

**PROYECTOS Y CONSTRUCCIÓN DE PLAYAS ARTIFICIALES Y REGENERACIÓN DE PLAYAS****IV. Construcción*****LEVANTAMIENTOS Y SEGUIMIENTOS  
TOPO-BATIMÉTRICOS EN INGENIERÍA  
DE COSTAS*****Vicente Esteban Chapapría, José Aguilar Herrando,  
José Serra Peris, Josep Ramón Medina Folgado**

Drs. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Laboratorio de Puertos y Costas E.T.S.I C.C.P.  
C/Camino de Vera  
46022 - VALENCIA

Telf.: 96 - 3 87 73 75

Fax.: 96 - 3 87 73 79

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

**RESUMEN:** se describen los métodos de ejecución de trabajos topográficos y batimétricos de seguimiento de playas, esenciales para la comprensión y control de los procesos litorales. Se plantea el problema de la medición de profundidades y de otras variables descriptivas de la fenomenología oceánica y las fuentes de error dependiendo de las técnicas y métodos empleados. Se comparan los errores de medida típicos de los sistemas de medición de profundidades habituales señalando los niveles de error que cabe esperar según sea el procedimiento utilizado.

**INTRODUCCIÓN**

La importancia de la ingeniería de costas en España puede acreditarse considerando lo realizado en las costas españolas durante los últimos años. Grandes estudios geofísicos para la detección de bancos de arena aptos para regeneraciones costeras, numerosos proyectos y obras y el desarrollo de estudios de seguimiento de playas para la mayoría de los grandes proyectos de regeneración realizados así lo acreditan.

En paralelo al esfuerzo español de regeneración y seguimiento de playas, el CERC americano está impulsando el uso del sistema numérico SMS (Gravens, 1992) para el diseño de obras costeras y estimación de evolución de playas, basado en modelos hidrodinámicos ensayados en grandes tanques (Kraus & Smith, 1994) y mediciones de campo localizadas (Lee & Birkemeier,

1993; Stauble et al., 1993). No obstante, a pesar del gran esfuerzo en investigación básica y el desarrollo de software para la modelación de la evolución de playas, el problema básico de predecir la respuesta a medio y largo plazo de una playa dista mucho de estar resuelto satisfactoriamente. Si finalmente se consigue modelar adecuadamente la respuesta dinámica de las playas a la acción del oleaje, como mínimo será necesario disponer de descripciones precisas de la playa seca y sumergida a lo largo del tiempo y de la evolución de los estados de mar.

En los últimos años la apuesta realizada en España por las técnicas blandas de protección de costas es clara, lo que se ha traducido en un fuerte incremento de la inversión pública en desarrollo de la Ley de Costas. En general, la regeneración de playas se ha convertido en la técnica de protección de costas de mayor expansión,

especialmente en países y zonas turísticas donde la playa constituye un recurso natural muy importante en el desarrollo económico.

La conservación, regeneración y restauración de las playas para proteger la costa ha impulsado los estudios de seguimiento de playas. Describir con precisión la playa seca y sumergida constituye un elemento esencial de todo proyecto de regeneración ya que, cuestiones como la elaboración de presupuestos y certificaciones a realizar, dependen de los volúmenes de arena existentes antes y después de las obras. La descripción previa de las playas no es por tanto sólo un tema de importancia económica para proyectistas y constructores, es además un factor fundamental para el control de las playas y su evolución a medio y largo plazo. La playa es un elemento dinámico de protección cuyo comportamiento sólo puede ser previsto con cierta aproximación y cuya funcionalidad debe garantizarse estableciendo un sistema de control sobre las características de la playa a lo largo del tiempo. El seguimiento de la playa permite conocer su desarrollo en el tiempo para una mejor predicción de su evolución y de las posibles intervenciones que sea conveniente realizar. Además de lo ya señalado, el seguimiento de playas permite acumular información valiosa para impulsar el desarrollo del conocimiento sobre los procesos litorales.

La estimación del clima marítimo y la batimetría de playas y formaciones costeras constituyen elementos esenciales del seguimiento y las bases sobre las que se asienta la valoración o interpretación de fenómenos observados en la misma. La calibración de instrumentos y del equipamiento utilizado en campañas de ingeniería oceanográfica constituye una de las piezas clave en el desarrollo y en la calidad de los resultados de dichos trabajos. Dentro de este contexto, la cuantificación de los errores de las batimetrías constituye un elemento fundamental para determinar la utilidad de las mismas y sus posibilidades de aplicación. La estimación de los errores en las batimetrías pasa a convertirse en factor clave para la interpretación de la respuesta de playas a la acción del oleaje y para la propia existencia de un modelo que sea capaz de describir adecuadamente la evolución de playas a medio y largo plazo. Pero además es igualmente preciso determinar la fiabilidad de los registros de oleaje y corrientes.

#### **LA EJECUCION DE BATIMETRIAS.**

Los trabajos y estudios batimétricos tienen como objetivo la medición y determinación de los calados existentes en una determinada área. Generalmente los resultados son plasmados posteriormente de manera

gráfica, y sirven de base e información previa para la elaboración de otros trabajos o actividades. Para la ingeniería marítima establecen así el soporte gráfico básico de información y trabajo.

La hidrografía se encamina al estudio y descripción de las áreas y fondos marinos, lacustres y fluviales y de sus costas adyacentes. Entre sus resultados destaca la confección de cartas náuticas, tablas y derroteros y cuanta información resulta útil y necesaria para la navegación. Las cartas suponen desde siempre una de las ayudas básicas a la navegación. Históricamente han sido confeccionadas por países con potencial económico, a fin de establecer las rutas marítimas. Hoy permiten establecer y abordar la necesaria organización del tráfico marítimo. Las cartas náuticas facilitan la información necesaria para garantizar la seguridad en la navegación. Dicho objetivo último, la seguridad, marca claramente los métodos de ejecución de los trabajos hidrográficos y sus resultados. Estos nunca se encaminan a conseguir una carta precisa, sino más bien una carta segura. Las técnicas que se usan, las aproximaciones que se realizan y la consideración de los errores siempre nos pone del lado de la seguridad. Así, por ejemplo, se justifica que el plano de referencia de las sondas sea el de la mayor bajamar.

El desarrollo de otras actividades -la minería oceánica, la explotación petrolera mediante plataformas, la ejecución de conducciones submarinas, etc.-, requiere inicial y básicamente de información fiable y precisa de las características batimétricas. Al mismo tiempo otros requerimientos ligados a tales actividades se relacionan con el posicionamiento en la mar. Uno de los aspectos más importantes en cualquiera de estas actividades es determinar la eficacia y fiabilidad de los sistemas que se utilizan.

En el proyecto, construcción y explotación de obras marítimas se acometen estudios y trabajos batimétricos para el replanteo, la medición y abono de obra ejecutada, la caracterización de fondos con diferentes objetivos, etc.. Para proyecto se precisa de la batimetría de la zona como marco informativo de las actuaciones. En muchas ocasiones la información batimétrica condiciona las soluciones posibles. La batimetría del área queda incorporada a los planos sobre los que se describen gráficamente las actuaciones. Para construcción es imprescindible tanto a efectos de replanteos, como de medición y abono de las obras. Numerosas partidas de obra son medidas y, por tanto, abonadas, mediante la determinación de volúmenes obtenida a partir de la comparación entre perfiles batimétricos antes y después de la ejecución de las obras. En determinados tipos de obras marítimas se estipulan además ciertas tolerancias sobre los perfiles teóricos de ejecución. Así, se obtienen volúmenes de

obra ejecutados dentro del perfil teórico y dentro y fuera de las tolerancias admitidas. Tal es el caso de algunas obras de dragado, por ejemplo. Pero hay que notar cómo precisamente la ejecución de esos trabajos de ingeniería marítima dependen y se desarrollan a partir de la información batimétrica que antes y durante su ejecución se va obteniendo. Por ejemplo, una draga automatizada recibe información en tiempo real de dónde y cuánto es necesario dragar. Aunque los trabajos se aborden con dragas sin sistemas de información e instrumentación batimétrica en tiempo real, dicha información resulta imprescindible para la prosecución de los trabajos. La única diferencia en el proceso radica en que la información batimétrica no es obtenida simultáneamente a la ejecución de las obras. En cualquiera de los casos dicha información se adquiere mediante el correspondiente sistema de información batimétrica. Ello supone que los trabajos batimétricos condicionan doblemente la ejecución de las obras, esto es, en el estricto plano de la ejecución y también en el de la medición. Así, las empresas constructoras disponen de dos fuentes de incertidumbre a la hora de valorar sus trabajos.

Muchos de los estudios, tanto de análisis como de seguimiento, de los procesos litorales en formaciones costeras arenosas igualmente se basan, en parte, en la realización de campañas batimétricas en diferentes momentos. Es esta una herramienta tradicional de los estudios de ingeniería costera. En primer lugar se consigue de esa manera una completa caracterización morfológica de los fondos. En segundo, si las determinaciones batimétricas se repiten es posible, por comparación, analizar los cambios que se registran. Así se determinan erosiones o acreciones en perfiles transversales y puede evaluarse el transporte sólido litoral. En todos esos casos se hace necesario disponer de una precisión y fiabilidad suficientes en los trabajos batimétricos. La fiabilidad del estudio y análisis de los procesos litorales depende lógicamente de una manera directa de la fiabilidad de esos trabajos.

En cualquier caso, sea como ayuda a la navegación, sea como parte de cualquier proceso o actividad en la ingeniería marítima, resulta clara la elevada trascendencia económica de los trabajos batimétricos. Si, además, la obra marítima cuya ejecución y medición depende de éstos, dispone de una componente bidimensional importante es indudable la mayor relevancia y repercusión económica que pequeñas variaciones en la medición vertical pueden suponer. En general el nivel de error de los resultados *no es evaluado*. Sin embargo, en algunas ocasiones, resulta necesario su conocimiento. En otras, conviene reducir los errores y aumentar, por tanto, el grado de fiabilidad de la información.

Así, las características e importancia de los trabajos batimétricos se pueden resumir en tres puntos : a)

dependencia general, b) trascendencia económica, y, e) fiabilidad en muchos casos indeterminada.

