

UNIVERSIDAD DE LA DEFENSA NACIONAL

Facultad de la Armada

Escuela de Ciencias del Mar



Tesina de Licenciatura en Cartografía

**“LEVANTAMIENTOS BATIMETRICOS MEDIANTE EL
USO DE SISTEMAS GNSS / RTK DE ALTA PRECISION”**

Autor: Bachiller Universitario en Cartografía Gustavo Alfredo Vera

**Directores de Tesina: Ing. Enrique Eduardo D’Onofrio
Lic. María Florencia de Azkue**

Julio 2021

INDICE

Capítulo 1 – Introducción	1
1.1 Situación actual	2
1.2 Problema de estudio, objetivos	3
1.3 Organización de la Tesina	5
Capítulo 2 – Carta Náutica	7
2.1 Hidrografía – Generalidades	7
2.2 Recopilación de datos hidrográficos	9
2.3 Las nuevas cartas digitales	12
Capítulo 3 – GNSS Conceptos Básicos	18
3.1 Qué son los sistemas GNSS	18
3.2 La estructura de las señales	21
3.3 Cómo funcionan los sistemas GNSS	24
3.4 GNSS Diferencial o relativo (DGNSS)	31
3.5 Diferencial Postproceso vs. Diferencial en Tiempo Real	36
3.6 La altimetría con GNSS	40
Capítulo 4 – Medición de la Profundidad	44
4.1 Orígenes y Conceptos	44
4.2 Instrumentos (Ecosondas Monohaz, Multihaz)	45
4.3. Propagación del sonido en el agua	55
4.4 Calibración de la ecosonda	59
4.5 Fuentes de error y ajustes en la medición de la profundidad	62
4.6 Dinámica de la embarcación	70
4.7 Incertidumbres en la medición de la profundidad y cómo interviene el GNSS RTK	76
Capítulo 5 – Las Mareas	78
5.1 Dinámica oceánica	78
5.2 Régimen de Marea	84

Capítulo 6 – GNSS RTK en hidrografía	89
6.1 Introducción	89
6.2 Datum vertical hidrográfico	91
6.3 Separación Elipsoide – NRS	94
6.4 Reducción de sondajes con Marea RTK	99
Capítulo 7 – Batimetría RTK – Datos	103
7.1 Resumen del trabajo de campo	103
7.2 Cálculo de la separación elipsoide WGS84 – NRS para la Dársena Norte del Puerto de Buenos Aires	105
7.3 Batimetría con Marea RTK en Dársena Norte	114
7.4 Procesamiento y análisis de resultados	124
Capítulo 8 – Discusión y Conclusiones	133
Bibliografía	140
Lista de acrónimos	146
Lista de figuras	150

Capítulo 1 - Introducción

Las cartas náuticas representan a escala una porción de territorio ocupado en su mayor parte por agua, con información vital para la navegación segura. Parte fundamental de la información incluida en estas, es la topografía del lecho submarino representada gráficamente mediante colores, curvas batimétricas y profundidades en puntos discretos conocidos como sondajes.

El conjunto de estos elementos y rasgos de representación cartográfica, por convención indican la distancia mínima al fondo, la cual se da en una circunstancia en particular: durante la marea astronómica más baja posible en la zona. Por lo tanto, para lograr la correcta representación de las profundidades en una carta, estas deben estar relacionadas a un plano de referencia llamado Nivel de Reducción de Sondajes (NRS), definido a partir de observaciones de marea, por lo que coincide con el datum de marea local (OHI, 2008).

Las mareas, las olas y otros efectos locales cambian constantemente el nivel del agua, haciendo que una batimetría precisa del fondo, desde una embarcación con GPS y ecosonda, sea una tarea algo más compleja de realizar comparada con un levantamiento topográfico clásico, requiriendo de sensores y observaciones complementarias para la compensación de dichos movimientos.

Tradicionalmente, la corrección de los sondajes se logra midiendo simultáneamente la marea y el oleaje durante la ejecución del levantamiento hidrográfico. En la práctica el oleaje y la marea se miden en forma separada. Usualmente también ocurre que la marea se observa en un sitio cercano pero diferente al lugar del levantamiento. No obstante, es sabido que el oleaje, la marea y otros efectos propios de la dinámica de la embarcación durante la navegación, como también ondas locales temporales que pudieran existir creadas por ejemplo por una embarcación de gran porte, no son movimientos que actúan separados y que combinados generan el verdadero nivel del agua en cada instante en el sitio de levantamiento. Esto es algo que un mareógrafo y un compensador de olas por sí solos no son capaces de registrar. Medir estas correcciones por separado y luego combinarlas en un post procesamiento puede generar incertidumbres adicionales (Scarfe, 2002).

Sin embargo, la medición de una corrección total para el nivel del agua utilizando tecnología GNSS (del inglés Global Navigation Satellite System) mediante el método RTK (del inglés Real Time Kinematic) cuya principal ventaja es obtener coordenadas 3D con precisión de pocos centímetros a tiempo real, se considera una manera más precisa, práctica y efectiva de resolver este problema, lo que la llevó a ser una técnica de campo ampliamente adoptada por los Servicios Hidrográficos, organismos y empresas privadas en el mundo.

Los sistemas GNSS RTK son instrumentos de medición satelital muy precisos que basan sus cálculos en un sistema de referencia geodésico mundial, apoyado en el elipsoide WGS84. Es decir, los cálculos entregan principalmente coordenadas geodésicas expresadas en latitud, longitud y altura elipsoidal. Sabiendo que el elipsoide es un modelo de representación matemática de la forma y dimensión de la Tierra y que las alturas referidas al mismo no se corresponden con las alturas referidas al NRS, es que los sistemas GNSS RTK para su uso en hidrografía deben ser complementados con un estudio previo de la zona de relevamiento. Esta labor complementaria debe enfocarse en establecer la correspondencia que existe entre cada NRS y el Elipsoide WGS84. Varios países del mundo ya están trabajando en la determinación de un modelo de corrección altimétrico basado en este requerimiento y están logrando definir esta relación a lo largo del litoral marítimo con modelos altimétricos. Así por ejemplo se pueden nombrar al VDATUM en los Estados Unidos (Myers et al. 2005), al AUSHYDROID en Australia (Martin et al. 2004), a los modelos BLAST para el Mar del Norte (Slobbe et al. 2013) y VORF para el Reino Unido (Iliffe et al. 2007), entre otros.

1.1 Situación actual

El estado del arte en levantamientos hidrográficos está dado por los sistemas GNSS RTK, donde es imprescindible conocer la distancia que separa al elipsoide WGS84 de los diferentes NRS o ceros hidrográficos a los que se referencian tanto los sondeos de las cartas náuticas como las tablas de marea.

La Argentina, habiendo adoptado el criterio LAT (del inglés Lowest Astronomical Tide) para definir los NRS y datums de marea, actualmente cuenta con datos y estudios que al momento no han sido aplicados plenamente para modelar la relación entre el elipsoide WGS84 con los diferentes NRS de aplicación local en las vastas regiones del litoral marítimo y vías navegables fluviales.

De la investigación previa realizada para elaborar esta tesina, surgió que, en el país solo unas pocas empresas privadas dedicadas a obras de ingeniería, de construcción marina y dragados están aplicando, con datos observados por ellas mismas, modelos locales de corrección de marea por GNSS RTK, método conocido como RTK Tide o Marea RTK. Cabe destacar que los softwares de posicionamiento y navegación actuales para hidrografía y control de dragado cuentan con las herramientas y los algoritmos necesarios para determinar, calcular y aplicar esta corrección a tiempo real durante la navegación, reduciendo significativamente el post proceso de datos en gabinete y en consecuencia minimizando los errores resultantes de dicho proceso, con un beneficio directo sobre la productividad y calidad de la información obtenida. Pero no en todos los casos las batimetrías resultan correctamente referidas a los NRS, ya que Argentina todavía no cuenta con un modelo de la distancia entre el elipsoide WGS84 y los NRS.

1.2 Problema de estudio, objetivos

Los métodos de captura de datos para hidrografía han evolucionado mucho en los últimos 25 años de la mano del avance tecnológico en instrumentos de medición, técnicas y softwares, y han llegado a un nivel de eficiencia sin precedentes. Es importante y necesario para los organismos hidrográficos encargados de generar material cartográfico a nivel mundial, adecuar a estos tiempos sus técnicas y materiales siguiendo estos avances con el propósito de mantener los más altos estándares internacionales, optimizando recursos, tiempos y calidad en los productos que generan.

El objetivo de esta tesina es exponer los conocimientos teórico-prácticos relacionados con la técnica de levantamientos hidrográficos mediante sistemas GNSS con tecnología RTK aplicando el método de corrección de marea RTK Tide. Además, se realiza un análisis comparativo entre levantamientos batimétricos efectuado con la nueva tecnología RTK Tide, con los realizados utilizando los métodos tradicionales aplicados en la actualidad. Cuando se determina la altura del pelo de agua en el lugar e instante exacto de la toma de datos, se puede incrementar la precisión del cálculo de reducción de sondajes, resultando en una batimetría de mejor calidad y con una reducción significativa de tiempos y costo de operación en el campo. Este método RTK Tide, es aplicable tanto para relevamientos con sondas monohaz como multihaz, aunque estas últimas requieren de una inversión mucho mayor en instrumental, pero con la ventaja de resultados con mayor cobertura y grado de detalle ya que registran datos del 100% del fondo marino.

Para realizar la batimetría será preciso establecer los elementos que participan en la misma, los cuidados que deben tenerse, entender la dinámica del agua y el comportamiento dinámico de la embarcación, la calibración de los instrumentos y cómo este conjunto de factores afecta al levantamiento. Sin ser menos relevante que lo anterior, se debe tener en cuenta la determinación de la relación NRS-elipsoide WGS84, además de disponer de un modelo de corrección altimétrico que permita la compensación de altura del nivel del agua resultante de la marea, el oleaje, la dinámica de la embarcación y ondas locales eventuales.

Como objetivo secundario se pretende establecer un punto de inicio que sirva de referencia a otras investigaciones más extensas, para determinar las relaciones elipsoide WGS84 - NRS a lo largo del litoral marítimo y vía fluvial navegable de nuestro país, que permita la adopción de esta técnica, tan utilizada en otras partes de mundo.

Para lograr los objetivos de esta tesis se realiza un levantamiento hidrográfico en un sector del Puerto de Buenos Aires. Para ello se cuenta con el apoyo del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), quien provee una embarcación

con su tripulación, y de la empresa Runco S.A. que pone a disposición el instrumental y software ad hoc a utilizar en el levantamiento y procesamiento de la información de campo. Se destaca que esta tesina ha sido realizada en el marco del proyecto B-ESCM-0010/20 del Instituto Universitario Naval, radicado en la Unidad Académica Escuela de Ciencias del Mar. El título del mencionado proyecto es: Cálculo de la distancia entre los planos de reducción de sondajes y el elipsoide WGS84 para el sector comprendido entre los paralelos 33°S y 59°S y los meridianos 69°50'W y 52°30'W

1.3 Organización de la Tesina

Este trabajo está organizado en 7 capítulos además del presente, de carácter introductorio. En el Capítulo 2 se describen las generalidades de las cartas náuticas y específicamente la representación de las profundidades en estas. El Capítulo 3 contiene una descripción general e introductoria a los sistemas GNSS, características estructurales, las señales, métodos de procesamiento y posicionamiento, mientras que en el Capítulo 4 se aborda la problemática de la medición de la profundidad con ecosondas, las calibraciones y ajustes previos a la batimetría.

Dado que el tema principal de estudio es la determinación de la altura del nivel del agua con RTK y su aplicación en una batimetría, el Capítulo 5 está dedicado a una descripción de las mareas, sus causas, sus ondas componentes y regímenes, para comprender su influencia en los levantamientos hidrográficos. Luego, en el Capítulo 6 se aborda la temática específica de la aplicación de la técnica RTK Tide, el proceso de cálculo y la determinación de la relación entre el elipsoide WGS84 y los NRS.

En el Capítulo 7 se encuentra desarrollada una descripción completa de los procedimientos de campo de un levantamiento batimétrico realizado con la técnica RTK Tide y su procesamiento en gabinete. Se presentan los resultados obtenidos en la Dársena Norte del Puerto de Buenos Aires durante el mes de diciembre de 2019. Estos resultados se comparan con los obtenidos en un

levantamiento tradicional, en la misma zona, utilizando reglas de marea e información de una estación mareográfica del SHN. En el Capítulo 8 se elaboran las conclusiones a partir del análisis de los resultados obtenidos de la batimetría por RTK Tide y su comparación con el método tradicional de levantamiento hidrográfico. Finalmente se presenta la Bibliografía citada en esta Tesina.

Capítulo 2 – Carta Náutica

2.1 – Hidrografía – Generalidades

Según la Organización Hidrográfica Internacional (OHI), la hidrografía es “esa rama de las ciencias aplicadas que se ocupa de la medición y descripción de las características de los mares y áreas costeras con el propósito principal de navegación y todos los demás fines marinos y actividades, entre las que se incluyen, entre otros, actividades offshore, investigación, protección del medio ambiente y servicios de predicción” (OHI, 2010).

Es así como la hidrografía ha sido desde su nacimiento, la ciencia de la Tierra que integra el conocimiento de los mares, ríos, superficies lacustres y cursos de agua, con el objetivo principal de estudiar y proporcionar información orientada entre otras a la seguridad en la navegación, a partir de conocimientos básicos de los cuerpos de agua, las características del lecho y las costas, así como el comportamiento y la dinámica del agua que en ellos ocurren como las corrientes y las mareas. Es innegable la importancia que la hidrografía tiene para abordar adecuadamente estudios de áreas de operación segura para el transporte y comercio, para el control del tráfico marítimo, zonas costeras, administración y explotación de recursos marinos, ingeniería e infraestructura marina, obras portuarias y protección del medio ambiente (OHI, 2005).

Es el Servicio Hidrográfico de cada país, el principal organismo responsable de generar esta información a través de la recopilación de datos en la costa y en el mar y ríos; producir y difundir información en apoyo de la seguridad de la navegación marina y la preservación, defensa y explotación de recursos en el ambiente marino.

Uno de los principales productos generados a partir de levantamientos y estudios hidrográficos es la carta náutica, la cual es una representación a escala de una región ocupada por agua, los puertos, las costas, puntos notables de estas, la topografía y la localización de ayudas a la navegación (faros, balizas, boyas, etc.). En lo que respecta a la porción cubierta de agua, la carta náutica

debe mostrar las corrientes, las obstrucciones, los potenciales peligros a la navegación, la naturaleza y la topografía del fondo representado por zonas coloreadas, isobatas (líneas curvas que unen puntos de igual profundidad) y los sondeos que representan la profundidad en metros y decímetros en cada punto medidos desde el cero de la carta (coincidente con las bajamares más bajas).

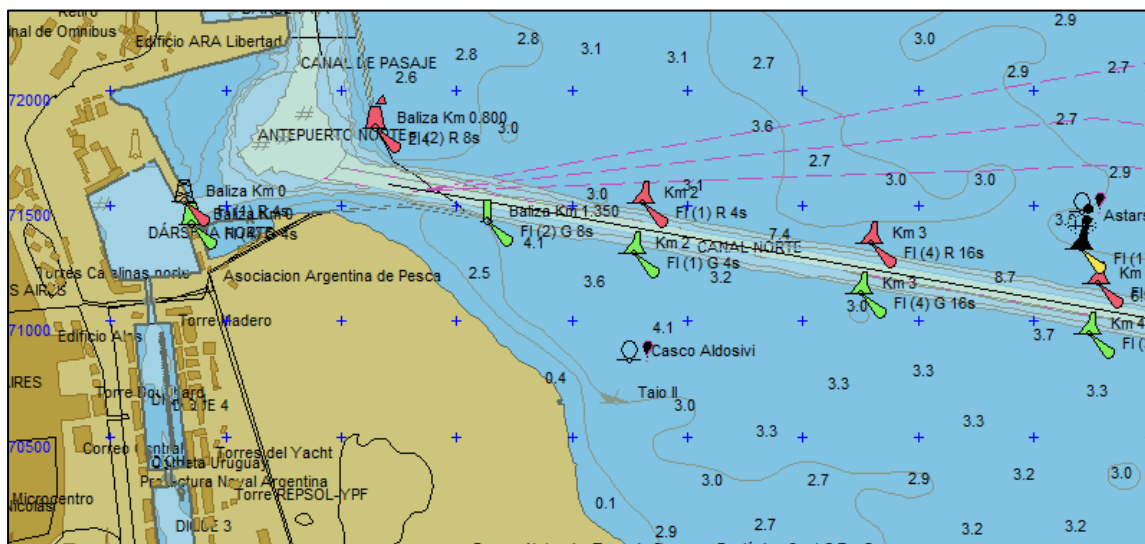


Figura 2.1.1 - Sector de carta náutica electrónica ENC formato S-57 del Puerto de Buenos Aires.

Fuente: Servicio de Hidrografía Naval – Carta AR401560

Las cartas náuticas constituyen un elemento de vital importancia a bordo de toda embarcación, aunque no el único, para navegar en zonas conocidas o desconocidas en forma segura. Estas son necesarias para la navegación segura a través de las aguas de un país y costas cercanas y para la entrada en sus puertos. Muchas áreas y puertos en el mundo no tienen una adecuada cobertura de sus cartas náuticas. La falta de cartas náuticas adecuadas impide el desarrollo del comercio marítimo en las aguas y puertos de las naciones involucradas. La industria naviera necesita eficiencia y seguridad. Áreas cartografiadas pobremente y la carencia de información pueden hacer que los viajes sean más largos de lo necesario, y hasta pueden impedir el cargamento óptimo de naves, aumentando así los costos. El ahorro de tiempo y de dinero que resulta del uso de rutas más cortas y profundas y del uso de naves más grandes o cargueros de gran calado pueden representar importantes ingresos económicos para la industria y el comercio nacional (OHI, 2005).

Las cartas náuticas y/o levantamientos hidrográficos son necesarios para la administración de las zonas costeras. Esto incluye la provisión de información batimétrica para la construcción de nuevos puertos y el mantenimiento y el desarrollo de los ya existentes, realización de operaciones de dragado de canales, estudios de la erosión costera.

También la información batimétrica es imprescindible para la explotación de recursos minerales e hidrocarburos. Las áreas sedimentarias de costa y costa afuera pueden contener depósitos minerales, en particular hidrocarburos, que requieren levantamientos adecuados para ser identificados. Si se confirma la existencia de hidrocarburos, ello conducirá a los países costeros a llevar a cabo el desarrollo de la producción de hidrocarburos, lo cual implica la interpretación de la morfología del fondo marino, la seguridad en la navegación para el transporte de esta carga peligrosa; la seguridad de las plataformas costa afuera y lo relacionado con los sistemas de transmisión en el fondo del mar, colocación de oleoductos y a la construcción de pozos de producción (OHI, 2005).

2.2 Recopilación de datos hidrográficos

El conjunto de datos necesarios para confeccionar una carta náutica proviene de diversas fuentes entre ellas levantamientos topográficos, levantamientos batimétricos, imágenes satelitales, fotogrametría aérea, observaciones del nivel del agua, estudios geofísicos y oceanográficos. Es notorio que, con el avance de la tecnología, las técnicas de posicionamiento han mejorado sustancialmente, así como los procesos de adquisición de datos hidrográficos, especialmente las batimetrías necesarias para la determinación de profundidades y su ubicación en el plano.

Los sistemas de posicionamiento satelital - como GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou - han relegado a otros métodos más antiguos, por ejemplo, la triangulación con teodolitos desde la costa. También el desarrollo de sondas acústicas digitales monohaz y multihaz han reemplazado el uso de sondas analógicas monohaz y mecánicas como el escandallo. Es así como en las

últimas décadas con las mejoras que ha tenido el GPS en las técnicas posicionamiento y la optimización de los algoritmos de cálculo de posición especialmente en 3 dimensiones, se ha logrado desarrollar un procedimiento para relacionar la altura obtenida por GPS con una corrección del nivel del pelo de agua a tiempo real, como método alternativo al uso de hidrómetros y mareógrafos tradicionales instalados en la costa, muchas veces alejados de la zona de levantamiento.

La determinación de las profundidades es una de las tareas más complejas, aunque fundamental para la confección de planos batimétricos y cartas náuticas. La profundidad por definición es la distancia vertical que existe entre el lecho (fondo) y el pelo de agua en un punto dado. Pero esa distancia no es un valor constante en el tiempo ya que se ve afectada por una realidad física que es que las grandes masas de agua en el planeta se encuentran en constante movimiento, afectadas por diversos factores y fuerzas que influyen en su equilibrio estático, como son las mareas, el oleaje, las corrientes y la meteorología (viento y presión atmosférica), entre otros.

Sumado a esto, la medición de la distancia al fondo se debe realizar en forma remota con una sonda y desde una plataforma en movimiento, una embarcación propulsada, que no se encuentra estática y estable durante la medición, como ocurre con un instrumento topográfico montado en un trípode sobre el terreno. Muy por el contrario, la embarcación se ve afectada por una serie de movimientos propios de la acción de navegar, que introducen errores en las mediciones. Estos movimientos asociados a la dinámica del buque son el cabeceo, el rolido, el movimiento oscilación vertical conocido como "Heave" producido por las olas y variaciones de calado función de la velocidad del movimiento y la profundidad de la zona conocidos como "Squat" y "Settlement", que serán abordados más adelante en este trabajo.

La sumatoria de todos estos efectos hacen que una batimetría sea una tarea ciertamente compleja que implica correcciones y compensaciones a los datos crudos, algunas aplicadas a tiempo real con diversos sensores de movimiento abordado (compensador de olas, compensador triaxial, posicionador

inercial o IMU - Inertial Measurement Unit) y otras en un procesamiento posterior de los datos con la ayuda de información complementaria y software de gabinete.

La representación de las profundidades como se dijo anteriormente, ya sea mediante líneas de igual profundidad (isobatas) o por números indicando la profundidad en un punto (sondaje), es lógicamente la información más importante que contiene una carta náutica ya que representan la topografía del fondo marino, la cual no se puede ver y es de vital importancia para la seguridad al navegar. Las profundidades en una carta por convención están dadas en valores que representan la mínima cantidad de agua que se encuentra en cada punto. Esto se da, generalmente en espacios marítimos, durante la marea más baja en condiciones meteorológicas normales y en cualquier condición astronómica, mientras que en ríos en condiciones de bajantes ordinarias. Como necesidad para cumplir con las recomendaciones de la OHI respecto a lo enunciado, se debe someter a los datos crudos levantados durante una batimetría a un proceso de ajuste llamado reducción de sondajes para poder transformar las profundidades observadas en un cierto momento con influencia de marea, a un nivel de referencia fijo y constante (Datum Vertical). Es así como las profundidades que brindan las cartas náuticas (Figura 2.2.1) se calculan como la distancia entre la topografía submarina y el Datum Vertical de origen o Nivel de Reducción de Sondajes (NRS) (Oreiro et al., 2015).

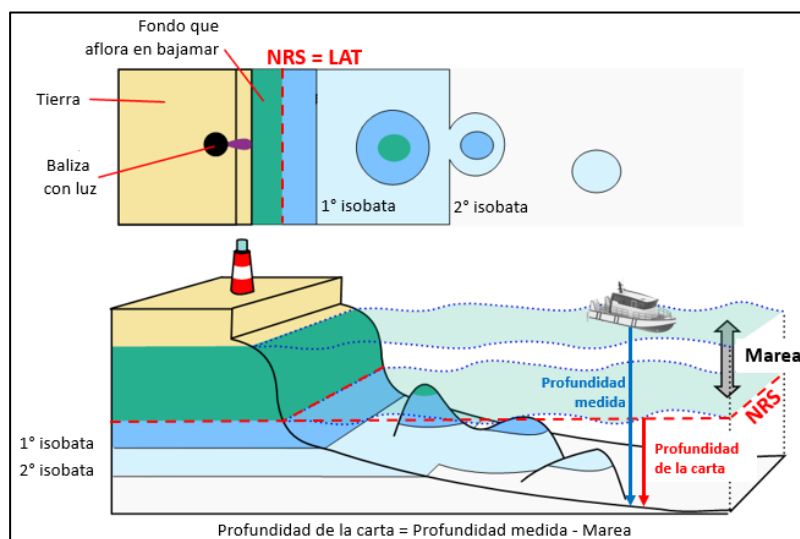


Figura 2.2.1 - El nivel de reducción de sondajes y profundidades en la carta náutica. Modificado de: by Mysid (original PNG by en:User:Mark.Murphy) - Self-made in Inkscape, based on en:Image:Nautical chart colour.PNG., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2580427>.

El esquema tridimensional ejemplifica el significado de las profundidades de la carta náutica. En este se muestra un sector donde se observan regiones de profundidades positivas (en color celeste y blanco) y profundidades negativas (en color verde) referidas al NRS el cual coincide con el LAT (del inglés Lowest Astronomical Tide) o marea astronómica más baja. Las últimas regiones (las negativas) quedan al descubierto en bajamar.

2.3 Las nuevas cartas digitales

Con el avance de la informática las cartas náuticas en papel están siendo reemplazadas por cartas digitales. Estas últimas a su vez se clasifican en cartas electrónicas (Electronic Nautical Chart, ENC) y cartas escaneadas o raster (Raster Nautical Chart, RNC).

Las RNCs son copias digitales de cartas de papel, realizadas conforme a la publicación especial S-61 de la OHI(1999) que se publican por o bajo la autoridad de un Servicio Hidrográfico Nacional.

Generalmente las RNC, producidas a partir del escaneo de las cartas papel oficiales, tienen un proceso de impresión multicolor. No existe un único formato aceptado para la presentación de las RNC. Los principales formatos son:

- BSB (utilizado entre otros por EEUU, Canadá, Cuba y Argentina), y
- HCRF (usado por Reino Unido, Australia y Nueva Zelanda).

La visualización de las RNCs está limitada a la misma resolución a la que fueron escaneadas. Una ampliación o reducción excesiva degrada notablemente la claridad de la imagen (Figura 2.3.1). Si el usuario desea ver una parte de la carta con más detalle, entonces se debería seleccionar una carta a mayor escala, igual que si fuera una carta de papel (OHI, 2017);

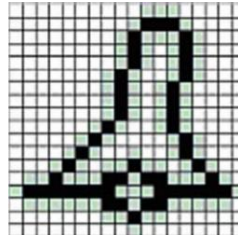


Figura 2.3.1 - Símbolo de una carta raster ampliado en exceso. Fuente OHI (2017)

La visualización de las RNCs se realiza con programas conocidos como RCDS (Raster Chart Display Systems). Cualquier orientación de la pantalla en los RCDS, excepto la de norte-arriba, puede afectar a la legibilidad del texto y símbolos de la carta. En algunos casos se pueden utilizar para visualizar las RNCs el software utilizado por las ENC que se conoce como Sistema de Visualización de Cartas Electrónicas (Electronic Chart Display and Information System, ECDIS).

Las RNCs incorporan una paleta de colores similar a los colores que usan las ENC para día / noche (Figura 2.3.2 y 2.3.3). Es obligatorio que un ECDIS que pueda utilizarse con las RCDS tenga la capacidad de proporcionar las paletas de colores apropiadas para las mismas. Las RNCs se usan como cartas individuales (no de forma continua como las ENCs). Sin embargo, el ECDIS puede cargar automáticamente las cartas adyacentes basándose en metadatos que se le proporcionen.

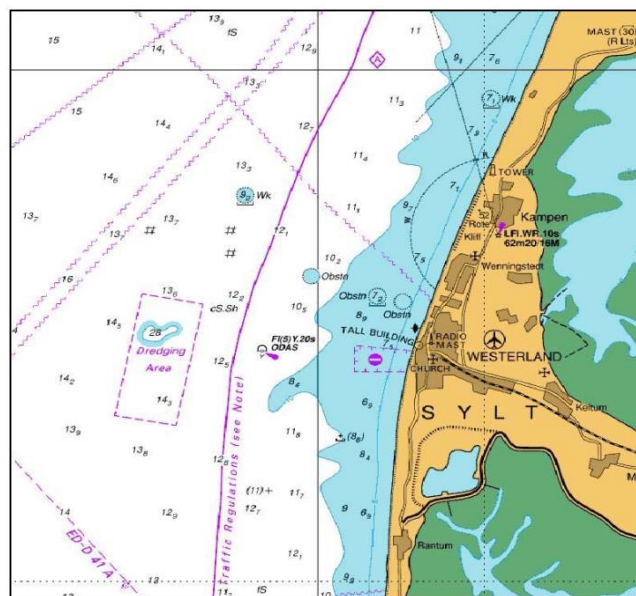


Figura 2.3.2 - Visión de un RNC de día. Fuente: OHI (2017).



Figura 2.3.3 - Visión de un RNC de noche. Fuente: OHI (2017).

Las RNCs pueden incluir metadatos significativos para permitir que un ECDIS haga el mayor uso de la imagen. Por ejemplo, en modo RCDS se puede acceder directamente a las notas de las cartas y a las tablas de mareas sin que el usuario tenga que seleccionar manualmente el área apropiada de la carta (OHI, 2017).

La imagen de una RNC mantiene el datum horizontal de la carta de papel de la que se haya derivado la RNC. Sin embargo, la georreferencia de la RNC puede incluir ajustes para acomodar el uso de GPS y del datum WGS84. Cuando se conozca la diferencia entre el datum horizontal local y WGS84, el ECDIS aplicará un ajuste automáticamente. Si no se conoce esta última diferencia entonces no es posible relacionar las posiciones del GPS y las de la RNC con exactitud (OHI, 2017).

Las ENC's son cartas vectoriales, compiladas a partir de una base de datos de objetos individuales georreferenciados, que proceden de los archivos de un Servicio Hidrográfico Nacional, incluyendo las cartas de papel existentes. Debido a las limitaciones de resolución y tamaño físico de los monitores de las computadoras personales, cuando se reproducen en un ECDIS, la imagen cartográfica generada a partir de las ENC's no imita plenamente la conocida

aparición de la carta de papel. Esta aparente desventaja se ve compensada por el hecho de que la ENC es una base de datos. Es decir, contienen información complementaria como datos de marea y de derroteros que permiten alertar de posibles peligros con relación a la posición y movimiento del buque (OHI, 2017).

Las cartas náuticas representan sólo una capa del sistema ECDIS, que en realidad se comporta como un Sistema de Información Geográfica (SIG), que permite al usuario disponer en pantalla no solo la información cartográfica, sino también combinarla con otros datos, como por ejemplo agregar las coordenadas de la derrota del buque. En el caso de un faro mostrado en la carta, el sistema también es capaz de exhibir la foto digital del faro e informar sobre sus características lumínicas, altura a la que se encuentra, datos de la torre que lo sostiene, etc. Un ECDIS integra la información cartográfica con el posicionamiento brindado por un Sistema de posicionamiento Global (GPS) y otros sensores utilizados en la navegación como el compás magnético y la sonda. Las Figuras 1.3.4 y 3.1.5 muestran dos pantallas de un ECDIS (OHI, 2017).



Figura 2.3.4 - Pantalla de un ECDIS, Presentación Estándar, día. Fuente: OHI (2017)



Figura 2.3.5 - Pantalla de un ECDIS, Presentación Estándar, noche. Fuente: OHI (2017)

Para obtener una estructura de datos eficiente que facilite la rápida presentación de datos ENC, el ECDIS necesita que el ENC en formato S-57 sea transformado a un formato interno llamado SENC (“ENC del Sistema”), que está optimizado para las rutinas de creación de imágenes cartográficas. A diferencia del formato uniforme y común de las ENCs, el formato SENC es exclusivo de cada fabricante de ECDIS.

Como la información del nivel del agua es fundamental para la utilización de la carta náutica, en la publicación OHI (2017a) se presentan distintas sugerencias para incorporar la información de mareas al ECDIS. Esta información se prefiere en forma de alturas horarias en lugar de las tradicionales pleamares y bajamares. El origen de las alturas del nivel del mar brindadas es un tema que actualmente está en discusión entre los países miembros de la OHI. Se proponen los siguientes orígenes: observaciones históricas, observaciones en tiempo real, alturas de predicciones astronómicas, alturas de predicciones utilizando redes neuronales y alturas de predicciones híbridas. Estas últimas

resultan de unir las metodologías de análisis armónico con la de redes neuronales (ver por ejemplo El-Diasty et al., 2018).

Tanto la OHI como la Organización Marítima Internacional (OMI) son las organizaciones encargadas de dictar las normas para la generación de cartas digitales y sistemas ECDIS. Los Servicios Hidrográficos son los que deciden si desean permitir que las ENC de sus aguas se distribuyan en formato SENC además de S-57. No todos los Servicios Hidrográficos permiten que sus ENC se distribuyan como SENCs.

Cada país marítimo, se encarga de confeccionar la cartografía de sus costas y puede considerarse que esto es además una forma de dar publicidad de las aguas que le pertenecen, siendo por esto y por otras razones legales y también económicas, por lo que son los organismos estatales los responsables de su confección, desde el levantamiento hasta su publicación final y las sucesivas correcciones y reediciones que correspondan para mantener actualizada la información (OHI, 2017).

Capítulo 3 – GNSS

3.1 – Qué son los sistemas GNSS?

Quienes dedican la vida a actividades profesionales como la hidrografía, la topografía, la cartografía y la geodesia entre otras relacionadas con las Ciencias de la Tierra, como también a la navegación comercial o deportiva, requieren soluciones a preguntas concretas tales como: ¿dónde estoy?, ¿dónde quiero ir? o ¿qué dirección debo tomar?

Los sistemas de navegación global por satélite o GNSS (Global Navigation Satellite Systems), han dado las respuestas con comprobada eficacia para estas aplicaciones e incluso se han impuesto como un estándar de la industria para resolver problemas que décadas atrás requerían gran cantidad de personal especializado con instrumental de topografía y la aplicación de métodos de captura de datos y cálculos muy complejos. Con el advenimiento de la tecnología de posicionamiento por satélite muchos de esos problemas pudieron ser resueltos con mayor rapidez, en forma simplificada y con gran precisión.

Si bien la idea nació en los Estados Unidos de América durante los años sesenta, el verdadero origen de estos sistemas se remonta a principios de la década del setenta, cuando los primeros satélites de navegación fueron puestos en servicio por el Departamento de Defensa de ese país. De esta manera se origina el sistema TRANSIT del cual se toman las primeras experiencias para desarrollar el sistema NAVSTAR, el hoy mundialmente conocido Sistema de Posicionamiento Global o GPS (Global Positioning System), el primero de los sistemas GNSS de los conocidos hasta hoy. Desde la introducción del sistema GPS, se ha facilitado más que nunca la fijación de nuevos estándares para la productividad y precisión, demostrando ser una de las herramientas más efectivas para innumerables aplicaciones que requieren posicionamiento instantáneo y preciso.

Al igual que los Estados Unidos de América, que ha logrado imponer a su sistema de navegación como el primero totalmente operacional, tanto para

aplicaciones militares como civiles, otros países, mediante sus agencias espaciales y consorcios de empresas han desarrollado sistemas similares y de cobertura global. Tal es el caso de GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) de la Federación Rusa, Galileo de la Comunidad Europea y el sistema BeiDou (también conocido como Compass) de la República Popular China. Otros países como Japón y la India también han desarrollado sus propios sistemas. En ambos casos, tanto el QZSS de Japón como el IRNSS de la India ofrecen solo una cobertura regional en sus respectivos países y por dicha característica, no serán considerados en adelante en este trabajo.

Los sistemas GNSS están basados en una constelación de satélites (entre 22 y 49 cada una), con relojes atómicos a bordo, orbitando a una gran altitud (entre 19.000km y 23.200km sobre la superficie de la Tierra). Cada uno de estos satélites transmite en forma continua señales sincronizadas, conteniendo información de posición y tiempo. Un receptor GNSS en tierra, mar o aire, recolecta esa información y compara simultáneamente datos de por lo menos 4 de ellos, obteniendo en forma instantánea la posición expresada en latitud, longitud y altitud en cualquier momento del día, los 365 días del año y sin importar las condiciones climáticas. Para lograr esto, el factor crítico es el tiempo y para medirlo de la forma más efectiva posible es que se ha dotado a cada receptor GNSS de un reloj de cuarzo de muy alta calidad para sincronizarse con la medida de tiempo utilizado por los satélites y así determinar su ubicación en el espacio tridimensional (3D). Es posible obtener posiciones con grados de exactitud que oscilan entre una decena de metros a unos pocos milímetros según las circunstancias, tipo de equipo y técnica empleados (Ferrario de Urriza, 2000).

El propósito principal por el cual los sistemas GPS, GLONASS y BeiDou fueron creados es el de proporcionar información de posicionamiento a las fuerzas armadas es decir su utilización primaria es estratégica militar. Sin embargo, Galileo fue un sistema pensado desde su concepción como una ayuda a la navegación y posicionamiento en general de uso civil. Dado el origen militar, del primero de los sistemas, el GPS, se hizo hincapié en la robustez, continuidad de servicio y en especial que fuera difícil de interferir. Esto convirtió al GPS en el sistema principal, muy confiable y resultó además útil para muchas aplicaciones

no necesariamente militares. Sus homólogos, tomaron ejemplo de esto diseñando sistemas muy robustos y confiables que hoy en conjunto, permiten trabajar en cualquier lugar del planeta con un nivel de redundancia de datos extraordinaria disponiendo de 20 a 40 satélites durante todo el día, dependiendo de las condiciones de cielo abierto del lugar.

Los sistemas GNSS son similares en sus conceptos básicos y todos ellos están integrados por tres bloques o “segmentos” fundamentales que interactúan entre sí.

Estos son:

- Segmento de Control
- Segmento Espacial
- Segmento de Usuarios

Segmento de Control: está constituido por estaciones de monitoreo terrestres ubicadas alrededor del planeta y cuyas funciones básicas son las de rastrear y monitorear el funcionamiento de los satélites en forma permanente como así también la de inyectarles ajustes y correcciones a los relojes atómicos a bordo y parámetros orbitales necesarios para asegurar la máxima precisión posible (Figura 3.1.1). Este segmento constituye el “centro neurálgico” de cada sistema.

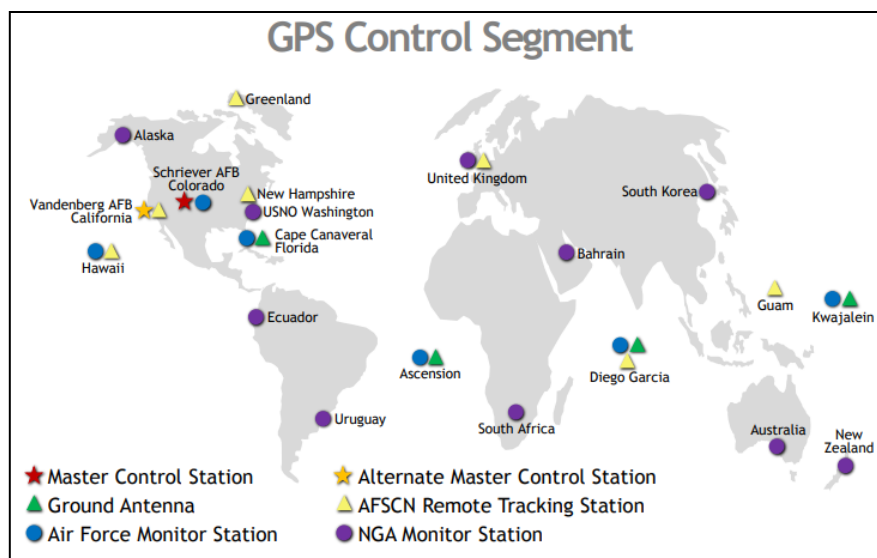


Figura 3.1.1. Estaciones que forman parte del Segmento de Control del sistema NAVSTAR - GPS (USA)

Fuente: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>.

Segmento Espacial: lo conforma la constelación de satélites, cada uno en una serie de planos orbitales muy bien calculados, cuya función principal es la materialización de una red de puntos de referencia en el espacio a partir de la cual los receptores GNSS obtienen información de posición y tiempo en cualquier sitio del planeta (Figura 3.1.2). Esto se logra a partir de la transmisión de señales que los receptores son capaces de rastrear, decodificar y utilizar para el cálculo de posición. El segmento espacial interactúa en forma bidireccional (envían y reciben datos y comandos) con el segmento de Control y de forma unidireccional con el segmento de Usuarios (envían información en una sola vía: satélite – receptor).

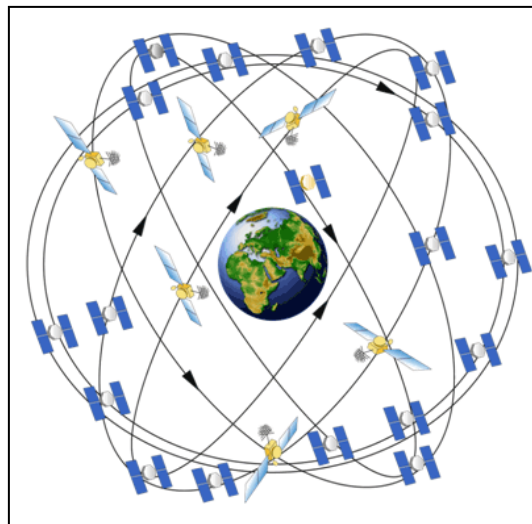


Figura 3.1.2 Constelaciones de satélites que conforman el Segmento Espacial

Fuente: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Space_Segment

Segmento Usuarios: está formado por todos los receptores disponibles en diferentes formatos y usos, al alcance de instituciones, empresas, profesionales e individuos en general, e incluyen tanto equipos receptores como software para posicionamiento orientado a las más diversas aplicaciones y usos prácticos, los que han alcanzado hoy en día límites inimaginables.

