:15:43	0.44	13.5	> 90
09-05-2021	08:05:43	0.51	13.6	> 90
09-05-2021	07:55:43	0.52	13.0	> 90
09-05-2021	07:45:43	0.53	12.4	> 90
09-05-2021	07:35:43	0.54	12.3	> 90
09-05-2021	07:25:43	0.51	12.2	> 90
09-05-2021	07:15:43	0.48	12.3	> 90
09-05-2021	07:05:43	0.45	12.3	> 90
09-05-2021	06:55:43	0.50	12.3	> 90
09-05-2021	06:45:43	0.44	12.4	> 90
09-05-2021	06:35:43	0.42	12.4	> 90
09-05-2021	06:25:43	0.42	12.4	> 90
09-05-2021	06:15:43	0.39	12.4	> 90

Bibliografía

- <https://sohma.armada.mil.uy/>
- <https://www.ycu.org.uy/1726/Inicio>
- BONILLA J. FORMOSO P. PERDOMO G. Tutor: FAURE J. Año 2019, Proyecto de Grado, Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería UDELAR, Modelo de transformación de alturas en el departamento de Maldonado.
- GORDIENKO S. WAINSTEIN M. Año 2017, Proyecto de Grado, Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería UDELAR, Análisis del cálculo de volumetría en una cantera a partir de relevamientos con tecnologías GNSS y UAV.
- POZZI C. NICORA F. Año 2020, Proyecto de Grado, Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería UDELAR, Combinación de tecnologías de medición y deformaciones introducidas por la Proyección Cartográfica UTM.
- PIEDRA-CUEVA I. TEIXEIRA L. FOSSATI M. SANTORO P. ALONSO R. MOSQUERA R. y SOLARI S. Año 2008, Informe Final, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería UDELAR, Especificaciones particulares para el estudio de readecuación del puerto deportivo del Buceo.
- BERNÉ J. ANQUELA A y GARRIDO N. Año 2016, GNSS-GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geomática, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- BALLESTERO M. GARCIA D. Año 2010, Proyecto Final de Carrera, Ingeniería Técnica Topográfica, Estudio Batimétrico con Ecosonda Multihaz y Clasificación de Fondos.
- Publicado por el BUREAU HIDROGRÁFICO NACIONAL, Año 2005, Organización Hidrográfica Internacional, Manual de Hidrografía.
- Publicado por el BORDEAU HIDROGRÁFICO NACIONAL, Año 2008, Normas de la OHI para los Levantamientos Hidrográficos, Publicación Especial N44.
- FELICÍSIMO, Angel M. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales.

- Depto. de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad Politécnica de Valencia, La triangulación de Delaunay aplicada a modelos digitales de terreno.

- BENAVIDEZ SOSA, A. Año 2004, Fundamentos de Geodesia Física.

Posibles líneas de investigación futuras

- Estudio y análisis ecosondas de doble frecuencia.
- Error asociado a la determinación del volumen.

Índice de figuras

1.	Esquema de alturas.	13
2.	Método de bisección.	37
3.	Escandallo con forma troncocónica.	41
4.	Geometría de mediciones LIDAR. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	42
5.	Batimetria Satelital <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	43
6.	Principio de Refracción. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	46
7.	Comportamiento de la embarcación. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	47
8.	Cobertura del haz en función del ancho del mismo. <i>Fuente: Presentación SOHMA</i>	48
9.	Cobertura de haz simple. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	49
10.	Ancho de barrido ecosonda multihaz. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i> . . .	50
11.	Levantamiento efectuado con ecosonda multihaz. <i>Fuente: Presentación SOHMA</i>	51
12.	Imagen representativa del ecosonda monohaz. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	52
13.	Onda acústica reflejada desde el fondo marino. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	52
14.	Levantamiento efectuado con ecosonda simple haz y multi haz. <i>Fuente: Presentación SOHMA</i>	53
15.	Simulación de líneas de levantamiento. <i>Fuente: Presentación SOHMA.</i> .	61
16.	Representación de accidentes naturales y artificiales. <i>Fuente: Presentación SOHMA.</i>	62
17.	Efecto del ancho del haz y de la inclinación de la embarcación en el posicionamiento. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	64
18.	Efecto del ancho del haz y de la inclinación del fondo marino en la medición de la profundidad. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	66
19.	Efecto del ancho del haz y de la inclinación de la embarcación en la medición de la profundidad. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	67
20.	Filtrado manual de bandeo. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	68
21.	Ejemplo eco falso.	69
22.	Ecograma de ecosonda de doble frecuencia. <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	70

23.	Logo institucional Yacht Club Uruguayo.	73
24.	Zona destinada al levantamiento hidrográfico.	73
25.	Instrumental GNSS-Trimble R8s.	74
26.	Ecosonda y batería empleados.	75
27.	Transductor utilizado.	76
28.	Controladora utilizada.	76
29.	Escandallo.	77
30.	Embarcación utilizada para el levantamiento.	78
31.	Zonas diferenciadas según su fondo.	79
32.	Planilla de apoyo para el levantamiento	79
33.	Líneas de navegación planificadas	80
34.	Medidas del instrumental efectuadas en campo.	88
35.	Bastón con antena GNSS amarrada a la embarcación, transductor su- mergido y ecosonda conectada.	89
36.	Levantamiento final, visualizado en la controladora.	90
37.	Requerimientos de exactitud de profundidad mínima para Orden Espe- cial, 1er Orden y 2da Orden (S-44). <i>Fuente: Normas de la OHI.</i>	91
38.	Datos crudos, unidades en metros. <i>Ver datos completos en anexo.</i> . . .	92
39.	Punto común para referir elevaciones al Cero Wharton, unidades en metros.	93
40.	Corrección de datos crudos, unidades en metros.	93
41.	Levantamiento batimétrico ejecutado.	94
42.	Curva de nivel sin suavizar / curva de nivel suavizada	98
43.	Zona de marinas y boca del puerto con relevamiento sin depurar. . . .	100
44.	Grilla de puntos empleados.	106
45.	Modelo de diferencias de elevaciones.	108
46.	Ejemplo de línea de navegación con puntos depurados.	109
47.	Levantamiento efectuado por SOHMA, Diciembre 2020.	110
48.	Estudio de sedimentación/aterramiento. <i>Fuente: Análisis de la dinámica sedimentológica del Puerto, IMFIA.</i>	111

49. Modelo de comparación superficies 1 y 3. 112