La realización de trabajos de batimetría supone la recogida de datos  $(x,y,h,t)$  en un área, lo que requiere la elección de un sistema de referencia. Dada un área en la que los trabajos deben ser desarrollados, es preciso previamente a su ejecución elegir y definir un sistema de referencia en el plano  $(X,Y)$ . Una vez está concretado el ámbito de trabajo y el correspondiente sistema de referencia, procede establecer la recogida de datos. Los sistemas de adquisición de datos, y en consecuencia los métodos de trabajo, han registrado recientemente importantes cambios, sobre todo en cuanto se refiere al equipamiento electrónico.

En todo caso, la instrumentación de la recogida de datos requiere, en cada momento del trabajo, de :

- 1.- referencia con el nivel del mar (**Z**)
- 2.- medición del calado (**h**)
- 3.- medición de la posición  $(x,y)$
- 4.- análisis y tratamiento de datos  $(x,y,h',t)$

Por último, será necesario establecer la determinación final de resultados  $(x_i,y_i,h'_i)$ . En relación con los aspectos referidos los sistemas de medición comúnmente utilizados y que en adelante se desarrollarán son :

**NIVEL, Z** : escala graduada/mareógrafo (flotante, de presión, transmisor) **CALADO, h** : escandallo/ecosonda (de destellos, haz)

**POSICION  $(x,y)$**  : alineación visual (marcas,etc.)/cabo guía/sextante horizontal/teodolito (bisección)/nuevos sistemas ópticos/ sistemas de radioposicionamiento (sistemas de fases, telemétricos, satélite y sat. diferencial, etc.)

**RESULTADOS** : programas de curvado

## **MÉTODOS CLÁSICOS PARA LA EJECUCIÓN DE BATIMETRÍAS.**

La base de los métodos clásicos consiste en crear una nube de puntos, distribuida de forma geométrica intentando conformar trazados rectos y paralelos entre sí, en forma de "malla". Esta malla contiene la situación de los puntos, tanto en planta como en alzado, por lo que el procedimiento para obtener las isobatas consiste simplemente en interpolarlas entre estos puntos. Este procedimiento actualmente está automatizado, por lo que el resultado es prácticamente inmediato.

Los distintos métodos contienen dos cuestiones bien diferentes: por un lado la obtención de la sonda (**h**), y, por otro lado, la de las coordenadas planas (**x,y**) de dicho punto. La metodología incluye los siguientes pasos:

### Referenciación de puntos en tierra.

La toma de posición de puntos debajo de la superficie libre de agua (mares, lagos, embalses,...) en zonas costeras, pasa por el posicionamiento previo de puntos en tierra. La ubicación de las bases o puntos iniciales de las diversas campañas de captación de información, así como sus direcciones en caso de establecer perfiles, deben ser facilitadas en un plano a escala adecuada. Ello permite correlacionar coordenadas marinas con coordenadas globales (U.T.M.). También se hace en el caso de que se tenga que volver a dichas bases para repetir o comprobar mediciones.

Antes de establecer la ubicación de las bases, debe abordarse el estudio previo de su localización, de manera que sean visibles sin dificultad, para no sufrir problemas durante el tiempo que duren las observaciones. Las señales que se adopten deben tener las siguientes características:

- Apropiaada para el tipo de material usual en trabajos de este tipo, es decir, la mayoría de las veces sucio arenoso.
- Apropiaada para ser permanente mientras dura el trabajo, pudiéndose si procede ser eliminada de forma sencilla.
- Configurar un conjunto poco visible en el contexto y no destacar en altura.
- Cuando los trabajos batimétricos a realizar están en áreas urbanas, puede ser suficiente la utilización de clavos y pintura.

Para dotar de coordenadas en un sistema único a todas las bases materializadas se precisa emplear coordenadas predeterminadas. Es ventajoso utilizar coordenadas U.T.M. por su fácil enlace con el Sistema Geodésico Nacional y por poder enlazar el trabajo con cualquier otro de contenido cartográfico en el área de influencia.

Para determinar las coordenadas de una determinada base se realiza una trisección inversa, visando vértices geodésicos cuya relación de coordenadas U.T.M. se conocen. También se puede ejecutar el enlace a partir de una poligonal, intersección directa o radiación.

El valor de la coordenada Z, dependiendo de la precisión que se desee alcanzar, puede ser obtenido a partir de la propia trisección inversa, por medio de nivelación trigonométrica, o en caso de exigencias más concisas, a través de nivelación geométrica.

### Determinación de la posición (**x,y**) de un punto sobre la superficie marítima.

#### Métodos de corto alcance

El problema de la determinación de (**x,y**) consiste en replantear el perfil a ejecutar, o los puntos aleatorios que pretenden levantarse, y determinar las coordenadas de los puntos en los que se va a medir la profundidad. Los métodos que generalmente se han utilizado son:

1º) **Por medio de sextante.** Es el método más antiguo, en desuso actualmente, a no ser que simplemente se quiera hacer una rápida aproximación. Este instrumento se utiliza para medir ángulos desde la superficie del barco, por lo que simplemente se puede utilizar en el caso de que desde la embarcación podamos ver tres puntos de referencia en la costa y conocer sus coordenadas planas.

Se debe medir simultáneamente los dos ángulos que forman nuestro punto con los tres puntos de referencia visados obteniéndose las coordenadas de nuestro punto por intersección inversa. Este método es impreciso y en el mejor de los casos se puede llegar a los 10 segundos en la apreciación de una lectura, aunque lo normal es que esté en torno a los 30 segundos.

2º) **Método de bisección.** Se necesitan dos teodolitos con sus operarios. La toma de datos en cada perfil se realiza desde dos bases: una (**B<sub>1</sub>**), generalmente coincidente con la propia del perfil, y otra (**B<sub>2</sub>**) desde la cual se interseca la dirección del perfil posicionando el barco. La precisión de este método depende de varios factores, como son:

- La visibilidad, factor que siempre será un inconveniente importante a tener en cuenta.
- El error angular del aparato.
- La sincronización entre los distintos operarios.
- La geometría de la figura de intersección, que dependerá en gran medida de la buena elección de las bases. El error para una intersección directa se puede cifrar mediante la siguiente fórmula:

$$E_{\text{planimetrico}} = \frac{E_{\text{aparato}}}{636620} \frac{\text{Distancia}}{\text{sen } V/2}$$

donde V es el ángulo que forman las dos visuales desde el barco a las distintas bases.

3°) **Método de bisección con distancias.** Análogo al anterior en su procedimiento de observación y cálculo. La diferencia estriba en la instrumentación utilizada y en los datos empleados para el cálculo. Se sustituyen los ángulos por distancias, ya que en este método se utilizan distanciómetros, que proporcionan la distancia entre las bases y el barco. Estos instrumentos se basan en la generación de ondas y su análisis posterior, y trabajan en el espectro de la luz infrarroja. Son instrumentos electro-ópticos y normalmente alcanzan precisiones de 5 mm + 1 p.p.m., siendo la longitud de onda de 800 a 900 nm.

Este método se ve limitado por dos factores:

1. Alcance del distanciómetro, que oscila normalmente entre 1 y 5 Km. El alcance máximo de un distanciómetro viene determinado por: a) La potencia de emisión de la fuente de radiación utilizada, b) Los prismas, la calidad de los mismos y el número de prismas utilizados, c) Las condiciones atmosféricas tales como la absorción, radiación, refracción y dispersión, tienden a reducir la distancia máxima. Las que más afectan son, en este caso, la absorción y dispersión, ya que se trabaja en ámbitos costeros.
2. La colocación de los prismas es muy importante, ya que la onda emitida por el distanciómetro tiene que reflejarse en el prisma y volver. Normalmente se equipa al barco con un gran número de prismas rodeando el punto donde se visa.

4°) **Por el método de polares con Estación Total.** Es quizás el método más utilizado hoy en día en las batimetrías costeras, debido a su sencillez y precisión. Además, se ajusta bien a la mayoría de trabajos.

Para la práctica de este método se precisa una estación total y su operario. La estación total es un instrumento donde está integrado un teodolito y un distanciómetro.

La metodología consiste en orientar a la referencia, marcar el ángulo determinado para el perfil, y ejecutarlo. Los ángulos cenitales se toman respecto a unos prismas colocados en la posición de la sonda. El cálculo de las coordenadas (x,y) se realiza por el sistema de polares:

$$X = D_B^P \sin(\alpha + \theta) \quad Y = D_B^P \cos(\alpha + \theta)$$

siendo  $\theta$  el acimut a la referencia.

En los trabajos realizados sin vinculación a un determinado perfil se utiliza este método, captando para cada punto el ángulo horizontal, el ángulo vertical y la distancia, de igual forma que un punto posicionado en tierra. Cada captura ha de ser informada al operario de la sonda para que señale la profundidad captada y la asocie al posicionamiento en planta.

Este método también plantea, al igual que los anteriores, problemas de coordinación entre el posicionamiento del barco y la medición de la profundidad. El principal problema es mantener la puntería de la estación total en la costa sobre el reflector en el barco, para que la señal sea constantemente recibida; obviamente, situaciones de ausencia de oleaje, hacen más fácil el trabajo.

### Métodos de medio y largo alcance.

Con estas técnicas se pueden alcanzar centenares de kilómetros.

1°) **Instrumentos de microondas.** Son similares a los distanciómetros, pero con longitud de onda superior. Utilizan generalmente ondas de radio con una longitud de onda de 3 centímetros, aunque pueden variar entre 1 milímetro y 10 metros. De todos estos instrumentos el más utilizado es el **telurómetro**, muy útil en prospecciones marinas, aunque actualmente algo en desuso.

El sistema del telurómetro consiste en la utilización de dos unidades idénticas. Cada elemento es una unidad completa y consta de todos los componentes necesarios para efectuar una medición: transmisor, receptor, antena, circuitos de medición y mecanismos de intercomunicación. Las unidades se centran sobre ambos extremos de la distancia a medir. Una de las unidades opera como "master" y la otra como "remote". Las unidades son idénticas y por tanto intercambiables.

Los sistemas de microondas miden la distancia inclinada entre los extremos de la línea por el método de comparación de fase. La onda portadora continua de alta frecuencia ( $\geq 10.000 \leq 10.500$  Hz) es modulada en frecuencia con una onda patrón de frecuencia inferior que varía entre 7.5 y 10 Mhz. Esta onda modulada es transmitida desde la unidad "master" a la "remote".