3.2 – La estructura de las señales

Uno de los principales temas que se debe abordar para comprender las técnicas de cálculo empleadas por los sistemas GNSS es la estructura de las señales emitidas desde los satélites.

Los satélites transmiten en forma permanente, señales electromagnéticas originadas a partir de relojes atómicos ultra precisos de Cesio, Rubidio e Hidrógeno con estabilidades de corto plazo (diario) de 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} de segundo. Estas señales incluyen 2 y 3 ondas portadoras (carrier phase), diferentes para cada sistema, todas dentro de la denominada Banda L, ubicadas en el espectro de frecuencias de las Microondas entre 1GHz y 2GHz (Figura 3.2.1).

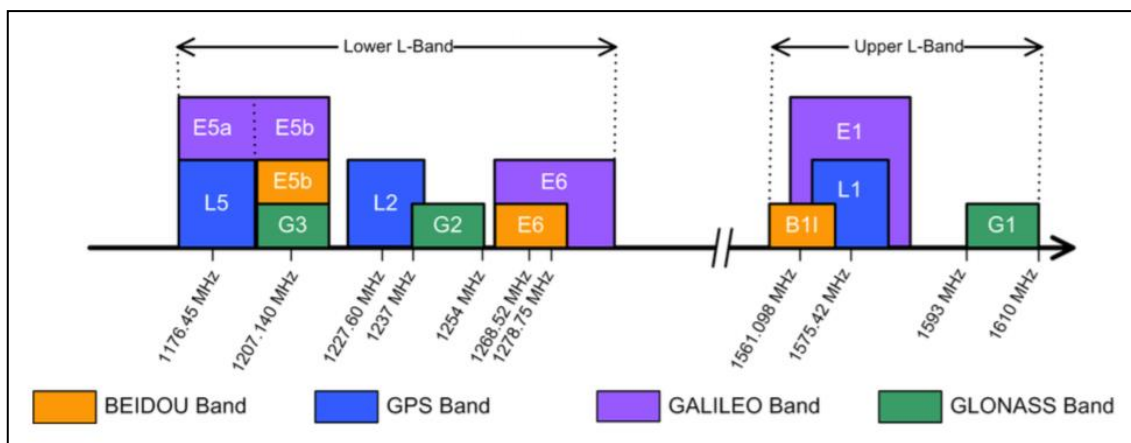


Figura 3.2.1 Distribución de las señales GNSS en la Banda L.

Fuente: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma203/1MA203_0e_BeiDouSWReceiver.pdf

Las ondas portadoras, se modulan con códigos pseudoaleatorios (Pseudo Random Code - PRC) como patrón de tiempo y en conjunto con ellos un mensaje de navegación. Existen a su vez formas diferentes de código pseudoaleatorio, algunos de uso civil y otros reservados para uso militar.

Estos códigos son una secuencia de pulsos digitales con un patrón muy complejo al punto tal que se asemejan mucho a un “ruido electromagnético aleatorio”. De allí su denominación de pseudoaleatorio. De esta manera cada satélite puede transmitir información utilizando las mismas frecuencias sin interferirse entre ellos (Hurn, 1989).

Por ejemplo, el código C/A de la constelación GPS (código de uso civil y acceso común), es transmitido en la portadora GPS L1, a una frecuencia de

1,023Mhz y posee una longitud de onda de unos 293 metros. Este código se repite, es decir completa su ciclo de transmisión, cada milisegundo.

Por su parte el código P también de GPS y que fuera en sus orígenes reservado para uso militar, se genera en ambas portadoras L1 y L2 a una frecuencia más alta (10,23Mhz) y posee una longitud de onda menor de alrededor de 29 metros completando su ciclo de repetición cada 266 días, 9 horas y 36 minutos (266,4 días).

El mensaje de navegación de GPS se incluye en todas las portadoras con un ciclo de transmisión de 12,5 minutos y a 50Hz de frecuencia, proporcionando datos fundamentales a los receptores referidos a:

- Parámetros orbitales precisos (ubicación) de cada satélite rastreado de la constelación referenciados al sistema geodésico WGS84 y la variación de estos en función del tiempo (efemérides)
- Parámetros orbitales aproximados de todos los satélites de la constelación para estimación de visibilidad en un tiempo dado (almanaque)
- Información acerca del estado de "salud" de cada componente del segmento espacial (satélites)
- Correcciones de reloj del satélite
- Modelo ionosférico utilizado por el sistema (para estimación de interferencias electromagnéticas sobre las ondas de radio transmitidas a través de la ionosfera)

El GPS, hace varios años que está experimentando cambios importantes en la estructura básica de la señal como parte de un proceso de modernización del sistema, con el objeto de adecuar las capacidades a los requerimientos actuales y mejorar las prestaciones especialmente en condiciones de difícil recepción como en sitios con importante presencia de obstrucciones (zonas de montaña, ejidos urbanos, arboledas de importante desarrollo y follaje denso). Como parte de este proceso se adicionaron nuevas señales diseñadas para uso civil y para permitir la interoperabilidad entre el GPS con los demás sistemas GNSS. De aquí

surgen la L1C (L1 C/A), L2C (L2 C/A) y la tercera frecuencia de GPS denominada L5 enfocada a satisfacer los requisitos específicos de seguridad en el transporte aéreo y otras aplicaciones de mayor exigencia respecto de la redundancia de datos. La frecuencia L5 se transmite en una banda de radio reservada para los servicios de seguridad en la aviación y aunque a la fecha de este trabajo, aún no fue declarada plenamente en operaciones, L5 proporcionará la señal de GPS de uso civil más avanzada y robusta del sistema, la que utilizada en combinación con L1C y L2C proporcionarán un posicionamiento de alta precisión más eficiente en ambientes con importante presencia de obstrucciones (Van Sickle, 2015).

3.3 – Cómo funcionan los sistemas GNSS?

Los principios básicos son realmente simples, aun cuando los sistemas utilizan la más alta tecnología desarrollada a la fecha. Para comprender el proceso de obtención de posición y tiempo utilizado por esta tecnología, se puede brindar una explicación con suficiente detalle y desde el punto de vista de usuarios del sistema, desarrollando los siguientes conceptos:

- 1) Un receptor GNSS mide la distancia que lo separa de cada satélite a la vista, a cada instante de tiempo, mientras lo mantiene en rastreo. En realidad, se denota a esta distancia como “pseudodistancia” por las razones que se explicarán más adelante.
- 2) Midiendo las pseudodistancias a un mínimo de 4 satélites simultáneamente y conociendo la ubicación de cada uno de ellos, un receptor puede calcular su posición en coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud). Este proceso se realiza mediante un cálculo trigonométrico conocido como trilateración,
- 3) Para calcular las pseudodistancias, es necesario medir el tiempo, utilizando relojes de muy alta precisión,

- 4) Como en toda medición, es necesario reconocer las fuentes de error, y determinar el método de corrección a utilizar según la aplicación,
- 5) Existen métodos de ajuste de errores. El posicionamiento diferencial o relativo es el más utilizado en aplicaciones que requieren una alta precisión

A continuación, se desarrollan los conceptos anteriores (Hurn, 1989):

1) Distancias.

La forma primaria que un receptor GNSS calcula la distancia que lo separa de un satélite, se apoya en que la distancia se puede obtener por el producto de la velocidad de la señal emitida por el tiempo empleado en la distancia recorrida. Sabiendo que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz ($C \approx 300.000 \text{ km/s}$) y que el receptor es capaz de medir el intervalo de tiempo empleado en el recorrido, es posible conocer la distancia entre la antena del receptor y el satélite.

La primera pregunta que debe plantearse entonces en este caso es: ¿Cómo se puede saber cuándo el satélite comienza a enviar las señales que se intentan cronometrar? Esa respuesta la proporciona el código pseudoaleatorio el cual es generado por los satélites y una réplica generada por el receptor en forma simultánea y sincronizada (a la misma hora). Luego todo lo que el receptor debe hacer, es comparar el código generado por el satélite, el cual lo recibe desfasado respecto a su réplica generada por el oscilador del receptor (Figura 3.3.1).

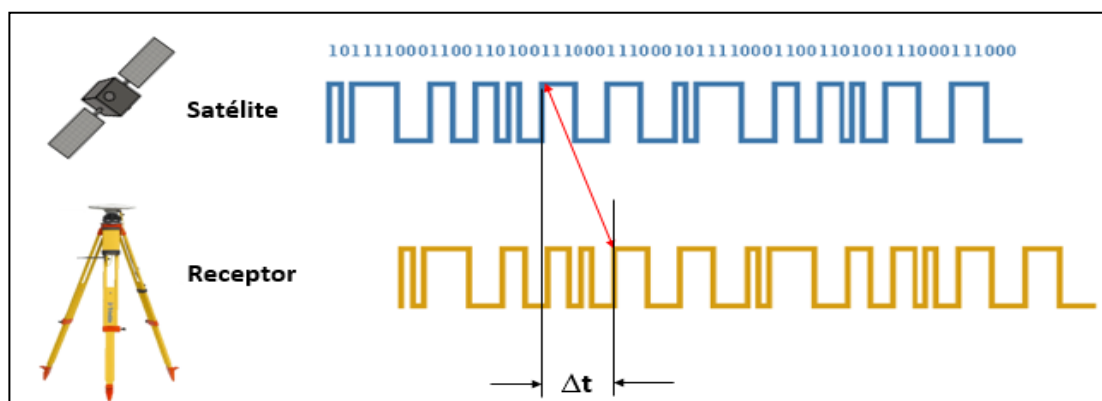


Figura 3.3.1 – Desfase aparente de códigos efecto de la distancia entre satélite y receptor.

Fuente: modificado de C/A code used to identify GPS
https://www.furuno.com/en/gnss/technical/tec_what_gps

Ese desfase representa el intervalo de tiempo (Δt) que la señal tardó en completar el recorrido que separa al satélite del receptor y con el cual se completa la ecuación de distancia para ese particular instante.

La distancia en realidad debe ser llamada pseudodistancia dado que lo que se mide, es una distancia aparente satélite-receptor que no ha sido corregida aún. Esta contiene errores originados en la sincronización de los relojes de ambos.

2) Trilateración.

La determinación de la posición del receptor en el espacio (3D) se realiza, como se explicó en el punto anterior, a partir de la determinación de distancias a cada satélite. De estos es necesario también saber dónde se encuentran en su órbita (coordenada del satélite) en el instante en que la medida es realizada. Con ese conjunto de datos y aplicando la trigonometría se obtiene una posición centrado en la antena del receptor GNSS, y es la intersección de las señales emitidas desde cada satélite a la vista. Esquemáticamente puede verse este concepto en la Figura 3.3.2 donde cada satélite es el centro de una esfera de radio igual a la distancia al receptor las que tomadas en conjunto se intersectan en un único punto en el espacio tridimensional (Hurn, 1989).

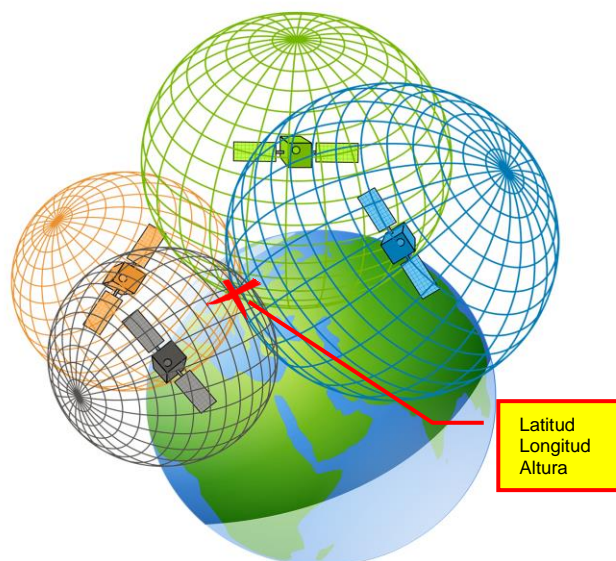


Figura 3.3.2 – Intersección de esferas de posición.

Fuente: <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>

3) Tiempo.

Anteriormente se explicó que tanto cada satélite como el receptor generan el mismo código en forma sincronizada. ¿Entonces, cómo es posible dicha sincronización cuando los satélites poseen relojes atómicos y los receptores de cristal de cuarzo? Si el reloj del receptor estuviera desfasado tan solo una milésima de segundo ($1/1.000s$) la distancia calculada podría diferir por más de 300 km de la verdadera.

Esa sincronización, se logra de manera bastante sencilla y consiste en realizar medidas de distancias a un mínimo de cuatro satélites. Recordando que para resolver nuestra ubicación es necesario determinar latitud, longitud y altitud es importante agregar que la medida efectuada al cuarto satélite puede también compensar una sincronización imperfecta de tiempo. Esto permite deducir que solo cuando al menos cuatro satélites son rastreados simultáneamente se pueden obtener mediciones precisas de posición y tiempo (Trimble, 2007).

4) Fuentes de Errores del sistema

Son muchas las fuentes de error que afectan a los sistemas de medición satelitales, por ello es muy importante saber individualizarlos y clasificarlos para saber cómo estos pueden ser compensados o minimizados.

Todo desvío del valor real de una medición es producido por una sumatoria de errores, algunos accidentales (aleatorios) y otros sistemáticos. Los GNSS no escapan de esta regla general.

Las principales fuentes de errores sistemáticos pueden ser divididas en aquellas originadas en los satélites, las ocasionadas durante la propagación de la señal y las generadas en los receptores utilizados. A continuación, se brinda una breve descripción de estas:

Errores sistemáticos dependientes del satélite:

- Efemérides o de órbitas: ~ 60cm
- Reloj del satélite: ~ 60cm

- Disponibilidad Selectiva (S/A-GPS): ~ 100m (si se encuentra activada). Se menciona, aunque desde 1999 esta fuente de error intencional ha sido desactivada por el gobierno de Estados Unidos de América en su sistema GPS.

Errores sistemáticos dependientes de la propagación de las ondas de radio:

- Retardo Ionosférico
- Retardo Troposférico

La suma de ambos resulta en una magnitud de error aproximado de 5 metros

Errores sistemáticos dependientes de los receptores y software

- Reloj del receptor: ~1 a 2m
- Error de desplazamiento del centro eléctrico de la antena (phase center) con respecto al centro mecánico (físico) de la misma: ~1 a 3mm
- Consideración de la velocidad de la luz como constante para el cálculo, situación que ocurre únicamente en el vacío, pero las señales al atravesar las diferentes capas de la atmósfera terrestre sufren un retardo especialmente en la ionosfera y la troposfera.

En el caso de los errores aleatorios (accidentales) se pueden mencionar los ocasionados por imprecisiones en la consideración de la altura de antena, errores de estación (ubicación de centrado del equipo sobre el punto a medir), el "multipath" o efecto de rebote de señal en estructuras cercanas (ej. árboles, edificaciones), ciclos de medición perdidos (saltos de ciclo o cycle slips).

Se debe destacar que la sumatoria de errores que aquí se mencionan se ve afectada además por las condiciones geométricas en que las mediciones son realizadas. Para ello existe un factor indicador de la calidad de una medida realizada que está relacionada con la disposición geométrica de los satélites visibles que intervienen en el de cálculo de posición. Ese factor es conocido como DOP (Dilution of Precision) o dilución de la precisión.

Para lograr la mejor precisión posible un receptor GNSS toma muy en cuenta este sutil principio geométrico y en base a este es que realiza una selección de los satélites a la vista mejor ubicados desde el punto de vista geométrico para efectuar los cálculos necesarios. Dependiendo de los ángulos relativos de los satélites en el espacio, la geometría puede aumentar o disminuir todas las incertidumbres mencionadas anteriormente (Figura 3.3.3). Por ello los receptores en general tienen, como parte de su software, rutinas y algoritmos que analizan las posiciones relativas de todos los satélites disponibles y eligen los de mejor ubicación relativa para reducir al máximo posible la incertidumbre en la medición. Los receptores más modernos aún más perfeccionados, calculan basándose en todos los satélites a la vista, minimizando completamente el efecto del DOP en las mediciones realizadas.

Existen diferentes factores DOP en relación con la componente de posición que afectan:

HDOP: Dilución en la componente horizontal (planimétrica)

VDOP: Dilución en la componente vertical (altimétrica)

PDOP: Dilución en la componente tridimensional (posición 3D)

TDOP: Dilución en la componente de tiempo

GDOP: Dilución en la componente geométrica (determinaciones conjuntas 3D)

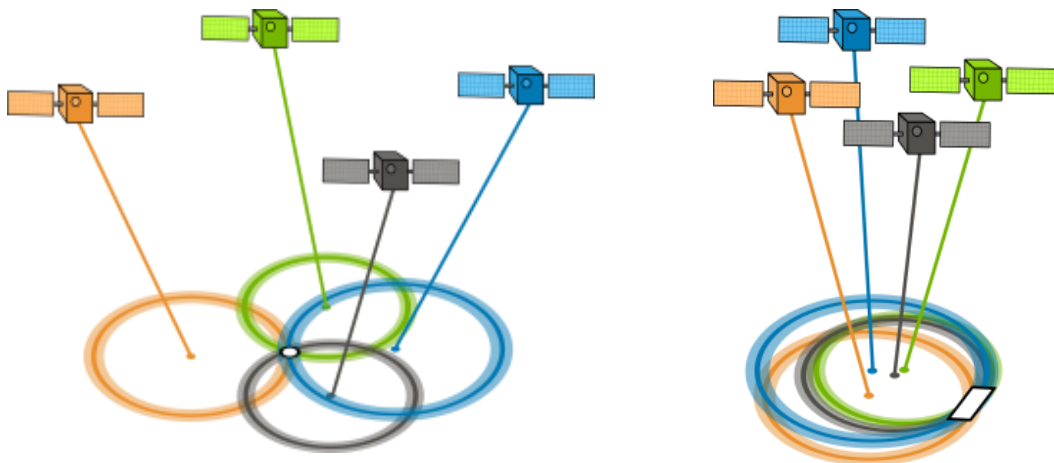


Figura 3.3.3 – A la izquierda: buen PDOP, área de incertidumbre reducida, buena Precisión. A la derecha: mal PDOP, geometría desfavorable aumentando el área de incertidumbre, Precisión resultante mala.

Fuente: <https://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath/>

El DOP es un número que relaciona el desvío estándar de una observación (σ_o) con el desvío estándar de la posición resultante (σ_p) (Huerta et al, 2005).

$$\sigma_p = \sigma_o \cdot \text{DOP}$$

A mayor valor DOP mayor es el error de posición por lo que constituye un factor “magnificador” de los errores y no un error en sí mismo.

5) Métodos de ajuste (modos de posicionamiento)

Los GNSS son los sistemas de navegación a nivel global más precisos y efectivos que jamás se hayan diseñado. Pero incluso su increíble precisión puede resultar insuficiente para ciertas aplicaciones que requieren de precisiones sub métricas o incluso mucho mejor llegando a centímetros o milímetros según la escala de trabajo y representación. De aquí podemos mencionar que para aplicaciones de navegación en general o posicionamiento expeditivo, solo con la utilización de un único receptor GNSS puede obtenerse posición en forma lo suficientemente rápida y con una precisión acorde (del orden de los 3 a 5 metros dependiendo de las condiciones de medición) para cumplir con éxito el objetivo. Se conoce comúnmente con el nombre de “posicionamiento autónomo” a este modo de uso de un receptor GNSS.

No es difícil pensar entonces que para aplicaciones que exigen mayor exactitud en los datos obtenidos para su representación en planos a escalas de detalle (1:25.000; 1:10.000; 1:5.000 o mayores) la resolución obtenida con un sistema autónomo resulta insuficiente por lo cual es necesario utilizar receptores más sofisticados y métodos rigurosos que permitan mitigar al máximo posible los errores del posicionamiento absoluto. Es así como se han desarrollado técnicas específicas que permiten la utilización de GNSS para diversas tareas que exigen muy alta precisión en las tres componentes de una coordenada.

3.4 – GNSS Diferencial o relativo (DGNSS)

El método de posicionamiento Diferencial o Relativo se pensó y desarrolló principalmente por la introducción de una perturbación intencional en el sistema GPS conocida como Disponibilidad Selectiva o S/A (Selective Availability), fuente de error muy significativa de magnitudes del orden de cientos de metros y de carácter variable en el tiempo, que fuera impuesta por el Departamento de Defensa de EE. UU. en la década del noventa, para restringir el uso del GPS en tiempos de guerra.

Este método, no solo permite eliminar la S/A, sino que también minimiza los errores sistemáticos consiguiendo resultados de mayor precisión, tanto que, según el tipo de receptor utilizado y los tiempos de observación, son acordes y funcionales para la hidrografía, topografía y geodesia. Es decir, pueden obtenerse resultados con errores residuales por debajo del metro hasta incluso unos pocos milímetros. Esto ha dotado a los sistemas satelitales de una gran aptitud para aplicaciones específicas como es el caso que se trata en este trabajo; la reducción de sondajes de una batimetría, mediante la altura obtenida por GNSS para determinar la marea in situ, sin el uso de un mareógrafo. Esto es una realidad, gracias a una sofisticada variante de la técnica diferencial, conocida como RTK (Real Time Kinematic) o Cinemático en Tiempo Real.

El fundamento del método diferencial radica en el hecho de que los errores de medición afectan de forma muy similar a cualquier receptor situado en un área relativamente amplia limitada solo por la visibilidad de los mismos satélites por parte de ellos. Es decir, los errores se pueden correlacionar entre receptores próximos que estén midiendo a los mismos satélites, lo que implica también que la observación debe ser simultánea y sincronizada.

Suponiendo el uso de 2 receptores GNSS y ubicando uno de ellos, fijo en una posición de coordenadas conocidas, se compara las mediciones de este último con los valores de coordenadas conocidas. Esos errores los obtiene comparando a cada instante de tiempo (lo que se conoce como época) sus propias determinaciones de coordenadas con las coordenadas conocidas,

establecidas como fijas. De esta comparación surgen vectores de error para cada época (ξ), que pueden almacenarse en un archivo para utilizarlos a posteriori o bien transmitirlos por telemetría (radios, telefonía, internet o vía satélite) como un mensaje de corrección a cualquier otro receptor que se encuentre en el área.

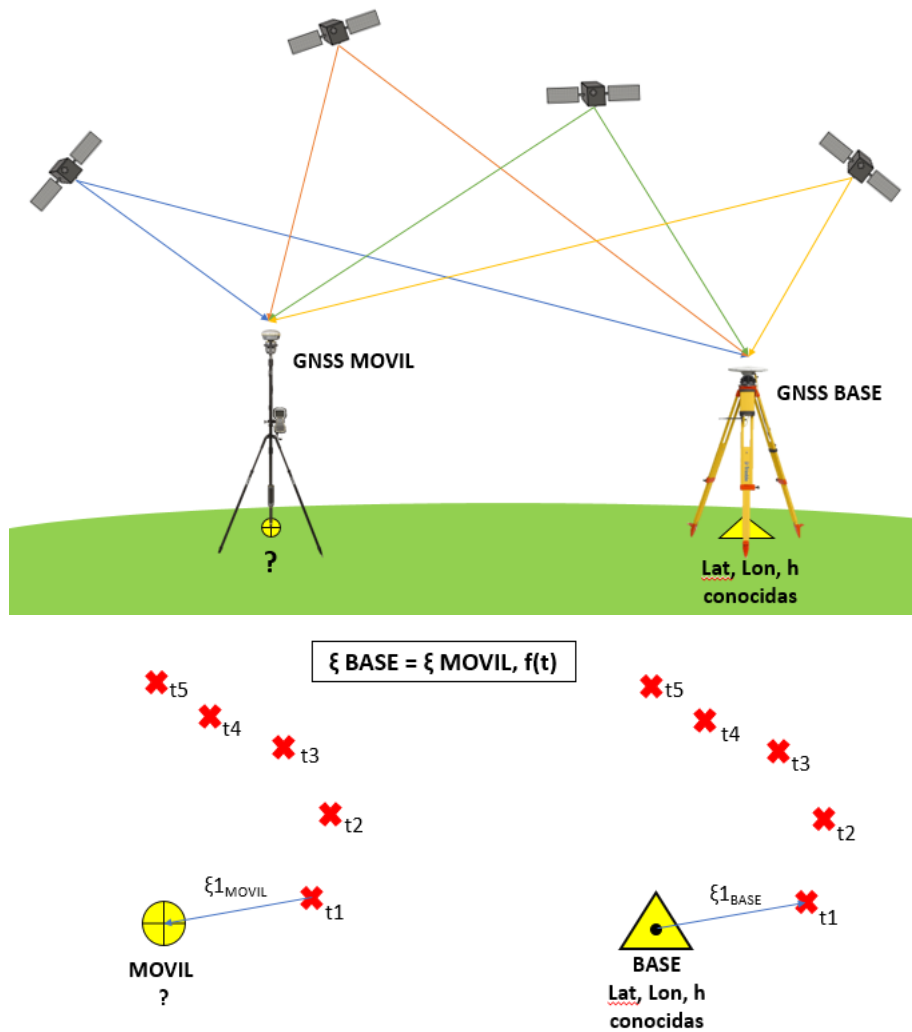


Figura 3.4.1 — Principio básico del Posicionamiento Diferencial

El concepto efectivamente funciona porque los satélites se encuentran tan elevados que cualquier error medido por un receptor será casi exactamente igual al producido en cualquier otro receptor que se encuentre en la misma zona, utilizando señales de los mismos satélites y en forma simultánea. Debido a la simplicidad de las señales, este factor de corrección ajusta, en efecto, todos los errores posibles en el sistema que procedan de los relojes de los receptores, de los relojes de los satélites, órbitas o de los retrasos ionosféricos y troposféricos.

Todos los receptores GNSS están diseñados para poder de una forma u otra, calcular posiciones corregidas con datos suministrados desde una estación base, pero no todos al punto de alcanzar precisiones topográficas o geodésicas. Es allí donde surgen diferentes “rangos de precisiones” y los receptores diseñados por los fabricantes para cada caso. Consecuentemente existen receptores diferenciales que solo pueden ajustar las medidas realizadas mediante el código pseudoaleatorio obteniendo resultados de orden sub métrico y aquellos receptores que pueden también resolver por observación de las portadoras de fase logrando cálculos de muy alta precisión en las coordenadas 3D de un punto.

Código pseudoaleatorio y portadora de fase pueden sonar como complicados conceptos de electrónica, pero de hecho refieren a la componente de la señal que se observa para realizar las determinaciones de tiempo y pseudodistancia. Utilizando observaciones de portadora de fase es como se puede incrementar substancialmente la precisión que se requiere para reemplazar los métodos de posicionamiento convencional utilizados en topografía e hidrografía con instrumentos óptico-electrónicos.

Los receptores con capacidad de seguimiento de portadora de fase comienzan de hecho por realizar las primeras mediciones mediante el código pseudoaleatorio (PRC), mejorándolas luego en base a la frecuencia portadora de ese código. El código pseudoaleatorio genera pulsos, como se dijo anteriormente, a una tasa aproximada de 1 Mhz mientras que la portadora trabaja por encima de 1Ghz (al menos 1.000 veces más rápido). Como ejemplo podemos mencionar que a la velocidad de la luz la portadora L1 de GPS a 1.57Ghz, tiene una longitud de onda de unos 19 centímetros, por lo tanto, actúa como una referencia mucho más precisa que el código en sí mismo cuya longitud de onda como se dijo es de unos 293 metros. Si sumamos a esto que el grado de resolución de las observables hoy en día es del orden del 0,1% de la longitud de onda podemos obtener soluciones con código mejor a 30cm y portadora de fase en el entorno de milímetros (Hurn, 1989).

En esencia, el método de portadora de fase consiste en determinar el número de ciclos de onda entre un satélite y el receptor. El problema que existe es que la portadora es muy uniforme y por ende muy difícil de contar. Cada ciclo de fase es idéntico a cualquier otro mientras que el código pseudoaleatorio es intencionalmente muy complejo para hacer más fácil y rápida su determinación, ya que es simple e instantáneo saber qué parte del código se observa. El truco entonces es hacer una primera determinación para aproximar una solución “al metro” utilizando el código pseudoaleatorio y luego realizar el ajuste final utilizando la portadora de fase.

Proceso de la Portadora de Fase

En este caso como ya se ha visto, la señal arriba al receptor sin la información de cuál ciclo determina una sincronización perfecta porque cada ciclo es idéntico a otros. Pero aún el receptor puede determinar por observación directa el desfase de esta onda comparándola con la réplica que genera internamente (igual que para el caso del código).

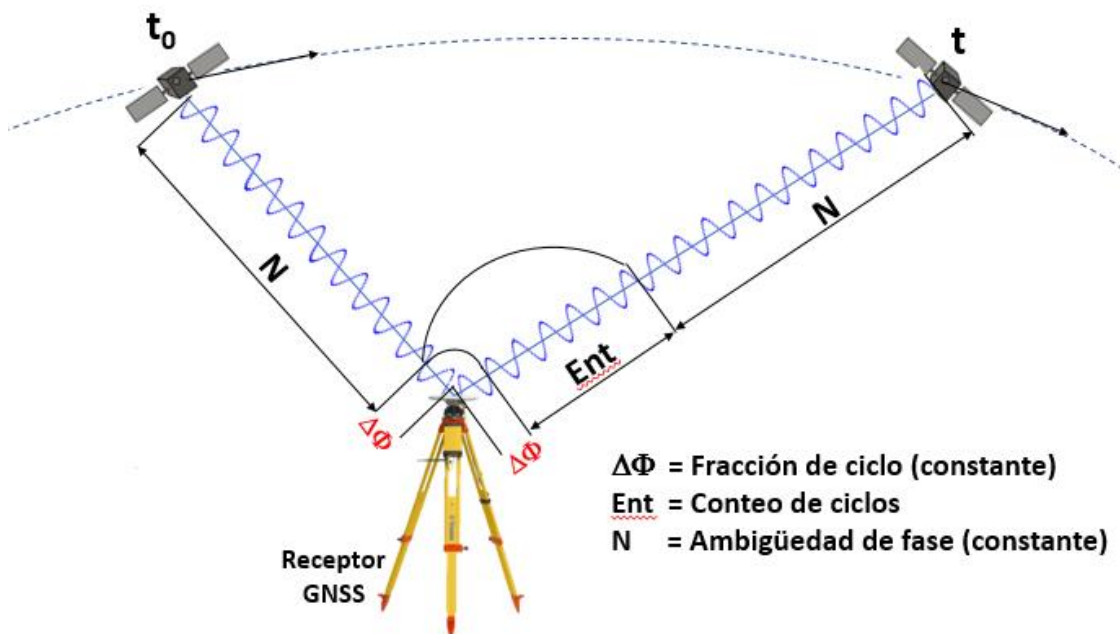


Figura 3.4.2 – Proceso de ondas portadoras de GNSS.

Fuente: Modificado de Van Sickle (2015)

Lo que realmente constituye el problema a resolverse es cómo determinar el número de ciclos completos que existen entre el observador y el satélite. Ese

número entero se lo conoce con el nombre de ambigüedad de fase (N). A partir del primer enlace con el satélite (t_0), el receptor realiza el conteo de ciclos debiendo mantener por un lapso prolongado el seguimiento sin interrupciones que, de ocurrir, agrega una incógnita a la ecuación de resolución. Las interrupciones en el seguimiento de la portadora se las conoce como saltos de ciclo (cycle slips).

Entonces, la fase total está constituida por una fracción de fase ($\Delta\Phi$), un número de ciclos completos (Ent) contabilizados desde el inicio de la medida en un instante (t_0) y su correspondiente ambigüedad (N) quedando la expresión de la siguiente forma (Ferrario de Urriza, 2000):

$$\Phi_{total} = \Delta\Phi + Ent(\Phi; t_0; t) + N(t_0)$$

Donde :

Φ_{total} : Fase Total

$\Delta\Phi$: Fracción de ciclo de fase

Ent: Número entero de ciclos contados

N: Ambigüedad de fase

Esta expresión en unidades de longitud o de pseudodistancias (ρ) tomando en cuenta que todas las observaciones se ven afectadas por errores ionosféricos y troposféricos, adquiere una forma muy similar a la ecuación aportada por el código con el agregado del término de la ambigüedad en función de la longitud de la onda portadora (λN) y el cambio del signo de la corrección ionosférica dado que ésta, en el caso de las fases de las portadoras actúa siempre como un retardo (Ferrario de Urriza, 2000):

$$\rho = D + c \cdot (dt - dT) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_R$$

Donde:

ρ : Pseudodistancia

D: Distancia

c : Velocidad de la luz

(dt - dT) : Diferencia de Tiempo

λN : Número entero de longitudes de onda portadora (ambigüedad)

d_{ion} : retardo por ionosfera

d_{trop} : retardo por tropósfera

ϵ_R : error residual

Para la determinación de la ambigüedad de fase, es necesario aplicar técnicas y algoritmos más complejos que implican en principio la utilización de dos receptores GPS capaces de rastrear fase en forma simultánea y realizar combinaciones lineales de las observaciones (posicionamiento relativo). Estas combinaciones se basan en métodos de análisis diferencial y se los conocen como diferencial simple, doble y triple de las respectivas ecuaciones de observación (Lauría et al, 2004).

3.5 – Diferencial Postproceso vs Diferencial en Tiempo Real

Existen diferentes técnicas al realizar un posicionamiento diferencial por lo que estas se clasifican según los observables utilizados, los tiempos de ocupación en cada punto y el momento en que se calcula y obtiene el resultado de esas mediciones (Figura 3.5.1).

Método Diferencial	Observables	Tiempo de Ocupación (Receptor Móvil)	Procesamiento	Precisión (1σ Horizontal y 1σ Vertical)
Estático	Códigos+Fases	Mayor a 45 min por punto	Postproceso	H= 0,3mm + 0,5ppm V= 0,8mm+1ppm
Estático Rápido	Códigos+Fases	Entre 8 y 20 minutos por punto (Dist <10km)	Postproceso	H= 0,3mm + 0,5ppm V= 0,8mm+1ppm
Cinemático Stop&Go	Códigos+Fases	2 a 3 épocas por punto	Postproceso / Tiempo Real	H= 8mm + 0,5ppm V= 15mm+1ppm
Cinemático Continuo	Códigos+Fases	1 época por punto	Postproceso / Tiempo Real	H= 10mm + 1ppm V= 20mm + 1ppm

Figura 3.5.1 – Métodos de posicionamiento diferencial.

Estos métodos muy utilizados en topografía pueden realizarse aplicando el cálculo de los datos en tiempo diferido, es decir con Postproceso, donde en una primera etapa se realiza la captura de datos crudos en campo, los que son

almacenados en archivos en la memoria de cada receptor o colector de datos. Luego en una segunda instancia, posterior al levantamiento, se transfieren los archivos correspondientes a cada observación y efectúan los cálculos diferenciales de los vectores de posicionamiento realizados entre la base y el móvil, para lo que se requiere el uso de software específico de oficina (Figura 3.5.2).

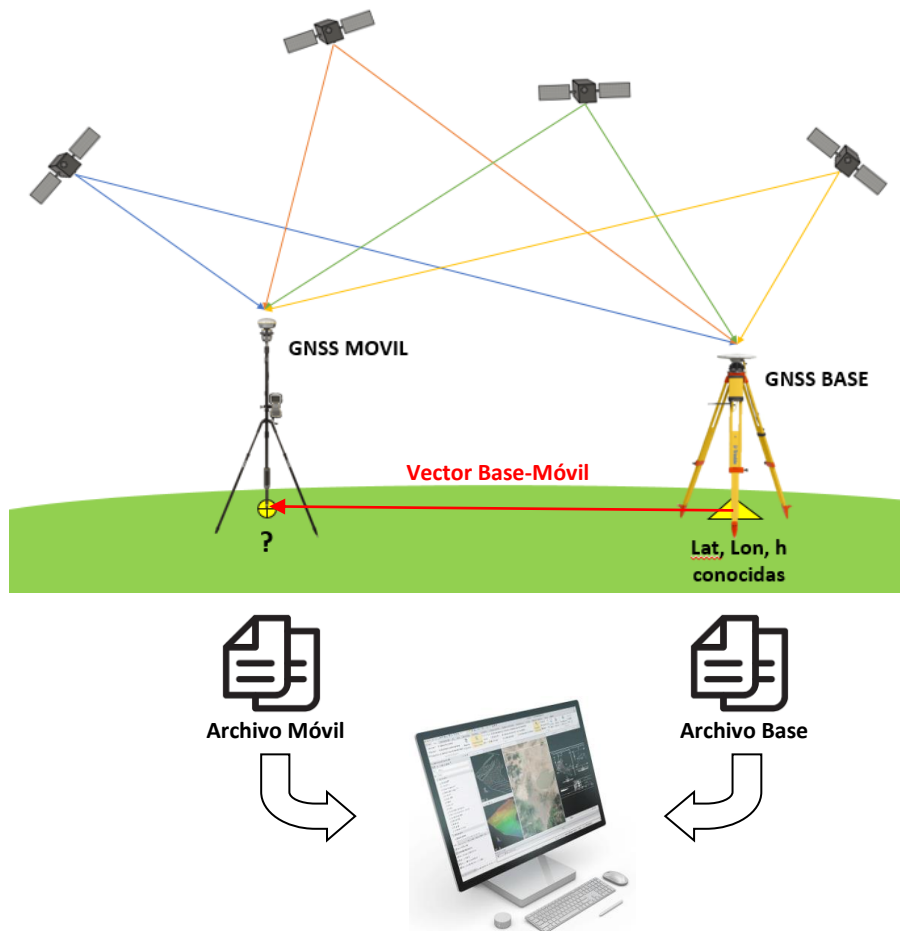


Figura 3.5.2 – Postproceso de datos GNSS

El Postproceso es adecuado para aquellos casos en los que no se requiere conocer las coordenadas corregidas en el momento del posicionamiento y es muy útil para tareas de levantamiento topográfico y geodésico. Pero en situaciones en los que se deben ubicar puntos en el terreno a partir de un diseño (replanteo), monitorear el movimiento de una estructura que debe ser montada con precisión, controlar que una draga extraiga material del lugar correcto o relevar perfiles batimétricos de un canal de navegación, es necesario conocer

las coordenadas precisas en el momento, por lo tanto, realizar el cálculo diferencial al instante.

Un sistema GNSS diferencial puede ser complementado para estas tareas con un dispositivo de telemetría (enlace de datos) que permita la transmisión de las correcciones desde el receptor Base hacia el receptor Móvil lo más rápido posible. El Móvil mediante un algoritmo de cálculo diferencial aplica las correcciones recibidas, obteniendo las coordenadas ajustadas en el momento o a “tiempo real” en el campo (Figura 3.5.3).

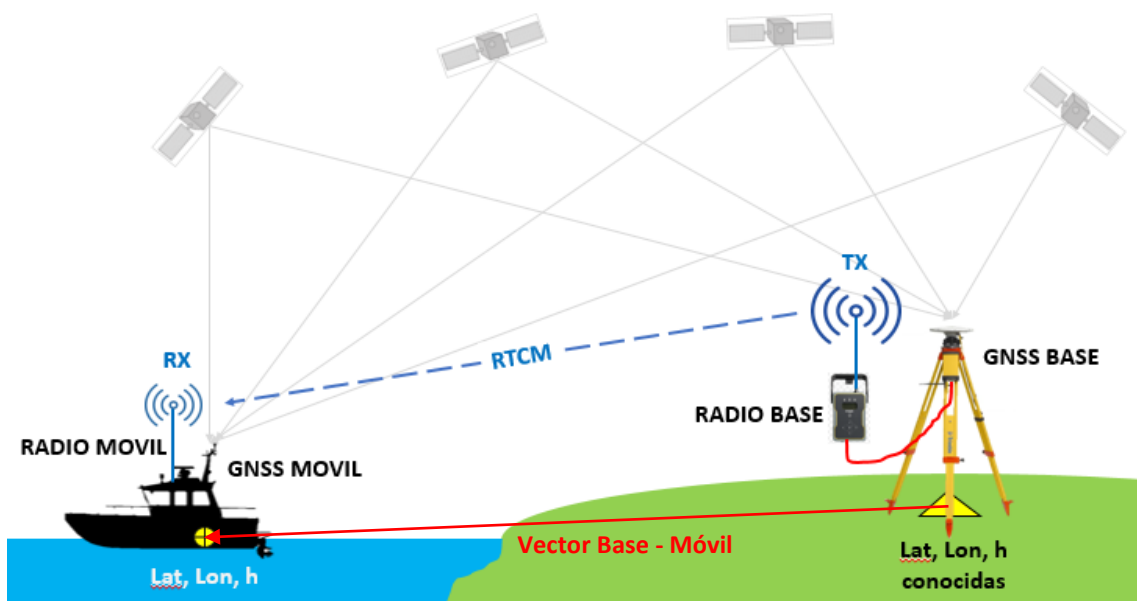


Figura 3.5.3 – Posicionamiento a tiempo real DGNS

Para batimetrías, el método Diferencial a tiempo real GNSS (DGNS) ha demostrado su gran utilidad por lo cual fue aceptado y ampliamente adoptado no solo para simplificar el levantamiento de datos y asignación de datos planimétricos a cada sondaje, sino también para la ayuda a la navegación de la embarcación sobre perfiles predeterminados. El DGNS permite el empleo de equipos capaces de resolver posición solo utilizando las observables de código pseudoaleatorio y transmitiendo las correcciones en un protocolo universal y estándar establecido por la RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services - www.rtcn.org). Dicho método no requiere la observación de portadora de fase y otorga un posicionamiento con un error horizontal (Norte, Este) por

debajo de 1m llegando incluso a valores cercanos a los 25cm con receptores GNSS de última generación.