La onda portadora sirve para transportar la frecuencia patrón. Dado que su frecuencia es alta, es menos

susceptible de ser afectada por dispersión, y, además, se requiere menos energía para su transmisión. Las frecuencias patrón proporcionan la necesaria calidad para conseguir mediciones precisas. Son generadas por la propia unidad y controladas por medio de cristales de cuarzo.

La señal transmitida por el "master" es recibida por el "remote" e inmediatamente es retransmitida de nuevo a aquél, donde el ángulo de fase de la modulación de regreso es comparado con la señal transmitida. La diferencia de fase proporciona una medida de doble distancia que la luz ha recorrido en su viaje de ida y vuelta.

Como hemos dicho, las microondas, viajando a una distancia doble de la que se desea medir cumplen una variación completa de fase de  $360^\circ$  para cada múltiplo par de exactamente media longitud de onda desde el instrumento. Por consiguiente si los aparatos están espaciados, precisamente un múltiplo par de media longitud de onda, la fase indicada será cero. Cuando los dos instrumentos no están separados exactamente una longitud de onda, como es el caso más frecuente, la diferencia de fase indicará la parte fraccional de una longitud de onda. La ambigüedad en el número desconocido de ciclos que la onda ha cumplido se resuelve transmitiendo patrones de frecuencias más bajas.

Para simplificar los circuitos electrónicos y disponer de un equipo más ligero, los patrones de frecuencia más baja son producidos por ligera variación de la modulación. Los cambios de fase de las longitudes de onda más largas son obtenidos comparando las variaciones de fase de las frecuencias patrón ligeramente variadas.

La precisión de los telurómetros es del orden de 3 p.p.m. de la distancia medida más un error adicional inherente al aparato, de aproximadamente 12.5 milímetros.

Se pueden medir distancias de hasta 100 Km. con resultados satisfactorios, pero tenemos que tener en cuenta en gran medida las condiciones meteorológicas, que pueden hacer variar considerablemente los resultados. En distancias del orden de 2 Km se obtienen las mayores precisiones, pero el error inherente del aparato y a veces la radiación del mar son más significativas en distancias cortas.

Para la ejecución del método de intersección directa mediante distancias obtenidas a través del telurómetro precisamos tres equipos. Dos grandes ventajas pueden recomendar al empleo de este sistema. La primera de

ellas es que no es necesario que los distintos elementos sean visibles entre sí. La segunda es la de poder trabajar por la noche.

Sin embargo tiene el inconveniente de la precisión obtenida, ya que las medidas efectuadas vienen afectadas por las condiciones atmosféricas, por lo que se deberán registrar la presión y la temperatura del punto medio para realizar las correspondientes correcciones.

2°) **Loran-C.** Es un sistema de navegación hiperbólica de largo alcance, por impulsos de baja frecuencia. Al igual que todos los sistemas de navegación hiperbólica operan según el tiempo que tardan en recibir las señales de las distintas bases.

El principio para la obtención de las coordenadas (x,y) del punto se basa en medir la diferencia de tiempo de la llegada de las señales procedentes de las bases al punto de observación. Mediante este tiempo y conocida la velocidad de la onda en el medio, se puede obtener el posicionamiento del punto receptor. Así pues los puntos de observación, quedan fijados por la intersección de dos o más hipérbolas cuyos focos son las estaciones fijas.

Para calcular las coordenadas del punto observado por el método más sencillo, esto es, por la intersección de dos hipérbolas, se necesita conocer las dos lecturas que se obtienen a través del Loran-C, y las coordenadas de la estación maestra y las dos secundarias. El método consiste en la intersección de hipérbolas, por lo que se deberá obtener la ecuación de las dos hipérbolas.

La precisión de este sistema depende del error cometido en la transmisión de la onda o señal en el espacio, que depende de los factores meteorológicos durante la observación y de la precisión del aparato.

La ventaja de este método está en su largo alcance, pudiendo llegar a los 1200 Km., con UHF y 80 Km con microondas.

3°) **Omega.** Este sistema proporciona posiciones en todo el mundo, con una exactitud nominal de una milla durante el día y dos millas durante la noche. Este sistema es un sistema global de ocho estaciones terrestres, situadas de tal forma que el usuario recibirá señales de al menos tres de ellas. Al igual que el sistema Loran-C, es un sistema de navegación hiperbólica de muy baja frecuencia, pero con la diferencia de que éste emplea diferencia de fase en vez de diferencia de tiempo. Esto hace que la ecuación de la hipérbola sea más exacta.

4°) NNSS (Navy Navigation Satcllite System). Es éste un sistema que utiliza los satélites norteamericanos de la constelación TRANSIT, aunque puede recibir señales de otros satélites como los GEOS. La TRANSIT dispone de seis satélites en el momento de la observación. La diferencia con el sistema G.P.S., que posteriormente se abordará, es que los satélites están a 1.100 Km de altitud, siendo esta característica la que hace que el sistema sea más preciso debido al efecto Doppler (cambio de frecuencia de la onda emitida por un foco cuando el observador o foco están en movimiento relativo). La diferencia entre dos cuentas Doppler permite calcular una diferencia concreta de distancia entre ambas posiciones del satélite y del receptor. Conocida la diferencia de distancias se puede obtener la ecuación de un hiperboloide, aplicando las mismas ecuaciones del sistema Loran-C, pero en este caso las hipérbolas son hiperboloides. El problema quedará resuelto si se conocen como mínimo tres ecuaciones, por lo que se necesitan al menos tres satélites para proporcionar las tres ecuaciones.

La precisión depende del método de observación y de la exactitud en coordenadas de los satélites. Así pues, si utilizamos solamente un receptor, obtendremos precisiones del orden del decámetro; si utilizamos dos receptores y observamos a la vez desde éstos a los mismos satélites, podremos obtener en posición absoluta errores de 10 m., ya que ciertos errores son comunes a los dos y se compensan. Ahora bien, si lo que se quiere obtener es un posicionamiento relativo podremos llegar a precisiones del orden de un metro. Ello es debido a que existen una serie de errores que afectan por igual a ambos receptores sin perjudicar la situación relativa. Esta última técnica se denomina **traslocación**.

Como hemos dicho anteriormente, la precisión también depende de las precisiones en las coordenadas que tienen los satélites, ya que si se utilizan las cuatro estaciones de la red OPNET en territorio estadounidense, los satélites tienen precisiones de 10 a 20 m. En cambio si utilizamos las efemérides resultantes de la observación por la red TRANET, red compuesta por 20 estaciones distribuidas por toda la Tierra, los satélites tendrán precisiones de 2 a 3 m. Con esta última red pueden obtenerse precisiones de algunos centímetros si se utiliza el método relativo.

5°) **G.P.S.** Es un sistema que utiliza los satélites norteamericanos de la constelación NAVSTAR, compuesta por 24 satélites. Para la navegación bidimensional, donde se conoce la altura y por lo tanto sólo se necesitan 3 satélites, se puede tener cobertura continua aunque con geometría mala en algunos

períodos. Esta es una de las causas que lo hacen más aconsejable que el método anterior.

El cálculo de las coordenadas utilizando el método de pseudodistancias, exclusivo de la técnica G.P.S., consiste básicamente en la intersección de las distintas esferas que entren en el cálculo, con centro en los respectivos satélites y radio la pseudodistancia obtenida.

La pseudodistancia, es el resultado de multiplicar la velocidad de la luz por el desplazamiento temporal necesario para correlar una réplica del código G.P.S. generado en el receptor, con la señal procedente del satélite G.P.S. Para sincronizar la réplica con el original recibido, el instrumento empieza a aplicar un retardo. Cuando la anulaci3n sucede, el tiempo de retardo permite calcular una distancia. Esta no será precisamente la que se busca ya que, aunque sabemos el momento de emisi3n del satélite porque el estado y la marcha del reloj del satélite son conocidos por el mensaje, no conocemos el estado del reloj del receptor. Por esta raz3n el valor obtenido no será una distancia sino una pseudodistancia.

Se reciben dos portadoras moduladas con distintos códigos, el P y el C/A. La diferencia entre ambos responde a los algoritmos polinómicos con que se generan ambas señales. El código P (Precise or Protected Code) está reservado para usuarios autorizados, en general militares. El segundo C/A (Code Acquisition or Standard), está dedicada a todo tipo de usuarios. La precisión obtenida depende de la longitud de onda de modulaci3n, por lo que si se utiliza el código C/A, de longitud de onda 300 metros, obtenemos una precisión del orden del decámetro. Si por el contrario utilizamos el código P cuya longitud de onda es 10 veces menor, es decir, de 30 metros, la precisión será de algún metro. Los satélites que necesitamos para el posicionamiento serán como mínimo tres, debido a que tenemos como inc3gnitas para el cálculo, las coordenadas planas del punto (x,y) junto con el retardo.

La obtenci3n de las coordenadas mediante la técnica básica o estándar es un método relativo ya que tiene un receptor fijo y otro móvil. El receptor fijo compara continuamente la posici3n aparente que le ofrece el sistema G.P.S. con la real que es conocida por nosotros, por lo que obtenemos para cada instante la diferencia existente entre las dos. Estas diferencias son las correcciones que han de aplicarse a la posici3n aparente G.P.S. del móvil para obtener su posici3n real. Esta técnica es la denominada navegaci3n diferencial. Otra posibilidad es la de calcular la correcci3n que habría que aplicar a cada pseudodistancia para hacer coincidir las coordenadas

G.P.S. con las conocidas. Tanto unas correcciones como otras serán de aplicación siempre que los dos receptores reciban las señales de los mismos satélites, donde obtendremos precisiones del orden de 3 metros. En el caso de que no podamos observar los mismos satélites no podremos aplicar las correcciones obtenidas con la primera posibilidad. Así pues, sólo podremos aplicar las correcciones de pseudodistancias a los satélites comunes, y en todo caso, la precisión en las coordenadas empeorará.

Si se necesitan resultados en tiempo real es imprescindible una comunicación entre el receptor y el móvil, para que el primero transmita las correcciones al segundo, lo que también afecta negativamente a la precisión. Si las posiciones no son necesarias en tiempo real, se pueden almacenar las correcciones obtenidas en el receptor fijo, para luego aplicarlas a las coordenadas obtenidas en el receptor móvil. Este método ofrece precisiones y rendimientos para la cartografía del fondo marino hasta ahora inalcanzables.

La obtención de las coordenadas mediante la técnica de scudo-satélites (o pseudolites) se basa en el mismo principio que en el referido método de navegación diferencial. Difiere de éste en que el pseudolite emite una señal dentro del mensaje como si fuera otro satélite más, disponiendo así de otra distancia más de posicionamiento para el móvil. El inconveniente de la utilización de este método es la necesidad de que haya visibilidad entre las antenas del fijo y del móvil, aunque la precisión aumenta en gran medida respecto al anterior. Podemos obtener las coordenadas con precisiones del orden de 25 centímetros.

El método de medida de fase es el que permite máximas precisiones. El principio de este método consiste básicamente en controlar la fase de una emisión radio-eléctrica hecha desde el satélite con frecuencia conocida y desde una posición conocida. Así, se controla continuamente la evolución del desfase entre la señal recibida y la generada por el receptor, lo que se denomina el observable, o, lo que es lo mismo, un cierto incremento de la longitud de onda.

El inconveniente es la posible pérdida de la fase, por lo que se requiere cierta precaución. Es fácil que al trabajar cerca de la costa nos interrumpa una torre, tendido eléctrico, arbolado, estructuras, etc. Además tenemos el inconveniente de no poder trabajar en tiempo real. En cambio tiene la ventaja, de ser el método más preciso, pudiendo obtener coordenadas con precisiones del orden del decímetro.

El método determinará en primer lugar todas las ambigüedades a los distintos satélites, tanto al móvil como al fijo, y en segundo lugar hará la toma de datos

por todo el itinerario.

Los algoritmos de cálculo, en términos generales, son los recogidos a continuación:

- El método de las simples diferencias es el tratamiento de las ecuaciones generadas en la común recepción instantánea de un mismo satélite. En éste se eliminan o minimizan los errores del reloj del satélite.
- Las ecuaciones correspondientes a la común recepción en un momento dado de dos satélites en una posición de la órbita, es lo que se denomina método de dobles diferencias. Facilitan la eliminación de las pérdidas de fase, minimizan o eliminan los errores del reloj del satélite y de los receptores, evitan la indeterminación de las órbitas y otras fuentes de error, ya que al ser de la misma magnitud, o similar, cuando estos errores son algebraicamente restados tienden a anularse.
- Si el planteamiento matemático lo hacemos tratando la recepción de dos satélites en una posición y luego en otra, lo que se denomina método de triples diferencias, eliminamos los errores, al igual que en el método de dobles diferencias, pero se cancela la ambigüedad de ciclos (N).

Este método es totalmente aplicable a los levantamientos batimétricos, estacionando el receptor de referencia en un punto cuyas coordenadas conocemos y el móvil a bordo del barco en que se miden calados. El trabajo se puede simplificar en gran medida si se considera que además el receptor puede navegar por pseudodistancias al barco sonda, por lo que se tendrá una malla prácticamente homogénea, aun sin visibilidad, pudiendo trabajar de noche.

6°) **GLONASS.** Este sistema se desarrolló en la antigua U.R.S.S. Como persigue idénticos fines que el estadounidense G.P.S., resulta lógico encontrar entre ambos grandes similitudes. Los principios teóricos y operativos de este sistema no fueron divulgados públicamente hasta principios de 1990, aunque el primer satélite COSMOS perteneciente a la constelación GLONASS se lanzó el 12 de Octubre de 1982 (cuatro años y medio después del lanzamiento del primer NAVSTAR). La constelación final constará también de 24 satélites, pero en sólo tres planos orbitales, con 65° de inclinación y uniformemente distribuidos en longitud. La altitud de los satélites será de 19.120 Km., 1.060 menos que los NAVSTAR. A comienzos de 1991 estaban en órbita y operativos 8.



Al igual que la constelación NAVSTAR, ofrecerá entre 6 y 11 satélites a la vista en cualquier momento y lugar cuando esté completa, no habiendo diferencias significativas entre las configuraciones observacionales de una y otra constelación. Ya hay receptores experimentales operativos que usan ambos sistemas. Las ventajas son incuestionables, porque cada uno tiene por separado una determinada limitación en la precisión obtenible, que se supera netamente en el uso conjunto. Además la cobertura con el doble número de satélites permite unos tiempos de observación más breves a igualdad de exigencias, o una superior redundancia a igualdad de tiempo de observación. Los receptores que pueden usar ambos sistemas no tienen más canales; sólo podrían tener común el oscilador o reloj interno, porque nada de lo demás es común: ni el sistema de recepción, ni las coordenadas, ni los sistemas de tiempo.

En general, el sector usuario civil ha de preferir usar sistemas dependientes de dos naciones diferentes, aunque por ahora los mencionados factores de complejidad y coste no facilitan esta posibilidad.

#### **Métodos para la determinación de la profundidad.**

Los trabajos batimétricos necesitan compaginar los valores altimétricos de playa seca con los propiamente batimétricos. Existe una zona común que debe solaparse en una extensión al menos suficiente, de manera recomendable.

Por esta razón, es usual en zonas con mareas, captar posiciones en tierra en bajamar y posiciones bajo el agua en pleamar. En trabajos con otro tipo de condiciones (mares sin carrera de marea significativa o lagos y embalses), resulta en todo caso necesario establecer el plano de referencia correspondiente. La comprobación altimétrica está sustentada en la verificación de valores altimétricos en el estrán.

Para la medida de las sondas los métodos utilizados son:

- El escandallo.
- La sonda y datos del mareógrafo.
- Nivelación trigonométrica

#### **Método del escandallo.**

El escandallo consiste en un peso suspendido de un cable o cadena marcada y calibrada. La posición se determina con cualquiera de los métodos explicados anteriormente, y los calados se miden fondeando el escandallo. El par posición-sonda, se establece mediante la coordinación tierra mar, de forma que cuando se realiza la lectura de la posición, al mismo

tiempo se fondea el escandallo.

El método del escandallo ha sido técnica habitual en los trabajos de puertos y costas, pero presenta una serie de inconvenientes. Por una parte es preciso corregir los valores determinados en la playa por la variación del nivel del mar, para lo cual se puede contar como referencia el nivel medio del mar en Alicante, utilizar mareógrafos de puertos cercanos haciendo referencia al cero del puerto, o bien se puede instalar un mareógrafo o sistema similar, para establecer las variaciones del nivel del mar.

Otro problema que se plantea es determinar el nivel del mar en el momento de la medida, sobre todo cuando existe algo de oleaje; en estos casos el técnico encargado de tomar las medidas debe ser capaz de establecer el punto medio de oscilación, depende pues, de la experiencia del sondador la precisión de la medida. Con el escandallo es difícil medir profundidades,  $h$ , con un error menor de  $1.5 \text{ cm} + 2\%(h)$ .

#### **Determinación de la profundidad mediante sonda y datos del mareógrafo.**

El instrumento que se utiliza se denomina ecosonda o sonar (Sound Navigation and Ranging). Consta de un emisor de ondas de sonido y de un receptor. Las ondas regresan tras reflejarse en el fondo o en algún cuerpo material. Las ecosondas pueden ser de destellos o de haz. Su tipología influye en los resultados que pueden obtenerse. Por ejemplo, la frecuencia de trabajo es una de las variables que intervienen: frecuencias altas, en torno a 200 KHz, provocan las reflexiones en materiales de baja densidad, esto es, fondos consolidados. En general resulta adecuado trabajar con frecuencias del orden de los 50 KHz, si bien la solución óptima estriba en disponer de ecosondas multifrecuencia, determinándose para cada trabajo la frecuencia más apropiada.

El tamaño del cono formado por las ondas es determinante igualmente en los resultados. Conos amplios integran mayor información, perdiéndose por lo tanto detalle. Por contra, la estrechez del cono proporciona mayor detalle aunque permite obtener una menor cobertura. En cualquier caso no hay que olvidar que las reflexiones se producen siempre en el punto más cercano al transductor, lo que induce a pérdidas de información caso de existir irregularidades en el fondo.

La calibración de ecosondas debe ser acometida frecuentemente. Fenómenos como la temperatura, salinidad y turbidez del agua, condiciones del mar, movimientos de la embarcación (escoras, cargas, etc), definición del fondo, etc, son aspectos de mayor o menor transcendencia en función de los objetivos del trabajo.

El método más utilizado para realizar la calibración de las ecosondas es el conocido como "barcheck". Básicamente consiste en sumergir bajo el transductor una placa reflectora a distintas profundidades perfectamente conocidas, precediéndose a la oportuna calibración de la ecosonda.

El sonar se utiliza tanto para la ejecución de batimetrías costeras, como para las batimetrías en alta mar. Según la batimetría que se esté confeccionando y el tipo de embarcación que utilicemos, reflejaremos los datos de distintas formas. En batimetrías costeras y utilizando lanchas neumáticas o pequeñas embarcaciones, los datos de profundidades se pueden tomar a mano en el momento del posicionamiento, es decir, el operador de tierra comunica el momento en el que posiciona el barco y en ese instante el operador apunta la profundidad registrada. En otros casos el sonar puede registrar los datos mediante un sonógrafo que efectúa un perfil continuo.

En el instante que desde tierra se toma el posicionamiento, se le comunica al operador de la sonda y éste hace una marca en el perfil. De esta manera hay una concordancia de tiempo para la  $(x_i, y_i)$  y para la  $(h_i)$  respecto a un punto.

Mediante una escala adecuada se mide en el perfil de la sonda para un punto P, su lectura  $L_s$ . A la lectura obtenida se le suma el valor de la profundidad que la sonda está introducida bajo el agua. De esta forma se obtiene la profundidad de un punto en un instante determinado de tiempo (t). Con la banda del mareógrafo se obtiene la altura de mareas para ese instante (t). La referenciación altimétrica de las bases fijas en tierra, se suele hacer respecto al nivel medio del mar en Alicante (N.M.M.A.). Es frecuente, en puertos importantes, hacer referencia el **cero del puerto**, que en teoría es una cota inferior, no alcanzable del nivel de aguas, evaluada en las condiciones más desfavorables de presión, temperatura, viento, coeficiente de marea, etc.