El enlace de datos (data link) es un componente esencial de los sistemas diferenciales a tiempo real, y el posicionamiento requiere de una transmisión regular (típicamente cada segundo) de paquetes de datos de la estación base y su recepción en el receptor móvil (Talbot, 1996). En la actualidad existen diversas tecnologías y sistemas utilizados para la transmisión de datos en tiempo real:

- Radio MODEM (HF, VHF, UHF, BLU)
- Celular (GSM / GPRS / 3G / 4G)
- Satelital (OnmiSTAR / Marinestar / Trimble RTX / Terrastar, entre otros)
- Radio Faro (MSK Beacon)
- Sistemas de aumentación (WAAS, EGNOS, SBAS)
- Internet (NTRIP)

Sin embargo, la utilidad de un sistema DGNSS se limita usualmente a determinaciones planimétricas (2D) siendo la altimetría una variable que puede ser resuelta, pero con poca o nula utilidad, ya que el error es tal que no es adecuada su aplicación para hidrografía.

No obstante, existen receptores y softwares que, recurriendo a técnicas de procesamiento más rigurosas (RTK) y a ciertos cuidados especiales, permiten obtener una altimetría de calidad superior y acorde a las exigencias de levantamientos topográficos, siendo así también apta para la hidrografía como se muestra en este trabajo. El concepto de RTK es básicamente el mismo que para DGNSS donde la telemetría juega un papel muy importante en el transporte de las correcciones de la base al móvil, pero con la ventaja que su sistema de procesamiento a tiempo real utiliza las mediciones de portadora de fase. Tal capacidad resulta en una mejor resolución de posición en 3D. Y no solo esto, la capacidad de resolver ambigüedades de fase en movimiento conocido como "On the Fly" (OTF), otro desarrollo en la tecnología de posicionamiento que ha creado una herramienta poderosa para el estudio de series de tiempo dinámicas, como

el análisis de mareas o el estudio de la altura del nivel del agua. Con la tecnología OTF debería ser posible obtener una serie temporal de alturas de la superficie del agua con una precisión de 1 a 2 centímetros, a una frecuencia de muestreo de 1 segundo, a muchos kilómetros de la tierra más cercana. El análisis posterior de series de tiempo producirá un datum de la superficie del agua en la ubicación del receptor (De Loach, 1995).

3.6 – La Altimetría con GNSS

Por años, mucho se ha discutido acerca de la calidad de la componente altimétrica determinada por medio del GPS porque se sabe que por razones geométricas esta suele tener una precisión entre 1,5 a 2 veces menor a la obtenida en las componentes planimétricas de la posición. En efecto no es un problema simple de tratar, pero es importante destacar que gracias al nivel de redundancia que se puede lograr debido a la cantidad de satélites disponibles y si la variable altimétrica se trata adecuadamente, la calidad de los datos que pueden obtenerse desde un sistema diferencial es suficientemente buena como para realizar cualquier tipo de determinación aún para las más exigentes de las aplicaciones.

Lo primero que se debe considerar es que la altura que se obtiene a partir de los sistemas GNSS están referidas a una superficie matemática llamada elipsoide. Un elipsoide desde el punto de vista estrictamente geométrico por definición es un sólido limitado por una superficie cerrada cuyas secciones planas son todas elipses o círculos. Desde el punto de vista geodésico es la superficie matemática que más se asemeja a la forma y dimensión de la Tierra. Existen diversos elipsoides que se han utilizado a lo largo del tiempo, algunos se continúan aplicando en diferentes zonas de la Tierra, otros a nivel global.

El sistema GPS desde sus inicios ha utilizado como sistema de referencia un elipsoide de aplicación mundial conocido como WGS84 (World Geodetic System 1984) creado por la Agencia de Mapeo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América (Defense Mapping Agency – DMA, actualmente National Geospatial-Intelligence Agency – NGA) (<https://www.nga.mil>), para

sustentar la cartografía producida en dicha institución y las operaciones del Departamento de Defensa (DoD) (Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional, 1999).

Por su parte los demás sistemas de posicionamiento utilizan elipsoides diferentes al WGS84: GLONASS (PZ-90), Galileo (GTRF) y BeiDou (CGCS2000), pero esto no es un problema porque están resueltas las transformaciones para pasar de un sistema a otro, con la finalidad de unificar los datos y trabajar en un único marco de referencia.

Para definir la componente z o altitud, el elipsoide no es una buena referencia. El agua de los océanos tiende a estar en equilibrio y por ello se comporta como una superficie gravitatoria equipotencial. Debido a esto se toma como referencia la superficie del nivel medio de los mares, corregida por efectos oceanográficos y atmosféricos, la cual coincide con una superficie equipotencial en el campo de la gravedad terrestre, denominado Geoide, y a esta altitud se le llama ortométrica (Berné Valero et al., 2014). La altura elipsoidal (h) es la distancia de un punto en el terreno respecto del elipsoide medida a lo largo de la normal de dicho punto al elipsoide. Esta altura poco tiene que ver con la distancia vertical conocida como altura ortométrica (H) o altura topográfica. La altura ortométrica de un punto en el terreno se obtiene a partir de nivelaciones con métodos geométricos y/o trigonométricos vinculadas a puntos gravimétricos de la red de nivelación de primer orden del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Principal>). Esta es utilizada para generar diversos tipos de cartografía (entre ellas la topográfica, náutica y aeronáutica) y apoyar proyectos para obras de ingeniería en general. La altura ortométrica indica la distancia vertical que existe entre un punto respecto del Geoide.

El Geoide como superficie equipotencial (de igual potencial gravitatorio) es una buena primera aproximación del nivel medio del mar, ya que existen efectos oceanográficos tales como la variación en la densidad del agua, patrones de la circulación oceánica permanente y efectos atmosféricos, los cuales producen diferencias con el geoide, en el peor de los casos pueden exceder el metro, pero

que generalmente son menores (Pugh et al, 2014). Como tal el Geoide no es una superficie que pueda ser representada mediante una ecuación matemática, utilizando para ello modelos numéricos requiriendo para su determinación de observaciones gravímetros y mediciones del nivel del mar.

La diferencia entre la altura elipsoidal (h) y la altura ortométrica (H) en un mismo punto y medido sobre la normal al elipsoide es lo que se define como ondulación o separación geoide - elipsoide (N) y dado que ambas superficies no son paralelas, en diferentes puntos de la Tierra pueden obtenerse diferentes valores de N (Figura 3.6.1).

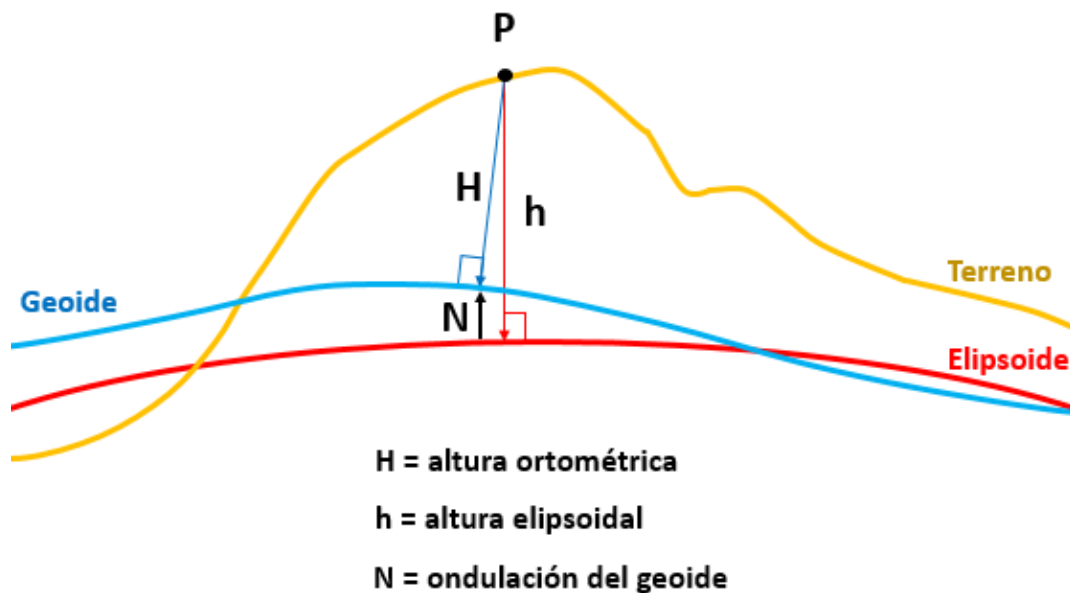


Figura 3.6.1 – Relación de alturas y separación geoide - elipsoide

La expresión a continuación señala la relación geométrica antedicha y a partir de esta se obtiene la utilizada para transformar las alturas elipsoidales medidas con GNSS en alturas referidas a un geoide local o global.

$$N = h - H$$

Estos conceptos básicos aquí explicados, son muy importantes para comprender la necesidad de aplicar un modelo de corrección altimétrico, que permita utilizar un sistema GNSS de alta precisión en la reducción de sondajes durante un levantamiento batimétrico. Esto lleva a que el proceso requiere que

la separación entre el elipsoide WGS84 y los niveles de reducción de sondajes locales deban ser conocidos previamente para cada zona de levantamiento (Scarfe, 2002).

La separación entre el elipsoide y el nivel de reducción de sondajes local no es constante y en algunos casos modelarlo puede ser una tarea bastante compleja. Según la situación particular en algunos casos se puede utilizar un valor fijo de separación (áreas muy pequeñas), la calibración de un plano inclinado (interpolación lineal) o hasta complejos modelos geoidales (para áreas mayores o de gran extensión). El cero de mareas, las batimetrías y los apoyos geodésicos deben colocarse en el mismo marco de referencia vertical antes de realizar operaciones de levantamiento hidrográfico (OHI, 2005).

El uso de la variable altimétrica y su tratamiento para la reducción de sondajes se desarrolla en detalle en el Capítulo 6 – GNSS RTK en hidrografía.

Capítulo 4 – Medición de la Profundidad

4.1 – Orígenes y Conceptos

La medición de profundidades es una tarea fundamental para un hidrógrafo y requiere del dominio y conocimiento del medio, de la acústica subacuática, de la tecnología aplicada, de los dispositivos disponibles y de los procedimientos adecuados, para lograr y cumplir los estándares recomendados internacionalmente para precisión y cobertura, tal como se articulan en OHI (2005 y 2014).

Desde los años en que el hombre comenzó a estudiar el fondo marino, su morfología, rasgos, características y por supuesto las profundidades, se han utilizado diversos métodos de acuerdo con la evolución de técnicas y tecnologías de cada época. De esta manera los primeros métodos manuales de medición con sondas mecánicas como perchas y sondaleza con escandallos fueron dejando paso hacia mediados del Siglo XX, a métodos acústicos más modernos y prácticos con el desarrollo de la tecnología SONAR (Sound Navigation And Ranging).

El sondeo obtenido por medio acústico aparece a poco de iniciar el siglo XIX, cuando el físico francés Dominique François Arago propone la utilización del principio físico de propagación del sonido en el agua para medir profundidades y distancias. Ya en el siglo XX los inicios de esta novedosa tecnología para la época adquieren un nuevo impulso con el meteorólogo inglés Lewis Richardson luego del naufragio del RMS Titanic en aguas del Atlántico Norte en abril de 1912. Richardson fue otro de los pioneros en sugerir la idea de utilizar un pulso acústico para detectar y medir objetos bajo del agua, pero fue el ingeniero de origen canadiense Reginald Fessenden quien logra construir un prototipo y realizar los primeros ensayos con los que logró detectar un iceberg a más de 3 kilómetros de distancia, en 1914 poco antes del comienzo de la Primera Guerra Mundial.

A partir de allí y durante la Primera Guerra, otros científicos en el desarrollo de la tecnología SONAR, lograron crear los primeros sistemas pasivos como los hidrófonos y otros dispositivos activos para la detección de submarinos. Gracias a la investigación del físico irlandés Robert Boyle quien, con el apoyo de Gran Bretaña, desarrolló en 1916 el primer proyecto de sistema de sonar activo utilizando cristales de cuarzo y la propiedad piezoeléctrica de este material, tecnología que sigue siendo utilizada en los transductores que se fabrican en la actualidad. Sin embargo, no fue sino hacia mediados del Siglo XX que se comenzaron a emplear las sondas acústicas (ecosondas), para la determinación de profundidades con el propósito del mapeo del fondo marino.

4.2 – Instrumentos (Ecosondas Monohaz, Multihaz)

Los instrumentos para medir profundidades en la actualidad son muy diversos e incluyen modernas tecnologías como Lidar (scanner Laser aerotransportado) y Satelital, que pueden en forma remota realizar batimetrías en aguas someras. Específicamente enfocados en la tecnología de sonares, las sondas acústicas pueden clasificarse en dos grandes grupos: ecosondas de haz simple (monohaz) ecosondas de haces múltiples (Mutihaz)

Ecosondas Monohaz

Las ecosondas monohaz o de un solo haz de emisión y recepción, alcanzan niveles de precisión sub-decimétrica en aguas poco profundas y agrupan a una variedad amplia de equipos que ofrecen diferentes rangos de frecuencia, de uno hasta tres canales independientes, que permiten trabajar con más de una frecuencia en simultáneo, ritmos de pulsos, potencias y alcance que las hacen muy versátiles y útiles para diferentes aplicaciones. Es así como éstos, son los instrumentos de medición de profundidad más difundidos y utilizados por los hidrógrafos en todo el mundo. La principal característica de las sondas monohaz es que permiten medir puntos discretos a lo largo de una línea mientras se navega lo que implica planificar muy bien la distancia entre perfiles para realizar un levantamiento con suficiente densidad de datos para representar el fondo.



Figura 4.2.1 – Ecosonda Echotrac E20 con transductor y Laptop.

Fuente: Teledyne Marine http://www.teledynemarine.com/ECHOTRAC_E20

Las ecosondas utilizan el transductor para proyectar pulsos acústicos, o "ping" y convierten los ecos de retorno nuevamente en energía eléctrica. En hidrografía y otras aplicaciones científicas, se emplean transductores de alta calidad, diseñados para una alta eficiencia acústica y una sensibilidad direccional específica, denominada patrón de haz, que se aplica tanto a la transmisión como a la recepción. Para ecosondas monohaz, el patrón de directividad se representa con un diagrama polar. El mismo se obtiene midiendo la presión sonora a una distancia determinada y cubriendo 360°. Esas intensidades observadas se normalizan según la máxima intensidad medida, que corresponde a la dirección de un eje perpendicular a la cara del transductor. En el diagrama polar de la Figura 4.2.2 se muestra la dirección del haz concentrado o lóbulo principal, y los lóbulos secundarios, que si bien no son deseados ya que constituyen una fuente de interferencia, son inevitables debido a la construcción del transductor. La directividad está determinada por las dimensiones físicas del transductor y la frecuencia del pulso acústico utilizado, y se describe por el "ancho del haz", que comúnmente viene dado por el ángulo entre los lados opuestos del lóbulo principal, donde la intensidad es de -3dB (Figura 4.2.2). En los transductores modernos más del 99% de la energía se concentra en el lóbulo principal (Fraser, 2017).

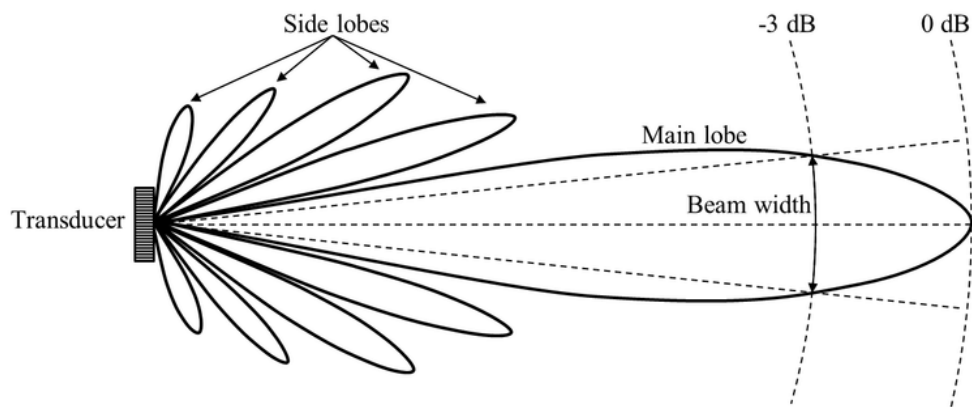


Figura 4.2.2. - Patrón de haz para una sonda monohaz. La sensibilidad direccional con ángulo es proporcional al rango del patrón del haz desde el centro del transductor.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Example-beam-pattern-for-a-single-beam-echosounder-The-directional-sensitivity-with_fig7_320335864

Las ecosondas monohaz utilizan un solo transductor que suele ser pequeño y de fácil instalación en cualquier tipo de embarcación. Los transductores monohaz poseen el proyector (o fuente) y el receptor de señal en la misma unidad. Existen diferentes tecnologías de transductores según el principio de funcionamiento, es decir la forma en cómo transforman un pulso eléctrico generado por la fuente (proyector) en un pulso acústico para generar la onda de choque en el agua. Según el proceso, pueden encontrarse 3 tipos de transductores: los magnetostrictivos, los electrostrictivos y los piezoeléctricos (D'Onofrio, 2016).

Los magnetostrictivos, utilizan el principio de campo magnético, electrificando un dispositivo conformado por un espiral de níquel con un eje de hierro que reacciona modificando la longitud de la espiral. La aplicación de una corriente alterna genera contracciones y expansiones de acuerdo con las características de la señal aplicada, transformándose luego en una onda vibratoria. Este tipo de transductor es el menos eficiente.

Los electrostrictivos, utilizan la aplicación de electricidad para generar la alteración de un material que puede ser cerámico policristalino o ciertos polímeros sintéticos, polarizados durante el proceso de fabricación, que actúan

mecánicamente ante el estímulo aplicado, es decir vibran a partir de la variación del potencial eléctrico.

Los piezoeléctricos funcionan con un principio similar a los electrostrictivos, pero el material utilizado es cristal de cuarzo ubicado entre dos láminas de metal. La aplicación de electricidad en las láminas de metal genera una presión sobre el cristal de cuarzo. Esta alteración del potencial eléctrico causa vibración del cuarzo lo que transmite esa vibración a toda la unidad emitiendo un pulso de ultrasonido. A la inversa, cuando el eco es recibido, la compresión mecánica del cuarzo genera una diferencia de potencial entre las caras opuestas del cristal transformando la onda mecánica en electricidad.

La tecnología piezoeléctrica junto con la del tipo electrostrictivo son las más eficientes y las más utilizadas en la actualidad.

Los transductores monohaz emiten pulsos ultrasónicos longitudinales, dirigidos y de forma cónica, que se propagan en la columna de agua en una sola dirección. La directividad y concentración de la señal define el ángulo de propagación o ancho del haz, cuya importancia es fundamental desde el aspecto de resolución, con la que el transductor y la ecosonda serán capaces de discretizar los puntos medidos en el fondo. A menor ancho de haz, mayor concentración de energía. El ancho de haz es una característica que hace que el algoritmo de identificación del fondo resuelva una profundidad con mayor o menor resolución dependiendo de las pendientes o características del suelo. En la Figura 4.2.3 se observa como un ángulo de haz más ancho produce mayor distorsión en el registro del fondo cuanto mayor es la pendiente de este (OHI, 2005).

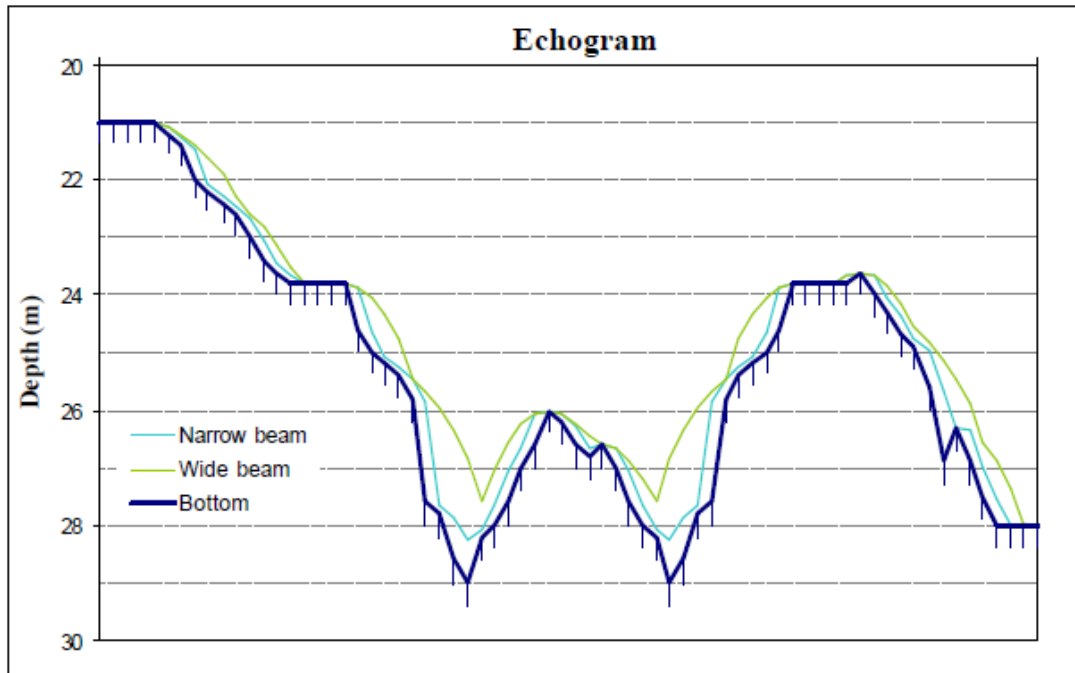


Figura 4.2.3 - Haz ancho (Wide beam) vs. Haz estrecho (Narrow beam). Fuente: OHI (2005)

La frecuencia es otro rasgo que caracteriza a las ecosondas ya que determina el alcance y la penetración de la señal en el fondo, por lo tanto, la utilidad y la aplicación del equipo. La señal acústica se atenúa desde el mismo instante en que comienza a propagarse en el agua, y este fenómeno ocurre más intensamente cuanto más alta es la frecuencia de emisión del pulso. Es así como a mayor frecuencia menor será el alcance de la señal y su penetración en el fondo marino. Pero como contrapartida a ello, la resolución y precisión de la medida de profundidad es mayor, debido a que a las frecuencias altas le corresponden haces de emisión finos (menor tamaño del pulso) y viceversa, para frecuencias de emisión bajas corresponden diagramas de emisión de haz ancho (Figura 4.2.3 y Figura 4.2.4).

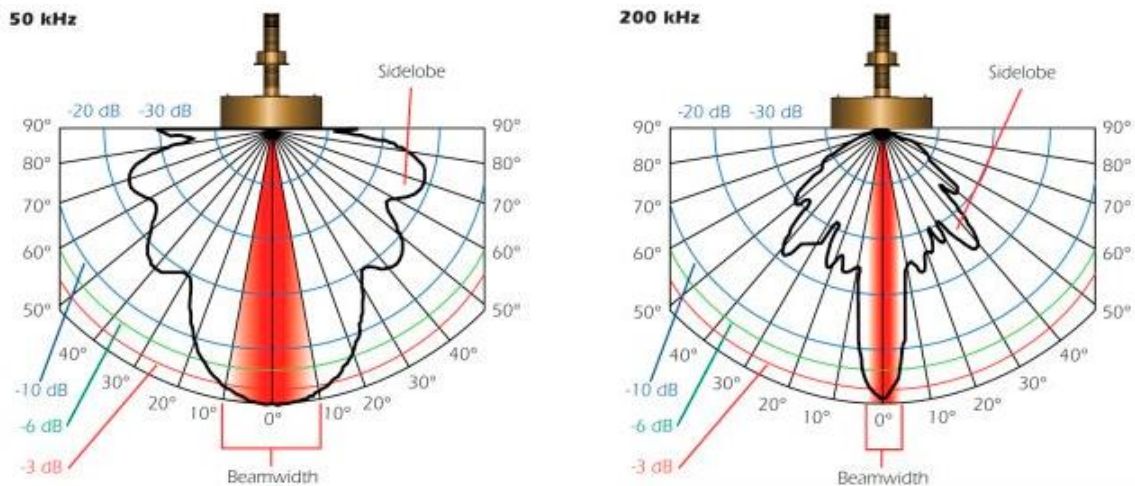


Figura 4.2.4 – Frecuencia de 50kHz (izq) y 200kHz (der.)

Fuente: AIRMAR - Guide to transducer technology 2009

(<http://www.airmar.com/uploads/brochures/AIRMAR%20Transducer%20Guide%202009.pdf>)

Las frecuencias más utilizadas en batimetrías están en el entorno de 200kHz para profundidades menores a 100m, pudiendo ser complementada con una frecuencia menor de 33kHz, de mayor penetración que la anterior y que resulta muy útil para registrar el fondo consolidado, superando la presencia y el espesor de los sedimentos en el lecho, caso típico del Río de la Plata. Para trabajos a mayores profundidades entre los 100m y 1500m las frecuencias más utilizadas están entre 50 y 200kHz, mientras que para profundidades mayores a 1500m usualmente se emplean frecuencias inferiores a los 50kHz llegando incluso a 12kHz.

Ecosondas Multihaz

Las sondas de haz múltiple o multihaz, tienen una tecnología más moderna que está evolucionando con gran rapidez especialmente en las últimas décadas y ofrecen la gran ventaja de realizar un barrido total del fondo con gran detalle y precisión. Esta ventaja comparativa por sobre las ecosondas monohaz, las hace muy superiores en términos de productividad y calidad de datos, pero con la desventaja que son instrumentos significativamente más costosos y que exigen sistemas de posicionamiento GNSS e Inerciales de muy buena calidad y

procedimientos de calibración mucho más rigurosos para lograr resultados de calidad (Figura 4.2.5).



Figura 4.2.5 - Ecosonda Multihaz SeaBat T50-R compuesto por la unidad de procesamiento tipo rack, transductor multihaz y sensor IMU (Inertial Measurement Unit). Fuente: Teledyne Marine, <http://www.teledynemarine.com/SeaBat-T50-R?ProductLineID=52>

El arreglo de transductores se compone de dos partes separadas. Por un lado, los proyectores de la señal alineados con la crujía (eje longitudinal) de la embarcación mientras que los receptores (hidrófonos) dispuestos transversalmente a la línea de navegación. Esta disposición de transductores y receptores, que se conoce con el nombre de aspas de molino, provocan que la franja del fondo del océano ensonificada por los proyectores resultará perpendicular a la correspondiente de los hidrófonos. Ambas franjas se intersecan en un área mucho más pequeña cuyas dimensiones corresponderán al ancho del haz del proyector y al del hidrófono (Sea Beam, 1999). En la Figura 4.2.6 se muestra en distintas tiras la ensonificación de cada par de proyectores (5 pares) y dentro de cada una de ellas, las zonas correspondientes a la directividad del arreglo de hidrófonos. Cada dirección detectada por el arreglo de hidrófonos corta a todas las direcciones definidas por el arreglo de proyectores en zonas muy pequeñas (cada cuadrado de la zona ensonificada de la Figura 4.2.6).

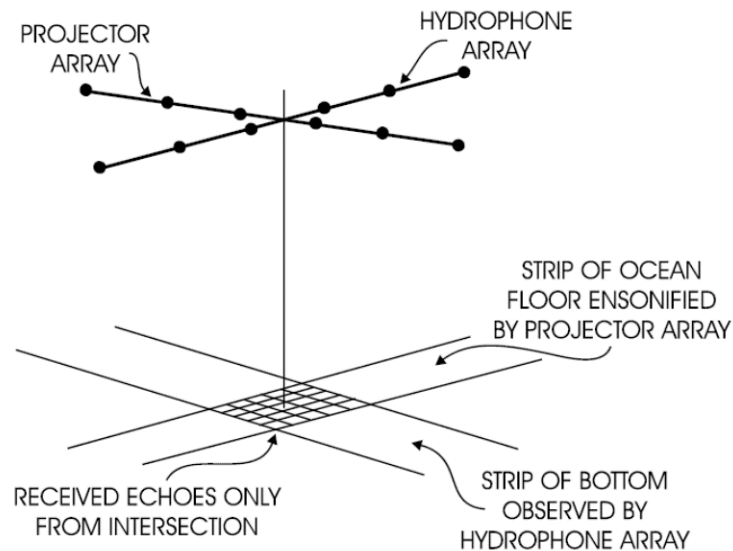


Figura 4.2.6. Proyectores e hidrófonos arreglados como aspas de molino cruzadas. Muestra las áreas ensonificadas por todos los elementos de los arreglos. Fuente: SeaBeam (1999).

La principal ventaja de estos sistemas es que pueden cubrir una franja en forma continua equivalente a una huella que cubre de 5,5 a 12 veces la profundidad, dependiendo de la cantidad de haces y la disposición de estos (equidistantes o equiángulos), generando una imagen completa, pudiendo recolectar un nivel de detalle muy alto del fondo y de los objetos allí presentes (Figura 4.2.7).

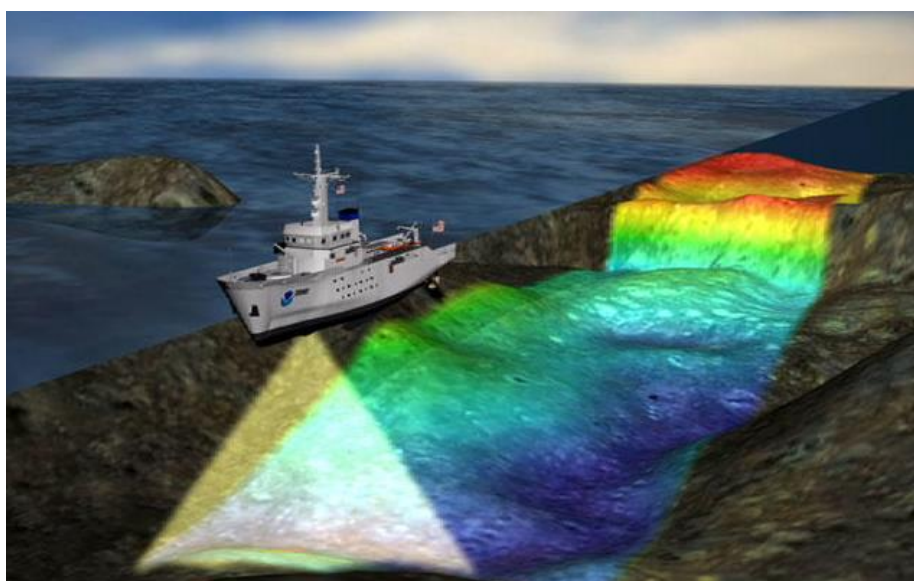


Figura 4.2.7 – Barrido del fondo con ecosonda multihaz

Fuente: USGS (<https://www.usgs.gov/media/images/noaa-multibeam-mapping-diagram>)

Las frecuencias de emisión utilizadas en multihaz suelen estar en un rango bastante amplio entre 70 y 500 kHz. Al igual que en el caso de las ecosondas monohaz, un instrumento de frecuencia más alta tendrá mejor resolución y precisión que un instrumento de frecuencia más baja para una cierta profundidad de agua.

La resolución y precisión que los sonares multihaz poseen, pueden proporcionar gráficos de alta precisión del fondo que los hace muy útiles no solo para batimetrías sino también en la inspección, búsqueda y hasta rescate de elementos u objetos sumergidos. La precisión no solo depende de la frecuencia, sino también de la precisión de la posición del transductor y la precisión de la estimación de la velocidad del sonido. En general, los últimos sonares multihaz tienen una resolución horizontal en el rango de decímetros, en algunos casos incluso hasta en el rango de centímetros. Los sistemas multihaz más modernos también permiten registrar los datos de la columna de agua en su totalidad como también los datos de retrodispersión (Backscatter), lo que permite la caracterización del lecho marino como un producto de calidad comparable a los sonares de barrido lateral.

Los sistemas multihaz en la actualidad se han simplificado en su arquitectura de forma tal que se los encuentra en unidades bastante compactas y transportables e integrados con el sistema de posicionamiento GNSS y el sensor de navegación inercial (INS), este último, usualmente solidario al transductor del sonar. Esto ha permitido que puedan operarse en embarcaciones de gran porte hasta incluso en embarcaciones muy pequeñas con la versatilidad de poder hacer la instalación del transductor tanto en forma permanente como temporal, mediante brazos retráctiles a través de un moon pool, montado en un soporte a proa o sobre una banda de la embarcación.

La calibración en este tipo de equipos requiere de mayores cuidados que para una sonda monohaz, ya que además de considerarse la velocidad de propagación del sonido y el draft es preciso realizar una calibración de los sensores de posicionamiento y del transductor, respecto de la embarcación y de la línea de navegación, lo que produce valores de compensación para el

cabeceo, balanceo, ceñida y latencia. El procedimiento de campo conocido como Patch Test permite estimar estos errores y lograr los estándares de precisión requeridos establecidos por la OHI (Figura 4.2.8).

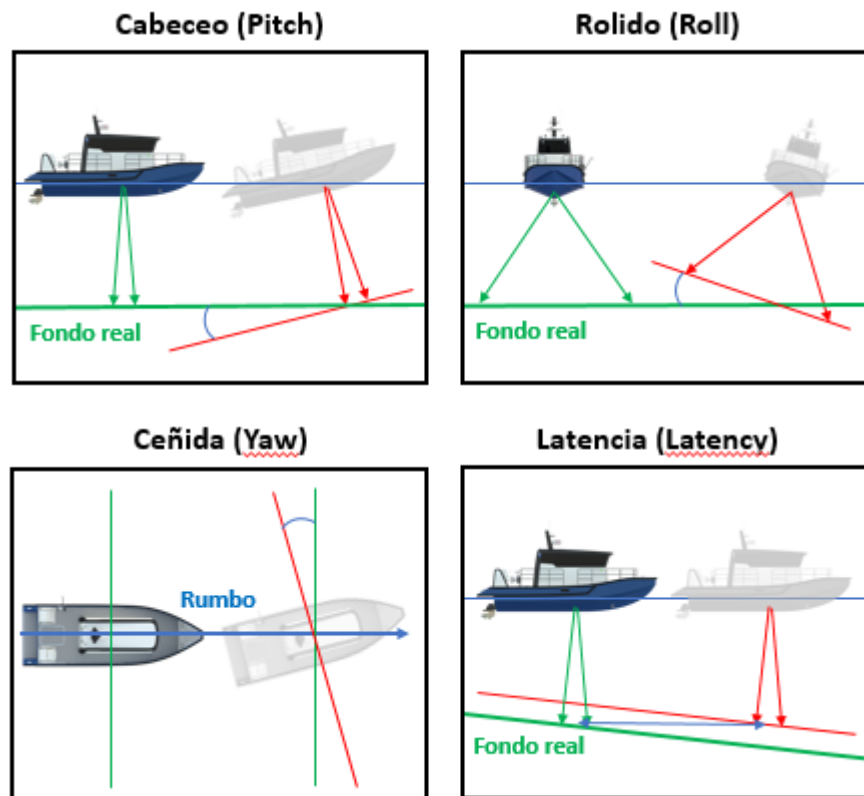


Figura 4.2.8 - Errores producidos por el cabeceo, balanceo, ceñida y latencia

El Patch Test es la primera etapa requerida en todo levantamiento con ecosonda multihaz y está diseñado para determinar con precisión la configuración estática del transductor (balanceo, cabeceo, ceñida) y la latencia entre la recepción de la posición GNSS y su integración con los datos batimétricos realizada por el sistema de adquisición. Un conocimiento impreciso de los valores de estos cuatro errores introduce errores sistemáticos (biases) al calcular la posición verdadera en 3D de cada haz individual. Estos errores sistemáticos se determinan secuencialmente, de acuerdo con adquisiciones de pasadas superpuestas y usualmente en diferentes direcciones de navegación que generan un conjunto de información, como la actitud dinámica, la posición y el rumbo de la embarcación, las compensaciones geométricas de cada componente del sistema de adquisición (GNSS, INS, MBES, compas) y del perfil de velocidad del sonido.

El cálculo de los errores sistemáticos mencionados se basa principalmente en realizar una correspondencia entre rasgos característicos del fondo marino identificados de cada pasada superpuesta. Se realiza un primer cálculo aproximado para ayudar a la identificación rápida del rango de valores a buscar. Luego, mediante iteraciones sucesivas puede refinarse la búsqueda según sea necesario, durante las cuales se muestran tanto las estimaciones de cada error como las correspondientes graficaciones. El cálculo lo realiza una rutina propia del software de adquisición utilizado con el multihaz y suele ser bastante automático, buscando el mejor valor dentro del rango establecido. Luego, el impacto de seleccionar un determinado valor se muestra inmediatamente en la vista general del área relevada para el test, que proporciona tres representaciones para permitir al usuario evaluar la precisión del resultado: una ubicación real codificada por colores de los haces, la profundidad, las isobatas y cuadrículas de profundidad sintetizadas que realizan comparaciones directas entre las profundidades de la pasada (Gueriot et al., 2000)

4.3 Propagación del sonido en el agua

Emitiendo una onda de sonido directamente hacia el fondo y registrando el retorno o eco, es posible calcular la distancia, dado que la velocidad en que el sonido se propaga en el agua es bastante estable, en un rango de profundidades relativamente pequeño. Este es el principio básico que define la forma en que se miden profundidades utilizando una ecosonda. Pero, lo cierto es que la velocidad de propagación del sonido en el agua está lejos de ser un valor constante y la magnitud de ésta depende de varios factores que a menudo cambian según el sitio y las características del medio líquido en el que se desplaza, tema que se abordará más adelante en este capítulo.

El cálculo de distancia al fondo (profundidad) respecto de la fuente de emisión del pulso acústico está dado por la ecuación (OHI, 2005):

$$P = \frac{1}{2} V \cdot \Delta t$$

Donde:

P: Profundidad

V: Velocidad media de propagación del sonido en el agua

Δt : Diferencia de tiempo entre el instante de emisión del pulso acústico y la recepción de su rebote (eco)

Esta ecuación es aplicable en tanto y en cuanto la distancia calculada que se busca es la que existe entre el emisor de pulso (transductor) y el objetivo (fondo) lo que usualmente se define como DBT (Depth Below Transducer) o profundidad bajo el transductor. Y es esta la distancia que una ecosonda mide en forma directa. Por lo que se puede definir la misma ecuación como:

$$DBT = \frac{1}{2} V \cdot \Delta t$$

En la práctica, el transductor de la ecosonda debe ser sumergido en el agua a una profundidad tal que permita que la emisión y recepción de las señales sea lo más clara y limpia posible evitando reflexiones tanto de la superficie del agua como del casco de la embarcación, o la turbulencia y burbujas de aire que se producen en las capas superficiales del agua cerca del casco, efecto del movimiento durante la navegación. Es por ello por lo que este nuevo factor propio de la instalación del equipo abordo, debe ser considerado cuidadosamente ya que interviene en el cálculo de la profundidad que se busca obtener, que es la profundidad real o distancia entre el pelo de agua y el fondo. Esta variable es conocida como draft (D), y representa la distancia a la que se encuentra la cara activa del transductor respecto de la superficie del agua. Esta distancia debe ser considerada y sumada a la distancia medida por la ecosonda para obtener la profundidad desde la superficie del agua.

El draft es un valor que se considera constante y se mide con la embarcación amarrada, en estado de reposo. Podría encontrarse similitud entre el draft para una batimetría a lo que la altura de instrumento significa para la topografía, pero en este caso se sumará a la profundidad DBT calculada por la ecosonda obteniéndose una nueva profundidad conocida como DBS (Depth Below Surface) o profundidad bajo la superficie del agua (Figura 4.3.1).

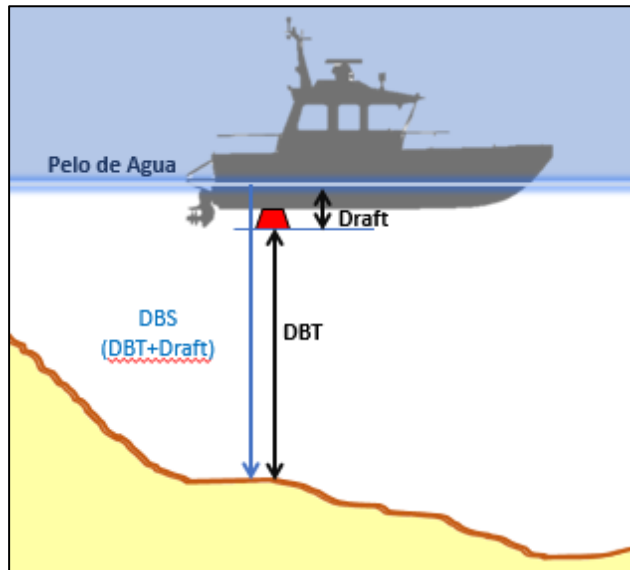


Figura 4.3.1 – DBT, DBS y Draft

Existe un tercer elemento a tenerse en cuenta en el cálculo de profundidad que está relacionado directamente con la ecosonda utilizada. La profundidad es la resultante de un proceso electrónico y físico que se lleva a cabo en los subsistemas dentro de la ecosonda. Allí intervienen una serie de transformaciones de señales eléctricas en señales acústicas y viceversa, al emitir un pulso de sonido, recibir su eco, transformarla nuevamente en un pulso electrónico, procesarlo y obtener el valor de la distancia medida. Sin considerar el tiempo en que la onda acústica está en el agua, este proceso dentro del instrumento emplea un tiempo que se traduce en un retardo electrónico que es propio del conjunto ecosonda-transductor. Este valor se lo conoce como Index y en ocasiones se lo puede ver representado con la letra “k”. El Index al ser un retardo que afecta el cálculo, debe ser restado en la ecuación general de profundidad, quedando la expresión como (U.S. Army Corps of Engineers, 2002):

$$DBS = \frac{1}{2} (V \cdot \Delta t) + D - k$$

Donde:

DBS: Profundidad bajo el Transductor.

V: Velocidad media de propagación del sonido en el agua.

Δt : Diferencia de tiempo entre el instante de emisión de un pulso acústico y la recepción de su eco.

D: Calado del Transductor (Draft).

k: Retardo electrónico (Index).

Determinar la velocidad del sonido V , es quizás el más crítico factor en el uso de sondas de profundidad acústica (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). El agua es un buen medio para la transmisión de pulsos acústicos, incluso mejor que el aire, pero la velocidad del sonido puede variar de unos 1.400m/s a cerca de 1.600m/s dependiendo de la densidad y las propiedades elásticas del medio líquido en que se propagan, variando principalmente en función de la temperatura, la presión, la salinidad y el contenido de partículas suspendidas o disueltas (Alkan et al., 2006). La diversidad de escenarios en los que pueden realizarse batimetrías como en ríos, lagos, espejos de agua o especialmente en el mar pueden exhibir grandes variaciones de temperatura y salinidad con la profundidad. Como resultado de estos cambios, la velocidad de la onda de sonido proyectada hacia el fondo no será constante en la columna de agua, haciendo que el efecto de esta variación sea significativo y en el orden de:

- 3,5 m/s de aumento por grado de temperatura.
- 1,3 m/s de aumento por milésima de salinidad.
- 1,7 m/s de aumento por cada 100m de profundidad.

En la práctica, la temperatura del agua es el factor más importante para los sondadores (IHME, 2000) obteniéndose valores aproximados de propagación como los mostrados en la Figura 4.3.2:

Medio (Temperatura °C)	Velocidad media del sonido en m/s
Agua Dulce (0°)	1402
Agua Dulce (25°)	1493
Agua de Mar (25°)	1533
Agua de Mar (0°)	1449

Figura 4.3.2 Velocidad media del sonido según el tipo de agua y la temperatura

La velocidad de propagación del sonido, el calado del transductor y el index, son valores por determinar y ajustar en la ecosonda durante el proceso de calibración, usualmente previo al inicio de un levantamiento. Existen varios métodos de calibración, uno de los más utilizados es el procedimiento conocido como Bar-Check.

4.4 Calibración de la ecosonda

Existen diferentes métodos de calibración de la ecosonda, pero uno de los métodos más utilizados es el denominado calibración por Bar-Check. Este es un método empírico que como toda calibración debe realizarse previo a cada levantamiento de datos hidrográficos. La calibración de la ecosonda se realiza para determinar la velocidad del sonido en el sitio de trabajo y verificar la profundidad de inmersión del transductor de la sonda (draft) como así también el valor index (retardo electrónico) si es que se lo determina por primera vez o se hubiera cambiado algún componente del conjunto ecosonda - transductor.

Para ello se utiliza una superficie que actúe como reflector, que puede ser una chapa lisa de hierro como material desplegable circular o rectangular con perforaciones, con una superficie mínima de 0.5m² para asegurar una buena pantalla reflectiva, con cáncamos (ojales) donde se enganchan una cadenilla con tiros o cabos que permitan arriar e izar la placa por debajo del transductor (Figura 4.4.1). También suele utilizarse una barra reflectora, puede ser un tubo de hierro de diámetro y material que evite el pandeo al que se le adosa una chapa reflectora fina de longitud mayor que la manga (ancho) del barco en la sección donde se encuentran instalados el o los transductores. En cada extremo se fija una cadenilla, cable o cabo graduado con una marca o señal cada metro para poder desde cubierta visualizar a qué profundidad se encuentra la pantalla reflectora durante el procedimiento.



Figura 4.4.1 – Dispositivo Bar-Check. Fuente: TOH Products CD (Teledyne Odom Hydrographic)

El procedimiento consiste en ubicar la placa por debajo del transductor a una profundidad conocida y luego realizar los ajustes en la ecosonda hasta lograr la misma lectura de profundidad digitalizada en esta. Esto se consigue cambiando los ajustes de velocidad de propagación del sonido (V), índice de retardo index (k) y draft (D) para que la profundidad registrada sea igual a la que corresponde al arriado de la placa (se recomienda arriarla cada metro, 2, 5 ó 10m según la profundidad máxima).

La Figura 4.4.2 muestra un registro de calibración de una ecosonda monohaz.

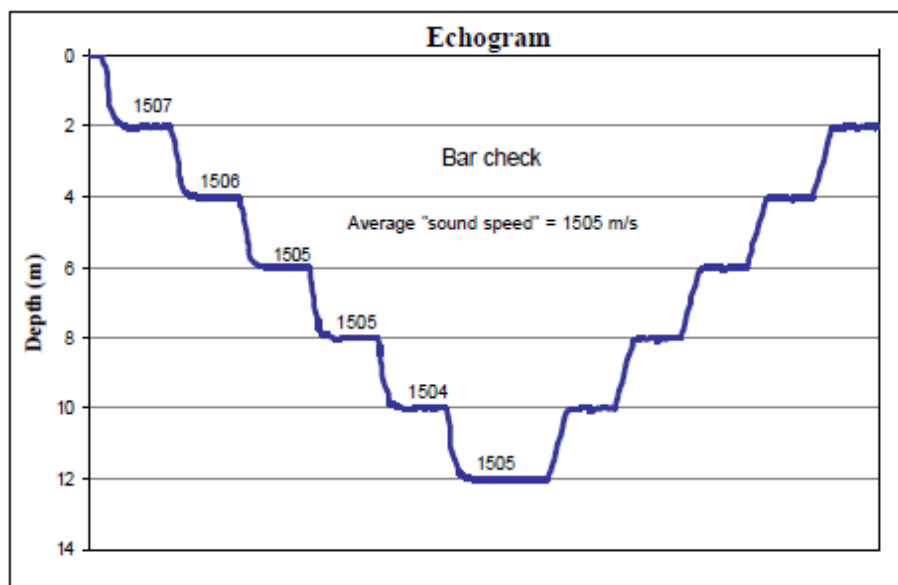


Figura 4.4.2 – Registro de Bar-Check en la faja de sondaje. Fuente: OHI (2005)

En aguas someras, hasta 20 o 30 metros de profundidad puede adoptarse el criterio que la masa de agua es bastante homogénea y la temperatura no varía demasiado, por lo que la velocidad de propagación del sonido a adoptarse será el promedio de velocidades en la columna de agua. Si las profundidades oscilan entre 50m y menos de 200m se debe medir la velocidad del sonido a distintas profundidades, por ejemplo, cada 20m y obtener el valor promedio que se utilizará en la sonda (D'Onofrio, 2016), pero en este último caso por la dificultad de mantener la placa reflectora debajo del transductor se aconseja complementar el trabajo con un perfilador de velocidad SVP (del inglés Sound Velocity Profiler).

Las recomendaciones para tener en cuenta cuando se calibra una ecosonda antes de iniciar el levantamiento son:

1. Seleccionar un área donde el agua esté tranquila para evitar el balanceo de la embarcación o que la corriente arrastre a la placa reflectiva quedando esta por fuera del lóbulo de emisión de la ecosonda.
2. Realizar la calibración utilizando toda la columna de agua, desde las profundidades más bajas hasta las más profundas de su área a relevar.
3. Comenzar siempre con la velocidad predeterminada del instrumento (1500 metros por segundo o la velocidad del día anterior).
4. Medir inicialmente el draft utilizando una cinta métrica o el brazo del transductor graduado.
5. Aplicar los ajustes de index para la calibración superficial (a menor profundidad).
6. Aplicar la corrección de la velocidad de sonido para las mayores profundidades ya que el efecto de la velocidad es más significativo con la distancia.

7. Si la profundidad es inferior a 6 metros (20 pies) configurar la velocidad del sonido a su valor por defecto de 1500m/s y utilizar solo el ajuste de draft e index para la calibración, ya que la variación de la velocidad del sonido tendrá un efecto muy pequeño en tales profundidades.
8. Para profundidades que excedan los 18 metros (60 pies), usar una barra que pueda alcanzar la mayor profundidad posible. En áreas como estas se recomienda la utilización de un SVP como control.
9. Documentar y guardar los datos de calibración para su posterior utilización.

4.5 – Fuentes de error y ajustes en la medición de la profundidad

Los levantamientos hidrográficos incluyen datos de sondeo (profundidad, posición, tiempo y características del agua de mar) con una frecuencia de muestreo suficiente como para representar con el mayor detalle posible todos los rasgos del fondo marino. Es primordial determinar la ubicación y la descripción de las características naturales y artificiales que puedan afectar a la navegación en la superficie (OHI, 2005).

La precisión con la que se determina la profundidad es función de diversos factores de error entre los que se encuentran los inherentes al propio instrumento (la ecosonda), a la instalación del transductor, a la dinámica de la embarcación, al medio y a la calibración del equipo. Estos errores se los puede clasificar al igual que en otros casos, en errores sistemáticos y errores aleatorios, pudiendo estos últimos ser estudiados a través del tratamiento estadístico.

El error sistemático (o sesgo), puede entenderse como la tendencia sistemática a subestimar o sobrestimar la magnitud medida a causa de una deficiencia en el diseño o en la ejecución del proceso de medición. El error sistemático siempre afecta a las mediciones en la misma cantidad o en la misma proporción, siempre que una observación se realice de la misma manera cada

vez. Como es un error predecible pueden reducirse sustancialmente sus efectos hasta un límite que se puedan despreciar. Por ejemplo, un error en la calibración de una sonda es un error sistemático porque siempre actúa con el mismo signo. Otro ejemplo de error sistemático puede ser la sobreestimación o subestimación de la altura del agua dada por el modelo de marea utilizado para la reducción de los sondeos.

Los errores accidentales o aleatorios (random) son fortuitos obedeciendo únicamente al azar. Luego se distinguen de los errores sistemáticos pues tienen igual probabilidad de ser positivos o negativos. Además, tampoco pueden evaluarse a priori de una medición y solamente es posible acotar el error. Un ejemplo de este tipo de errores es la lectura sobre una regla de marea o sobre una mira en una nivelación geométrica. Los errores accidentales se pueden acotar utilizando métodos estadísticos.

Se destaca que en la realidad no existen los errores sistemáticos o aleatorios puros. Por ejemplo, el error de un sondeo estará afectado por el error residual de la calibración de la sonda (error sistemático) y de los errores propios del método de medición de la sonda o precisión de esta (error aleatorio) (D'Onofrio, 2016).

La exactitud total de una medición de profundidad depende de muchos errores aleatorios y sistemáticos, que están presentes en el levantamiento hidrográfico. Luego la exactitud de un punto del fondo queda representada por un elipsoide centrado en el valor exacto (Figura 4.5.1). Las dimensiones de este elipsoide quedan determinadas por los errores estándares en las tres dimensiones X, Y, Z (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

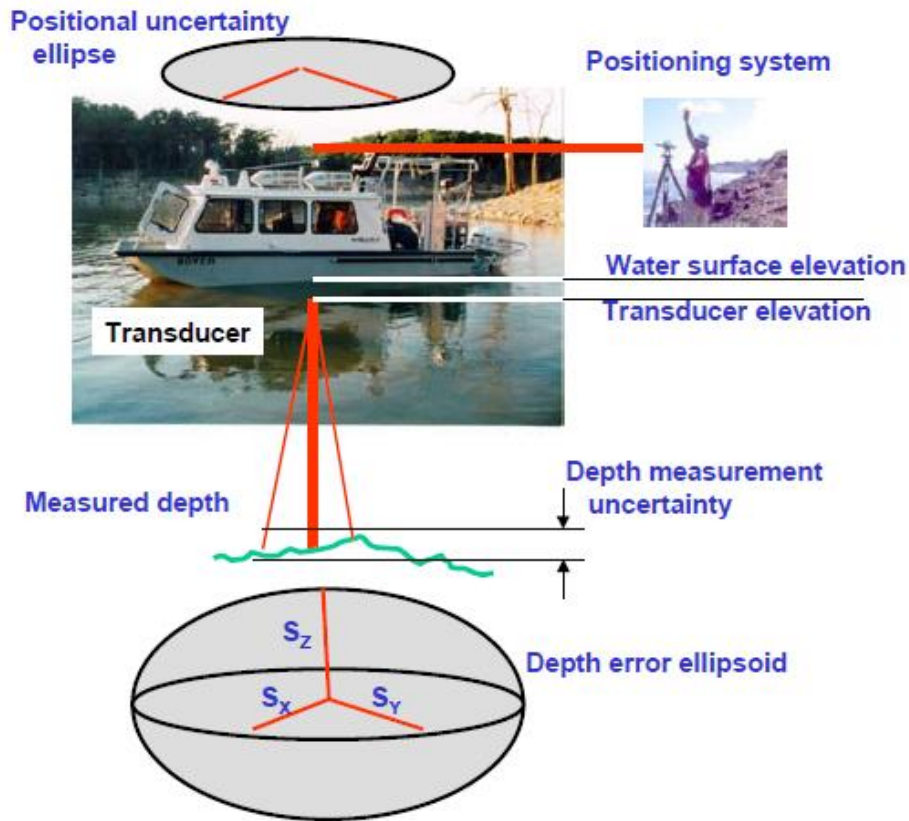


Figura 4.5.1 - Incertidumbre de la posición de un punto en el fondo.

Fuente: U.S. Army Corps of Engineers (2002).

Los errores sistemáticos (biases) involucrados en un levantamiento hidrográfico se pueden deber a la utilización de un modelo errado de marea, una calibración deficiente de la sonda, una adopción de una incorrecta velocidad de propagación del sonido en el agua y a un defectuoso cálculo del offset entre la antena del GNSS y la ubicación del transductor de la sonda. Los errores aleatorios son los propios del método de medición de marea elegido y los propios de los métodos de posicionamiento y medición de la profundidad. En la Figura 4.5.2 se plantea y explica el caso donde un levantamiento más preciso (con menores errores aleatorios o random), pero con mayores errores sistemáticos (biases) resulta finalmente el que da la batimetría más alejada de la realidad (menos exacta) (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

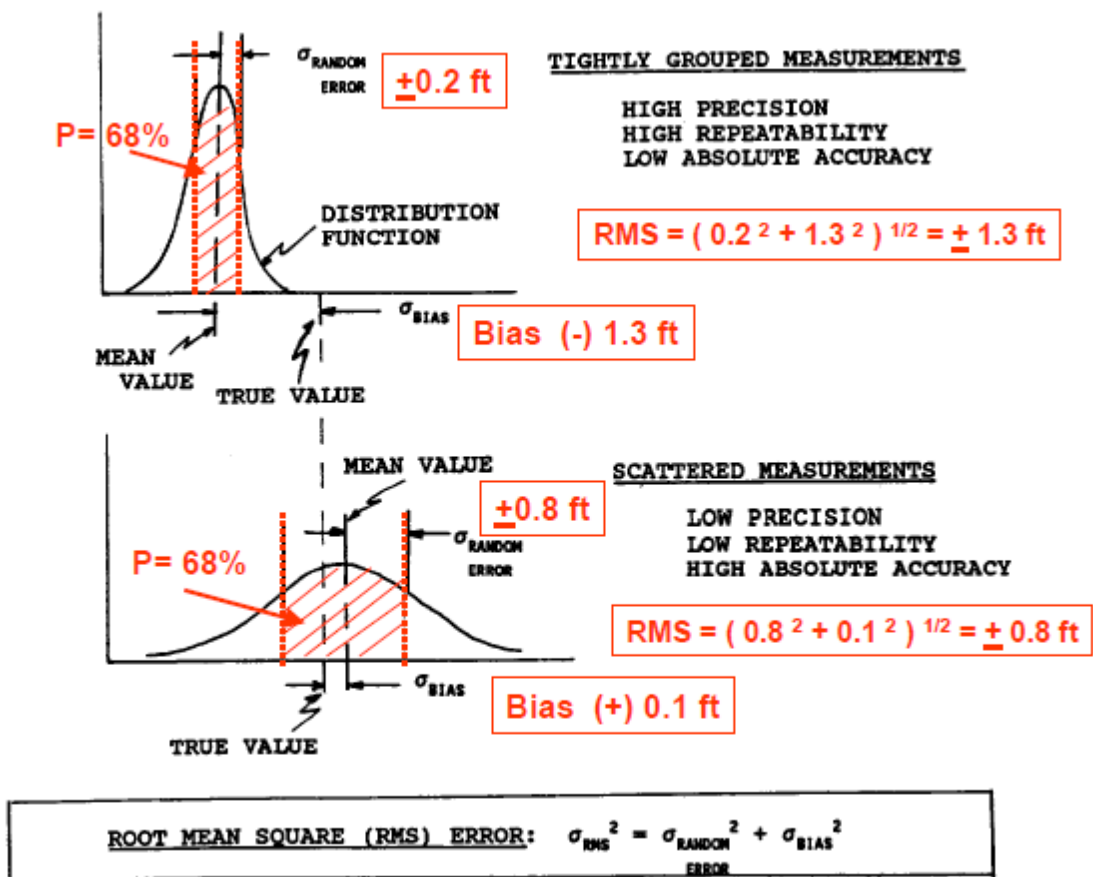


Figura 4.5.2 - Muestra dos levantamientos donde para determinar cuál es el más exacto combina los errores aleatorios con los sistemáticos. Fuente: U.S. Army Corps of Engineers (2002).

Se entiende por error medio cuadrático (x_{RMS} , del inglés root mean square) a una medida estadística de una colección de datos de una variable discreta "x", dado por las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$1. \quad x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

$$2. \quad x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [f(t)]^2 dt}$$

donde N en la primera ecuación, es el número de datos y $T_2 - T_1$, en la segunda ecuación, es el intervalo a considerar en una función continua $f(t)$.

La OHI ha dado recomendaciones sobre las tolerancias que deben observarse en los levantamientos hidrográficos (tanto en profundidad como en las coordenadas horizontales) en función de la clasificación del trabajo según el objetivo de este (OHI, 2008), publicando la Tabla de la Figura 4.5.3.

**Estándar Mínimo para Levantamientos Hidrográficos
(Para ser leído en conjunto con el texto completo de este documento)**

Orden	Especial	1a	1b	2
Descripción de áreas	Áreas donde la separación quilla-fondo es crítica	Áreas de profundidades menores de 100 metros donde la separación quilla-fondo es menos crítica, pero podrían existir <u>rasgos</u> de interés para la navegación.	Áreas de profundidades menores de 100 metros donde la separación quilla-fondo no se considera de interés para el tipo de buque que se espera transite por el área	Áreas generalmente más profundas a 100 metros donde se considera adecuada una descripción general del fondo marino.
Máximo THU permitido 95% <u>Nivel de confianza</u>	2 metros	5 metros + 5% de profundidad	5 metros + 5% de profundidad	20 metros + 10% de profundidad
Máximo TVU permitido 95% <u>Nivel de confianza</u>	a= 0.25 metros b= 0.0075	a= 0.5 metros b= 0.013	a= 0.5 metros B= 0.013	a= 1.0 metros b= 0.023
<u>Búsqueda Completa del Fondo Marino</u>	Requerido	Requerido	No requerido	No requerido
<u>Detección de rasgos</u>	Rasgos cúbicos > 1 metro	<u>Rasgos</u> cúbicos > 2 metros en profundidades hasta 40 metros; 10 % de la profundidad cuando ésta es mayor a 40 metros	No aplicable	No aplicable
Máximo espaciamiento recomendado entre líneas principales	No definido ya que se requiere una <u>búsqueda completa del fondo marino</u> .	No definido ya que se requiere una <u>búsqueda completa del fondo marino</u> .	3 x profundidad promedio o 25 metros, cualquiera que sea mayor, para LIDAR batimétrico espaciamiento entre puntos de 5 x 5 metros	4 x profundidad promedio
Posicionamiento de ayudas a la navegación fijas y topografía de interés para la navegación (95 % de <u>Nivel Confidencia</u>)	2 metros	2 metros	2 metros	5 metros
Posicionamiento de línea de costa y topografía de menos interés para la navegación (95 % de <u>Nivel Confidencia</u>)	10 metros	20 metros	20 metros	20 metros
Posición media de ayudas a la navegación flotante (95 % <u>Nivel de Confidencia</u>)	10 metros	10 metros	10 metros	20 metros

Figura 4.5.3 Normas para levantamientos hidrográficos. Fuente: OHI (2008).

En la Figura 4.5.3 se identifica como THU a la Incertidumbre Total Horizontal, que se refiere a los errores con el 95% de confianza (2σ), aceptados en el posicionamiento planimétrico de la embarcación. Se denota con TVU a la Incertidumbre Total Vertical que se refiere a los errores con el 95% de confianza, aceptados en la medición de las profundidades. En este último caso los valores de a y b para el cálculo del error en profundidad deben ser introducidos en la ecuación:

$$e = \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2}$$

Donde:

- a: es la suma de todos los errores constantes (errores sistemáticos)
- b: coeficiente de error (errores aleatorios)
- d: profundidad

En la Tabla anterior se entiende por rasgo a cualquier objeto, ya sea artificial o no, que se proyecte sobre el fondo marino que puede ser un peligro para la navegación de superficie. Con "búsqueda completa del fondo marino" se indica que se debe utilizar un método sistemático para explorar el fondo del mar para detectar los rasgos especificados. Un rasgo cúbico significa un cubo regular dispuesto en el fondo.

Con propósitos de la seguridad en la navegación, el uso de un barrido mecánico (rastras) puede ser un método considerado suficientemente preciso para levantamientos de Orden Especial y Orden 1a, con la finalidad de que garantice una mínima profundidad segura a través de un área. Actualmente para esta revisión del fondo se utiliza el sonar lateral y no es necesaria cuando el levantamiento se realiza con una sonda multihaz.

El "Orden Especial" es el más riguroso y su uso se destina solamente para aquellas áreas donde es crítica la separación entre la quilla de las embarcaciones y el fondo marino. Luego se requiere una búsqueda completa del fondo y el tamaño de los rasgos a ser detectados por esta búsqueda se mantiene deliberadamente pequeño. Puesto que la separación quilla-fondo es crítica, se

considera inverosímil que los levantamientos de orden especial sean conducidos en aguas más profundas a 40m. Los ejemplos de las áreas que pueden justificar levantamientos de orden especial son: áreas de atraque, puertos y áreas críticas de los canales de navegación.

El "Orden 1a" se destina para aquellas áreas donde la separación quilla - fondo es menos crítica que para el Orden Especial. Donde puedan existir rasgos artificiales o naturales que sean de preocupación para la navegación, se requiere una búsqueda completa del fondo marino, no obstante, el tamaño de la característica a ser detectadas es más grande que para las de Orden Especial. Los levantamientos de Orden 1a pueden ser limitados para aguas más bajas que 100 metros.

El "Orden 1b" es apropiado para áreas menos profundas que 100 metros, donde una descripción general del fondo marino es adecuada para el tipo de embarcaciones que se espera transiten por el área. No se requiere una búsqueda completa del fondo marino, lo que significa que algunos rasgos pueden ser perdidos, aunque el máximo espaciamiento entre líneas de sondajes permisibles limitará el tamaño de los rasgos que probablemente permanecerán sin detectar. Este Orden de levantamiento se recomienda solamente donde la separación quilla-fondo no sería considerado un problema. Un ejemplo sería un área donde las características del fondo son tales que la probabilidad de que exista un rasgo artificial o natural en fondo marino que represente un peligro para la navegación esperada en el área sea bajo.

El "Orden 2" es el menos riguroso y se destina para aquellas áreas donde la profundidad es tal que una descripción general del fondo marino se considera adecuada. No se requiere una búsqueda completa del fondo marino. Se recomienda que los levantamientos de Orden 2 estén limitados para áreas más profundas que 100 metros, ya que una vez que la profundidad excede los 100 metros, la existencia de rasgos artificiales o naturales que sean lo suficientemente grandes como para afectar a la navegación y que todavía permanezcan sin detectar por un levantamiento de Orden 2, se considera improbable.

Resumiendo, existen dos tipos de incertidumbres que se deben tener en cuenta en cualquiera de los levantamientos:

- Incertidumbre de posicionamiento: incertidumbre en la posición de los sondajes.
- Incertidumbre vertical: incertidumbre en la determinación de la profundidad.

Con respecto a la incertidumbre en el posicionamiento si se utiliza GNSS diferencial (DGNSS) la precisión va a ser menor de $\pm 2\text{m}$. En el caso de este trabajo, se ha utilizado un sistema GNSS RTK cuya precisión horizontal alcanza niveles del orden de $\pm 3\text{cm}$, muy superior al requerimiento de la norma.

Para la medición de profundidades, se utilizó una ecosonda de grado hidrográfico de simple frecuencia (200kHz) la cual por definición del fabricante ofrece una precisión en la medida de $\pm 1\text{cm} + 0.1\%$ de la profundidad. Dado que la hipótesis de estudio de este trabajo plantea la capacidad de utilizar un GNSS RTK para la determinación del verdadero nivel del agua in-situ durante el levantamiento, lo que incluye a la marea, puede considerarse que el GNSS interviene y es protagonista también en la medición de profundidades y su post-procesamiento.

Como ya se explicó, para el cálculo de la incertidumbre en los sondajes se aplica la ecuación:

$$e = \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2}$$

Como puede observarse en la Tabla de la Figura 3.4.5, para los levantamientos de Orden Especial los parámetros a y b tienen un valor impuesto de:

$$a = 0.25\text{m}$$

$$b = 0.0075\text{m}$$

Luego, si la profundidad media de la batimetría realizada es $d = 12\text{m}$, se obtiene un valor de 0.267m para el máximo de incertidumbre total vertical (TVU) permisible para el tipo de levantamiento escogido. Esto significa que los errores totales resultantes de los sondeos del levantamiento deben ser menores a ese valor.

4.6 Dinámica de la embarcación durante el levantamiento

Para la instalación de los sensores de medición abordo, la embarcación suele estar definida por un sistema de coordenadas de tres ejes X, Y, Z. Luego el transductor, el GNSS y otros sensores de movimiento deben montarse conociendo la relación entre estos y el punto origen del sistema de referencia de la embarcación (0,0,0) y quedando así definidos por sus offsets respecto del origen (Figura 4.6.1).

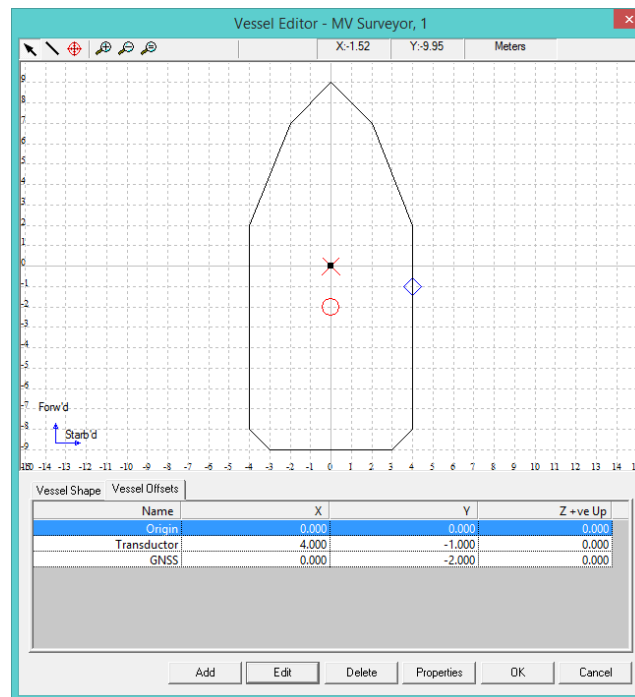


Figura 4.6.1 – Editor de embarcaciones y offsets de Trimble HYDROpro

El comportamiento dinámico de la embarcación mientras se desplaza por el cuerpo de agua en movimiento produce oscilaciones propias del medio, de modo tal que el tren de olas y el rumbo que se toma respecto de este alteran la

verticalidad del haz de la ecosonda. Tres rotaciones ocurren en forma simultánea y combinada durante la navegación. Estos son como se ve en la Figura 4.6.2 el Pitch o cabeceo el cual se produce en torno al eje X produciendo la elevación o hundimiento de la proa, el Roll o balanceo también llamado rolido, que se produce en torno al eje Y, generando un movimiento de elevación y descenso de las bandas de la embarcación, el Yaw o ceñida que es la rotación de la crujía de la embarcación en torno al eje Z, lo que produce una deriva respecto de la línea de navegación.

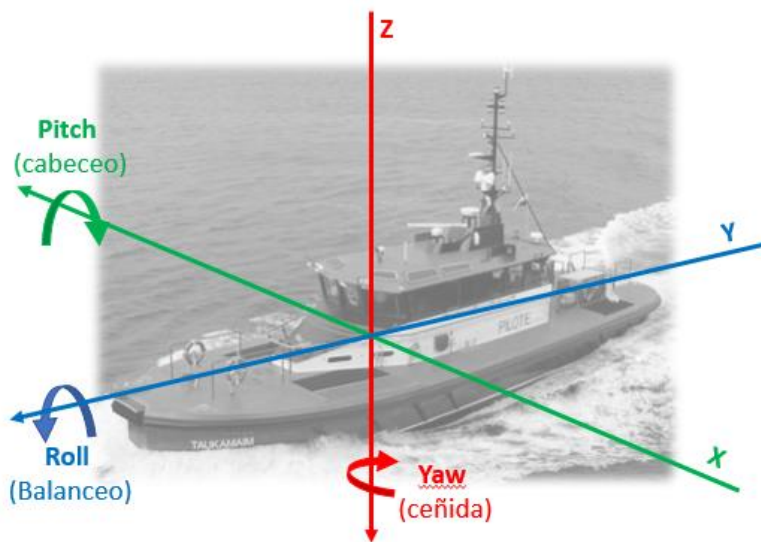


Figura 4.6.2 – Cabeceo / Balanceo o Rolido / Ceñida

Los sistemas de adquisición de datos batimétricos embarcados producen profundidades en relación con el transductor. Estas profundidades luego se trasladan al punto origen de la embarcación al igual que la posición GNSS. La combinación de la altura del GNSS RTK y la profundidad proporciona una medición directa desde el elipsoide WGS84 hasta el fondo. El cambio en la separación vertical entre la antena y el punto de referencia de la embarcación variará según los offsets horizontal y vertical (medidos en el marco de la embarcación) y el ángulo de cabeceo y balanceo de la embarcación (Figura 4.6.3).

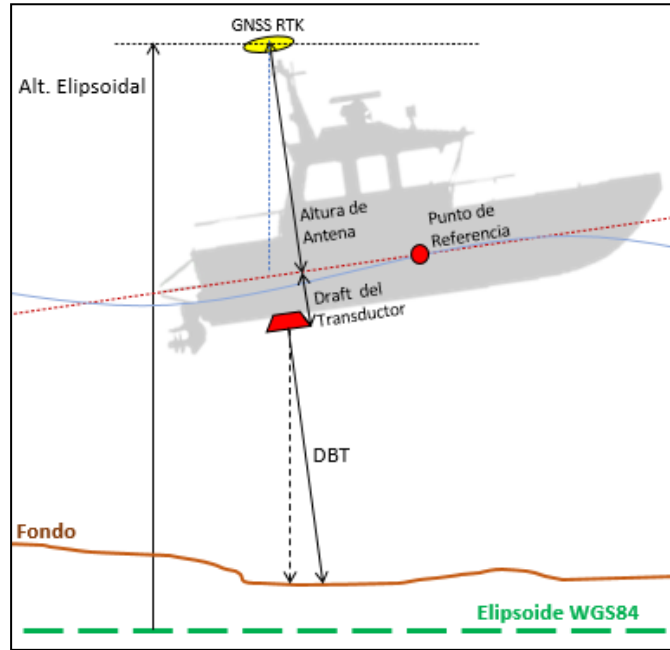


Figura 4.6.3 – Efecto de Cabeceo

En la Figura 4.6.4 se muestra un ejemplo del efecto del cabeceo en el offset vertical entre la antena GNSS y el punto de referencia de la embarcación, dado un offset horizontal "Y". El offset vertical en estado de reposo (sin cabeceo), está representada por "Z" en verde; el offset vertical con un ángulo de cabeceo " α ", se representa como la línea discontinua en negro (Z'). Debe notarse que el brazo de palanca Z' será siempre menor que Z, por lo tanto, cuanto menor el offset horizontal, menor el cambio en el offset vertical (Mills et al., 2014).

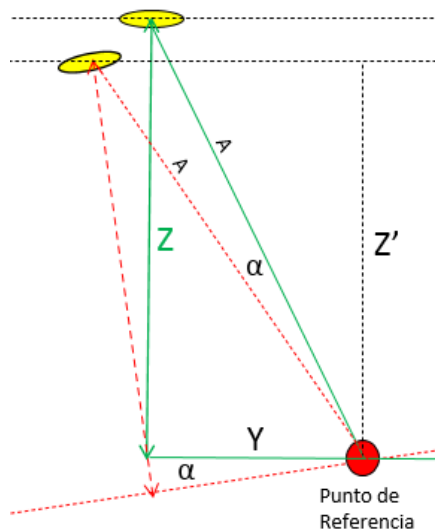


Figura 4.6.4 – Efecto del Pitch y el offset horizontal Y, en la traslación vertical del punto de referencia.

Fuente: Alkan et al. (2006)

Si se considera que la altura GNSS puede ser utilizada para compensar la altura del nivel del agua influenciada por la marea, es preciso mantener una relación altimétrica fija entre la antena GNSS, el punto de referencia y el transductor. Sin embargo, una variación en la verticalidad de la antena puede producir también una variación de la altura respecto del transductor que se hace más notable si entre ambos hay una distancia horizontal (offset Y).

Para el método de compensación de marea por RTK Tide que se estudia, deben considerarse además una serie de componentes verticales que intervienen e influyen directamente en las profundidades medidas. En la Figura 4.6.5 se identifican cada uno de los componentes y la terminología asociada.

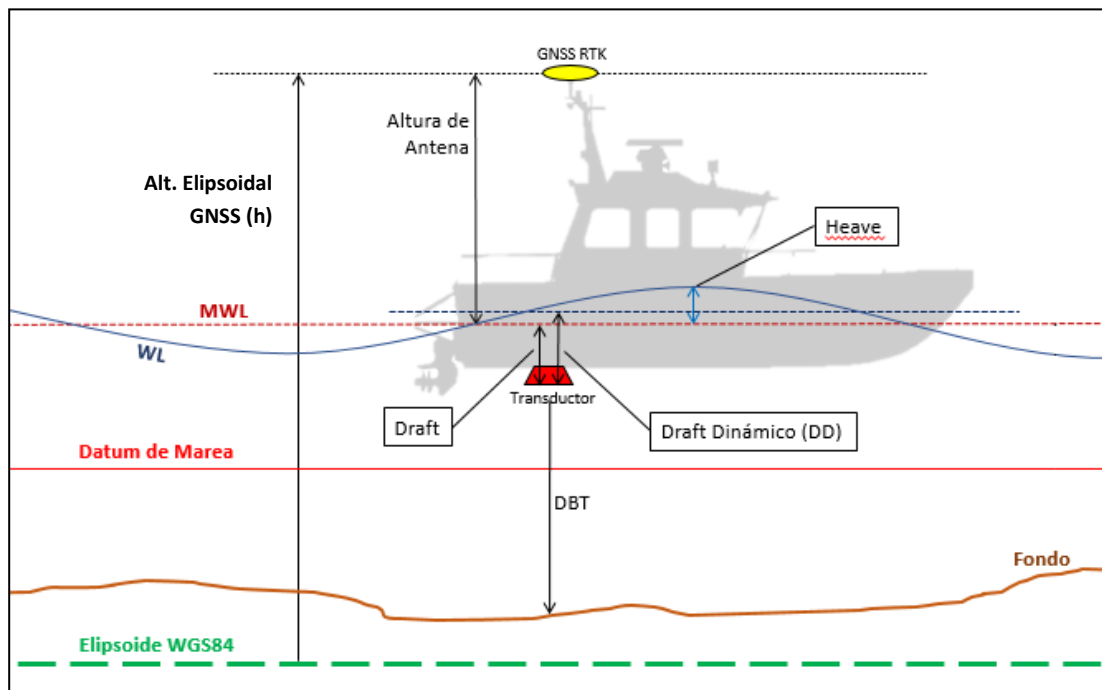


Figura 4.6.5 – Componentes verticales

MWL: Mean Water Level, es el nivel medio del agua influenciado por la marea.

WL: Water Level, identifica al nivel del pelo de agua real con el efecto del movimiento vertical producido por el oleaje (Heave).

Altura Elipsoidal (h), representa la altura medida por el receptor GNSS del centro de fase su antena, en el sistema de referencia basado en el elipsoide WGS84.

Atura de Antena, es la distancia vertical medida entre la línea de flotación de la embarcación (pelo de agua) en reposo y el centro de fase de la antena GNSS. Para la técnica RTK Tide este valor es muy importante y debe considerarse con especial cuidado.

Draft (calado del transductor), es la distancia vertical medida entre la línea de flotación con la embarcación en reposo y la cara activa del transductor. Este es otra magnitud que debe medirse cuidadosamente y uno de los tres factores a considerarse al momento de realizar la calibración de la ecosonda.

Draft Dinámico, es el calado del transductor, pero en condición de navegación, influenciado por los efectos hidrodinámicos conocidos como Settlement y Squat (Asentamiento), los que producen una alteración del calado en reposo y varía con la velocidad de la embarcación y la profundidad. En verdad, estos fenómenos se generan a partir la fuerza hidrodinámica en torno a la embarcación cuando esta se propulsa y navega, que produce una depresión o elevación del nivel del agua circundante. Esto es así por el equilibrio que deben mantener la energía cinética y la energía potencial del fluido. La embarcación acompañando la variación del nivel del agua, mantiene su plano de flotación y consecuentemente el transductor se acerca o aleja más al fondo, dando como resultado profundidades menores o mayores a las que mediría si el sistema estuviera quieto en estado de reposo.

En la ejecución de la batimetría, durante el procedimiento de medida, intervienen diversos errores que influyen en la precisión a la hora de determinar la profundidad en un punto. En un elipsoide de error pueden representarse estos errores donde cada semieje corresponde a las direcciones de las coordenadas (ex, ey, ez). Las correcciones efectuadas sobre los datos, las calibraciones, los factores tiempo, velocidad y distancia, intervienen con fuerza en la precisión de un levantamiento hidrográfico (Ballesteros et al., 2010). Los errores para tener en cuenta son:

- e_z → Velocidad del sonido
- e_B → Balanceo o rolo (Roll)

- $e_c \rightarrow$ Cabeceo (Pitch)
- $e_o \rightarrow$ Compensación del oleaje (Heave)
- $e_{\text{calado-din}} \rightarrow$ Calado dinámico (Draft Dinámico)
- $e_{\text{marea}} \rightarrow$ Corrección de marea (Tide)

A continuación, considerando que dichos errores son independientes entre sí, se calcula el error total en la determinación de la profundidad reducida e_z para el sistema del TVU= $\pm 26,5\text{cm}$ como la composición cuadrática de los errores nombrados anteriormente (Ballesteros et al., 2010).

$$e_z = \sqrt{e_{z_c}^2 + e_B^2 + e_c^2 + e_o^2 + e_{\text{calado-din}}^2 + e_{\text{marea}}^2}$$

$$e_z = \pm \sqrt{e_{z_c\text{-perfil}}^2 + e_{z_c\text{-}\beta}^2} = \pm \sqrt{2,75^2 + 0,33^2} = \pm 2,77 \text{ cm}$$

$$e_B=0,2^\circ = \pm 0,74\text{cm}$$

$$e_c=5^\circ = \pm 0,03\text{cm}$$

$$e_o = \pm 5\text{cm}$$

$$e_{\text{calado-din}} = e_{\text{calado-est}} = \pm 2\text{cm}$$

$$e_{\text{marea}} = \pm 1\text{cm}$$

Sustituyendo los valores en la expresión anterior se obtiene el error total de:

$$e_z = \sqrt{2,77^2 + 0,74^2 + 0,03^2 + 5^2 + 2^2 + 1^2} = \pm 6,18 \text{ cm}$$

Este error ha sido calculado para condiciones de sondeo desfavorables, para una profundidad media de $z = -11,682\text{m}$, con un ángulo extremo de apertura del haz $\beta=65^\circ$ y con unas condiciones pésimas de cabeceo y balanceo.

La tabla de la Figura 4.6.6 brinda la estimación del error para una ecosonda estándar y para condiciones de operaciones particulares (OHI, 2005).