En trabajos en mar, donde se acostumbra a emplear el cero del puerto como referencia altimétrica, hay que determinar la relación que existe entre ambas cotas. En el momento de captar la información el estado del mar está caracterizado en la banda del mareógrafo respecto al N.M.M.A.

Conocido el valor entre los dos ceros referenciales: N.M.M.A. y cero del puerto, y conociendo los valores de h (altura de pie de sonda) y  $L_s$  (lectura de la sonda), se puede, con ayuda de los datos de la banda del mareógrafo, establecer la situación altimétrica.

En un instante de tiempo o en corto periodo de tiempo se puede determinar, en la banda del mareógrafo, la altitud sobre el N.M.M.A. de la lámina del mar ( $\Delta h$ ). Con la lectura de la sonda, queda fijada la altura existente entre el nivel del agua y el punto

considerado. Como, por otra parte, se conoce la distancia en vertical entre el nivel del agua y el N.M.M.A. en ese instante, se conocerá la profundidad del punto considerado con la relación al N.M.M.A.

Elementos participantes en la captura de la sonda de un punto P bajo la superficie del mar:

- Datos de la banda del mareógrafo . . . .  $\Delta h$ .
- Posición del pie de sonda . . . . .h.
- Lectura de la sonda . . . . .  $L_s$ .
- Diferencia entre N.M.M.A. y Cero del Puerto  $\Delta o$ .

Al valor  $\Delta h$  puede tener signo tanto positivo como negativo.

Se obtiene:

- Sonda respecto al Nivel Medio del Mar en Alicante:
  - . en valor absoluto . . . . . [  $L_s + h - \Delta h$  ]
- Altura respecto al Cero del Puerto:
  - . en valor absoluto . . . . . [  $L_s + h - \Delta h - \Delta o$  ]

Con ecosonda es difícil alcanzar errores menores de 20 cm, así como medir en áreas de menos de 2 m de profundidad.

**Determinación de la profundidad por medio de nivelación trigonométrica.**

Este sistema consiste en realizar topografía terrestre del fondo marino al obviar la medición correspondiente del nivel del mar. El sistema resuelve simultáneamente el posicionamiento en planta del punto en que se obtiene la medición de profundidad. El método se puede desarrollar con distintos equipos que son descritos a continuación.

**1º Ecosonda.** En el caso de que se disponga de una estación total es posible determinar la **(h)** a partir de una nivelación trigonométrica. Al hacer lectura angular a la cruceta del barco u otro punto considerado donde ubicar el prisma y calcular su distancia **d** se puede dar cota trigonométrica a la cruceta (**Z<sub>c</sub>**) a partir de la base. Como se conoce la altitud del punto visado respecto al nivel del agua **H**, la altitud de **P** puede determinarse con facilidad.

Los datos incluidos en la figura están complementados con el ángulo cenital y con la distancia geométrica o reducida. Para la obtención de este valor es necesario ubicar el prisma en un lugar conveniente. En los trabajos usuales, se suelen situar en dos lugares de clara caracterización:

- En la cruceta de la embarcación, por su fácil accesibilidad y visibilidad.
- Sobre la propia sonda, dando continuidad con el valor a la verticalidad.

En cualquiera de los dos casos, la distancia tomada desde la base de tierra es prácticamente la misma. Aplicando las relaciones taquimétricas clásicas y siendo:

$$t_A^P = D_A^P \cot V_A^P$$

con  $D$  la distancia reducida, se obtiene la posición del nivel instantáneo del mar:

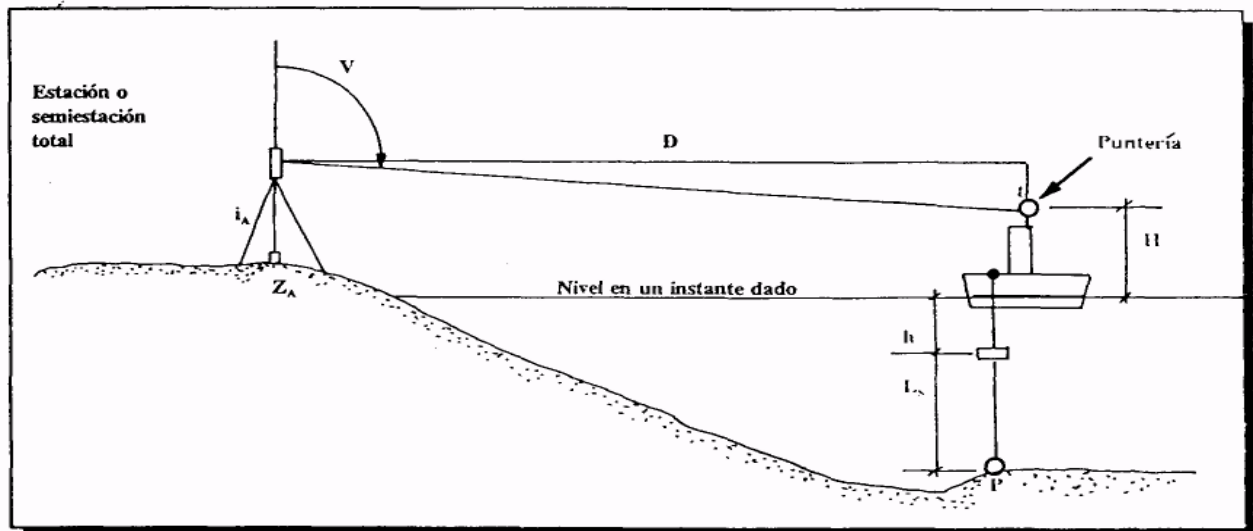
$$Z_M = Z_A + t_A + i_A - H$$

$$Z_P = Z_M - h - L_S$$

Este método puede alcanzar niveles de error similares al anterior.

metodologías de trabajo.

Ello llevó al diseño de un sistema que permitiese evaluar y determinar la fiabilidad de una batimetría ejecutada. Sucesivamente se desarrollaron dos equipos, de entre los que el segundo demostró mejores resultados, en cuanto a su concepción y funcionamiento (Serra et al., 1994). El segundo equipo diseñado y fabricado está formado por barras de aluminio de 2 a 4 metros de longitud. Las barras se engarzan entre ellas mediante tornillos pasantes con tuerca y contratuerca. Son barras huecas de aluminio, taponadas convenientemente a fin de que sean autoflotantes. Disponen de un pie pesado, de plomo, de forma sensiblemente cilíndrica, articulado en el extremo inferior de la barra y que sirve de apoyo del conjunto en el fongo. En su extremo superior se aloja una corona en la que se roscan hasta siete prismas. La verticalidad de la barra se consigue por la propia flotabilidad de la barra. Las barras son añadidas a medida que la profundidad de trabajo lo requiere. Mediante este conjunto la medición se obtiene por nivelación desde una estación terrestre, lo que supone estar haciendo un levantamiento altimétrico puro, sin consideración alguna referente al nivel del mar, así la



**Figura 1**

**2º Profundímetro de precisión.** La Universidad Politécnica de Valencia, por encargo de la Dirección General de Costas del M.O.P.T.M.A., está desarrollando el "Estudio de la dinámica litoral y seguimiento de la Playa de El Saler (Valencia)". Este estudio pretende establecer sistemas para la cuantificación de los errores en los trabajos batimétricos y sus causas, así como elaborar un conjunto de recomendaciones para la mejora de las

medida del calado en el punto y el procedimiento queda sustancialmente simplificado al menos en cuanto respecta a fuentes de incertidumbre para los resultados.

La experiencia en cuanto al uso de este sistema ha demostrado no ser sólo un eficaz instrumento de control, sino que además sirve como método para la determinación de la profundidad con una operabilidad y rendimiento superior al escandallo y una precisión muy superior cuando se opera en la

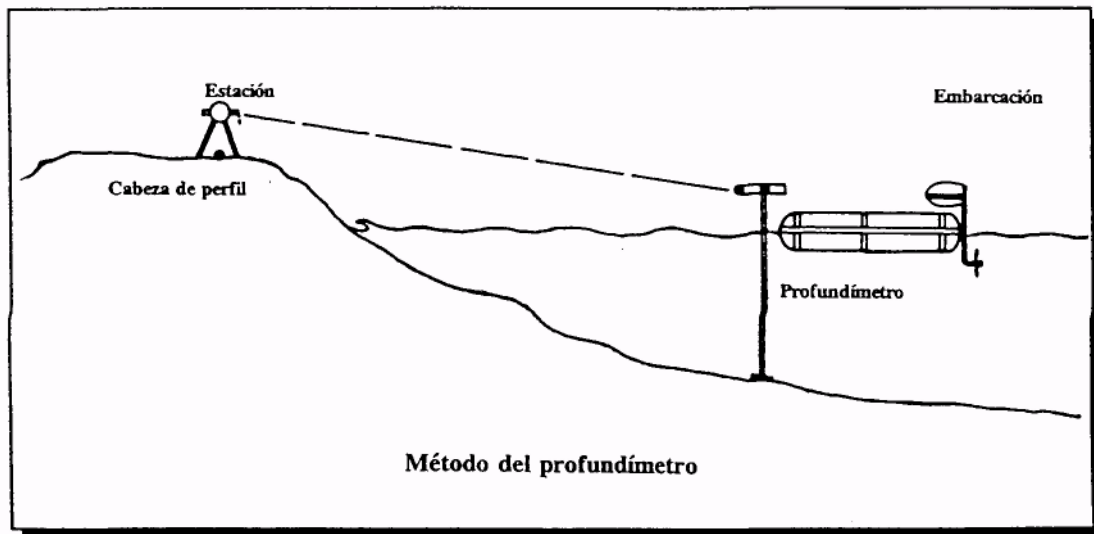


Figura 2

zona costera (profundidades  $\leq 10$  metros) y en situaciones de oleaje suave ( $H_{1/3} \leq 1$  metro). Con el profundímetro se puede alcanzar niveles de error de topografía terrestre, de 1 a 2 cm.