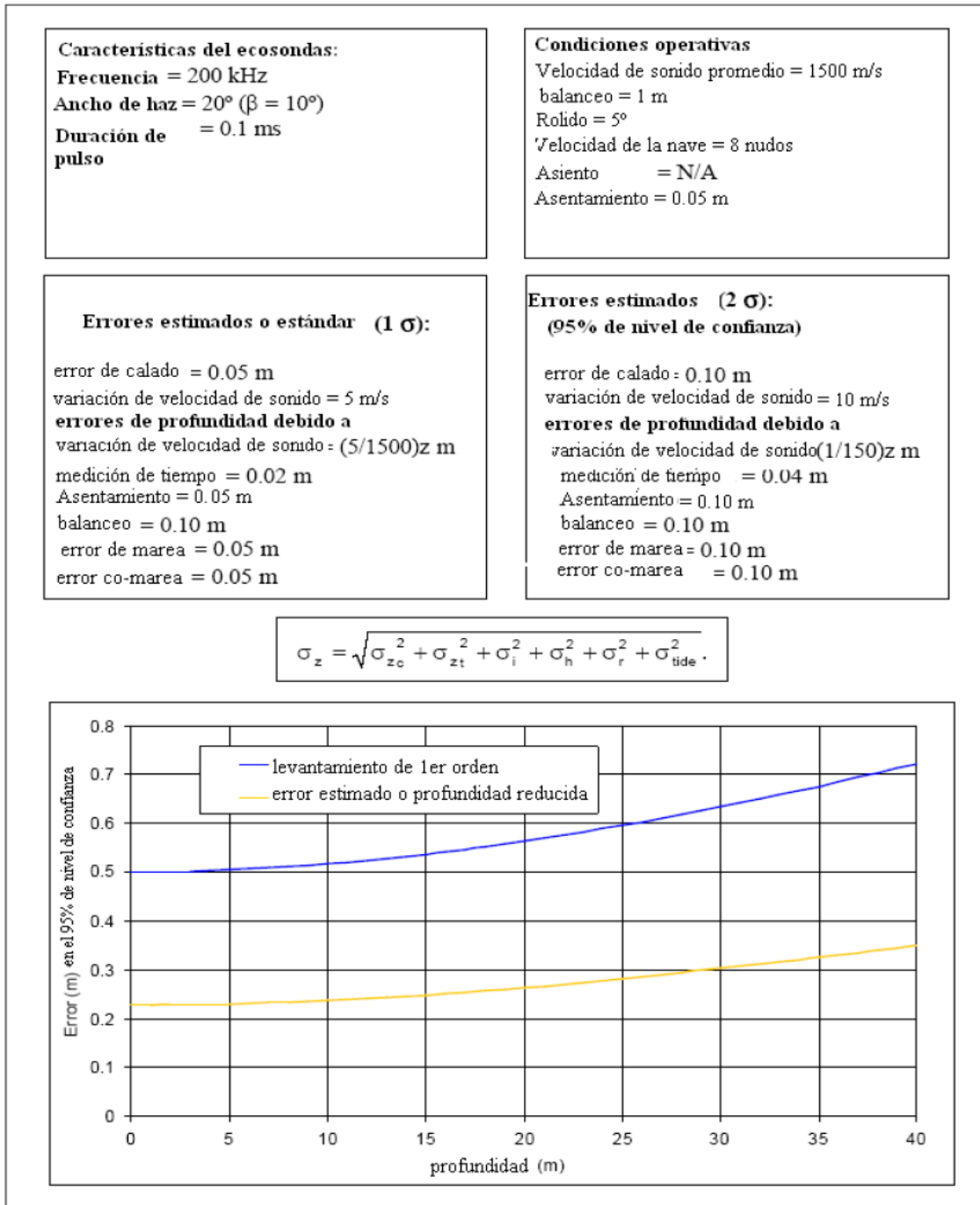


Figura 4.6.6. Estimación de errores de una ecosonda. Fuente: OHI (2005).

4.7 – Incertidumbres en la medición de la profundidad y como interviene el GNSS RTK

No hay dudas respecto a que el levantamiento hidrográfico tradicional desde una embarcación supone un reto en sí mismo debido a que la superficie

del fondo que se debe medir está oculta a la vista del hidrógrafo por una masa de agua que se encuentra en mayor o menor medida, en permanente movimiento. A su vez la embarcación debe trasladarse sobre esta superficie sorteando corrientes, oleaje y viento, recorriendo perfiles teóricos proyectados en gabinete, lo que hace aún más complejo el proceso.

La incertidumbre asociada con las profundidades obtenidas refleja el efecto de todo el equipamiento utilizado tanto a bordo, como auxiliar instalado en la costa, las traslaciones y los procesos a los que se someten los datos. La incertidumbre total vertical (TVU) debe ser modificada cuando se realiza un levantamiento con GNSS RTK de alta precisión ya que la altura calculada con éste interviene en el cálculo de la profundidad actuando como equipo sensor de las variaciones de altura en el pelo de agua (Mills et al, 2014).

Para un levantamiento referenciado al elipsoide o ERS (del inglés Ellipsoidally Referenced Survey) se debe incluir la incertidumbre de la componente vertical del GNSS, así como el efecto de la traslación de la posición desde la antena GNSS al punto de referencia del barco. La incertidumbre asociada con esta inclusión también tiene en cuenta el efecto del cabeceo, del rolido y las incertidumbres asociadas con esas mediciones. Si se va a medir el efecto del oleaje (Heave), también habrá incertidumbre asociada a esta componente de movimiento vertical. Si no se lo mide, habrá incertidumbre asociada con la interpolación de la altura de la embarcación entre las observaciones GNSS. En algunos casos, la componente vertical de este puede acotarse más mediante la aplicación de un filtro de suavizado, agregando de esta manera otro factor más a la determinación de la incertidumbre (Mills et al, 2014).

La última y más problemática incertidumbre asociada con el método RTK Tide es la relativa al modelo que debe desarrollarse de separación entre el elipsoide WGS84 y el NRS, donde la incertidumbre se deriva del modelo en sí y de su aplicación.

Capítulo 5 – Las Mareas

5.1 – Dinámica oceánica

Todos los cuerpos de agua del planeta por sus características físicas se ven afectados por fuerzas que modifican su distribución modificando su altura. El movimiento de ascenso y descenso periódico del nivel del mar que resulta de la fuerza de atracción gravitacional de la Luna y el Sol que actúan sobre la Tierra en rotación es lo que se define como marea astronómica. Este movimiento viene acompañado de otro horizontal provocado por las mismas causas denominado corriente de marea.

Pero la Luna y el Sol no son las únicas razones por las que las aguas modifican su altura periódicamente. Existen otros factores que influyen en ese movimiento armónico haciéndolo más o menos irregular y dificultando su predicción. Por orden de importancia se puede destacar a la meteorología como principal responsable de estas variaciones a partir de la acción de los vientos y variaciones de presión atmosférica, apareciendo el concepto de onda de tormenta (ODT). Si la diferencia entre el nivel de agua, bajo los efectos de la acción meteorológica, y la marea astronómica cumple con ciertos criterios de magnitud y duración se producen las ODT (D'Onofrio et al, 2008). Los cambios en la presión atmosférica influyen en el nivel del agua actuando en forma inversamente proporcional. A mayor presión atmosférica, menor nivel de agua y a menor presión atmosférica, mayor altura del agua.

Otros elementos que afectan el nivel de las aguas y el régimen de variación son los accidentes geográficos, la topografía del fondo, las aguas poco profundas (o aguas someras), la desembocadura de los ríos, las ondas producidas por sismos marinos (Tsunamis), los meteotsunamis (oscilaciones de alta frecuencia que vienen montadas en las mareas, producidas por el pasaje de frentes meteorológicos por la plataforma continental), las seiches (ondas estacionarias que se generan en cuerpos de agua cerrados o parcialmente cerrados, que se manifiestan como oscilaciones de alta frecuencia montada sobre la marea), las

precipitaciones, la fusión de los hielos, la temperatura y salinidad del agua (D'Onofrio, 2016).

La sumatoria de todos estos elementos da como resultado una marea total que es en definitiva el nivel de agua que se da en cada sitio bajo ciertas y variables condiciones, pero claramente las componentes más importantes del desplazamiento de grandes masas de agua están dadas por la acción de los movimientos lunisulares, cuyo comportamiento resultante (marea astronómica) puede predecirse con bastante exactitud.

Como se ha mencionado, las mareas astronómicas se producen por acción de la atracción gravitatoria que ejercen en conjunto la Luna y el Sol sobre los cuerpos de agua de la Tierra. La posición relativa entre estos y la Tierra, generan mareas de mayor o menor magnitud dependiendo la posición geográfica y la época del año.

Las mareas son ondas, consecuentemente tienen valores máximos y mínimos en función del tiempo. Una marea alta o pleamar es producida por la acumulación de agua resultante del flujo horizontal hacia la región de máxima atracción de las fuerzas gravitacionales lunar y solar combinadas. El efecto contrario se conoce como bajamar.

Se define a la fuerza generadora de marea debida a la Luna como la resultante de la fuerza centrífuga causada por el movimiento de la Tierra alrededor del centro de masa del sistema Tierra Luna y de la fuerza de atracción gravitacional de la Luna. Siguiendo un razonamiento similar se determina la fuerza generadora de marea debida al Sol, como la resultante de la fuerza centrífuga causada por el movimiento del centro de masa del sistema Tierra - Luna en su órbita alrededor del Sol y de la fuerza de atracción gravitacional del Sol.

Si se determina la fuerza de marea en distintos puntos de la superficie de la Tierra, se obtiene una distribución de estas como muestra la Figura 5.1.1.

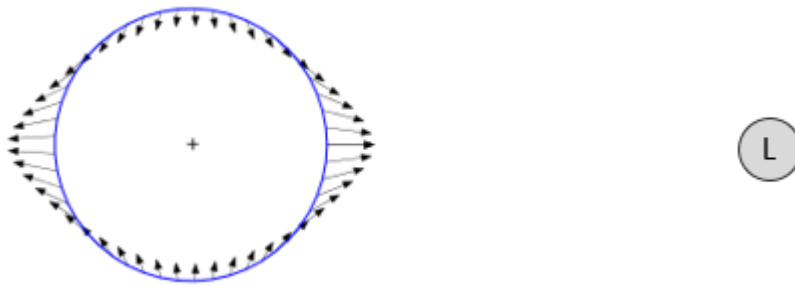


Figura 5.1.1 – Acción de las fuerzas de marea debidas a la Luna sobre la Tierra.

Fuente <https://en.wikipedia.org/wiki/Spaghettification>

Una marea alta adicional (pleamar) se produce en el lado opuesto de la Tierra, donde la fuerza centrífuga del sistema orbital predomina sobre la atracción gravitacional del Sol y de la Luna (OHI, 2005), como se puede ver en la Figura 5.1.2. Como en todo sistema en equilibrio, a la vez se producen zonas donde el agua, desplazada hacia las regiones de mayor acumulación, deja depresiones o niveles más bajos de acumulación o de bajamar.

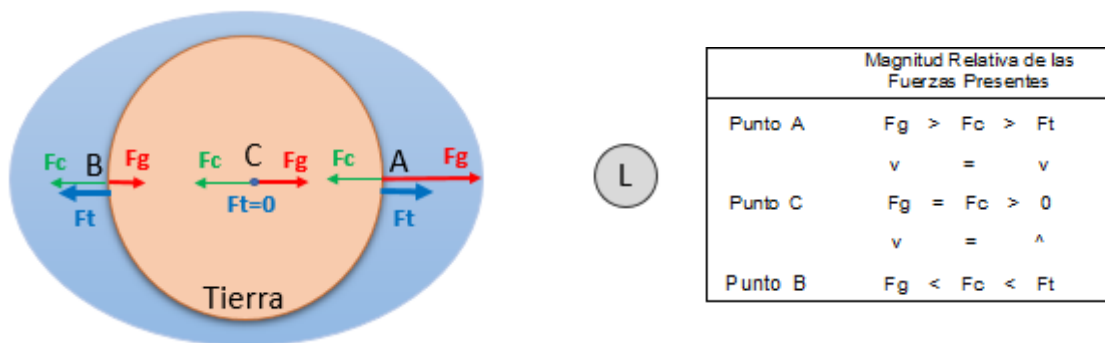


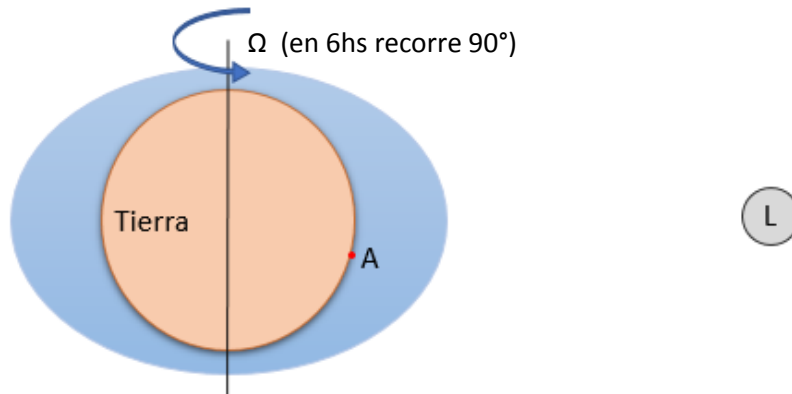
Figura 5.1.2 – Marea alta y marea baja debidas a la acción gravitatoria de la Luna. Fuente: OHI (2005)

F_c = Fuerza Centrífuga debido a la revolución de la Tierra y la Luna alrededor de su centro de masa.

F_g = Fuerza Gravitacional debido a la Luna

F_t = Fuerza Resultante del levantamiento de marea debido a la Luna

La alternancia entre una Pleamar y una Bajamar desde un punto de vista teórico es un efecto relativo al observador ubicado en la superficie del planeta, donde la rotación terrestre en relación con la distribución de aguas genera el efecto de variación de altura de la marea (Figura 5.1.3).



Ω : Rotación terrestre

Figura 5.1.3 – Variación de la altura de la marea. Fuente: OHI (2005)

Es así como un observador ubicado en un punto A va a observar una pleamar. Suponiendo que la Luna no se mueve consecuentemente las aguas permanecen en la misma posición, transcurridas 6 horas el punto A rotó 90° registrándose una bajamar y así sucesivamente. Este es el caso de un modelo de marea semidiurna donde se producen dos pleamares y dos bajamares por día.

Esta representación de la distribución de las masas de agua corresponde a lo que se conoce como Teoría de Equilibrio de la Marea, o Teoría Estática de la Marea, presentada por sir Isaac Newton en su libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1686).

Esta teoría se basa en algunas hipótesis que declaran que:

1. Las aguas cubren totalmente la superficie de la Tierra, que es esférica y de profundidad uniforme.

2. Sobre las aguas actúan solamente las fuerzas generadoras de marea lunares y solares y la atracción de la gravedad terrestre.
3. Las aguas forman una superficie donde las fuerzas anteriores están en equilibrio constituyendo una superficie equipotencial, es decir donde la resultante de la fuerza de marea y la fuerza de gravedad son perpendiculares a la superficie terrestre, es decir que su trabajo moviéndose por la superficie misma es igual a cero (0).
4. No se tiene en cuenta la fricción e inercia.

Existen otros factores que actúan sobre las mareas astronómicas modificando la magnitud de éstas, que son la distancia de la Luna y el Sol y la posición de la terna Tierra – Luna – Sol. La órbita de la Luna es elíptica y la Tierra está ubicada en uno de los focos de esa elipse. De igual forma que el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol describe una elipse y este último se ubica en uno de los focos (Figura 5.1.4).

El período orbital de la Luna es de aproximadamente 28 días de modo que, por lo dicho, una vez por mes ésta se encuentra en el punto más cercano a la Tierra (perigeo) y una vez al mes en el punto más alejado (apogeo). Esto produce que durante el perigeo se produzcan mareas de mayor magnitud por la menor distancia Tierra - Luna.

Con un comportamiento similar, la distancia Tierra – Sol varía produciendo que una vez al año la Tierra se encuentre en su punto más cercano al Sol (perihelio) y lo opuesto en su punto más lejano (afelio).

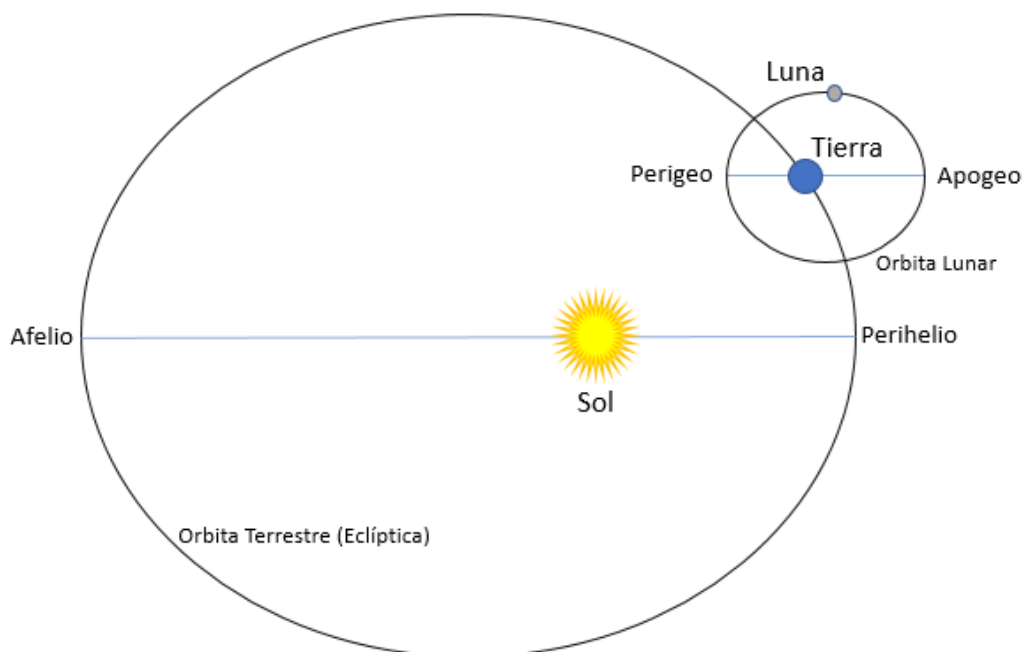


Figura 5.1.4 – Órbitas, lunar y terrestre

Siendo la distancia Tierra – Luna el factor más importante que influye sobre las mareas, la posición relativa de la terna Tierra – Luna – Sol, también influye en el comportamiento y magnitud de estas. Cuando la Luna se encuentra en oposición o conjunción (Luna Nueva o Luna Llena) las fuerzas de atracción de ambos astros actúan en una dirección similar y se suman, dando como resultado mareas de mayor amplitud. Estas mareas son conocidas como mareas vivas o de sicigias (Figura 5.1.5).

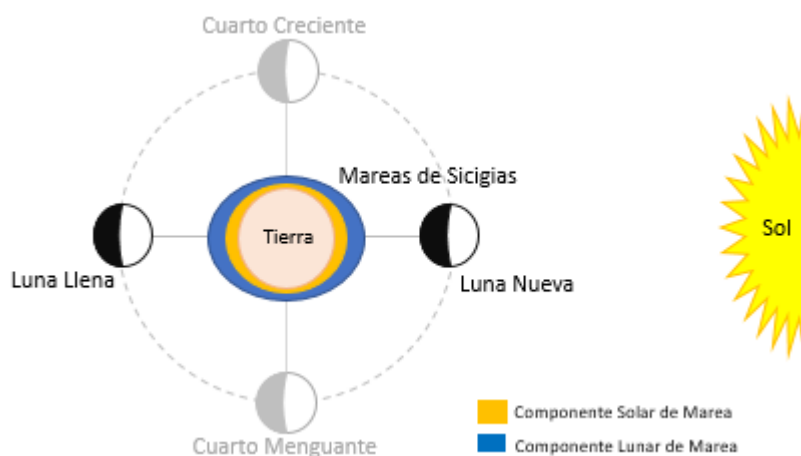


Figura 5.1.5 – Mareas Vivas o de Sicigias

En el caso opuesto cuando la Luna está en fases de cuadratura (Cuarto Creciente o Cuarto Menguante) las fuerzas de atracción ejercidas por la Luna y

el Sol no actúan en la misma dirección y la sumatoria de estas resulta en mareas de menor amplitud las que se denominan mareas muertas o de cuadratura (Figura 5.1.6).



Figura 5.1.6 – Mareas Muertas o de Cuadratura

5.2 Régimen de Marea

La respuesta de los océanos a las fuerzas que generan las mareas es muy compleja y las características de estas mareas varían significativamente de un sitio a otro (Pugh et al., 2014).

Se define como pleamar al nivel máximo alcanzado por una marea creciente. Se conoce como bajamar al nivel mínimo alcanzado por una marea bajante. La diferencia de altura entre una pleamar y la bajamar que le sigue se denota como amplitud de la marea (Figura 5.2.1).

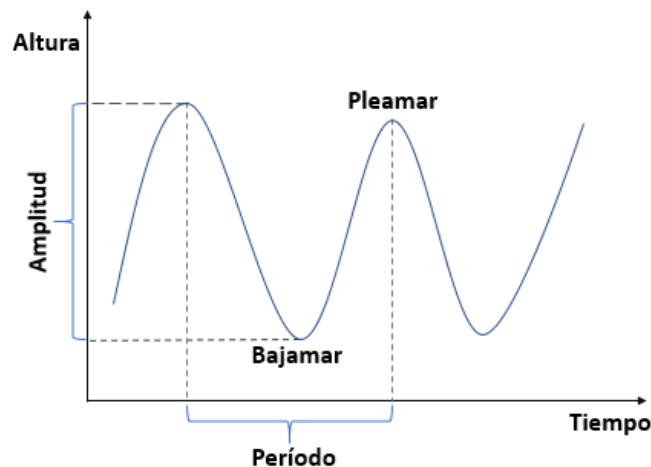


Figura 5.2.1 – Pleamar, bajamar, amplitud y período de la marea

El comportamiento verdadero de las mareas en diferentes puntos del planeta difiere significativamente por varias razones, algunas propias de la forma y características de la Tierra y otras astronómicas.

El agua es un fluido que cumple con su respuesta a las fuerzas generadoras de mareas (OHI, 2005), pero la Tierra no es una esfera de superficie lisa y con una profundidad uniforme, tampoco está completamente cubierta de agua. Los continentes, dividen el fluido en océanos, mares y otros cuerpos de agua más pequeños. Cada uno tiene un período natural de oscilación dependiendo de su tamaño y profundidad. Los movimientos de marea son afectados por la fricción con el fondo y con otras corrientes oceánicas, perturbando o reflejando dichos movimientos, disminuyendo o acentuando varios componentes de las fuerzas que las producen.

Dadas las variaciones de distancias entre la Tierra, la Luna y el Sol y los cambios de posiciones relativas entre estos, sumados a la morfología de las costas, la profundidad y la ubicación del punto donde se observa, las mareas se comportan en forma diferente presentando alteraciones en su amplitud o en su período. Estas alteraciones o anomalías permiten describir y clasificar los regímenes de marea en diferentes partes del mundo.

De la teoría estática de la marea surge que la marea astronómica puede ser pensada como una sumatoria de ondas, conocidas como componentes armónicas, las cuales representan los distintos efectos de la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol sobre el agua de los océanos.

El estudio de la marea astronómica generalmente se aborda desde dos puntos de vista:

1. Calculando las amplitudes y fases de las principales ondas componentes de la marea (método de análisis armónico)
2. Utilizando modelos numéricos desarrollados a partir de las ecuaciones de la hidrodinámica.

Las ondas componentes de la marea reflejan todas estas variaciones que coinciden con los períodos de los movimientos astronómicos relativos (Tierra-Luna-Sol), permitiendo predecir el comportamiento del nivel del agua en el tiempo, mediante predicciones de marea astronómica de gran exactitud y a muy largo plazo.

La marea astronómica se aproxima por la siguiente expresión (Jalón-Rojas, 2013)

$$\xi_{MA}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} a_i \cos(\omega_i t + \alpha_i)$$

Donde:

a_0 : nivel medio

a_i : amplitud de la onda componente i

ω_i : frecuencia de la onda componente i

α_i : desfase inicial de la onda componente i

t : instante en que se calcula la marea

\mathcal{N} : número de componentes consideradas

Algunas de las componentes principales de las mareas y su fuente se muestran en la Figura 5.2.2:

Componentes principales de la Marea		
Nomenclatura	Periodo (horas)	Componente / Fuente
M₂	12.42	Componente principal, mareas semidiurnas / Luna
S₂	12.00	Componente principal, mareas semidiurnas / Sol
N₂	12.66	Componente debida a la variación de la distancia Tierra – Luna
K₂	11.97	Componente debida a la declinación del Sol y la Luna
K₁	23.93	Componente debida a la declinación del Sol y la Luna
O₁	25.82	Componente principal, mareas diurnas / Luna
P₁	24.07	Componente principal, mareas diurnas / Sol
Q₁	26.87	Componente debida a la variación de la distancia Tierra – Luna

Figura 5.2.2. Ondas componentes principales de la marea. Los subíndices 1 indican componentes diurnas. Los subíndices 2 indican componentes semidiurnas. Fuente: modificado de http://oceanografia-gral-fis.at.fcen.uba.ar/TP4-Biol&Geol/Mareas_2010.pdf

Considerando la amplitud (H) de las principales componentes armónicas diurnas (K_1 y O_1) y semidiurnas (M_2 y S_2), puede calcularse un parámetro que define el tipo de marea predominante en cada lugar (régimen de marea). Este parámetro se lo conoce como factor de forma (F) y se lo representa con la siguiente expresión:

$$F = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}}$$

A partir del valor resultado de este factor (F) se definen cuatro regímenes diferentes (Defant, 1961):

- Si $F < 0,25$: la marea es semidiurna, es decir se producen 2 bajamares y 2 pleamares por día, aproximadamente de la misma altura.
- Si $0,25 \leq F < 1,5$: la marea es mixta, con predominancia semidiurna. En la mayoría de los casos se producen 2 bajamares y 2 pleamares por día, pero con pronunciadas desigualdades diurnas, es decir se producen diferencias en la altura de las pleamares, mientras que las alturas de las bajamares pueden ser similares o presentar diferencias. En ciertas ocasiones puede producirse 1 bajamar y una pleamar al día.
- Si $1,5 \leq F < 3$: la marea es mixta, con predominancia diurna. Esto significa que se producen 1 bajamar y 1 pleamar por día, aunque también pueden producirse 2 bajamares y 2 pleamares, con una marcada desigualdad diurna (diferencia de altura entre una pleamar y la bajamar consecutiva).
- Si $3 \leq F$: la marea es diurna, produciéndose 1 bajamar y una pleamar por día.

La Figura 5.2.3 muestra las curvas que caracterizan a los 4 regímenes de marea (Defant, 1961).

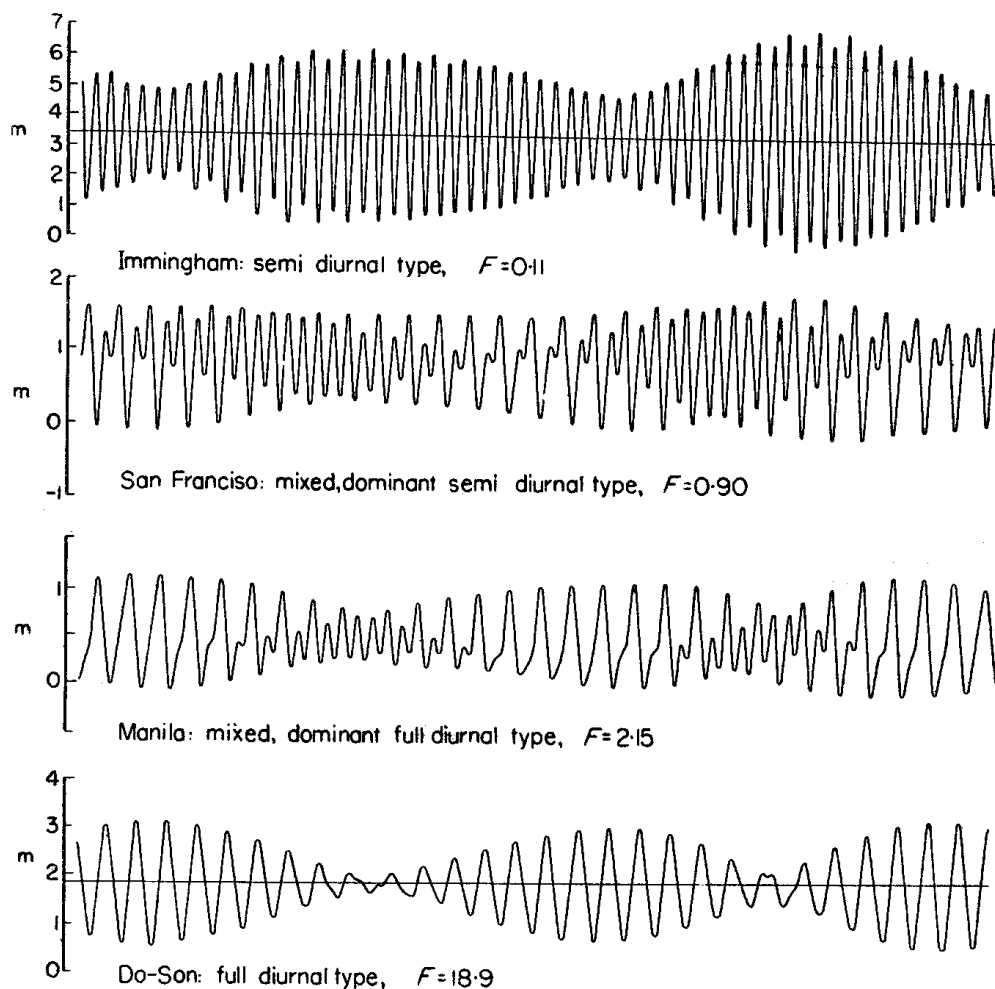


Figura 5.2.3. Curvas que caracterizan a los 4 regímenes de marea, con su correspondiente factor de forma (F). Fuente: Defant, 1961.

El litoral marítimo argentino, posee regímenes de marea diferentes según la región. En la Península Antártica predominan las mareas mixtas preponderantemente semidiurnas y diurnas. Más al norte, entre Tierra del Fuego y Bahía Blanca el régimen de marea es semidiurno, mientras que al norte de Bahía Blanca hasta el Río de la Plata inclusive el comportamiento de la marea es mixto preponderantemente semidiurno (D'Onofrio, 2016).

Capítulo 6 – GNSS RTK en hidrografía

6.1 Introducción

Como se ha expuesto en el capítulo 2, la representación de sondajes en una carta náutica requiere de varios procesos y elementos para tener en cuenta. También es sabido que no solo la marea actúa modificando el nivel del agua durante una batimetría, además intervienen otros movimientos generados por: i) el oleaje; ii) la acción de navegar mientras se sondea el fondo (Pitch, Roll, Settlement y Squat); iii) ondas locales y eventuales producidas por el tráfico en la zona de relevamiento, como el desplazamiento de agua que producen los buques de gran porte, que en ocasiones pueden tardar varios minutos en estabilizarse. Usualmente los levantamientos tradicionales realizan un tratamiento de estas variables y efectos en forma separada.

Un mareógrafo, por ejemplo, está diseñado para medir con precisión la onda de marea, pero su instalación en la costa, frecuentemente en un muelle, espigón u otra estructura portuaria, muchas veces se encuentra alejado de la zona de levantamiento y es posible que la marea registrada en él no sea la misma que se está dando en la zona de la batimetría. Además, la forma en que se instala está diseñada para minimizar el efecto de las olas.

Un compensador de olas instalado a bordo de la embarcación es capaz de medir los movimientos de desplazamiento vertical que genera el oleaje, dentro de cierto rango y mejor aún un sensor inercial suma a esto todos los movimientos de cabeceo, rolido y ceñida que la embarcación experimenta durante la navegación.

Es bastante común que algunas batimetrías se realicen también sin contar con algunos de estos instrumentos. Es claro que es imposible realizar una batimetría sin obtener lecturas de un mareógrafo o de una regla hidrométrica, pero es mucho más frecuente y usual de lo que podría pensarse que no se disponga de un compensador de olas a bordo y más aún un sensor inercial, especialmente estos últimos por su alto costo.

Los sistemas GNSS con capacidad RTK y resolución de ambigüedades de fase en el vuelo (OTF) ,tienen una virtud que los convierte en una herramienta sólida y efectiva para resolver la incógnita del verdadero nivel que el pelo de agua tiene en cada instante en que se realiza una lectura de profundidad con la ecosonda. Un GNSS con RTK puede determinar la altura de la antena del receptor con precisión centimétrica y en tiempo real. Es decir, se puede saber en cada instante de tiempo y con frecuencias de cálculo que van de 10Hz (0,1seg) hasta incluso 20Hz (0,05seg) la altura del equipo, y con gran precisión $\pm 1,5\text{cm} + 1\text{ppm}$. Siendo que la antena mantiene una posición fija respecto de la embarcación, si se determinan con precisión la ubicación de ésta respecto del punto de referencia y respecto del transductor, cualquier movimiento vertical que afecte a la embarcación producto de la marea, oleaje, cabeceo, rolido, etc., será detectado por el equipo GNSS y cualquier variación que resulte en un cambio en la altura podrá ser registrado. Ese movimiento vertical estará en consecuencia afectado por todas las variables mencionadas en su conjunto, como ocurre en la realidad. Algunos de quienes han comenzado a estudiar esta técnica décadas atrás, definieron esta resultante como WLC (Water Level Correction), o corrección del nivel del agua (Scarfe, 2002).

Además, los dispositivos de compensación de olas (Heave Compensator Devices) de estado sólido requieren que la embarcación de relevamiento viaje a una velocidad y dirección constantes para estabilizarse, antes de cada línea de levantamiento. El equipo RTK no necesita de tal cuidado, lo que lo convierte en una mejor alternativa para líneas de levantamiento cortas y áreas de estudio pequeñas como puertos y marinas. Una consideración importante consiste en identificar cómo hacer coincidir con precisión las alturas del GNSS con los sondajes. Se denomina latencia a la diferencia de tiempo o retraso entre el tiempo en que los datos del posicionamiento GNSS son recibidos y el tiempo asignado por el programa integrador de los datos de posicionamiento y sondajes. El retardo de tiempo o latencia es la diferencia de tiempos entre la medición de la profundidad y el posicionamiento. Scarfe (2002) presentó un método para alinear los sondajes a los 5 milisegundos más cercanos. Con una latencia tan precisa, se puede corregir el movimiento causado por un oleaje de período

prolongado, así como por ondas de período corto (período > 5 segundos). Esta metodología supera en precisión a la utilizada en los levantamientos tradicionales.

Un componente difícil y necesario de las ciencias marinas, topografía, cartografía e ingeniería es la determinación precisa de una superficie de referencia vertical en el sitio del proyecto (De Loach, 1996). Pero el desafío más importante que se enfrenta al utilizar un GNSS RTK para hidrografía se centra en cómo relacionar de la forma más precisa posible la altura elipsoidal que es el valor de altura que obtiene un GNSS, con la superficie de referencia utilizada para la reducción de sondajes, es decir el NRS. Medir la componente vertical del relevamiento con GNSS requiere una calibración para corregir la separación entre el elipsoide utilizado por el sistema GNSS referido al sistema mundial WGS84 con la elevación respecto del NRS. Esta separación entre ambas superficies requiere de un estudio previo de la zona de levantamiento y de su extensión.

6.2 Datum vertical hidrográfico

Los sistemas de referencia vertical pueden clasificarse bajo tres categorías principales: de mareas, geodésicos y elipsoidales. Los sistemas de referencia de mareas y geodésicos, representados por el NRS y el geoide respectivamente, son superficies físicas, mientras que el sistema elipsoidal es una superficie matemática (Mills et al. 2014).

La información altimétrica del terreno en cartas topográficas se representa relacionada al geoide, pero los sondajes de las cartas de navegación están referenciadas al datum de marea o NRS que constituye el datum vertical hidrográfico y que en la mayoría de los casos no coincide con el geoide. El geoide por definición es una superficie equipotencial que varía según la gravedad y se asemeja bastante al nivel medio del mar sin contribuciones oceánicas y meteorológicas. Sin embargo, dado que la superficie del mar se mueve hacia arriba y abajo en intervalos de tiempo desde segundos hasta en tiempo

geológico, esta superficie de referencia debe definirse matemáticamente mediante un promedio estadístico de los valores observados en un período particular del ciclo de mareas y se denomina datum de mareas (NOAA, 2001). El datum de marea responde a diferentes criterios de adopción pero que en forma general representa un nivel mínimo por debajo del cual rara vez el nivel de mar pueda estar. Solamente en lugares donde la amplitud de la marea es menor o igual a 0.30m se acepta que el NRS coincida con el nivel medio del mar (OHI, 2010). Consecuentemente el datum vertical hidrográfico estará situado casi siempre debajo del geoide. La Argentina al igual que muchos otros países adoptó el criterio LAT (del inglés Lowest Astronomical Tide), que representa el nivel de marea astronómica más baja, como NRS.

La zona costera abarca una amplia franja a lo largo del litoral que incluye tanto la tierra como el mar y fusionar adecuadamente la información de ambos es esencial para el análisis de los procesos costeros y las decisiones de gestión adecuadas. Esto se puede lograr si tanto las cartas topográficas como las náuticas quedan referidas a la misma superficie. Es decir, si los levantamientos batimétricos se realizaran refiriéndolos al elipsoide WGS84, no solo permitirían utilizar el método GNSS RTK para calcular a la marea sino también posibilitarían integrar los levantamientos marinos con los terrestres. Independientemente de esto las profundidades de las cartas náuticas deben ser referidas al NRS para su utilización.

Al momento de escribir esta Tesina la República Argentina aún no cuenta con un modelo que brinde la distancia entre el elipsoide WGS84 y los NRS.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) por su parte desarrolló con la colaboración de la RMIT University de Australia, luego de varios años de estudio y el aporte de diferentes organismos, de empresas nacionales y de países vecinos, el modelo GEOIDE-Ar16 el cual tiene cobertura en el territorio continental argentino, sus países limítrofes, Islas Malvinas y el litoral marino (Figura 5.2.1). El GEOIDE-Ar 16 se ajustó al Marco de Referencia Geodésico Nacional POSGAR 2007 y al Sistema de Referencia Vertical Nacional 2016 (SRVN16) a partir de la determinación de una superficie correctiva calculada

mediante el método clásico de transformación de 4 parámetros (para computar la superficie de tendencia) y una colocación por mínimos cuadrados (para estimar los residuos) (IGN, <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Geoide-Ar16>).

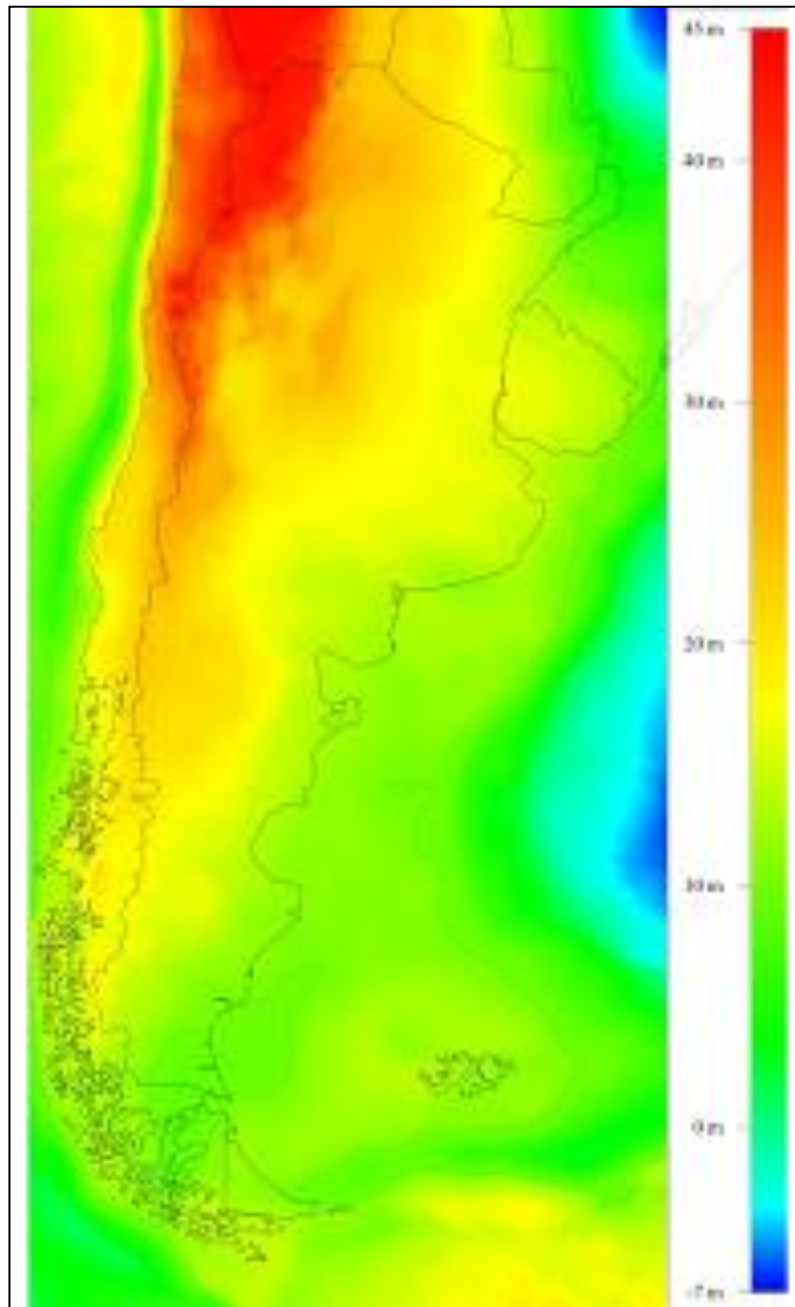


Figura 6.2.1 - Modelo de Geoide Gravimétrico Nacional GEOIDE-Ar 16.

Fuente: <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Geoide-Ar16>

En el ámbito hidrográfico si bien existe una base cartográfica completa y los NRS a los que refieren su información batimétrica están muy bien definidos,

no existe aún una concatenación de NRS en forma tal que pueda definirse un modelo de datum vertical hidrográfico de aplicación regional o nacional. Este avance permitiría tanto al SHN como a otros organismos del gobierno y empresas privadas, desarrollar y extender el uso de tecnologías y técnicas como RTK Tide, en cualquier sitio navegable dentro aguas jurisdiccionales, mejorando los procesos de adquisición de datos batimétricos para diversos usos.

6.3 Separación Elipsoide – NRS

Utilizar sistemas GNSS RTK para determinar el movimiento vertical de la embarcación durante una batimetría, supone que la utilización de un mareógrafo ya no sería imprescindible para la reducción de las profundidades observadas, pero aun así un mareógrafo sigue siendo útil para validar los datos obtenidos con GNSS. La clave de calcular el nivel del pelo de agua con GNSS reside en determinar y vincular las referencias altimétricas que se utilizan para las profundidades (NRS) y las alturas elipsoidales obtenidas del receptor GNSS al WGS84. El modelado de esta relación es un trabajo previo que debe realizarse al menos una vez en cada sector en el que quiera aplicarse la técnica RTK Tide y para lo cual los mareógrafos y reglas hidrométricas ofrecen un buen punto de partida para dicho modelado, contribuyendo también a la validación del modelo de corrección definido por la separación Elipsoide – NRS durante el levantamiento.

Instalar y mantener en el tiempo estaciones mareográficas en grandes extensiones es una tarea difícil y costosa, por lo que usualmente estos sensores no suelen estar muy densificados a lo largo de las costas. Los mareógrafos permanentes se encuentran a menudo en áreas desarrolladas, pero es posible que deban instalarse temporalmente también en sitios inhóspitos con el único propósito de realizar un levantamiento batimétrico, si no se dispone de otro registro cercano. El uso de alturas de marea predichas no resulta ser lo suficientemente preciso debido a la acción de forzantes meteorológicos que provocan ondas de tormenta. Las ondas de tormenta son las modificaciones del nivel del agua producidas por cambios bruscos de presión atmosférica y efecto

de arrastre del viento, que alteran a la marea astronómica. Su duración puede variar desde algunas horas hasta 2 ó 3 días produciendo, en ocasiones, alturas que difieren en más de un metro con las de la marea predicha (D'Onofrio et al.,2008). Además, cuando existe un gradiente significativo del nivel del mar, como se da en algunos estuarios, o en zonas muy amplias pueden requerirse dos o más registros de mareas a partir de los cuales interpolar las correcciones de mareas, para reducir los sondajes.

En topografía, la relación entre el elipsoide y el geoide implica un proceso donde se establece en el terreno puntos con cota ortométrica y altura elipsoidal. Mediante una nivelación geométrica, acompañada de mediciones de la gravedad, partiendo desde un punto con cota conocida y luego ocupando los mismos puntos con un GNSS diferencial, se obtendría los dos valores altimétricos: cota referida al geoide y altura elipsoidal. La relación existente entre ambos está definida como:

$$N = h - H$$

Donde:

h= altura elipsoidal

H= altura ortométrica

N= ondulación del geoide

El valor N por lo tanto indica la separación que existe entre ambas superficies en ese punto. Si se dispone de solo un punto con N conocido y de no existir anomalías gravimétricas significativas, podría considerarse que ese valor de N es el mismo en una zona pequeña en el entorno del punto conocido y podría utilizarse como factor de ajuste de alturas de GNSS a cotas ortométricas. Si la zona de relevamiento topográfico es de mayor extensión, de tal manera que N no pueda ser considerado constante, dependiendo de la precisión del levantamiento a realizar, se podrían necesitar 2, 3 o más puntos para establecer un modelo de ajuste altimétrico en toda el área.

Establecer la relación entre el elipsoide y el nivel de reducción de sondajes puede ser una tarea simple o bastante compleja dependiendo de la zona de trabajo y los medios disponibles, pero ciertamente plantea un criterio de pensamiento similar al aplicado en topografía. Es importante recordar el desafío que plantea el hecho de que en hidrografía las mediciones se realizan en el agua y es sabido que en este entorno no suelen existir muchas referencias fijas, excepto las que se encuentran en la costa y puede darse el caso donde puntos de apoyo con altimetría referida al datum de marea sean en algunos lugares escasos, alejados de la zona de levantamiento o hasta inexistentes.

Para modelar la relación entre estas dos superficies, es preciso disponer de puntos en la zona, cuya altura al datum de marea y al elipsoide WGS84 sean conocidas. Los mareógrafos y reglas hidrométricas desplegados a lo largo de la costa resultan fundamentales para definir un modelo de conversión ya que estos están relacionados al NRS en cada lugar, y además, calcular su altura elipsoidal es una tarea relativamente simple de ejecutar si el punto es accesible para instalar una antena GNSS. Si, por el contrario, se da la situación en que el punto es accesible, pero de difícil o imposible instalación de un receptor GNSS, como se dio la situación durante la tarea de campo hecha para esta Tesina, se puede utilizar un punto auxiliar, al cual trasladar la cota del hidrómetro y posicionar allí el receptor GNSS.

El número de puntos necesarios dependerá del tamaño del área geográfica a cubrir, la precisión requerida para las correcciones del nivel del agua y el presupuesto disponible para el levantamiento de puntos adicionales que pudieran ser necesarios para densificar el apoyo.

En general los puntos donde se puede calcular la distancia entre el NRS y el elipsoide se encuentran en la costa. Para suplir esta dificultad que plantea la observación de marea lejos de la costa (offshore), existen en la actualidad boyas con equipos GNSS y sensores inerciales diseñados para medir marea. Posteriormente, si se dispone de más de 1 año de medición, se calcula el NRS. De poder implementarse esta metodología, permitiría generar un modelo de transformación de mejor geometría espacial.

Existen tres criterios para definir la relación elipsoide – NRS, que dependen de la extensión geográfica a cubrir.

El primero, si el relevamiento es pequeño, puede alcanzarse con un simple ajuste altimétrico en un punto dentro de la zona de levantamiento. Instalar y medir con un GNSS diferencial sobre un punto de cota referida al cero hidrográfico, que como se mencionó, puede ser una regla hidrométrica, un mareógrafo o un punto auxiliar a estos. Esta metodología es efectiva, por ejemplo, para relevamientos en puertos y aguas aledañas, pero debe recordarse que no es recomendable alejarse demasiado del sitio donde se establece la referencia para la transformación. Es prudente aplicar el criterio topográfico que indica que una porción de tierra puede considerarse plana dentro de un área aproximada de 10km x 10km, sabiendo que más allá comienza a intervenir el factor de curvatura terrestre y más significativamente cuanto más se extiende.

El segundo criterio es aplicable si el área de relevamiento es de mayor extensión, y consiste en utilizar más de un punto de calibración altimétrica. En este caso se aplica la técnica de plano inclinado, la cual somete a los puntos de referencia a un ajuste por mínimos cuadrados dando como resultado la superficie que mejor se ajuste a los puntos que se tengan de referencia en la zona de relevamiento. El método del plano inclinado se aproxima bien a la separación elipsoide-NRS en una área de mayor desarrollo y su precisión dependerá de la cantidad, calidad y distribución de los puntos de calibración y siempre podrá ser mejorada agregando puntos de referencia al cálculo. Para otras áreas con variaciones mayores en los NRS, o que cubran un área mucho más extensa, es posible definirse más de un modelo de plano inclinado para optimizar la precisión.

Finalmente, el tercer criterio y considerando extensiones mucho más importantes, para obtener modelos de ajuste altimétrico satisfactorios es necesario establecer un modelo que relacione los NRS utilizados en las cartas náuticas con el sistema de referencia WGS84, y esta relación se establece a

través de la superficie del nivel medio de mar (NMM), modelada en los dos sistemas de referencia (Oreiro et al, 2015).

La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos, desarrolló una herramienta para la transformación de alturas entre datums verticales llamado VDatum (Milbert D., 2002) que permite convertir alturas elipsoidales al datum de marea utilizado en su cartografía náutica basado en el criterio de la media aritmética de las más bajas bajamares (en inglés: Mean Lower Low Water, MLLW). Según el método de la NOAA, el proceso requiere cuatro etapas de cálculo, convirtiendo: (1) las elevaciones del elipsoide global al elipsoide de aplicación local, (2) transformando las elevaciones del elipsoide local al datum ortométrico (geoide), (3) una transformación del datum ortométrico al nivel medio del mar local (NMM) y (4) convertir esas alturas al NRS (Hess et al, 2003).

Considerando este criterio de transformación y haciendo una analogía local, el paso (3) no podría realizarse debido a que no se dispone de un modelo empírico o de ecuaciones de transformación que vinculen el datum ortométrico (GEOIDE-Ar 16). Uno de los caminos posibles es vincular el LAT al elipsoide WGS84 utilizando modelos globales del NMM y predicciones de marea realizadas con constantes armónicas provenientes de observaciones del nivel del mar realizadas utilizando altímetros satelitales. Dado que los modelos del NMM resultan menos precisos en las cercanías de las costas (aproximadamente 25km) para esta región se requerirá disponer de mediciones de marea referidas a puntos fijos referidos al elipsoide WGS84, con una densidad suficiente como para cubrir nuestro litoral marítimo.

Este proceso permitiría el desarrollo e implementación a futuro de una superficie de referencia vertical hidrográfica de múltiples aplicaciones prácticas además del cálculo del nivel de agua por RTK Tide para el procesamiento de batimetrías. Una de ellas es la de la pleamar astronómica más alta (HAT, en inglés Highest Astronomical Tide) que permite realizar, estudios sobre la línea de ribera y de ingeniería de costas.

6.4 Reducción de sondajes con Marea RTK

Los softwares de navegación hidrográficos tienen incorporados los algoritmos capaces de calcular el valor reducido de los sondajes a tiempo real, es decir el sondaje menos la marea. Este proceso de cálculo requiere que la medición de la altura de la antena del GNSS sea muy precisa y del conocimiento previo de la separación existente entre el elipsoide y el NRS en el lugar. Este método, conocido como RTK Tide o Marea RTK combina la medición in-situ a tiempo real de la altura elipsoidal (GNSS), con la diferencia de altura obtenida previamente del modelo de transformación Elipsoide – NRS y el sondaje medido con la ecosonda.

Con la embarcación estática (por ejemplo, amarrada en el puerto), la influencia del cabeceo, rolado, oleaje y asentamiento es mínima o nula, por lo tanto, la línea de flotación de la embarcación coincidirá con el nivel del agua (Figura 6.4.1.).

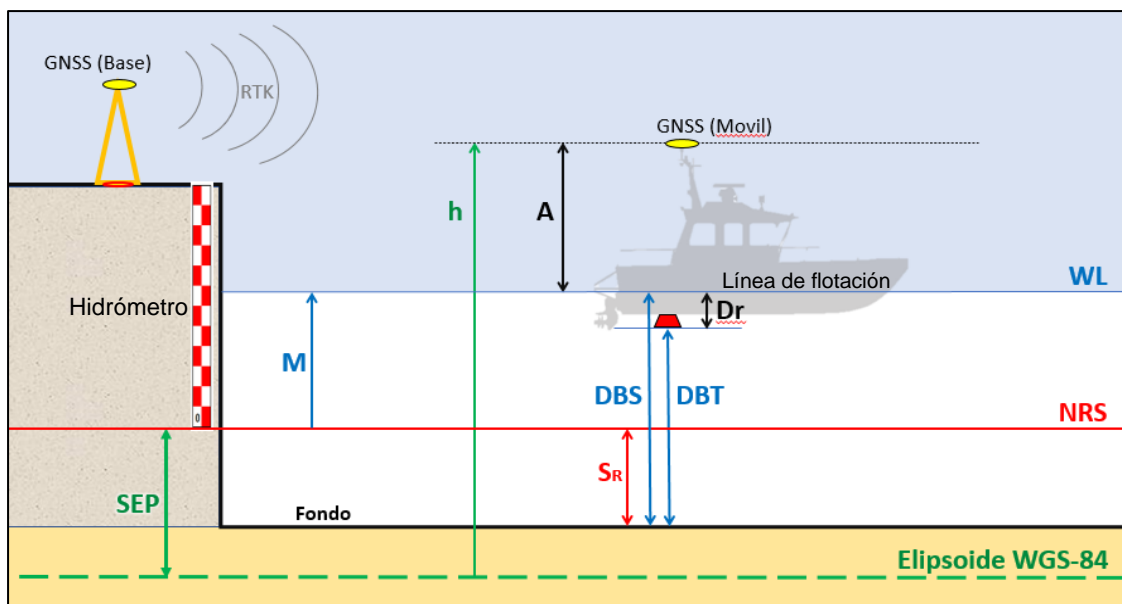


Figura 6.4.1 Embarcación amarrada en cercanía de un hidrómetro cuyo cero coincide con el NRS.

De la Figura 6.4.1 surgen los siguientes términos:

- h : Altura elipsoidal del receptor GNSS
- A : Altura de antena GNSS sobre la línea de flotación

M: Marea
Dr: Draft (calado del transductor)
DBT: Profundidad bajo el Transductor (Depth below Transducer)
DBS: Profundidad bajo la superficie (Depth below Surface)
S_R: Sondaje reducido
WL: Nivel del agua (Water Level)
NRS: Nivel de Reducción de Sondajes (Datum de Marea)
SEP: Separación Elipsoide WGS84 – NRS

Los sondajes medidos por la ecosonda (DBT) a los que se les suma el Draft se transforman en sondajes desde la superficie identificados como DBS. Estos se reducen al NRS según la siguiente expresión:

$$(i) \quad S_R = DBS - M$$

Donde M (marea medida por RTK) y referida al cero del hidrómetro se calcula como:

$$(ii) \quad M = h - A - SEP$$

El valor de M calculado en (ii) debe coincidir con las observaciones correspondientes realizadas en el hidrómetro.

Reemplazando (ii) en (i) la ecuación de reducción de sondajes por método Marea RTK queda como:

$$(iv) \quad S_R = DBS - h + A + SEP$$

La ecuación (iv) describe el sondaje reducido en una situación de reposo, con la embarcación amarrada.

Se sabe que las batimetrías se realizan con la embarcación navegando, y durante la misma el nivel del agua circundante se modifica producto de la dinámica de la embarcación por el efecto de asentamiento (Settlement y Squat), bajando o subiendo la línea de flotación. Esta alteración genera una diferencia de altura conocida como Draft Dinámico (Figura 6.4.2).

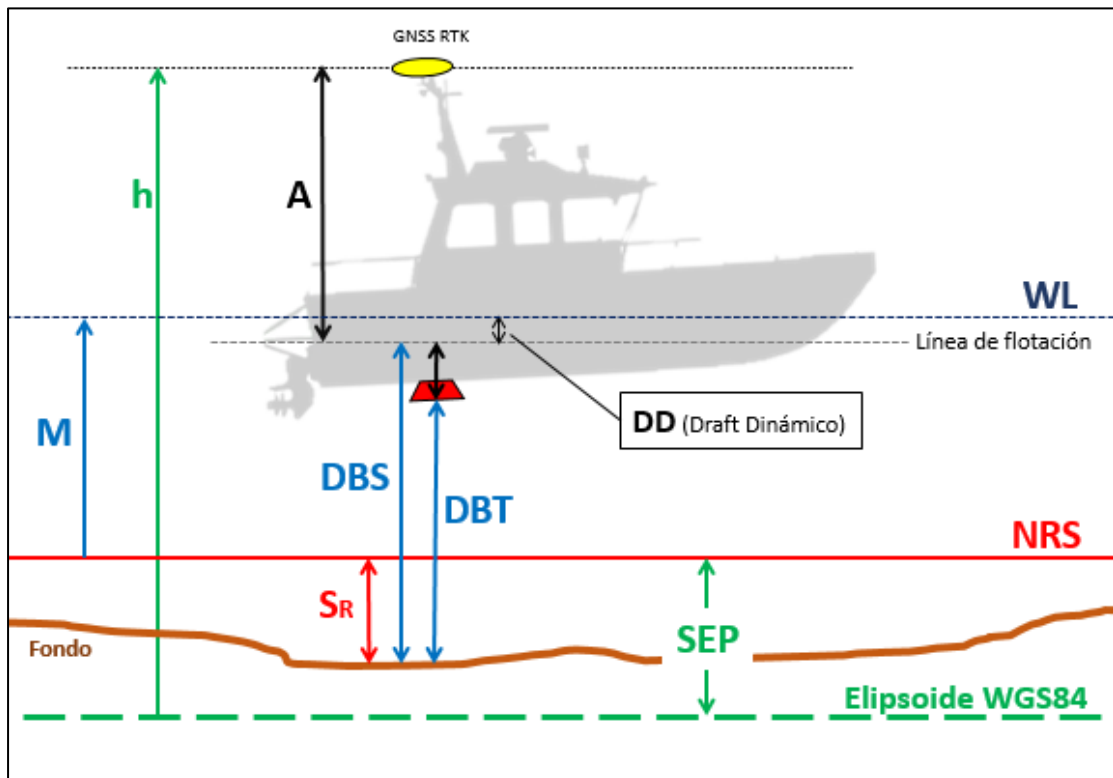


Figura 6.4.2 – Marea RTK en navegación.

De la figura anterior puede deducirse que:

$$(v) \quad M = h + DD - A - SEP$$

Luego la ecuación de reducción de sondajes también se altera por el efecto de la navegación con el draft dinámico DD:

$$(vi) \quad S_R = DBS + DD - M$$

Finalmente sustituyendo la marea M dada por la ecuación (v) se reemplaza en la ecuación (vi) y se obtiene:

$$(vii) \quad S_R = DBS + DD - h - DD + A + SEP$$

En la ecuación (vii) se puede observar que el draft dinámico DD se anula a sí mismo, por lo tanto, la expresión final nuevamente y al igual que con la embarcación estática (ecuación (iv)) está representada por:

$$S_R = DBS - h + A + SEP$$

Queda demostrado que, teniendo la observación de la profundidad, la altura elipsoidal del GNSS, la altura de su antena y la separación elipsoide – NRS, no es relevante conocer el draft dinámico DD, dado que no interviene en el proceso de reducción de sondajes. Esto significa que, si no se tiene la capacidad de incluir la corrección del draft dinámico, aun así, el método de marea RTK dará un valor de reducción de sondaje correcto, mientras que el método convencional entregará el resultado con un error sin dimensionar.

En cambio, si se pretende comparar la marea RTK con la marea convencional obtenida de un mareógrafo es muy importante conocer con precisión el draft dinámico DD ya que representa la alteración altimétrica del plano de flotación de la embarcación que hace que ambas dejen de ser similares.

La condición necesaria para que esta técnica funcione, es conocer con la mejor precisión posible el valor del SEP (Sanders, 2008).

Capítulo 7 – Batimetría RTK – Datos

7.1 Resumen del trabajo de campo

Para esta Tesina se planteó hacer una batimetría con marea RTK en la Dársena Norte del Puerto de Buenos Aires por su cercanía a la Escuela de Ciencias del Mar (ESCM) y el fácil acceso que a través de ella se tiene a la zona a navegar. Como parte de la planificación y previo al levantamiento, se realizaron varias tareas de campo con el objetivo de determinar localmente la separación entre el NRS y el elipsoide WGS84. Se recopilaron datos de diversas fuentes, principalmente del SHN, de la Administración General de Puertos (AGP) y del IGN, para obtener los datos de base y antecedentes que permitieran calcular dicha transformación altimétrica entre ambas superficies de referencia, para luego de haber definido esto, realizar la batimetría calculando a tiempo real la marea mediante un sistema de posicionamiento satelital de precisión GNSS RTK.

Por otra parte, todos los equipos topográficos, hidrográficos y softwares utilizados para las diferentes etapas del trabajo de campo y procesamiento en gabinete fueron gentilmente aportados por la empresa importadora de tecnología geoespacial, RUNCO S.A.

Respecto de los medios para realizar la navegación, se contó con el importante aporte del Departamento de Campañas del SHN contando con un semirrígido de 6 metros de eslora y un equipo de tres personas, dos tripulantes y un observador de marea que estuvieron a disposición del trabajo de campo ejecutado durante la jornada del 17 de diciembre de 2019.

Los medios utilizados y las tareas realizadas en cada etapa se enumeran en la Figura 7.1.1:

Etapa / Fase del trabajo	Medios utilizados (Equipo / software)	Tarea realizada
Establecimiento de la Separación Elipsoide – NRS	Nivel automático Pentax AL270 de 27X y mira topográfica	Nivelación de puntos auxiliares para trasladar el cero hidrográfico (NRS)
	Regla hidrométrica (YCA2) instalada en el Yacht Club Argentino (Dársena Norte)	Referencia utilizada del cero hidrográfico (NRS) para el traslado de cotas a puntos auxiliares
	Archivos de datos GNSS de Referencia, Estación IGM1 (RAMSAC)	Base de Referencia para procesamiento diferencial estático de puntos auxiliares
	Receptor GNSS Trimble MPS865 con antena GNSS GA810	Ocupación de puntos auxiliares para la determinación de altura elipsoidal
	Software de procesamiento GNSS Spectra Precision Survey Office (SPSO)	Procesamiento de vectores estáticos y cálculo de coordenadas WGS84 (latitud, longitud y altura) de los puntos auxiliares
	Software Microsoft Excel	Planilla de nivelación y cálculo de la Separación Elipsoide - NRS
Levantamiento Batimétrico	Embarcación neumática (Semirrígido) BIM de 6m de eslora con 3 tripulantes (timonel, hidrógrafo y auxiliar)	Ejecución de la batimetría en Dársena Norte.
	Ecosonda monohaz CEE HydroSystems CEE-LINE de 200kHz.	Medición de profundidades
	Sistema diferencial (Base-Móvil) GNSS RTK Spectra SP60	Posicionamiento planialtimétrico de precisión centimétrica y determinación de altura de marea RTK
	Software Trimble HYDROpro y software Trimble TMC	Navegación, levantamiento de datos, procesamiento de sondajes y dibujo de planos.
	Regla hidrométrica (YCA2) instalada en el Yacht Club Argentino (Dársena Norte)	Registro de marea obtenido en el YCA - Dársena Norte, durante la batimetría
	Mareógrafo AGP (Puerto de Buenos Aires)	Registro de marea obtenido en el Espigon 1 del Puerto de Buenos Aires
	Mareógrafo SHN (Palermo)	Registro de marea obtenido en el muelle de Pescadores Costanera Norte

Figura 7.1.1 Enumeración de medios disponibles y tareas realizadas

7.2 Cálculo de la separación elipsoide WGS84 – NRS para la Dársena Norte del Puerto de Buenos Aires

La primera etapa de toda batimetría con medición RTK de la marea, es definir la separación local entre el elipsoide WGS84 y el NRS correspondiente a la zona elegida para el levantamiento. Si este dato no fue establecido en trabajos anteriores, se requerirá un procedimiento de campo y gabinete previos al levantamiento en el agua.

Para la batimetría en la Dársena Norte, no se contaba con este dato conocido previamente, por lo que se estableció el mismo mediante el primer criterio aplicable a áreas pequeñas, que consiste en un ajuste altimétrico simple en un punto. El punto de arranque relacionado al NRS de la zona de estudio, elegido por su ubicación y su relativamente fácil acceso, fue la regla hidrométrica del SHN instalada en el Yacht Club Argentino (YCA) (Figura 7.2.1).



Figura 7.2.1 – Dársena Norte y ubicación de la regla hidrométrica en el YCA

En la Figura 7.2.1 se muestra además una imagen ampliada de la regla identificada como YCA2, fijada en la pared del espigón al sur de la entrada a la Dársena Norte, dentro de marina de yates del YCA.

Debido a la diferencia de altura entre el tope de la regla YCA2 con el coronamiento del espigón y por la presencia de árboles cercanos, resultó imposible la instalación de una antena GNSS, para medir en forma correcta, efectiva y segura la altura elipsoidal en ese punto (Figura 7.2.2). Suministrado por el Departamento de Campañas del SHN, se obtuvo la cota del tope de la regla hidrométrica, el cual se encuentra a 4 metros sobre el nivel de reducción de sondajes.



Figura 7.2.2 – Ubicación de la regla YCA2 en el espigón del YCA

Debido a esta dificultad, se decide trasladar la cota de la regla YCA2 mediante el método de nivelación geométrica y radiación simple a otros puntos auxiliares sobre el espigón, más cercanos a la boca de entrada a la dársena, lo que permite medir con GNSS en mejores condiciones de cielo abierto. Para ello se utilizó un nivel automático de 27 aumentos (27X) Pentax AL-270. Con esta nivelación se establecieron 3 nuevos puntos, uno de ellos la Baliza Verde Km 0 de la cual se contaba con antecedentes, y se agregaron nuevos puntos identificados como C1 y C2 (Figura 7.2.3).



Figura 7.2.3 – Vista de los puntos auxiliares utilizados para trasladar el NRS referido a la regla YCA2

La Figura 7.2.4 brinda un croquis más detallado de los puntos auxiliares donde fue trasladada la cota del NRS.

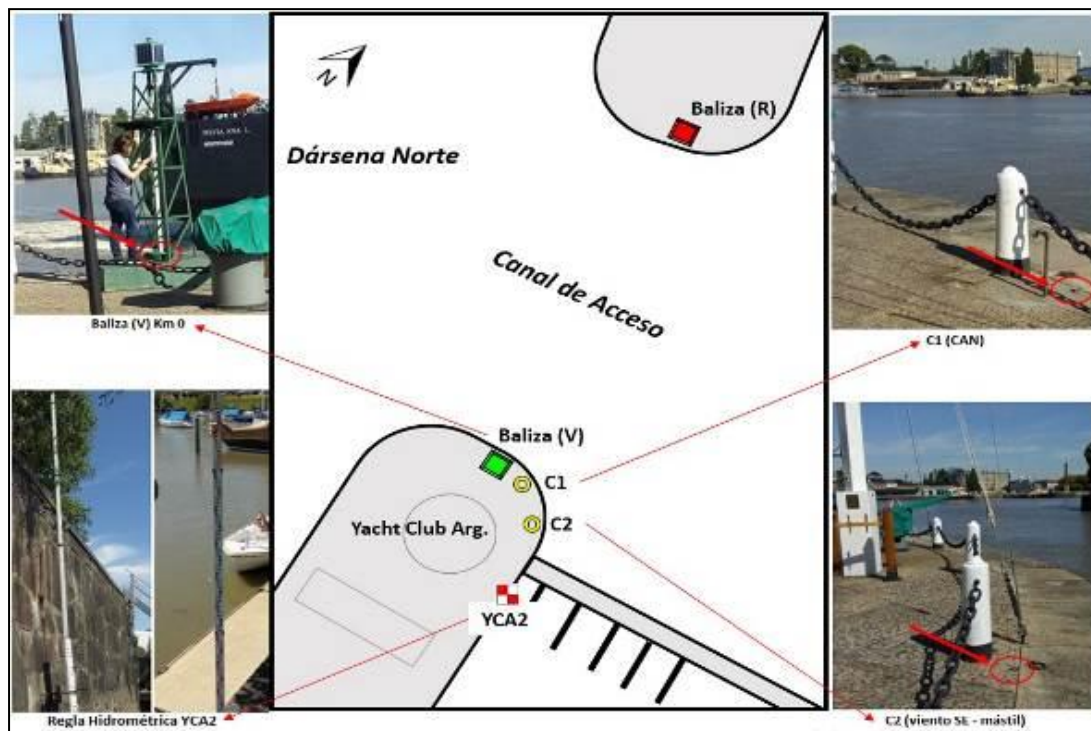


Figura 7.2.4 – Croquis de los puntos fijos auxiliares utilizados para trasladar la cota del NRS referido a la regla YCA2

Los resultados de la nivelación geométrica pueden observarse en la planilla de la Figura 7.2.5.

Estación		Lectura Atrás	A.J. (plano visual)		Lectura Adelante	Distancia (m)	ΔH (tope Regla YCA2) (m)	Cota NRS (m)
Tope Regla Hidrométrica YCA2	Hilo Sup	3.748	7.646	Hilo Sup	-	20.4	-	4.000
	Hilo Medio	3.646		Hilo Medio	-			
	Hilo Inf	3.544		Hilo Inf	-			
Baliza (V) Km0	Hilo Sup	-	7.646	Hilo Sup	1.31	15.3	2.412	6.412
	Hilo Medio	-		Hilo Medio	1.234			
	Hilo Inf	-		Hilo Inf	1.157			
C1 (CAN)	Hilo Sup	-	7.646	Hilo Sup	1.641	10.4	2.057	6.057
	Hilo Medio	-		Hilo Medio	1.589			
	Hilo Inf	-		Hilo Inf	1.537			
C2 (SE - mástil)	Hilo Sup	-	7.646	Hilo Sup	1.593	7.1	2.088	6.088
	Hilo Medio	-		Hilo Medio	1.558			
	Hilo Inf	-		Hilo Inf	1.522			

Figura 7.2.5 – Planilla de nivelación geométrica

Los mismos puntos fueron medidos luego con un sistema móvil GNSS de doble frecuencia Trimble MPS865 con constelaciones GPS+GLONASS y utilizando como base de referencia para el ajuste diferencial la estación permanente IMG1, de la Red RAMSAC perteneciente al IGN, ubicada en su edificio técnico sito en la Av. Cabildo 381 de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y aproximadamente a 7,5km de distancia del sitio de levantamiento. La corta distancia entre base y móvil permitió realizar ocupaciones del tipo Estático Rápido ya que, en esa magnitud de vector, menor a 10km, es esperable obtener precisiones similares a ocupaciones estáticas (horizontal 5mm+0,5ppm y vertical 10mm+1ppm), con solo 20 minutos de ocupación por punto.

Los puntos C1 y C2 fueron medidos bajo muy buenas condiciones durante el tiempo de ocupación mencionado (Figura 7.2.6) obteniéndose resultados acorde a lo esperado según el informe de procesamiento de vectores GNSS del software utilizado para el cálculo, Spectra Precision Survey Office (SPSO).



Figura 7.2.6 – Ocupación GNSS con receptor Trimble MPS865 – C1 (izq.) y C2 (der.)

El tercer punto nivelado, ubicado en la base de concreto de la baliza verde que marca el Km 0 del canal de acceso a la Dársena Norte (Figura 7.2.7), fue ocupado de la misma forma que los anteriores puntos. Pero instalar la antena del receptor GNSS en la base de la baliza planteó una dificultad para rastrear señales de los satélites libre de interferencias, ya que teniendo la estructura de la baliza sobre la antena era esperable un importante nivel de Multipath (rebote de señal). Esto comprometía la calidad de la medida, especialmente en la altura elipsoidal, variable de mayor interés en determinar con la mejor precisión posible. Aun así, la baliza verde fue medida en la base bajo estas condiciones desfavorables con una ocupación de 30 minutos y se repitió luego la medición, pero instalando la antena GNSS sobre la lámpara y 20 minutos de ocupación, situación que también presentó una dificultad ya que, para fijar la antena la baliza carece de un bulón o soporte que permita asegurarla convenientemente. De cualquier forma, aún con estas dificultades, se hizo la medición como ensayo para comprobar qué resultados arrojaría el procesamiento de ambas localizaciones de la antena GNSS, aun sabiendo previamente que no eran las mejores condiciones para el trabajo de determinación de la separación entre el elipsoide WGS84 y el NRS.



Figura 7.2.7 – Baliza verde, ocupación con GNSS en la base (figura izquierda) y sobre la lámpara de tope (figura derecha)

Finalmente se obtuvieron tres nuevos puntos uno de ellos con dos ocupaciones sucesivas ubicando la antena en diferente posición (Figura 7.2.8).

Punto	Ocupación	Altura de antena	Observaciones
C1 (CAN)	~20 minutos	1,501m	
C2 (SE - Mástil)	~20 minutos	1,594m	
Baliza Verde Km 0	~30 minutos	0,150m	Base de la Baliza
Baliza Verde Km 0	~20 minutos	2,880m	Tope de la Baliza

Figura 7.2.8 – Resumen de ocupaciones GNSS

Para el procesamiento de las ocupaciones con GNSS se utilizaron archivos RINEX de la base IGM1 perteneciente a la red GNSS de monitoreo continuo RAMSAC del IGN generando vectores menores a 7,5km. Los resultados obtenidos del cálculo según el reporte de vectores del software Spectra Precision Survey Office (SPSO), estuvieron dentro de lo esperado para cada caso como surge del análisis de la tabla de la Figura 7.2.9. Los tres puntos C1, C2 y la Baliza con sus dos ocupaciones, obtuvieron soluciones fijas de L1/L2 para GPS y GLONASS.

Observación (Vector)	De	A	Tipo de solución	Precisión Horizontal 1σ (m)	Precisión Vertical 1σ (m)	Acimut geodésico.	Distancia elipsoidal (m)	Δ Altura (m)
IGM1 - Baliza V (Base)	IGM1	Baliza V (Base)	Fija	0.015	0.039	110°21'54"	7359.015	-28.807
IGM1 - Baliza V (Tope)	IGM1	Baliza V (Tope)	Fija	0.008	0.018	110°21'54"	7359.115	-28.785
IGM1 - C2 (SE mastil)	IGM1	C2 (SE mastil)	Fija	0.006	0.014	110°21'19"	7377.299	-29.135
IGM1 - C1 (Can)	IGM1	C1 (Can)	Fija	0.007	0.014	110°20'54"	7365.703	-29.176

Figura 7.2.9 Resumen de procesamiento de vectores del software SPSO ver 5.1
Precisión H y Precisión V (1σ - 67% de confiabilidad)

En el resumen de procesamiento (Figura 7.2.9) se observa que la precisión vertical (σ_V) en los puntos C1 y C2 estuvo en niveles aceptables (ambos $\sigma_V < 15\text{mm}$) mientras que la baliza verde en la ocupación de la luz de tope tuvo una pequeña degradación respecto a los anteriores ($\sigma_V = 18\text{mm}$), pero fue significativamente mayor en la ocupación de la base de esta ($\sigma_V = 39\text{mm}$).

Las coordenadas geográficas, la altura elipsoidal WGS84 y la cota ortométrica según el Geoide Ar-16 (IGN), que surgieron del procesamiento se muestran en la tabla de la Figura 7.2.10:

Punto	Latitud (WGS84)	Longitud (WGS84)	Altura Elipsoidal (WGS84)	Cota IGN Geoide (Ar-16)	Tipo de solución	Prec. H. 1 σ (m)	Prec. V. 1 σ (m)
Baliza V (Base)	34°35'43.09736" S	58°21'50.80847" W	21.880 m	5.771 m	Fija	0.015	0.039
Baliza V (Tope)	34°35'43.09909" S	58°21'50.80510" W	21.902 m	5.793 m	Fija	0.008	0.018
C2 (SE mástil)	34°35'43.26557" S	58°21'50.11868" W	21.552 m	5.443 m	Fija	0.006	0.014
C1 (Can)	34°35'43.10729" S	58°21'50.53306" W	21.512 m	5.402 m	Fija	0.007	0.014

Figura 7.2.10 - Planilla de coordenadas de procesamiento GNSS

Calculados los valores altimétricos de los puntos auxiliares en ambos sistemas de referencia (elipsoide WGS84 y NRS), como último paso del procesamiento se combinaron las alturas elipsoidales y cotas al NRS de cada punto en la tabla de la Figura 7.2.11, obteniéndose las diferencias entre el WGS84 y el NRS para la zona.

Punto	Nivelación Altura NRS (m)	Posicionamiento GNSS		Separación Elipsoide - NRS (m)
		Alt. Elipsoidal (h) WGS84 (m)	Cota IGN (H) Geoide AR-16 (m)	
Baliza (V) Km 0 (Base)	6.412	Observación (Base) 21.880	Observación (Base) 5.771	15.468
		Observ. (Tope Luz) 21.902	Observ. (Tope Luz) 5.793	15.490
C1 (Can)	6.057	21.512	5.402	15.455
C2 (viento SE mástil)	6.088	21.552	5.443	15.464

Figura 7.2.11 - Tabla de cálculo de valores de Elipsoide y NRS

Tomando el conjunto de las cuatro observaciones realizadas se obtienen valores de Separación Elipsoide – NRS que varían en un rango de 0,035m, un valor medio de 15,469m con una desviación estándar de 0,016m (Figura 7.2.12).

	Conjunto Baliza, C1, C2	Conjunto C1, C2
Promedio (m)	15.469	15.460
Rango (m)	0.0350	0.009
Desv. Std (m)	0.0148633	0.0063640
Varianza (m)	0.0004418	0.0000405

Figura 7.2.12 – Estadística de las observaciones

Descartando los valores provenientes de las observaciones en la Baliza Verde realizadas en la base y el tope de esta, dado que se sabe que estas mediciones con GNSS fueron menos confiables por los inconvenientes conocidos a priori y descritos anteriormente, el valor medio de separación Elipsoide – NRS se ubica en los 15,46m, menos de un centímetro por debajo de la media de todo el conjunto de datos. En conclusión y dado que la variación no es significativa, se da por válido adoptar este último valor (15,46m) como Separación Elipsoide – NRS para este trabajo, surgido de los puntos C1 y C2. El valor de la diferencia entre el elipsoide WGS84 y el NRS hallado para Dársena Norte, es una buena aproximación en una zona mayor incluyendo el puerto en su totalidad hasta el Km 5 del Canal de Acceso Norte (Figura 7.2.13). Para relevamientos hidrográficos en áreas donde no existe el modelado elipsoide - NRS, este método es razonablemente simple y rápido de aplicar. Estos resultados pueden ser validados y hasta incluso mejorados realizando otras observaciones en un área más extensa, involucrando mediciones con GNSS en otros mareógrafos y reglas disponibles. De este modo podrían sumarse las estaciones mareográficas de Palermo ubicado en el muelle Club de Pescadores de Costanera Norte a 5km del área de estudio, San Fernando en el espigón del YCA, Río Luján a 24km, etc.

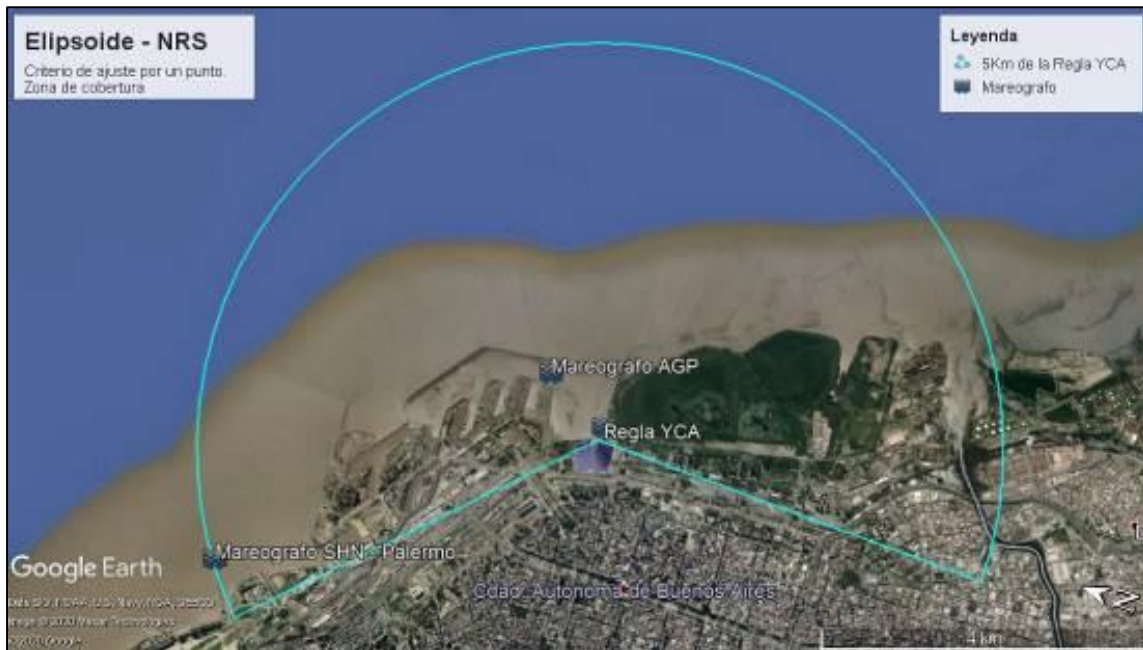


Figura 7.2.13 – Zona de cobertura del ajuste altimétrico por un punto.

7.3 Batimetría con Marea RTK en Dársena Norte

La batimetría fue realizada el 17 de diciembre de 2019, en el interior de la Dársena Norte la cual tiene una extensión aproximada de 360m x 450m y cubre un área de poco más de 16Ha, de acuerdo con una planificación previa realizada utilizando el software de navegación Trimble HYDROpro. La navegación se realizó conforme a un patrón de pasadas paralelas con un espaciamiento entre perfiles de 10m y con perfiles perpendiculares de comprobación identificados como DN-x donde “x” es el número de perfil para su reconocimiento durante el procesamiento (Figura 7.3.1).