**3° Trineo.** Stauble et al. (1993) presentan un sistema con barra coronada con un reflector láser, arrastrado por el fondo marino y con estación total en tierra para obtener los valores de posición o distancia y el desnivel. El sistema es similar al del profundímetro de precisión puesto que traslada al mar las técnicas de topografía terrestre y elimina la corrección necesaria por nivel del mar. Los problemas, sin embargo derivan de la ausencia de verticalidad, especialmente en fondos irregulares. Con el trineo se pueden obtener niveles de error del orden de 5 cm.

**4° Perfilador hidrostático.** Gable & Wanetick (1984) describen un dispositivo sensor que se desplaza siguiendo un perfil por el fondo del mar. La medida del calado se transmite a un sensor de referencia estático situado en la playa que registra la presión hidrostática. Los sensores están conectados por un tubo con un fluido y la posición en planta se determina midiendo la extensión del tubo largada. Con este sistema se pueden conseguir niveles de error de 5 a 10 cm.

**5° CRAB** (Coastal Research Amphibious Buggy). Es un vehículo de 10,6 m de altura en forma de trípode sobre ruedas cuya moción se realiza gracias a un motor de automóvil situado en una plataforma superior

que queda emergida. El vehículo, que se desplaza apoyado por el fondo, (Gable & Wanetick, 1984; Stauble et al., 1993) permite rápidas medidas en zonas de rompientes y en perfiles hasta los 9 m de calado. La medición, tanto de su posición como del calado, se obtiene por métodos de topografía terrestre gracias a que va provisto de reflectores en la parte superior. Con el CRAB se pueden conseguir niveles de error de 5 a 10 cm.

### BATIMETRÍAS MEDIANTE SENSORES REMOTOS.

La ejecución de batimetrías mediante sensores remotos es el campo que en mayor medida y más rápidamente se ha desarrollado recientemente. Se trata de sistemas con aplicaciones en condiciones puntuales. No obstante, las precisiones que se obtienen por los diferentes métodos no son, en general, elevadas, por lo que los objetivos marcados en la actualidad en los estudios en desarrollo apuntan precisamente hacia su mejora.

#### Batimetrías mediante métodos fotogramétricos.

Después de los métodos tradicionales, es la solución más utilizada. Muchas veces se prescinde de la utilización de este método, a causa de que sólo se puede utilizar en aguas limpias y hasta ciertas profundidades. Sin embargo, son métodos de gran utilidad para la elaboración de mapas batimétricos de zonas poco profundas.

Para la restitución, se requiere que las fotografías tomadas tengan una cierta verticalidad con respecto al fondo marino. Con el empleo de técnicas fotogramétricas de precisión podemos lograr esta verticalidad, e incluso muchas veces será suficiente el empleo de modelos estereoscópicos simples para la determinación del relieve batimétrico alrededor de las islas. En zonas alejadas de costa, es preciso solapar las fotografías para cubrir las zonas que se encuentran entre los puntos del fondo que cumplen la verticalidad requerida.

La principal diferencia entre la fotogrametría terrestre y la fotogrametría batimétrica estriba en la trayectoria de los rayos de luz debido al medio que atraviesan. En fotogrametría terrestre el rayo tiene una corrección debido a la atmósfera, denominada corrección de refracción atmosférica; en fotogrametría batimétrica el rayo atraviesa también el agua, por lo que para la elección de los puntos de una aereotriangulación debemos de tener en cuenta los efectos de refracción y difracción. Como efectos de menor importancia se tiene el del oleaje, la salinidad del agua, la presencia de algas o plancton, la temperatura del agua, etc. El punto sumergido elegido se ve en una posición aparente. Para que todos los puntos elegidos sean teóricamente correctos para una aereotriangulación, caso típico en fotogrametría batimétrica, por la dificultad de dar puntos de apoyo en el agua, tendremos que introducir unas correcciones a fin de obtener la posición real del punto sumergido.

El mismo punto del fondo marino aparece en distintas posiciones aparentes en las distintas fotografías obtenidas, lo que hace imprescindible el conocimiento de la ubicación real del punto para poder tratar conjuntamente a estos puntos sumergidos, puntos de paso, que enlazan con los distintos modelos y a los que dotaremos de coordenadas a través del conocimiento de puntos terrestres que aparezcan en fotografías que contengan zonas emergidas. Los puntos que enlazan distintos modelos se denominan **puntos geodésicos del fondo**.

En cada fotografía, aunque tenga una verticalidad muy exacta, habrá que realizar una serie de correcciones en las coordenadas de los puntos geodésicos del fondo, para que sean estrictamente métricas. Para la corrección de estas coordenadas es necesario conocer el índice de refracción del agua en la zona de trabajo, que depende de la salinidad. Además se tendrá que conocer la altura del vuelo y la profundidad del agua en el momento en que se tomó la fotografía.

Los efectos producidos por el estado de la mar son tratados como valores residuales durante todo el proceso analítico de la aereotriangulación.

Actualmente se investiga estadísticamente en la incidencia de otros fenómenos que influyen en la determinación exacta de la profundidad. Se puede considerar tolerable todo el proceso para mares en calma, usando fotografías aéreas con un solape del 70% aproximadamente.

En el proceso de aereotriangulación se trata el efecto sistemático de la diferencia de refracción como un error accidental durante la minimización de la imágenes residuales. Los actuales programas usados en aereotriangulación, junto con los instrumentos de medida de recopilación de los datos necesarios y los cálculos matemáticos para convertir las profundidades medias aparentes (ha) de los puntos en profundidades medias verdaderas, operan con suficiente exactitud como para poder aplicar la fotogrametría a zonas cercanas a la costa.

Esta primera aproximación, sin una estricta corrección para la refracción, genera unos errores residuales en las coordenadas de los puntos geodésicos, que hacen que éstas aparezcan imaginariamente más grandes, aunque el error total en la determinación de la profundidad del agua es menor al 2 % cuando la aereotriangulación se realiza con un solape longitudinal del 65 al 70 %. Es obligado realizar una serie de operaciones previas al vuelo fotogramétrico para asegurarse que éste dará buenos resultados, por lo que es preciso calcular en primera instancia la cuantía y forma de reflexión solar. Además de este aspecto tendremos que tener en cuenta el estado de la marca, ya que es conveniente tomar las fotografías en bajamar, de tal modo que obtengamos una mayor claridad y detalle del fondo. La meteorología deberá ser adecuada para poder obtener unas favorables condiciones de iluminación y, asimismo, tendremos que tener en cuenta la existencia de vegetación.

Una vez realizado todo el proceso, con los datos obtenidos y procesados para la formación del mapa, se aplica cualquier técnica de edición para restituciones. La calidad de los mapas obtenidos mediante este método es muy superior a la obtenida con los métodos tradicionales, por lo que el fondo marino queda mejor definido. Esto se debe a que en el método de fotogrametría batimétrica el operador de restitución, cuando traza una curva o isolínea, está en contacto con el terreno, mientras que en los métodos tradicionales la obtención de las curvas se hace por interpolación de datos, dando por consiguiente un resultado que se puede diferenciar del real según la geometría del terreno y la cantidad de datos a interpolar, o lo que es lo mismo, la densidad de la malla obtenida. Estas técnicas resultan ventajosas en trabajos a gran escala y con excelentes condiciones de visibilidad atmosférica y de transparencia del agua marina.

### Métodos Ópticos.

Estos métodos se basan en el estudio de las imágenes obtenidas mediante un sistema óptico. Así pues, deberán combinarse distintos filtros a fin de obtener varias bandas del espectro, distintos brillos... En estos métodos será fundamental una buena calibración según su banda o brillo y resultan de aplicación en trabajos de gran extensión y con buenas condiciones de trabajo en cuanto se refiere a visibilidad.

### Aproximación Multiespectral.

Básicamente el método consiste en determinar el coeficiente de extinción óptica de una columna de agua mediante la medida del brillo aparente de puntos idénticos en dos fotografías distintas filtradas de modo especial, una en rojo y otra en verde. La magnitud de los brillos depende de los sedimentos o partículas suspendidas en el agua, ya que éstos hacen que la luz llegue al fondo difuminada. Si existen estas partículas, el brillo será distinto al que daría un mismo punto en el caso de que el agua fuera transparente.

La profundidad de las aguas se determina comparando los brillos en las dos bandas conocidas de color de transmisión del agua. Los resultados, con una precisión de alrededor del 10% para profundidades de unos seis metros, son archivados sobre unos fondos homogéneos de arena de tipo similar a las playas sobrevoladas y se usan en la calibración de los brillos.

El problema que presenta esta técnica, y, por tanto, la limita, es que sólo se puede utilizar en mares en calma y en aguas relativamente claras, cielos despejados y para ángulos de incidencia solar de entre 30 y 55°. En las zonas donde la penetración de la luz no es buena, se pueden conseguir datos con una técnica de fotografiado multiespectral, con un número de bandas mayor y siendo estas bandas espectrales más estrechas que las normales. Se suele usar en conjunto con un espectroradiómetro sumergido en el mismo lugar. De forma simple, el concepto se reduce a seleccionar la banda más adecuada, es decir, la porción de espectro electromagnético entre el azul y el amarillo, para lograr así la máxima profundidad de penetración según las condiciones del agua, determinadas por la medida de la atenuación espectral en el agua.

Se pueden lograr precisiones mayores tratando cada banda como una banda monocromática de sondeo con un rango de extinción característico. Aplicando una serie de capas colorantes utilizando transparencias de contraste marcado, se obtiene una imagen derivada de cada banda de color, obteniendo así un mapa en falso color, donde cada matriz representa un intervalo de profundidad. Los filtros de banda estrecha se usan para

evitar redundancias espectrales entre bandas adyacentes. Además, es necesario un laboratorio fotográfico de precisión para obtener resultados repetibles, con un control de las gamas efectivas de las diferentes bandas fotográficas empleadas.

Otra alternativa menos usada es el uso de películas de color con un filtro amarillo para eliminar el efecto de sensibilidad al azul, dado que la luz azul es mala para la formación de imágenes, en términos de fondo topográfico. Hacia 1970, las casas GAF y KODAK sacaron al mercado películas en color sensibles a las alteraciones espectrales. La gran velocidad de estas películas junto con la supresión de sensibilidad azul, condición que elimina la necesidad de usar filtros, permiten tomar imágenes con unas condiciones de luz impensables, comparándose con las películas normales. Sin embargo, en aguas turbias cercanas a la costa, las películas de color no presentan una mayor velocidad sobre las películas monocromáticas.