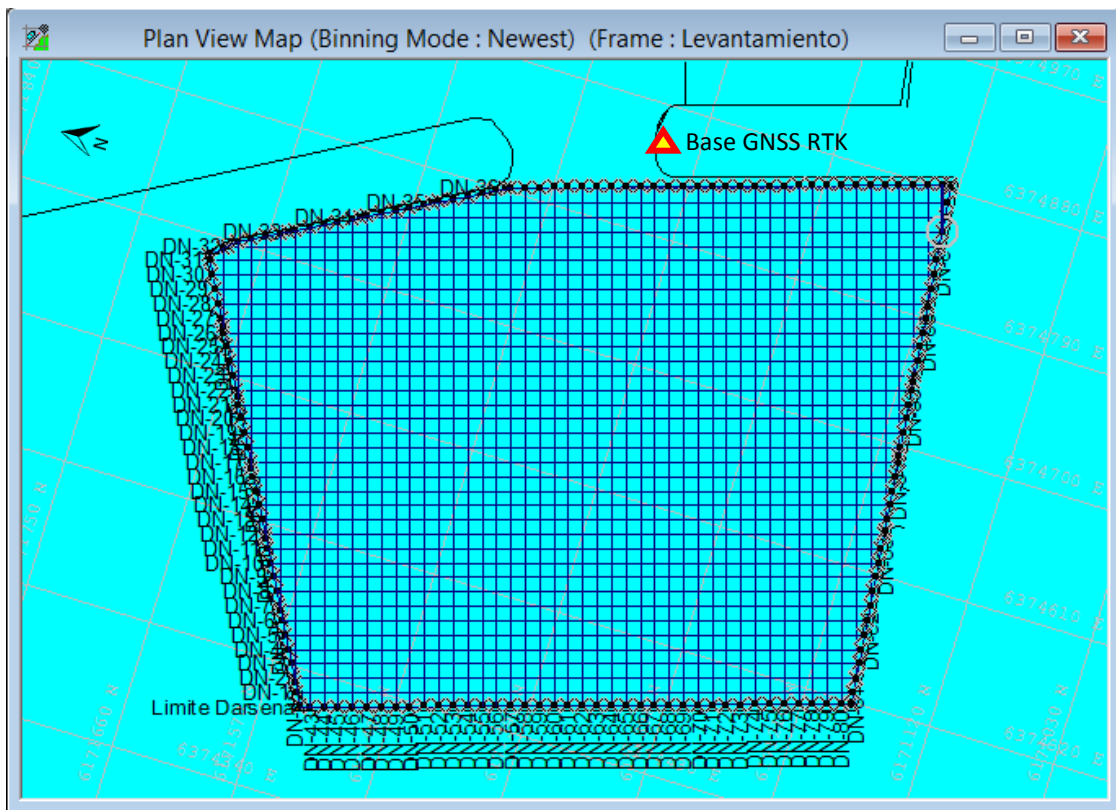


Figura 7.3.1 – Perfiles cada 10m en HYDROpro

Para la batimetría se utilizó un sistema GNSS RTK Spectra Precision SP60 integrado por dos receptores (uno base y uno móvil) con un enlace de radio UHF, una ecosonda hidrográfica monohaz CEE-LINE de la marca CEE HydroSystems, de 200kHz y el software hidrográfico Trimble HYDROpro.

El relevamiento se inició instalando el receptor GNSS SP60 base, en el punto C1 (Figura 7.3.2), ubicado en la boca de entrada de la dársena. Este punto fue uno de los utilizados en el cálculo de la separación del elipsoide WGS84 con el NRS. Dada su ubicación y que sus coordenadas planialtimétricas fueron determinadas previamente con una ocupación estática y vinculada a la estación base IGM1 de la red RAMSAC del IGN, resultó útil también para montar el equipo base y transmitir correcciones RTK al móvil a bordo de la embarcación.



Figura 7.3.2 – Equipo GNSS Base Spectra Precision SP60 con radio interna UHF

Una vez ubicado el receptor sobre el punto se midió la altura de la antena, parámetro que interviene en el cálculo de las correcciones altimétricas transmitidas y referidas al punto C1. Finalmente se inició el levantamiento de datos en la base para el modo RTK lo que origina la transmisión de los paquetes de datos de corrección vía radio modem UHF. Por las características de la radio interna del receptor SP60, la altura de la antena de radio y las obstrucciones presentes en el sitio se esperaba una cobertura de radio de entre 3 a 4 Km que sería suficiente para cubrir la zona de interés.

Con la base en operación y transmitiendo correcciones RTK, se procedió al montaje del receptor GNSS móvil y del transductor de la ecosonda a bordo del bote semirrígido. La instalación se realizó en el espejo de popa utilizando un soporte y tramos de jalón que permitieron ubicar sobre la vertical del transductor, el receptor GNSS el cual tiene la antena integrada (Figura 7.3.3).



Figura 7.3.3 – Montaje del equipo GNSS móvil con ecosonda y laptop con el software HYDRopro

Seguido al montaje y verificación de conectividad de los sensores con el software de navegación, se realizaron las calibraciones previas al levantamiento para asegurar la precisión necesaria y cumplir con el objetivo del levantamiento. De esta forma se midió la altura de la antena del GNSS respecto del pelo de agua y el draft estático del transductor. Luego por el método de barcheck se procedió a la calibración de la ecosonda donde se ajustó el draft, el valor index para el conjunto ecosonda-transductor y la velocidad de propagación del sonido (1.490m/s) que fuera luego utilizada para todo el levantamiento.

Finalmente, se navegó un perfil en el antepuerto de ida y vuelta y a diferentes velocidades para establecer la corrección de latencia del sistema. El primer recorrido de ida (sentido Sur-Norte) a velocidad de relevamiento (3 Nudos) y el segundo en sentido inverso (Norte – Sur) a 5 Nudos (Figura 7.3.4). El resultado del cálculo de latencia arrojó un valor muy pequeño menor a 1

segundo, razón por la cual se descartó la aplicación de latencia en el post procesamiento de la batimetría.

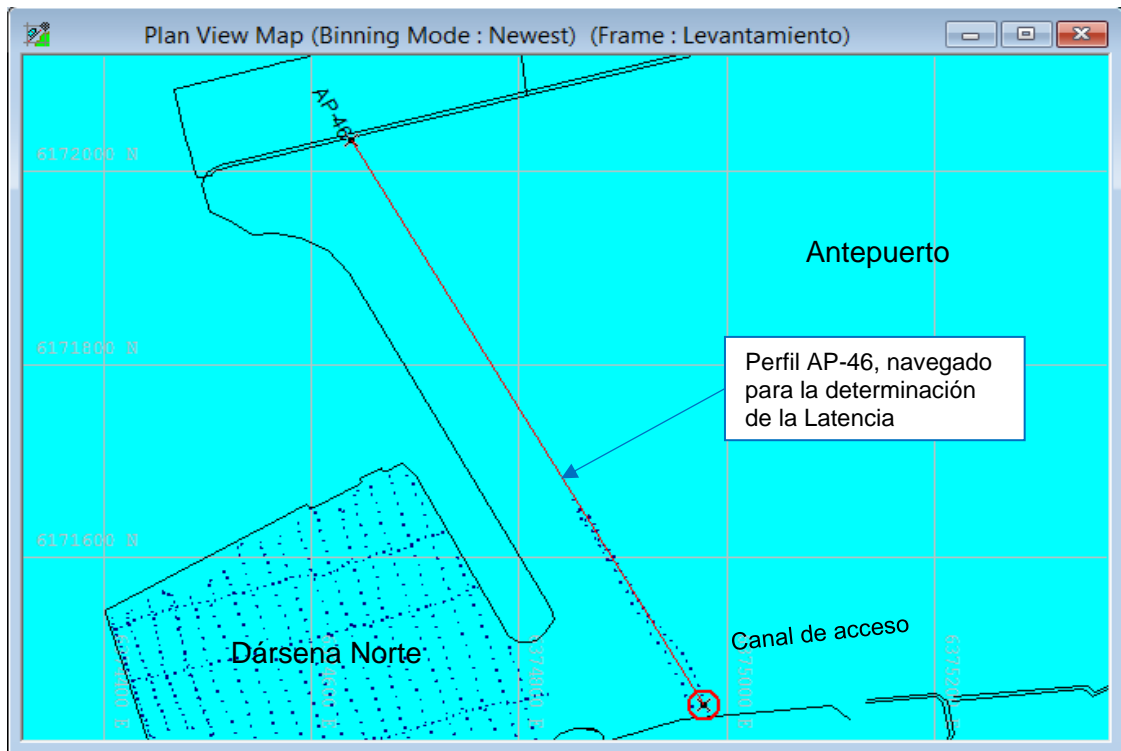


Figura 7.3.4 – Perfil navegado en el antepuerto para cálculo de latencia (software HYDROpro). La sucesión de puntos indica los perfiles navegados y la línea roja el perfil teórico de guía

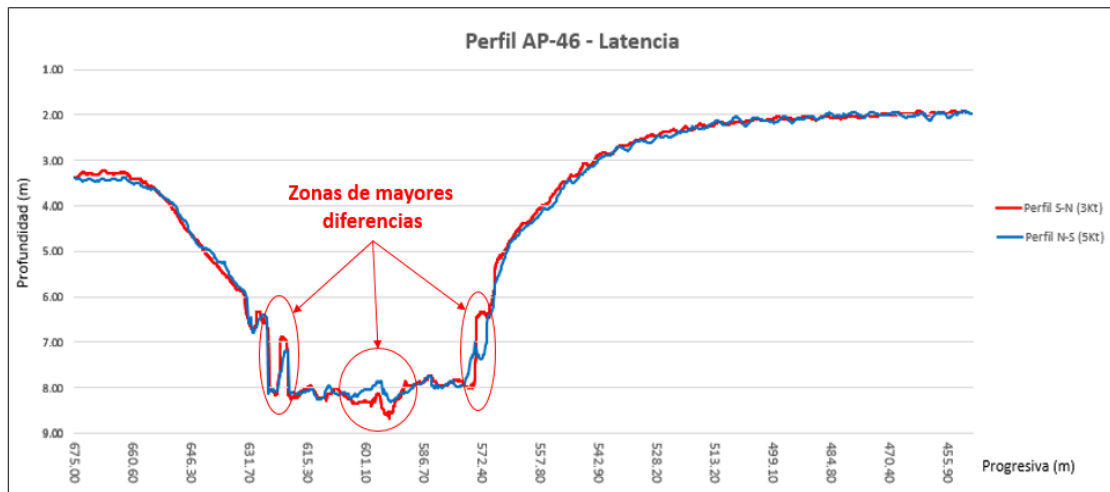


Figura 7.3.5 – Perfiles navegados en el antepuerto superpuestos para cálculo de latencia

La Figura 7.3.5 muestra la profundidad registrada en los dos perfiles navegados y la progresiva en metros de las posiciones de los sondajes. Considerando el desplazamiento lateral producido por la corriente, el viento y el

gobierno del bote, particularmente en la zona del canal de acceso a la dársena (Figura 7.3.4), el rango de las diferencias de sondajes encontradas es de -1.32 / 1.15 m y el desvío estándar es de 0.287m. Las zonas donde se registraron las mayores diferencias son precisamente en los sitios de mayor apartamiento lateral entre los perfiles. Lo aconsejable en estos casos es repetirlos tratando de mantener la misma línea en un sentido y otro, para capturar el mismo fondo que permita lograr una comparación más precisa, hecho que por razones de tiempo fue imposible realizarlo en esta ocasión.

El archivo de batimetría contiene todos los registros de posicionamiento y profundidades asociados mediante un sistema de sincronización de tiempo o Time Stamping, que los softwares de navegación, en este caso HYDROpro, registran. De esta manera el software sincroniza y asocia automáticamente cada posición medida por el GNSS con una lectura de la ecosonda. El GNSS calcula su posición con una frecuencia de 5 a 20 Hz dependiendo del tipo de receptor y la configuración de este. Para este trabajo se utilizó 10Hz. Por su parte las ecosondas trabajan con tasas de emisión o “pings” de entre 10 y 20Hz. La ecosonda utilizada CEE-LINE trabaja con un máximo de 10Hz. Los datos tanto del GNSS como de la ecosonda son enviados al software de navegación a través del protocolo de comunicación estándar de la NMEA, el cual integra diversas sentencias (mensajes NMEA-0183) que contienen información de posición, velocidad, tiempo, rumbo, datos de la constelación de satélites a la vista, etc. El mensaje de NMEA utilizado para este trabajo fue el llamado PTNL-GGK (Tiempo, Posición, Calidad de la Posición y DOP) ya que contiene, además del posicionamiento planimétrico, un campo adicional que registra la altura elipsoidal de la antena GNSS, dato que aplicando las ecuaciones vistas en el Capítulo 6, junto con la altura de antena y la separación Elipsoide-NRS permite calcular la altura de la superficie del agua referida al NRS. Esto luego permite efectuar la reducción de sondajes automáticamente en el software de procesamiento, en este caso en el módulo NavEdit de HYDROpro.

El mensaje PTNL-GGK es más largo que el estándar NMEA-0183 de 80 caracteres y la salida de altura en la cadena de datos es siempre una altura elipsoidal. Este mensaje tiene la siguiente estructura (Figura 7.3.6):

\$PTNL,GGK,131239.00,121719,3435.97323841,S,05821.62010742,W,3,14,1.2,EHT18.790,M*73

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

Campo	Significado
0	Identificación encabezado \$PTNL
1	Tipo de mensaje o ID: GGK
2	Tiempo UTC de la posición o "fix", en formato hhmmss.ss.
3	Fecha UTC de la posición o "fix", en formato mmddyy.
4	Latitud, en grados, minutos y decimales de minuto (dddmm.mmmmmmm)
5	Cuadrante de latitud: N: Norte, S: Sur
6	Longitud, en grados, minutos y decimales de minuto (dddmm.mmmmmmm)
7	Cuadrante de latitud: E: Este, W: Oeste
8	Indicador de calidad GPS/GNSS: 0: Sin posición o posición inválida 1: GPS/GNSS Autónomo 2: Solución RTK Flotante 3: Solución RTK Fija 4: Diferencial por código (DGPS ó DGNSS) 5: Solución SBAS – WAAS/EGNOS/MSAS 6: RTK Flotante o RTK 3D Network 7: RTK Fija 3D Network 8: RTK Flotante o RTK 2D Network 9: RTK Fija 2D Network solution 10: OmniSTAR HP/XP 11: OmniSTAR VBS 12: Location RTK 13: Beacon DGPS
9	Número de satélites en la solución

-
- 10 Dilución de la Precisión (DOP)
-
- 11 Altura Elipsoidal (de la antena sobre el elipsoide). Comienza siempre con el prefijo ETH
-
- 12 M: unidad de la altura elipsoidal (medida en metros)
-
- 13 Checksum o suma de verificación, siempre comienza con *
-

Figura 7.3.6. - En la parte superior muestra el mensaje PTNL-GGK y en la inferior el significado de cada uno de sus campos.

Fuente: Trimble (https://www.trimble.com/OEM_ReceiverHelp/V4.44/en/NMEA-0183messages_PTNL_GGK.html#:~:text=Note%20%E2%80%93%20The%20PTNL%20GGK%20message,height%20for%20example%20EHT24)

El cálculo y registro de la marea con RTK se realiza con el software de navegación a tiempo real durante el levantamiento, por lo tanto, es importante establecer en el software de navegación el sistema de referencia altimétrico que será utilizado en el proceso de conversión. En la Figura 7.3.7, puede observarse la opción de separación constante entre el elipsoide WGS84 y el datum local, en este caso el NRS ubicado a 15,46m por encima del elipsoide.

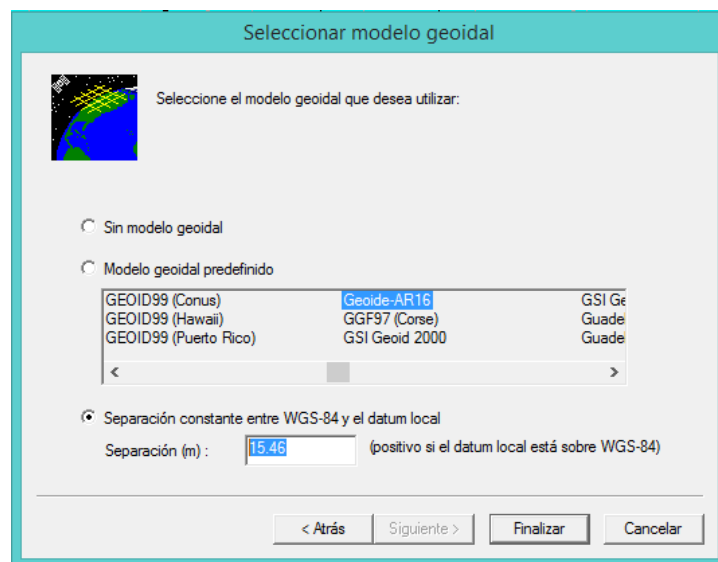


Figura 7.3.7 – Configuración de Geoide y separación elipsoide-NRS (software HYDROpro)

Este valor de separación es el determinado previamente y utilizado por el algoritmo de RTK Tide para calcular el nivel del pelo de agua respecto del NRS, reduciendo las alturas elipsoidales de la antena GNSS. Al configurar la

embarcación y los offsets es esencial medir con precisión e ingresar el valor de la altura de la antena del receptor GNSS RTK para que el cálculo sea correcto.

La dársena se navegó realizando un perfil cada dos proyectados, con una distancia entre pasadas de 20 metros. Los perfiles principales fueron 18 y se recorrieron 5 perfiles de comprobación transversales a los primeros navegados. La Figura 7.3.8 muestra la navegación recorriendo los perfiles en la dársena.

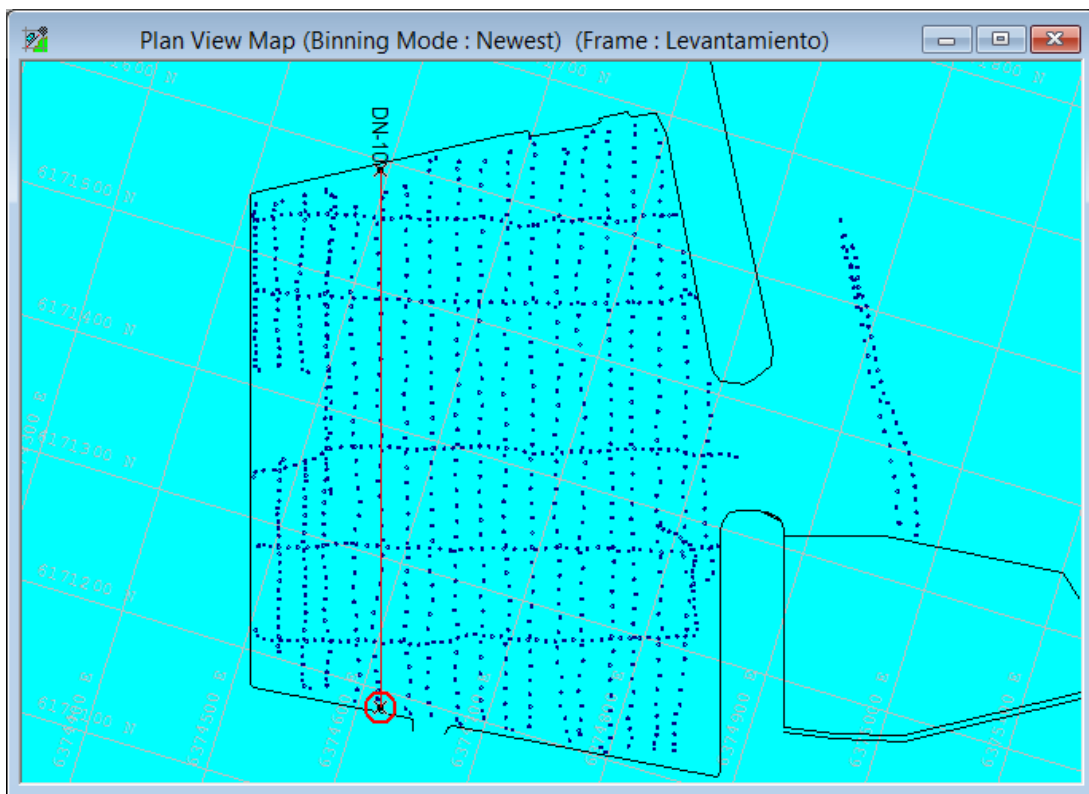


Figura 7.3.8 – Perfiles navegados y cobertura de la dársena (software HYDROpro)

La batimetría se desarrolló con normalidad, bajo una meteorología favorable, visibilidad óptima, 26°C de temperatura, con viento predominante del ENE a una velocidad promedio de 7.5 nudos y condiciones del río estables y con muy poco oleaje especialmente dentro de la zona de trabajo (Figura 7.3.9).



Figura 7.3.9 – Navegación y levantamiento de perfiles de la dársena

El tiempo de trabajo empleado en el relevamiento de toda la dársena fue de aproximadamente 2 horas 20 minutos comenzando el primer perfil a la hora 10:12 a.m. y finalizando a la hora 12:31 p.m. Durante el trabajo y debido a una falla en la ecosonda, debió hacerse una detención que demandó 25 minutos entre las (11:22 am y 11:47 am) para corregir el error y proseguir luego sin más novedades hasta el final del trabajo. En un relevamiento con fines cartográficos debieron haberse navegado todos los perfiles proyectados cada 10 metros, pero en esta ocasión por el tiempo limitado y medios con que se contaban, debió reducirse la cantidad de perfiles navegados a la mitad. Aun así, el set de datos fue suficiente para completar los objetivos de este trabajo, logrando una cobertura prácticamente completa de la dársena, exceptuando los sectores donde había buques amarrados que imposibilitaban el paso.

7.4 Procesamiento y análisis de resultados

El procesamiento realizado con el módulo NavEdit del mismo software HYDROpro, permite procesar y depurar los datos crudos obtenidos de la batimetría. Este procesamiento incluye diferentes pasos automáticos y otros de edición manual que permiten obtener al finalizar sondeos reducidos de acuerdo con el plano de reducción de la zona de trabajo. Además, permite extraer la marea registrada en el archivo de datos crudo de campo.

La marea se observa con una frecuencia de 1 Hz y luego es promediada cada 30 segundos para mitigar el efecto del oleaje. Consecuentemente el registro de la altura de marea se realizó cada 30 segundos (Figura 7.4.1).

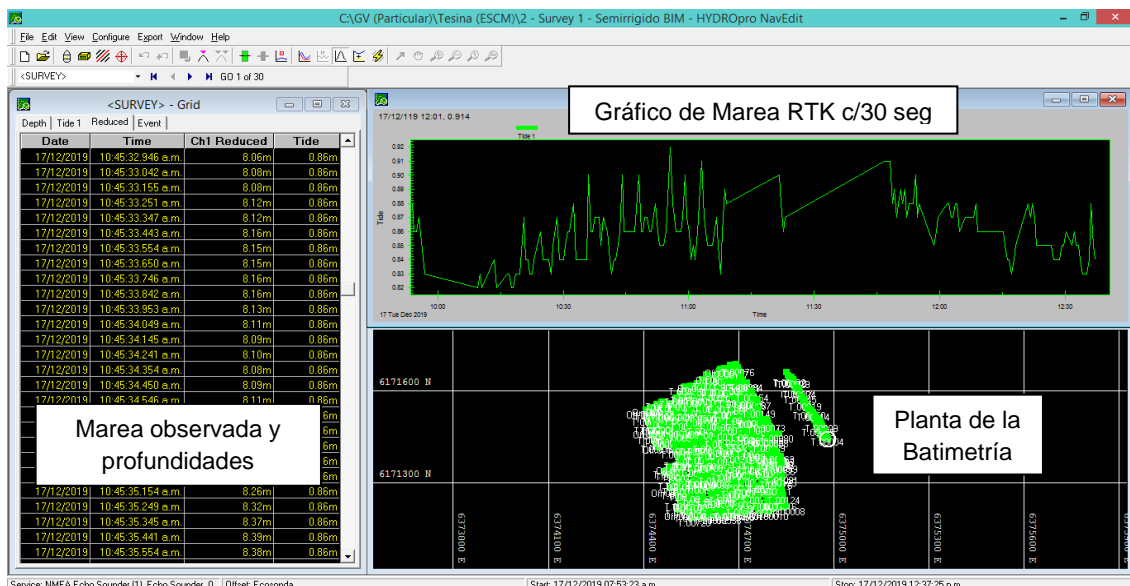


Figura 7.4.1 – Procesamiento de sondeos en NavEdit (software Trimble HYDROpro)

Extraído el registro de la marea puede observarse, en este caso, que la distribución de datos promediados cada 30 segundos responde a una función polinómica de grado 3 indicando la tendencia de la curva (Figura 7.4.2).

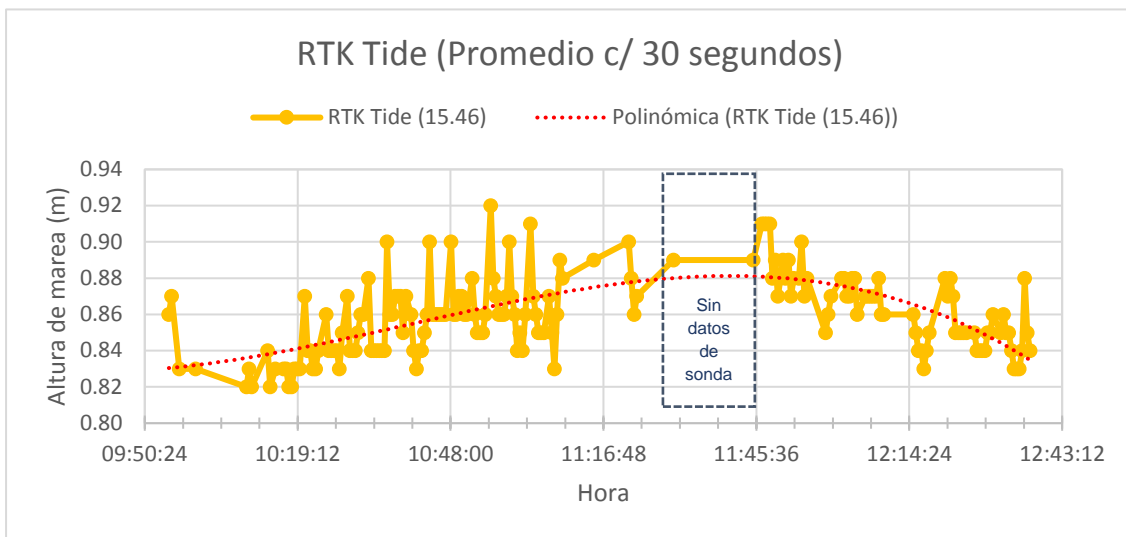


Figura 7.4.2 – Registro de marea cada 30 segundos y tendencia polinómica de grado 3

Las variaciones entre cada uno de los registros consecutivos de marea, en magnitudes de varios centímetros, se deben en su mayoría y casi exclusivamente a los movimientos de la embarcación que son replicados directamente por la antena del receptor GNSS al estar firmemente montados uno al otro. Además, debe considerarse que la precisión altimétrica de un receptor GNSS RTK se encuentra estadísticamente en valores del entorno de $\pm 1,5\text{cm} + 1\text{ppm}$ estableciendo un umbral mínimo de error desde el inicio que debe ser tenido en cuenta.

Se observa también en el gráfico resaltado el período de interrupción del levantamiento durante la corrección del problema de comunicación con la ecosonda. Este período de tiempo quedó descartado y no se aplica a la corrección de sondajes ya que durante ese intervalo no se registraron datos de la ecosonda.

Para ver las diferencias del registro de RTK Tide con los mareógrafos de Palermo, AGP y la lectura manual de la regla YCA2, se sometió al registro de RTK a un nuevo proceso donde se promediaron las lecturas a 15 minutos para equiparar con los registros de todos ellos, obteniéndose un gráfico comparativo (Figura 7.4.3) donde se observan las diferencias de lectura entre RTK Tide y los demás mareógrafos y regla de marea.

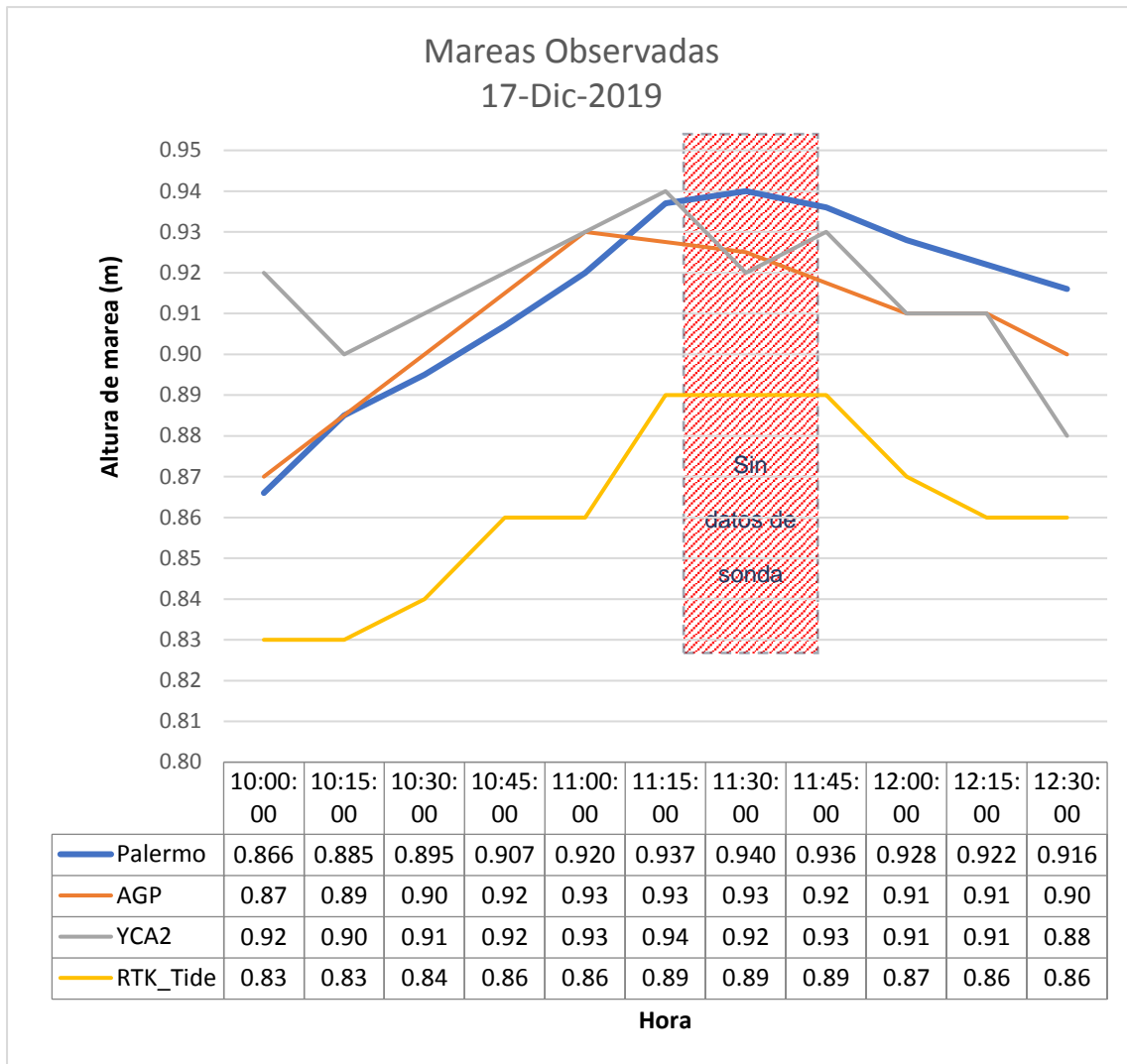


Figura 7.4.3 – Comparación de registros de marea cada 15 minutos

Las diferencias de los registros RTK Tide comparado con cada uno de los mareógrafos y la regla YCA2 se observan en la tabla de la Figura 7.4.4.

	SHN Palermo	AGP Espigon 1	SHN YCA2	RTK Tide (15min)	SHN Palermo	AGP Espigon 1	SHN YCA2
Hora	Altura (m)	Altura (m)	Altura (m)	Altura (m)	Diferencias RTK Tide - Lectura Convencional (m)		
10:00:00	0.866	0.87	0.92	0.83	-0.04	-0.04	-0.09
10:15:00	0.885	0.89	0.90	0.83	-0.06	-0.06	-0.07
10:30:00	0.895	0.90	0.91	0.84	-0.06	-0.06	-0.07
10:45:00	0.907	0.92	0.92	0.86	-0.05	-0.06	-0.06
11:00:00	0.920	0.93	0.93	0.86	-0.06	-0.07	-0.07
11:15:00	0.937	0.93	0.94	0.89	-0.05	-0.04	-0.05
11:30:00	0.940	0.93	0.92	0.89	-0.05	-0.04	-0.03
11:45:00	0.936	0.92	0.93	0.89	-0.05	-0.03	-0.04
12:00:00	0.928	0.91	0.91	0.87	-0.06	-0.04	-0.04
12:15:00	0.922	0.91	0.91	0.86	-0.06	-0.05	-0.05
12:30:00	0.916	0.90	0.88	0.86	-0.06	-0.04	-0.02

Figura 7.4.4 – Diferencias de alturas RTK Tide vs. Mareógrafos convencionales

En general los datos observados muestran una consistencia en las diferencias RTK Tide respecto de los demás registros, en rangos que no superan los 10 cm. Si se considera al registro de un mareógrafo convencional como la realidad respecto del nivel del agua, las diferencias entre este y la marea RTK pueden adjudicarse a una serie de factores, algunos de ellos errores al momento de establecer la altura de la antena de la base GNSS, la altura de antena del móvil e incluso desvíos en el cálculo de la separación Elipsoide-NRS. Pero también puede deberse a efectos particulares como el asentamiento de la embarcación (Squat+Settlement) y otras perturbaciones de carácter local. Es importante comprender que la marea medida por el método RTK contiene variables que un mareógrafo no tiene capacidad de registrar, más aún si se encuentra alejado de la zona donde se realiza el levantamiento. Es así como el método RTK Tide registra el verdadero nivel del agua en el sitio exacto y bajo las condiciones reales de medición, considerando todos los efectos que actúan sobre la dinámica de la embarcación y los registros de datos de profundidad.

Luego de procesados los perfiles de la batimetría utilizando RTK Tide, los sondeos reducidos resultantes se exportaron al software Trimble Marine Construction (TMC) para completar el procesamiento y obtener diversos

productos, entre ellos el modelo digital del fondo de la dársena, vistas en 3D como puede verse en la Figura 7.4.5.

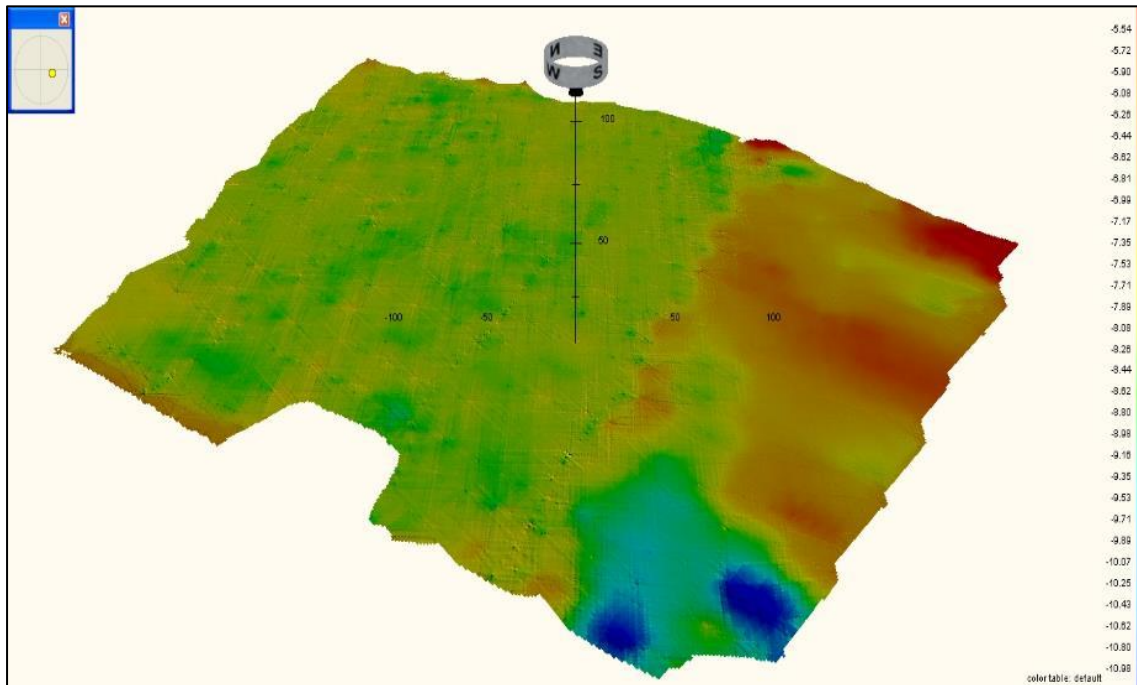


Figura 7.4.5 – Vista 3D del Modelo digital del fondo de la Dársena Norte
(software Trimble Marine Construction - TMC)

Las curvas batimétricas y sondajes resultantes del procesamiento fueron representados en un plano batimétrico a escala 1:3.000 a continuación (Figura 7.4.6).



Figura 7.4.6 – Plano batimétrico por marea RTK (software TMC)

Para validar la batimetría obtenida mediante el método con marea RTK y comprobar la confiabilidad de los resultados, se sometió al mismo set de datos crudos a un procesamiento por el método convencional para luego utilizar a este como patrón de comparación, asumiendo que el nivel del pelo de agua indicado en el mareógrafo o en la regla hidrométrica es el nivel verdadero para el sitio y el momento indicado.

Para poder desarrollar esta comprobación es que durante el trabajo y simultáneo a la batimetría, se registraron las alturas en el mareógrafo de Palermo, en el de AGP y en la regla YCA2 con un intervalo de 15 minutos. Para el proceso de validación, se adoptó como referencia el registro obtenido de las lecturas de la regla YCA2, asumiendo que sus valores son los que más asemejan al comportamiento del nivel del pelo de agua durante el levantamiento, especialmente por la cercanía de estos a la zona de trabajo. De este modo, nuevamente con el módulo NavEdit de HYDROpro se sometió la misma batimetría a un segundo procesamiento donde el único cambio fuera la curva de marea utilizada para la reducción de sondajes, aplicando la marea registrada en la regla YCA2.

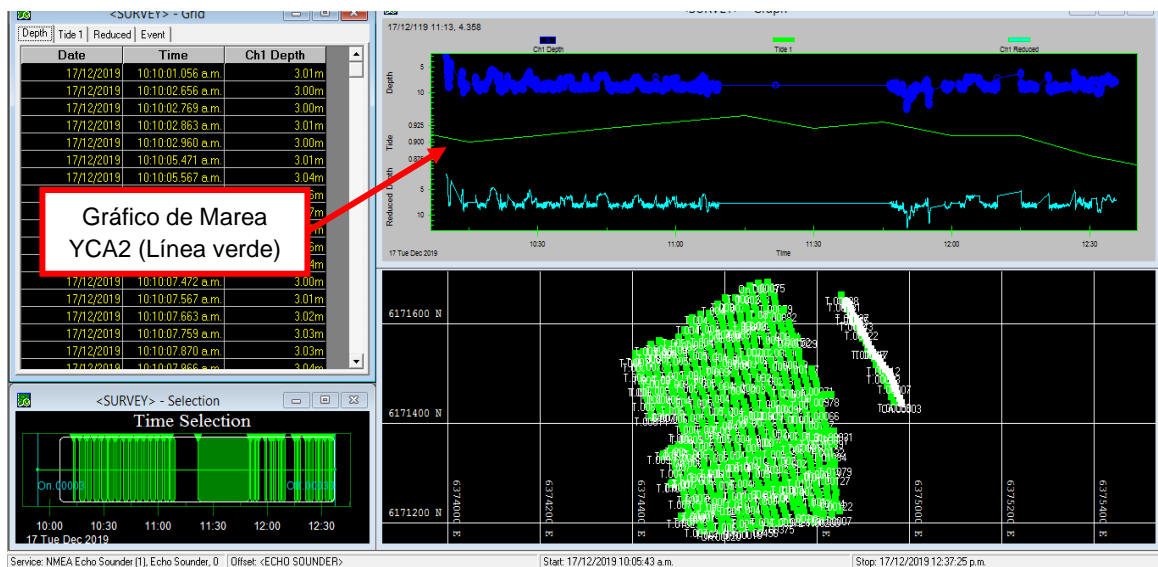


Figura 7.4.7 – Procesamiento de la batimetría con la marea observada en la regla YCA2 (software Trimble HYDROpro)

Finalizada esta etapa, los resultados obtenidos por marea convencional se exportaron exactamente de la misma manera que los datos obtenidos por marea

RTK, asegurando de no haber modificado ningún parámetro que pudiera influir o introducir variaciones que pudieran alterar el patrón de comparación.

Es importante destacar que este proceso de validación no se realizó sobre los sondeos seleccionados para confeccionar el plano de sondeos y curvas batimétricas, sino que se elaboró con el 100% de los sondeos, utilizando el total de los 40.843 sondeos medidos y resultantes de los procesos, habiendo cumplido con los criterios de procesamiento configurados en el módulo de edición NavEdit de HYDROpro.

Ambos conjuntos de sondeos reducidos, por la marea de la regla YCA2 y por marea RTK, fueron exportados al software TMC para someterlos al proceso de comparación. Allí se calculó el modelo digital del terreno (del fondo de la dársena) correspondiente a cada batimetría (Figura 7.4.8).

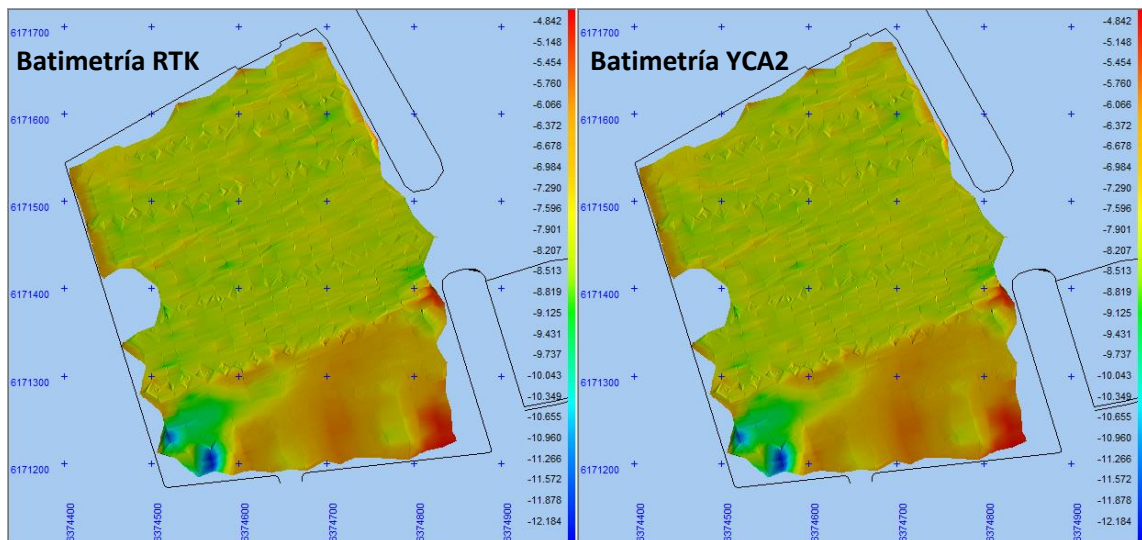


Figura 7.4.8 – Modelos digitales de terreno (software TMC).

Izquierda: Batimetría obtenida por método RTK Tide.

Derecha: Batimetría obtenida por método convencional de lectura de marea (regla YCA2)

A simple vista, las diferencias entre ambos modelos son difíciles de percibir, aun analizando las imágenes de los MDT a escalas más ampliadas. A través de una operación de cálculo en TMC llamada “Create Difference Model”, se compararon ambos MDT. El resultado que puede verse en la Figura 7.4.9 muestra las diferencias de profundidad existentes entre ambos MDT. Puede

observarse que las diferencias máximas entre un modelo y el otro no exceden los 12 centímetros siendo aún menor sobre algunos de los perfiles medidos. La escala hipsométrica muestra en colores rojos, las mayores diferencias y en verde las menores.

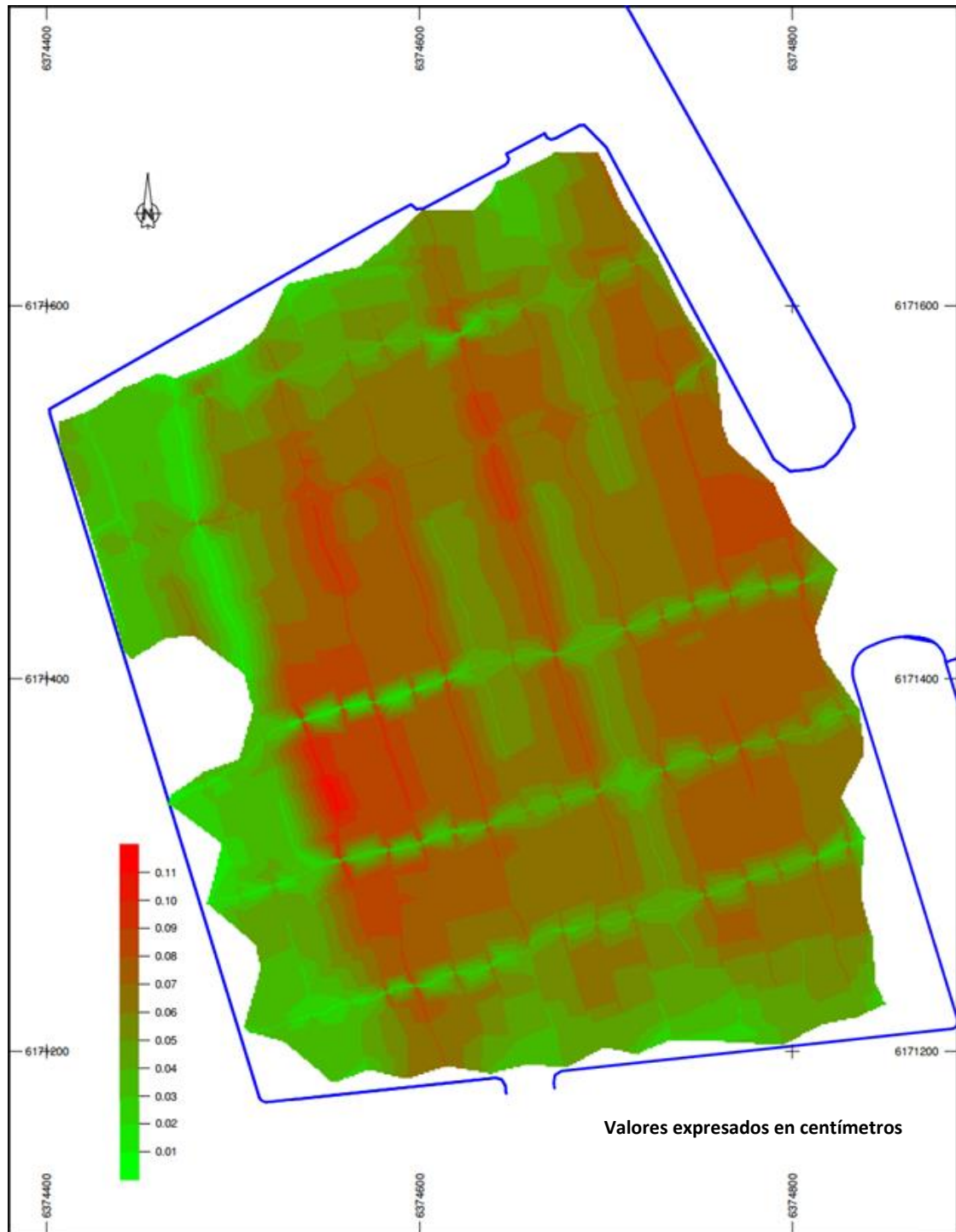


Figura 7.4.9 – Comparación de batimetrías procesadas con marea RTK vs. YCA2 (software TMC)

Capítulo 8 – Discusión y Conclusiones

El objetivo planteado para este estudio es exponer los conocimientos teórico-prácticos relacionados con la técnica de levantamientos hidrográficos mediante GNSS RTK aplicando el método RTK Tide y realizar un análisis comparativo con los métodos tradicionales aplicados hasta la actualidad. Para ello se realizó un levantamiento batimétrico en la Dársena Norte del Puerto de Buenos Aires por su cercanía a la ESCM y el fácil acceso que a través de ella se tiene a la zona a navegar, resolviéndolo de dos maneras: con RTK Tide y por el método convencional.

Las mediciones de fase portadora proporcionadas por el método RTK han sido por décadas muy utilizadas para todo tipo de trabajo topográfico a cielo abierto y cada vez son más aceptadas en levantamientos hidrográficos, en proyectos de dragados y obras marítimas. Al aumento notorio en la precisión y confiabilidad con las que se puede medir la ubicación planimétrica de una embarcación, se le suma también la capacidad de determinar los movimientos verticales con precisiones mejores que 5cm durante el levantamiento, motivo por el cual los sistemas RTK están desplazando a los sistemas de posicionamiento horizontal DGPS/DGNSS los cuales utilizan mediciones solo de código de limitada capacidad en altimetría. La medición de fase portadora proporciona la elevación en tiempo real de una lancha hidrográfica y consecuentemente, la elevación de la superficie del pelo de agua sobre la que se encuentra, a partir de la cual también pueden reducirse y referenciarse las profundidades obtenidas de una ecosonda a bordo.

Este método de medición con GNSS por fase portadora es clave para obtener también la relación entre las alturas del receptor GNSS, referidas siempre al elipsoide WGS84, con el datum de marea o NRS utilizado en la zona de levantamiento, tarea que resulta imprescindible realizar si no se cuenta con un modelo de transformación previamente establecido.

Los sistemas RTK tienen una precisión de nivel centimétrico en observaciones estáticas, estáticas rápidas y hasta con ocupaciones de corto

período (técnica conocida como Stop & Go), tanto en la componente horizontal como en la vertical. Sin embargo, debe considerarse que esta precisión se degrada cuando la medición se realiza en movimiento constante y con las componentes debidas al movimiento de una embarcación navegando. Si se utilizan sistemas complementarios como equipos de compensación de movimiento (compensador de olas o sensor inercial triaxial) y técnicas de filtrado avanzadas, pueden suavizarse estos movimientos y obtener una elevación media de la superficie del agua mejorada en un rango de condiciones meteorológicas y de navegación más amplias. Sin estos sensores complementarios deberá tenerse en cuenta las condiciones de viento y oleaje, igual que en batimetrías convencionales, aun utilizando un sistema GNSS RTK para determinación del nivel de agua.

Como en todo sistema diferencial GPS o GNSS, es requisito de la técnica RTK establecer una estación base local en el sitio del proyecto o en su cercanía. Puede ser un base propia materializada en la costa sobre un punto cuyas coordenadas son conocidas y con buena visibilidad de la zona del levantamiento, para asegurar las comunicaciones por radio UHF o utilizar un servicio de corrección por internet como el caso del servicio RAMSAC-NTRIP del IGN. En este último caso deberá considerarse la estación CORS más cercana al proyecto y la cobertura celular de la zona para obtener las correcciones. La estación base RTK será la de referencia y la encargada de calcular los datos de corrección de pseudodistancia y fase de la portadora y darles formato a estos para transmitirlos a la embarcación de levantamiento hidrográfico. Es importante que la distancia entre la base RTK y el sitio de la batimetría sea lo más corta posible, generalmente se recomienda menos de 20 kilómetros. A mayores distancias, independientemente del límite en el enlace de comunicaciones, pueden sumarse otros problemas, como dificultades en el cálculo de ambigüedades de fase y consecuentemente de inicialización requerida para llegar a precisiones centimétricas. El posicionamiento cinemático de alta precisión está disponible una vez que el receptor a bordo de la embarcación resuelve las ambigüedades enteras o como usualmente se dice, cuando este obtiene una “solución fija” de ambigüedades. Luego para permanecer en este estado de “ambigüedades fijas” (modo RTK Fijo) es necesario que tanto la estación de referencia como el

receptor móvil mantengan el seguimiento de un mínimo de 5 satélites. En la actualidad eso no debería suponer un problema dada la alta disponibilidad de constelaciones y satélites a la vista durante todo el día. Pero de cualquier forma, si ese número de satélites cayera por debajo del mínimo o por otra razón (por ejemplo que los factores de calidad, basados en el cálculo de residuales no cumplan con ciertos límites), la solución fija de RTK se pierde entrando en un modo llamado "flotante", comprometiendo la precisión ya que la capacidad de resolución de posición sería disminuida a un nivel de 20 cm o incluso peor y las ambigüedades se deberían resolver nuevamente antes de que el sistema recupere la inicialización y vuelva a un nivel centimétrico, para lograr una buena resolución de la componente altimétrica que es la que más interesa en este caso.

De acuerdo con los lineamientos de la OHI (2005), la técnica RTK otorga sobrada precisión y capacidad para el posicionamiento horizontal en levantamientos de todo orden y también resulta adecuada y aceptada en la determinación de la marea local para luego reducir los sondeos de una batimetría. Pero es necesario prestar especial atención a una serie de factores que intervienen directa e indirectamente en este proceso.

Lo primero y principal a tenerse en cuenta es que debe contarse con una buena determinación de la relación existente entre la superficie de referencia altimétrica para los GNSS, el elipsoide WGS84, y el NRS utilizado en la zona de levantamiento. El método RTK es una herramienta que mide eficazmente la elevación de la superficie del agua local en relación con el elipsoide WGS84, pero de nada serviría si no se cuenta con un modelado eficaz también, de la relación de estas alturas elipsoidales con las alturas expresadas en relación con el NRS, como son los sondeos reducidos de planos batimétricos y cartas náuticas.

Dado que la conversión entre alturas WGS84 y los sondeos reducidos siempre contendrá algún grado de incertidumbre, quizás sea prudente crear archivos de nivel de agua y productos de sondeos finales con alturas expresadas en ambos sistemas tanto WGS84 como NRS. Esto garantizaría que futuros usuarios de los datos puedan investigar la precisión de las transformaciones

anteriores, como así aplicar sus propios modelos, posiblemente más precisos. Es una preocupación real que los sondeos pudieran almacenarse con modelos de transformación de alturas deficientes y que nunca podrán ser capaces de recalcularse con modelos más precisos, a medida que se disponga de mejores datos de base y modelos de la distancia entre el elipsoide y el NRS. Por esta razón, los metadatos sobre cómo se convirtieron los sondeos (por ejemplo, parámetros del modelo WGS84-NRS) deberían ser un requisito mínimo de cualquier levantamiento.

El valor de la diferencia entre el elipsoide WGS84 y el NRS de 15.46m hallado en este trabajo para Dársena Norte, podría considerarse una aproximación aceptable en una zona del orden de unos 5 kilómetros a la redonda. Utilizar un solo punto de vinculación de ambas superficies de referencia, para el caso de relevamientos hidrográficos en áreas pequeñas donde no existe un modelado previo de elipsoide - NRS, es un método razonablemente simple y rápido de aplicar. Si la zona de cobertura es mayor debe considerarse la utilización de múltiples puntos, donde puedan determinarse tanto los NRS con el empleo de mareógrafos como su altura elipsoidal medida con GNSS, para de esta forma generar un modelo más amplio basado en una interpolación entre puntos observados. La densificación de puntos dependerá de la extensión de cobertura de cada plano de reducción y es regla que cuanto mayor sea el área de cobertura aún mayor deberá ser la disponibilidad de puntos en ambos sistemas de referencia altimétrica, incluso considerando el uso de modelos de geoide para realizar diversos estudios en la zona.

Es sabido que la corrección más importante en los sondeos medidos durante una batimetría, por su grado de significancia es la marea. En levantamientos tradicionales las variaciones de la fase de marea entre el sitio de observación de esta (en un mareógrafo o regla hidrométrica) y la ubicación de la embarcación en el sitio del levantamiento, debe ser tenida en cuenta para evitar errores en la reducción de los sondeos. Otros efectos locales pueden alterar la elevación de la superficie del agua en la zona del proyecto y estos efectos aumentan con la distancia al sitio de observación de marea. En ocasiones estas diferencias sistemáticas pueden exceder las tolerancias máximas establecidas

de acuerdo con el orden del levantamiento. Es aquí donde la técnica de RTK Tide se destaca ya que corrige el verdadero nivel del agua en el sitio del levantamiento, considerando no solo la marea, sino también el oleaje y cualquier otra onda local. En los levantamientos tradicionales la lectura de marea se realiza generalmente en la costa, alejado del lugar de la embarcación sondadora, mientras que, si se considera el oleaje, se determina a bordo. De hecho, en la realidad cotidiana hay muchos trabajos de batimetría que se ejecutan sin utilizar compensador de olas, esperando las condiciones más propicias de viento y oleaje de forma tal que estas influyan lo menos posible en la batimetría con la desventaja que, en ocasiones, reduce la ventana de trabajo a tiempos y condiciones muy restringidas. Utilizar esta técnica RTK Tide amplía las posibilidades de trabajo en condiciones que se considerarían difíciles para levantamientos convencionales.

Como se mencionó en varios pasajes de este trabajo, la técnica RTK Tide proporciona el cálculo entre el NRS de referencia y la elevación de la superficie del agua local. Por ello RTK Tide no puede considerárselo equivalente a la marea observada en un mareógrafo, sin embargo, constituye un corrector eficaz que se aplica a las profundidades observadas. RTK Tide coincidiría con la observación realizada por un mareógrafo, únicamente cuando la embarcación está amarrada y detenida. Tan pronto como la embarcación entra en movimiento, el DD entra en la solución de RTK Tide, generando un movimiento vertical del transductor de la sonda y una variación del calado, efecto del asentamiento de la embarcación (squat y settlement). Cuando se usa RTK, quedó demostrado que la corrección de DD se cancela automáticamente en la ecuación (vii) del ítem 6.4, ya que esta alteración es detectada y medida inmediatamente por el sistema GNSS, incluso sus variaciones producto de la velocidad, de la profundidad o variaciones de carga en la embarcación. Por ejemplo si la embarcación es pequeña, con el consumo de combustible disminuye su peso y en consecuencia habrá una tendencia de disminución en el calado. En un levantamiento tradicional rara vez esta sutil pero importante componente es considerada con rigurosidad.

Respecto del efecto del oleaje, hay dos opciones posibles respecto de cómo el software de navegación combina nivel de agua con RTK Tide

considerando las correcciones de oleaje. La primera opción es combinar datos de marea con el oleaje utilizando las elevaciones RTK en alta frecuencia de actualización, típicamente de 1 segundo. Entre las actualizaciones de elevación del GNSS, el software es capaz de ajustar los datos de elevación para predecir el cambio en el movimiento de la embarcación. Si se dispone de un receptor RTK de alta tasa de actualización, por ejemplo 10 Hz o mayor, las mediciones directas de elevación pueden calcularse independientemente de cualquier entrada de sensor inercial. La segunda metodología consiste en un promedio de datos en un intervalo definido por el usuario, usualmente 30 segundos, para eliminar el oleaje. Promediar las elevaciones RTK permite obtener un plano de oleaje normalizado ya que, en la teoría, este nivel vertical promedio se asemejaría a un plano cero definido por un compensador de olas o un sensor inercial. Este segundo método es el recomendado como consecuencia de experiencias previas realizadas por desarrolladores que han comprobado su mayor efectividad, tema que no fue tratado en detalle en este trabajo ya que no es parte del objetivo de este.

Los registros de marea obtenidos en este trabajo por RTK Tide fueron comparados con dos mareógrafos cercanos y con lecturas efectuadas en la regla YCA2. En general estos datos observados a bordo de la embarcación utilizada muestran una consistencia en las diferencias de RTK Tide respecto de los demás registros, en rangos que no superan los 10 cm. Si se considera al registro de un mareógrafo convencional como la realidad respecto del nivel del agua, las diferencias entre éste y la marea RTK pueden adjudicarse a una serie de factores, algunos de ellos podrían ser errores al momento de establecer la altura de la antena de la base GNSS, la altura de antena del móvil instalado en la embarcación e incluso desvíos en el cálculo de la separación elipsoide-NRS. Pero también tiene una componente muy importante que son los efectos descritos anteriormente tal como el asentamiento de la embarcación y otras perturbaciones de carácter local. Es importante destacar que la marea medida por el método RTK contiene variables que un mareógrafo no tiene capacidad de registrar, más aún si se encuentra alejado de la zona donde se realiza el levantamiento. Es así como el método RTK Tide registra el verdadero nivel del agua en el sitio exacto y bajo las condiciones reales de medición, considerando

todos los efectos que actúan sobre la dinámica de la embarcación que modifican los registros de datos de profundidad.

Para validar la batimetría obtenida mediante el método con marea RTK y comprobar la confiabilidad de los resultados, se sometió al mismo set de datos crudos a un procesamiento por el método convencional para luego utilizar a este como patrón de comparación, asumiendo que el nivel del pelo de agua indicado por la regla YCA2 es el nivel verdadero para el sitio y el momento indicado. De esta manera se obtuvieron dos modelos digitales del terreno (Figura 6.4.8), donde al ser comparados los 40.843 sondeos obtenidos se obtuvieron diferencias que no exceden los 12cm. Este resultado valida el levantamiento realizado donde se calculó la distancia entre el elipsoide WGS84 y el NRS y la marea se midió utilizando RTK Tide.

Se espera que la metodología utilizada en esta Tesina sirva para realizar nuevos levantamientos en la zona de estudio y encarar la extrapolación del método a otros lugares costeros del litoral Atlántico, donde se requieran realizar batimetrías. Cabe destacar que en las costas de la Patagonia donde la amplitud de la marea alcanza los 12m, el método RTK Tide supera a la utilización de una regla, mareómetro o al mareógrafo tradicional emplazado en la costa, porque los posibles cambios de fase de la marea en la zona del relevamiento pueden superar las diferencias aceptadas por la OHI (2008).

BIBLIOGRAFIA:

Alkan R. M., Kalkan Y., Aykut N. O., 2006. Sound Velocity Determination with Empirical Formulas & Bar Check. Shaping the Change, XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8-13, 2016. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2006/papers/ps04/ps04_01_al_kan_etal_0566.pdf

Baker B., 1999. Real Time Kinematic GPS (RTK) Systems for Hydrographic Surveying – Five Years On. Internal paper, Marine Survey Division, Trimble Navigation, New Zealand Ltd.

Ballester M., Sala L., García D., 2010. Estudio batimétrico con ecosonda multihaz y clasificación de fondos. Proyecto Final de la Carrera de Ingeniería Técnica Topográfica de la Universidad Politécnica de Cataluña, 94p.

Berné Valero J.L., Anquela Julián A.B., Garrido Villén N., 2014. GNSS, GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geomática. Universitat Politècnica de València. Primera edición 1914, 437p.

Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional, 1999. Sistemas Geodésicos. Subcomité de Geodesia, Grupo de Trabajo Sistemas Geodésicos, 1ª. Edición 1999,51p.

DeLoach S.R., 1995. GPS Tides and Datums. The Hydrographic Journal. No.75, January, 3-7.

DeLoach S.R. 1996. GPS Tides: A Project to Determine Tidal Datums with the Global Positioning System. M.Eng. report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 181, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 105 p.

Defant A., (1961).Physical Oceanography.Volume II.Pergamon Press, 598 p.

D'Onofrio E.E., Fiore M.E., Pousa J.L., 2008. Changes in the regime of storm surges in Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 24,1A, 260-265.

D'Onofrio E., 2016. Levantamientos Hidrográficos. Departamento Agrimensura, Facultad de ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Apuntes de Clase

El-Diasty Mohammed, Al-Harbi Salim, Pagiatakis Spiros, 2018. Hybrid harmonic analysis and wavelet network model for sea water level prediction. *Applied Ocean Research* 70 (2018) 14–21.

Ferrario de Urriza S., 2000. El ABC del GPS. Consejo Profesional de Agrimensura de la Provincia de Buenos Aires, 169p.

Fonseka P.G.C.C., Madhushankha H.R.S., Priyasad J.K.S.M., Yasarathna K.H.J.I., 2017. Latency effect on the bathymetry in single beam echo-sounder system. Thesis submitted to the Faculty of Geomatics, Sabaragamuwa University of Sri Lanka, 47p.

Fraser S., 2017. Acoustic Investigation of the Hydrodynamics and Ecology of a Tidal Channel and the Impacts of a Marine Renewable Energy Installation. A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Aberdeen, School of Engineering, 314p.

Gueriot D., Chedru J., Daniel S., Maillard E., 2000. "The patch test: a comprehensive calibration tool for multibeam echosounders," OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158), Providence, RI, USA, pp. 1655-1661 vol.3, doi: 10.1109/OCEANS.2000.882178.

Hess K. L., Milbert D. G., Gill S. K., Roman D. R., 2003. Vertical datum transformations for kinematic GPS hydrographic surveys. Proceedings of the U.S. Hydro 2003 Conference, Biloxi, Mississippi, USA, 24-27 March. CD-ROM.

Huerta E., Magiaterra A., Noguera G., 2005. GPS: Posicionamiento Satelital, 1° ed., Rosario, UNR Editora - Universidad Nacional de Rosario, 148p.

Hurn, J., 1989. GPS - A Guide to the Next Utility, Trimble Navigation, 76p.

Iliffe, J. C., Ziebart M. K., Turner J. F., 2007. The derivation of vertical datum surfaces for hydrographic applications. The Hydrographic Journal 125:3–8.

IHME, 2000. Sondadores. Instituto Hidrográfico de la Marina de España, 111p.

Jalón-Rojas, I., 2013. Análisis de armónicos con T_Tide (Tidal analysis with T_Tide). Tutorial and Matlab script to perform a classical tidal harmonic analysis using T_Tide, http://isabeljalonrojas.com/analisis-de-armonicos-de-marea-astronomica-con-t_tide/

Lauría E., Ramos R., Cimbaro S, 2004. Curso Geodesia Satelitaria-GPS. Apunte Centro de Capacitación en Ciencias Geográficas. Instituto Geográfico Nacional.

Martin R. J., Broadbent G. J., 2004. Chart datum for hydrography. The Hydrographic Journal, No. 112.

Milbert D. G., 2002. VDatum Transformation Tool (New Version 1.05) The Geo Community Spatial News, <http://spatialnews.geocomm.com/features/vdatum/>

Mills J., Dodd D., 2014. Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography, International Federation of Surveyors (FIG), Publication N°62, ISSN 2311-8423.

Myers E., Wong A., Hess K., White S., Spargo E., Feyen J., Yang Z., Richardson P., Auer C., Sellars J., Woolard J., Roman D., Gill S., Zervas C. and Tronvig K., 2005. Development of a national Vdatum, and its application to sea level rise in North Carolina. Proceedings of the USHydro2005, March 29–31, San Diego, CA.

NOAA, 2001. Tidal datums and their applications. Silver Spring MD, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Center for Operational

Oceanographic Products and Services, NOAA Special Publication NOS CO-OPS 1, 132p. DOI: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-170>.

OHI, 1999. Product specification for raster navigational charts (RNC). Special Publication No. 61, 1st Edition, International Hydrographic Bureau, 18p.

OHI, 2005. Manual de Hidrografía. Publicación M-13 de la Organización Hidrográfica Internacional, 1ra Edición, Mónaco, 507p.

OHI, 2008. Normas de la OHI para los Levantamientos Hidrográficos. Publicación S-44, 5ta. Edición, 32p.

OHI, 2010. Hydrographic Dictionary. Publication S-32, International Hydrographic Organization. http://hd.iho.int/en/index.php/Main_Page

OHI, 2014. Hydrographic Dictionary. Publication S-32, International Hydrographic Organization. http://hd.iho.int/en/index.php/Main_Page

OHI, 2017. Las cartas electrónicas de navegación y las prescripciones de transporte: Hechos. Publicación S-66 de la Organización Hidrográfica Internacional, Mónaco, 48p.

OHI, 2017a. Water Level Information for Surface Navigation - Product Specification. Publicación S-104 de la Organización Hidrográfica Internacional, Mónaco, 43p.

Oreiro F., D'Onofrio E., Fiore M., 2015. Vinculación de las referencias altimétricas de las cartas náuticas con el elipsoide WGS84 para el Río de la Plata. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. *Geoacta* 40(2): 109-120.

Prieto J., Velasco J., 2014. Errores y precisión de las observaciones GNSS. Notas y gráficos de apoyo para a la asignatura Aplicación del GNSS en la geomática. Curso 2013-2014. ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM, Madrid. 80pp.

Pugh D., Woodworth P., 2014. Sea-Level Science - Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes. Cambridge University Press, 409p.

Sanders P., 2008. RTK Tide Basics. Coastal Oceanographics Inc., USA. Hydro International, <https://www.hydro-international.com/content/article/rtk-tide-basics-9>

Scarfe B. E., 2002. Measuring Water Level Corrections (WLC) Using RTK GPS. The Hydrographic Journal, 2002 (104), 17-23.

Scarfe B. E., 2006. Precise RTK GPS water levels. Hydro International, 10(2), 25-26.

SeaBeam 1999. Multibeam Sonar Theory of Operation. Communications SeaBeam Instruments, Estados Unidos, 103p.

Slobbe D. C., Klees R., Verlaan M., Dorst L. L., Gerritsen H., 2013. Lowest Astronomical Tide in the North Sea Derived from a Vertically Referenced Shallow Water Model, and an Assessment of its Suggested Sense of Safety, Marine Geodesy, 36:1, 31-71, doi: 10.1080/01490419.2012.743493

Talbot N.C., 2013. Compact Data Transmission Standard for High-Precision GPS, Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996), Kansas City, MO, 861-871.

Trimble Navigation Ltd., 2007. GPS. The first Global Navigation Satellite System. Part Number 022540-030, 144p.

Trimble Navigation Ltd., 2014. HYDROpro Training Course V2.41 Manual, 246p.

Trimble Inc., 2019. Trimble Marine Construction Software – TMC Position-Single Beam Manual V1.0.0, 202p.

Ueno M., Santerre R., Langelier D., Marceau G., 2000. Improvement of GPS Ambiguity Resolution Using Height Constraint for the Support of Bathymetric Surveys. Proceedings of the IAIN World Congress and the 56th Annual Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, June 2000, pp. 842-850.

U.S. Army Corps of Engineers, 2002. Engineering and Design Hydrographic Surveying. Manual No. 1110-2-1003. Department of the Army. Washington, DC 20314-1000, 579p.

Van Sickle J., 2015. GPS for Land Surveyors. Fourth edition. USA. International Standard Book Number-13: 978-1-4665-8311-5 (eBook - PDF), 350p.

LISTA DE ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

AGP	Administración General de Puertos
C/A	Coarse Adquisition code (Código de adquisición gruesa)
CGCS2000	China Geodetic Coordinate System 2000 (Sistema de coordenadas geodésica de hina 2000)
CMR	Compact Measurement Record (Registro de medición compacto)
DBS	Depth Below Surface (profundidad bajo la superficie del agua)
DBT	Depth Below Transducer (profundidad bajo el transductor)
DD	Dinamic Draft (calado dinámico)
DGNSS	Differential GNSS (GNSS Diferencial)
DGPS	Differential GPS (GPS Diferencial)
DMA	Defense Mapping Agency (Agencia de mapeo de defensa)
DoD	Department of Defense (Departamento de Defensa)
DOP	Dilution of Precision (dilución de la precisión)
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System (sistema electrónico de visualización e información de cartas)
ENC	Electronic Navigational Chart (carta de navegación electrónica)
ERS	Elipsoidally Referenced Survey (levantamiento con referencia elipsoidal)
ESCM	Escuela de Ciencias del Mar
GNSS	Global Navigation Satellites Systems (sistemas de navegación global por satelites)
GPS	Global Positioning System (sistema de posicionamiento global)
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame (Marco de referencia terrestre de Galileo)
HAT	Highest Astronomical Tide (marea astronómica más alta)
IGN	Instituto Geográfico Nacional

INS	Inertial Navigation Sensor (Sensor de navegación inercial)
IMU	Inertial Measurement Unit (Unidad de medición inercial)
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System (Sistema de navegación por satélite regional de la India)
LAT	Lowest Astronomical Tide (marea astronómica más baja)
MBES	Multi Beam Echo Sounder (Ecosonda multihaz)
MDT	Modelo Digital del Terreno
MLLW	Mean Lower Low Water (Nivel de agua medio más bajo)
NMM	Nivel Medio del Mar
MWL	Mean Water Level (nivel medio del agua)
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging (Sistema de navegación con tiempo y distancia)
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency (Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial)
NMEA	National Marine Electronics Association (Asociación Nacional de Electrónica Marina)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (administración nacional del océano y la atmósfera)
NRS	Nivel de Reducción de Sondajes
ODT	Onda de tormenta
OHI	Organización Hidrográfica Internacional (IHO - International Hydrographic Organization)
OMI	Organización Marítima Internacional (IMO – International Maritime Organization)
OTF	On the fly (inicialización en el vuelo)
POSGAR 2007	Posiciones Geodésicas Argentinas 2007
PRC	Pseudo Random Code (código pseudoaleatorio)
PRS	Plano de Reducción de Sondajes

PZ-90	Parametry Zemli 1990 goda (Parámetros de la Tierra 1990)
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System (Sistema por satellite cuasicenital)
RCDS	Raster Chart Display Systems (sistemas de visualización de cartas raster)
RNC	Raster Navigational Chart (carta de navegación raster)
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services (Comisión radio técnica para servicios marítimos)
RTK	Real Time Kinematic (cinemático a tiempo real)
S/A	Selective Availability (disponibilidad selectiva)
SENC	ENC del sistema (formato interno propietario de las cartas ENC)
SEP	Separación Elipsoide – Plano de reducción
SHN	Servicio de Hidrografía Naval
SPSO	Spectra Precision Survey Office software
SVP	Sound Velocity Profiler (perfilador de velocidad del sonido)
RAMSAC	Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo
RMS	Root Mean Square (raíz media cuadrática o error medio cuadrático)
SONAR	Sound Navigation and Ranging (navegación y distancia por sonido)
SR	Sondaje Reducido
SRVN16	Sistema de Referencia Vertical Nacional 2016
THU	Total Horizontal Uncertainty (incertidumbre horizontal total)
TMC	Trimble Marine Construction software
TVU	Total Vertical Uncertainty (incertidumbre vertical total)
USACE	U.S. Army Corp of Engineers (cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos)
WGS84	World Geodetic System 1984 (sistema geodésico mundial de 1984)

WL	Water Level (nivel del agua)
WLC	Water Level Correction (corrección del nivel del agua)
YCA	Yatch Club Argentino

LISTA DE FIGURAS

2.1.1	Sector de carta náutica electrónica ENC formato S-57 del Puerto de Buenos Aires	8
2.2.1	El nivel de reducción de sondajes y profundidades en la carta náutica	11
2.3.1	Símbolo de una carta raster ampliado en exceso	13
2.3.2	Visión de un RNC de día	13
2.3.3	Visión de un RNC de noche	14
2.3.4	Pantalla de un ECDIS, Presentación Estándar, día	15
2.3.5	Pantalla de un ECDIS, Presentación Estándar, noche.	16
3.1.1	Estaciones que forman parte del Segmento de Control del sistema NAVSTAR - GPS (USA)	20
3.1.2	Constelaciones de satélites que conforman el Segmento Espacial	21
3.2.1	Distribución de las señales GNSS en la Banda L	22
3.3.1	Desfajaste aparente de códigos efecto de la distancia entre satélite y receptor	25
3.3.2	Intersección de esferas de posición	26
3.3.3	A la izquierda: buen PDOP, área de incertidumbre reducida, buena Precisión. A la derecha: mal PDOP, geometría	

	desfavorable aumentando el área de incertidumbre, Precisión resultante mala.	29
3.4.1	Principio básico del Posicionamiento Diferencial	32
3.4.2	Proceso de ondas portadoras de GNSS	34
3.5.1	Métodos de posicionamiento diferencial	36
3.5.2	Postproceso de datos GNSS	37
3.5.3	Posicionamiento a tiempo real DGNS	38
3.6.1	Relación de alturas y separación geoide - elipsoide	42
4.2.1	Ecosonda Echotrac E20 con transductor y Laptop	46
4.2.2	Patrón de haz para una sonda monohaz. La sensibilidad direccional con ángulo es proporcional al rango del patrón del haz desde el centro del transductor.	47
4.2.3	Haz ancho (Wide beam) vs. Haz estrecho (Narrow beam)	49
4.2.4	Frecuencia de 50kHz (izq) y 200kHz (der.)	50
4.2.5	Ecosonda Multihaz SeaBat T50-R compuesto por la unidad de procesamiento tipo rack, transductor multihaz y sensor IMU (Inertial Measurement Unit).	51
4.2.6	Proyectores e hidrófonos arreglados como aspas de molino cruzadas. Muestra las áreas ensonificadas por todos los elementos de los arreglos.	52
4.2.7	Barrido del fondo con ecosonda multihaz.	52

4.2.8	Errores producidos por el cabeceo, balanceo, ceñida y latencia .	54
4.3.1	DBT, DBS y Draft.	57
4.3.2	Velocidad media del sonido según el tipo de agua y la temperatura.	58
4.4.1	Dispositivo Bar-Check.	60
4.4.2	Registro de Bar-Check en la faja de sondaje.	60
4.5.1	Incertidumbre de la posición de un punto en el fondo.	64
4.5.2	Muestra dos levantamientos donde para determinar cuál es el más exacto combina los errores aleatorios con los sistemáticos.	65
4.5.3	Normas para levantamientos hidrográficos.	66
4.6.1	Editor de embarcaciones y offsets de Trimble HYDROpro.	70
4.6.2	Cabeceo / Balanceo o Rolido / Ceñida.	71
4.6.3	Efecto de cabeceo.	72
4.6.4	Efecto del cabeceo (Pitch) y el offset horizontal Y, en la traslación vertical del punto de referencia.	72
4.6.5	Componentes verticales.	73
4.6.6	Estimación de errores de una ecosonda.	76

5.1.1	Acción de las fuerzas de marea debidas a la Luna sobre la Tierra.	80
5.1.2	Marea alta y marea baja debidas a la acción gravitatoria de la Luna.	80
5.1.3	Variación de la altura de la marea.	81
5.1.4	Orbitas, lunar y terrestre.	83
5.1.5	Mareas Vivas o de Sicigias.	83
5.1.6	Mareas Muertas o de Cuadratura.	84
5.2.1	Pleamar, bajamar, amplitud y período de la marea.	84
5.2.2	Ondas componentes principales de la marea. Los subíndices 1 indican componentes diurnas. Los subíndices 2 indican componentes semidiurnas.	86
5.2.3	Curvas que caracterizan a los 4 regímenes de marea con su correspondiente factor de forma (F).	88
6.2.1	Modelo de Geoide Gravimétrico Nacional GEOIDE-Ar 16.	93
6.4.1	Embarcación amarrada en puerto en cercanía de un hidrómetro cuyo cero coincide con el NRS.	99
6.4.2	Marea RTK en navegación.	101
7.1.1	Enumeración de medios disponibles y tareas realizadas.	104
7.2.1	Dársena Norte y ubicación de la regla hidrométrica en el YCA.	105

7.2.2	Ubicación de la regla YCA2 en el espigón del YCA.	106
7.2.3	Vista de los puntos fijos auxiliares utilizados para trasladar el NRS referido a la regla YCA2.	107
7.2.4	Croquis de los puntos fijos auxiliares utilizados para trasladar la cota del NRS referido a la regla YCA2.	107
7.2.5	Planilla de nivelación geométrica.	108
7.2.6	Ocupación GNSS con receptor Trimble MPS865 – C1 (izq.) y C2 (der.).	109
7.2.7	Baliza verde, ocupación con GNSS en la base (figura izquierda) y sobre la lámpara de tope (figura derecha).	110
7.2.8	Resumen de ocupaciones GNSS.	110
7.2.9	Resumen de procesamiento de vectores del software SPSO ver 5.1 – Precisión H. y Precisión V (1σ - 67% de confiabilidad).	111
7.2.10	Planilla de coordenadas de procesamiento GNSS.	112
7.2.11	Tabla de cálculo de valores de Elipsoide y NRS.	112
7.2.12	Estadística de las observaciones.	113
7.2.13	Zona de cobertura del ajuste altimétrico por un punto.	114
7.3.1	Perfiles cada 10m en HYDRopro.	115
7.3.2	Equipo GNSS Base Spectra Precision SP60 con radio interna UHF.	116

7.3.3	Montaje del equipo GNSS móvil con ecosonda y laptop con el software HYDROpro.	117
7.3.4	Perfil navegado en el antepuerto para cálculo de latencia (software HYDROpro)	118
7.3.5	Perfiles navegados en el Antepuerto para cálculo de latencia	118
7.3.6	En la parte superior muestra el mensaje PTNL-GGK y en la inferior el significado de cada uno de sus campos	120
7.3.7	Configuración de Geoide y separación elipsoide-NRS en HYDROpro.	121
7.3.8	Perfiles navegados y cobertura de la dársena (software HYDROpro)	122
7.3.9	Navegación y levantamiento de perfiles de la dársena.	123
7.4.1	Procesamiento de sondajes en NavEdit (software Trimble HYDROpro).	124
7.4.2	Registro de marea cada 30 segundos y tendencia polinómica de grado 3.	125
7.4.3	Comparación de registros de marea cada 15 minutos.	126
7.4.4	Diferencias de alturas RTK Tide vs. Mareógrafos convencionales.	127
7.4.5	Vista 3D del Modelo digital del fondo de la Dársena Norte (software TMC).	128
7.4.6	Plano batimétrico por marea RTK (software TMC).	129

7.4.7	Procesamiento de la batimetría con la marea observada en la regla YCA2.	130
7.4.8	Modelos digitales de terreno obtenidos de TMC. Izquierda: Batimetría por método RTK Tide. Derecha: Batimetría obtenida por método convencional de lectura de marea (regla YCA2).	131
7.4.9	Comparación de batimetrías procesadas con marea RTK vs. YCA2 (software TMC)	132