Los experimentos realizados con estas películas mostraron que eran capaces de producir alto contraste cromático, lo que por comparación con las películas normales, las lleva a una menor utilización para la formación de mapas con poca profundidad. Para el fotografiado del fondo marino, el cromatismo apagado que se producía debido a la atenuación espectral derivada del doble paso por las columnas de aire y de agua, restringía la luz, de formación de imágenes a una banda de longitud de onda de 200 nm. En aguas turbias, la presencia de cantidades significantes de dispersión, comparables en tamaño a las longitudes de onda, producen la necesidad, incluso para las técnicas multiespectrales, del uso de filtros para paso de bandas estrechas.

### Fusionado de Imágenes Temporales.

Se trata de otra modalidad dentro de los métodos multiespectrales. Nace de una aproximación multiespectral denominada fusionado de imágenes temporales estáticas (Statical temporal image merging).

El método se basa en el estudio de un conjunto de varias imágenes del mismo lugar. Estas deben de estar tomadas en diferentes días y bajo diversas condiciones. Así se combinan las variables temporales de las imágenes, es decir, las nubes, partículas suspendidas en el agua, etc,... y de este modo podemos obtener un promedio de las imágenes, con lo que resaltaremos las características estables en el fondo, ya que éstas no han variado.

Esta aproximación se puede combinar con el uso de filtros de interferencia de bandas estrechas (de

alrededor de 20 nm.) a lo largo del rango posible de longitudes de onda que penetran en el agua. Las bandas deben elegirse de acuerdo a la transmisión selectiva de las aguas costeras y turbias, teniendo en cuenta que el uso de las bandas estrechas eliminan la redundancia espectral permitida por los filtros con anchura de banda mayor. Así pues, incluso sin el conocimiento previo de las características y profundidad de la columna de agua, se puede elegir bandas óptimas para la toma de imágenes según el día.

Para obtener el calibrado de la profundidad de cada imagen inicialmente cada armazón obtenido de la película expuesta sobre el agua muestra una determinada claridad en relación a la profundidad. Luego se comparan con los patrones de imágenes de batimetría obtenidas previamente por sondeos, es decir, mediante métodos tradicionales, por lo que se ve la profundidad de penetración según la longitud de onda.

Con todas estas consideraciones, una imagen sintética se obtiene como una mezcla de bandas umbrales selectivas, tomadas simultáneamente para producir una imagen óptima en la fusión de estas imágenes temporales. Estas imágenes se combinan cuidadosamente y se calibra la profundidad. Todo este proceso se realiza mediante una digitalización de las imágenes, logrando así, mediante un programa de ordenador que fusiona estadísticamente, estos datos digitalizados obtenidos en sucesivos vuelos sobre la misma zona, el contorno del mapa completo, ya que el programa calcula superficies por técnicas de regresión lineal y después dentro del dicho mapa.

#### **Scanner multiespectral (MSS).**

En este método se usan relaciones del resultado de las señales de varias bandas del espectro. Por ejemplo, una combinación frecuente es la de las siguientes bandas: la primera comprenderá una longitud de onda 400 a 440 nm, la segunda entre 500 y 520 nm, la tercera entre 550 y 580 nm, la cuarta entre 620 y 680 nm y la quinta entre 800 y 1000 nm.

En la banda azul, es decir, la banda comprendida entre las longitudes de onda que varían entre 400 y 440 nm, no es óptima la penetración de la luz y se forma, por lo tanto, un contraste de imagen bajo. En cambio si utilizamos la banda verde, que varía entre longitudes de onda comprendidas entre 500 y 520 nm. y entre 550 y 580 nm, los detalles sumergidos son más claros. Si utilizamos la banda del rojo, comprendida entre longitudes de onda que varían entre 620 nm y 680 nm, solamente se pondrán de manifiesto los puntos de escasa profundidad, debido a la mayor absorción del

agua en esta longitud de onda. Finalmente, en la banda del infrarrojo próximo, comprendida entre longitudes de onda que varían entre 800 y 1000 nm, solamente se registran los límites entre el mar y la tierra, es decir, la línea de costa.

Los efectos de reflexión de la superficie se eliminan con el empleo de puntos de profundidad determinada que no tienen reflexión de fondo.

Al final del proceso se obtiene una imagen de puntos en la que la profundidad se conoce por el tono de grises obtenido. Este tono se compara con una gama de grises adecuada al tipo de aguas en el que se está trabajando. El problema recae pues, en distinguir un tono concreto de todos los obtenidos. Se pueden usar sensores que distinguen hasta 256 tonos de grises. Cada punto de la pantalla tiene un tono y un número, de forma que están estructurados en forma matricial. Así solo podremos comparar los números, teniendo cada número una profundidad determinada.

#### **Batimetrías mediante satélite LANDSAT.**

El sensor MSS del satélite Landsat se ha utilizado para la realización de batimetrías en mares poco profundos. Detecta la luz reflejada por la superficie del mar y el fondo marino. Se puede calcular así la profundidad con píxeles de 80 metros de lado. Se ha utilizado para dos cosas, la primera la Idealización de escollos, y la segunda la preparación de nuevos mapas de profundidades. Cada imagen tiene  $75 \cdot 10^5$  píxeles y cubre un área de 18.520 Kilómetros cuadrados. Obtener una imagen cuesta 25 segundos. Cada 18 días vuelve a pasar por el mismo terreno, habiendo cubierto toda la tierra en esos días. Las bandas verdes y rojas, MSS 6 y 7 se usan para la delincación de los límites costeros.

Los métodos para conseguir la batimetría son más complicados que los que se usan para conocer la altimetría. La reflectancia del agua y del fondo marino, es menor que la de la tierra, lo que hace que se requieran datos de más bandas, que deben ser guardados en cintas. El primer paso en las modificaciones consiste en introducir píxeles artificiales que permitan hacer más notoria la diferencia entre distintos objetos.

Una de las grandes ventajas del LANDSAT es que su paso se repite cada 18 días, lo que permite conocer muy bien el fondo marino, comparando las imágenes de una órbita con la siguiente al conseguir conocer las variaciones de la penetración de las ondas en el agua. Las imágenes se comparan píxel a píxel mediante ordenadores y proceso semiautomático.

Para obtener finalmente la batimetría, se hacen gráficos analizando las profundidades que da cada sensor. Mediante medias ponderadas se consigue la profundidad aproximada, para luego pasar a modificar la profundidad mediante ecuaciones por errores conocidos, obteniendo así la profundidad definitiva de cada punto.

Otro sistema de teledetección utilizado actualmente para batimetría es el satélite francés SPOT. Lleva un sensor HRV (Alta Resolución Visible) con cuatro canales.

Mediante los sensores de este satélite se consigue mejorar mucho la resolución, y el factor estereoscópico aumenta mucho, lo que permite calcular mejor las profundidades. Combina varias órbitas, su imagen no es vertical y posee una órbita de 60 Km. Mejora bastante la resolución espacial respecto al TM de LANDSAT, debido principalmente al tamaño menor de su órbita. Este método tiene una precisión inferior a los anteriores, pero se puede utilizar a una escala mucho mayor y con un coste muy bajo.

#### **Batimetría mediante LIDAR aéreo.**

La mejora de la tecnología del láser durante los 70, permitió crear sistemas capaces de obtener una resolución de 20 centímetros. Se demostró que con el sistema láser neón, se podía apreciar hasta una profundidad de más de 10 metros en condiciones favorables, y en agua turbia 4.6 metros. La batimetría obtenida mediante este método muestra gran precisión a menos de tres metros de profundidad, con variaciones de 7 a 20 centímetros. Este método permite conseguir datos mucho más rápidos que con las técnicas convencionales con embarcación.

#### **Batimetría mediante Sonar Lateral.**

Otro método usado para la obtención de batimetrías es el sonar lateral, análogo al radar lateral. Los sistemas de radar lateral de apertura sintética eran considerados por el ejército de los Estados Unidos como materia reservada hasta el año 1970.

Los sistemas de sonar se adaptan a las normas de geometría de los radares laterales, por lo que actualmente tienen una gran aplicación en la investigación técnico-cartográfica del fondo del mar. El sonar lateral consiste en un emisor receptor de ondas acústicas que va instalado en un objeto (fish) unido a la embarcación mediante un cable de acero, que, además de sujetarlo, permite la transmisión de la información al barco.

Las ondas reflejadas proporcionan una imagen en dos dimensiones parecidas a la obtenida por el SAR, o a fotografías cuando el sol está bajo y detrás de la cámara. Se puede hacer con varios barcos moviéndose en paralelo y así conseguir una carta completa y continua. Su funcionamiento básico es como sigue :

1. El emisor lanza un impulso de microondas, que dibujado en sección por un plano perpendicular al eje de la dirección de trayectoria, sería un arco de circunferencia con centro en foco emisor, que avanzaría hacia el fondo a la velocidad de la luz en forma de abanico. Aunque pueda parecer plano, no debemos olvidar que en realidad es un haz cónico cuya base es esférica, ya que es un frente de onda esférico.
2. La onda alcanza un punto del fondo (P) que refleja parte del impulso emitido en la misma dirección, pero en sentido contrario, es decir, lo devuelve de nuevo hacia la fuente emisora.
3. El frente de onda alcanza un punto T, mientras que la onda que fue reflejada por el fondo es P' y continua avanzando hacia la antena. El punto T, a su vez, dará una señal de retorno T'. El equipo dispone de un conmutador transmisor y receptor que permite recibir la señal reflejada en el terreno. Si la señal es positiva, es decir, devuelta por el objeto y recogida, pasa al receptor. El receptor está conectado a un tubo de rayos catódicos en el que un haz de electrones barriendo la pantalla produce un punto luminoso S de mayor o menor luminosidad, según la intensidad de la señal recibida con la velocidad del medio de transporte.
4. La señal reflejada por el punto del fondo (P) es captada por el receptor y la hace visible en la pantalla, apareciendo en ella el punto P. También el punto T, que ha devuelto la señal, aparecerá luminoso en la pantalla, por lo que se ve la imagen de dos puntos del terreno, P y T. Como el medio de transporte sigue avanzando, iremos obteniendo la imagen de varios puntos del terreno en el tubo de rayos catódicos, es decir se está obteniendo una imagen de una franja de terreno.

Esta secuencia sucede en muy poco tiempo y la onda emplea tan solo una fracción de segundo en hacer su recorrido, por lo que la superficie de emisión y recepción se puede considerar como un plano, ya que depende de la velocidad del medio de transporte, de la distancia del foco al objeto y de la velocidad de propagación de la onda en el medio.



Las principales formas de almacenamiento de imágenes son en película fotográfica y en cinta magnética.

- Película fotográfica, distinguiendo : a) Imagen bidimensional : en la práctica lo que se hace es colocar un rollo de película paralelo al tubo de rayos sobre el cual el punto sólo recorrerá una y otra vez la misma línea, y se hace pasar el carrete fotográfico a una velocidad proporcional a la velocidad del medio de transporte. La película se impresionará con las distintas intensidades del punto luminoso, con lo que obtendremos una secuencia continua del terreno. Estas imágenes pueden obtenerse sobre la película de color con luz monocromática, o simplemente con película en blanco y negro; b) Imagen tridimensional : si la señal de retorno la comparamos con otra señal de referencia de impulsos constantes en el receptor, y la imagen resultante la recogemos sobre una película de grano muy fino obtendremos lo que se denomina un Holograma Sonar. La imagen obtenida presenta un aspecto grisáceo, más o menos uniforme, que desde luego no produce a simple vista la impresión de ver el terreno como se suele ver en una fotografía. Aumentando la imagen se podrá ver una serie de líneas paralelas llenas de puntos negros y de espacios en blanco irregularmente distribuidos, que no son más que el resultado de las interferencias producidas por las ondas de referencia sobre las de retorno del Sonar. Esta imagen sirve para obtener una imagen tridimensional del terreno observado.
- Cinta magnética. La señal recogida y procesada por el receptor puede almacenarse en una cinta magnética después de haber sido codificada. El proceso no es excesivamente complicado ni requiere unos aparatos complejos. Además da la posibilidad de obtener la imagen sobre un tubo de rayos catódicos.

Las imágenes en general, tienen una buena nitidez y dan una sensación de relieve espectacular, como consecuencia de *las sombras*. *Los objetos que* tienen una elevación en el terreno con una cierta diferencia respecto a los que se encuentran en su entorno aparecen muy definidos. Las imágenes en blanco y negro tienen, en líneas generales, un aspecto más oscuro que las obtenidas con emulsión de color. Abundan los grises (reflectores difusos) y la imagen es quizá menos luminosa que una fotografía clásica. Destacan mucho los buenos reflectores sobre este fondo apagado.

Sin lugar a dudas, la imagen en color es mucho más luminosa. Las sombras destacan aún más sobre el fondo de color, con lo que se tiene una mejor visión de las elevaciones. Estas imágenes en color se obtienen utilizando luz monocromática, resultando así imágenes en rojo o verde, pero en las que a veces aparece otro color como resultado de respuestas muy intensas.

El sonar lateral ofrece la posibilidad de inspeccionar el lecho marino entre perfiles. Pese a las múltiples características favorables de este sistema, su empleo en batimetrías ha estado limitado por su incapacidad para incorporar información cuantitativa de las profundidades.

El sonógrafo de barrido lateral calcula el nivel del eco como una función del rango del ángulo de arrastre del equipo remolcado, dando por tanto, una imagen distorsionada del fondo marino. Esto hace que la interpretación del gráfico del sonar sea costosa en tiempo y dinero.

El sónar de barrido lateral ofrece unos resultados útiles en áreas de lechos marinos compuestos por materiales homogéneos, en tanto que en las zonas de materiales heterogéneos es de escasa utilidad. Se trata, por tanto, de técnicas de trabajo complementarias en la ejecución de batimetrías. En zonas con batimetría abrupta los gráficos de sónar ofrecen unas imágenes muy distorsionadas del fondo marino. En tales áreas es muy difícil distinguir entre los efectos ocasionados por el barrido lateral y los ocasionados por los materiales.

#### **Batimetría mediante "WRELADS".**

En Australia se ha usado para la ejecución de batimetrías el WRELADS (Weapon Research Establishment Láser Depth Sounding). Es un sonar que funciona por medio de láser. Debido a sus características especiales permite obtener una mayor profundidad y exactitud. Mide profundidades de entre 2 y 30 metros con un error máximo de 1 metro. Su resolución es de 10 metros y se puede llevar a bordo de un avión a 70 m/sg.

*El láser emite en el espectro infrarrojo 1.064 nm, aunque también emite en verde. La radiación infrarroja se decodifica mientras la verde aún está en el fondo marino. El infrarrojo se emite vertical mientras que el verde se emite con un ángulo de 15 grados respecto a la vertical. Permitiendo así conocer la profundidad al comparar ambas ondas. De noche se llega a alcanzar los 60 metros de profundidad.*

Usando el WRELADS desde avión, se determinan 268 x 70 metros cuadrados, mientras que con un barco en

el mismo tiempo de trabajo sólo se consiguen 5 metros cuadrados. Esto explica el interés en el uso de sensores remotos para determinar con rapidez un conjunto de mapas para la navegación comercial.

Existe una versión que se ha usado en Canadá que utiliza al mismo tiempo láser e imágenes en color de fotografía aérea. Los dos sistemas se consideran complementarios. Con las imágenes en color se determinan los puntos de poca profundidad, con el láser las aguas profundas. De esta forma se consigue un mapa del fondo del mar completo y con errores inferiores a 1 m.

### **Batimetrías mediante Sistema Multihaz de Sondeo por Eco.**

Las técnicas que se utilizan hoy en día para la cartografía de fondos marinos se basan principalmente en el empleo de sondas por eco de haz único y el empleo del sonar de barrido lateral, que permiten la inspección visual entre líneas de sondeo.

La ecosonda permite un muestreo, altamente densificado, de la topografía a lo largo de los perfiles del levantamiento, pero no da ninguna información del lecho marino entre dichos perfiles. Para una cartografía de detalle se precisa una densificación de perfiles, de hasta uno cada 25 metros, lo que supone un alto coste económico y de tiempo. La producción de mapas a partir de estos datos precisa de personal especializado y de técnicas avanzadas de interpolación.

El sonar de barrido lateral ofrece la posibilidad de inspeccionar el lecho marino entre perfiles. Pese a las múltiples características favorables del sonar de barrido lateral, el empleo de esta técnica, en cartografía batimétrica, ha estado limitado por su incapacidad para adoptar información cuantitativa de las profundidades, como se ha comentado anteriormente.

Hay dos factores principales que pueden impulsar la sustitución de las ecosondas convencionales y los sonares de barrido lateral por una nueva generación de sistemas de cobertura de barrido por franja ancha:

- a) Las demandas de una cartografía de fondos marinos más fiable y precisa van en aumento. Esto precisa una mayor densificación de perfiles de sondeo que la obtenida con las sondas de eco convencionales. Habrá que emplear sistemas de cobertura de barrido con franjas más anchas, a fin de mantener los costes de los levantamientos dentro de unos límites razonables y también para conseguir el nivel requerido de detalle y de fiabilidad en

los mapas finales.

- b) La tecnología actual hace posible disponer de sistemas de franja ancha con unas dimensiones aceptables y dentro de unos límites razonables de costes.

La Sonda de Eco Multihaz puede reemplazar, en gran medida, a las sondas de eco de haz único y a las técnicas de sonar de barrido lateral. Podrá disponer de una precisión comparable a la de la sonda de eco de haz único, y no existirá la necesidad de realizar una inspección visual entre perfiles de sondeo.

El empleo de sistemas de franja ancha puede reducir los costes de los levantamientos. El ahorro en tiempo del levantamiento, para una cobertura del 100%, en comparación con la sonda de eco de haz único, es proporcional al número de haces y a su apertura. Además del ahorro en tiempo de levantamiento, también se reduce el uso razonable de un sistema de proceso de mapas en tiempo real. Mediante el empleo de estas técnicas se puede comprobar la calidad de los datos antes de abandonar la zona que se está levantando. En comparación con los anteriores sistemas de franja ancha, las dimensiones de los recién desarrollados sistemas de franja ancha son pequeñas. Esto hace posible su instalación en barcos de cierto porte, lo que significa que el usuario puede incorporar estos sistemas a los buques de levantamiento ya existentes.

La introducción de los sistemas de cobertura de franja ancha tendrá un importante impacto sobre la forma en que se procesan los datos batimétricos. Se incrementará la tendencia hacia el empleo en producción de la cartografía asistida por ordenador, debido a que:

- La cobertura del 100% del lecho marino hace que el trazado automático de curvas sea la técnica más adecuada y satisfactoria. Sólo se precisan pequeñas cantidades de interpolación, con lo que estas técnicas directas conducirán a resultados satisfactorios.
- La cantidad de datos generados por un sistema de barrido de franja ancha es de tal magnitud que su proceso manual es poco práctico.

Este sistema dispondrá de la posibilidad de producir mapas del fondo marino en tiempo real, al tiempo que progresa el levantamiento. En la mayoría de las aplicaciones es factible almacenar los datos batimétricos junto con informaciones adicionales de tiempos, datos de posición y datos medioambientales,

en soporte magnético, a fin de efectuar su análisis y proceso posteriormente al levantamiento. Este proceso incluirá las correcciones debidas a las mareas y cambiará los datos obtenidos en varias líneas o perfiles de levantamiento, permitiendo la eliminación de los datos redundantes o incorrectos. Aunque a este sistema se le otorga un gran potencial a medio plazo, en la actualidad su aplicación presenta numerosos problemas.

## CONCLUSIONES

La precisión de los trabajos batimétricos tiene una gran trascendencia económica y técnica en la construcción y seguimiento de una amplia variedad de obras marítimas y procesos litorales. Los niveles de error, coste y Habilidad de las batimetrías tienen especial relevancia en los estudios de seguimiento de playas.

La ejecución de trabajos batimétricos e hidrográficos puede abordarse en estos momentos mediante una gran variedad de métodos. Los sistemas de adquisición de datos y, en consecuencia, los métodos de trabajo, han registrado recientemente importantes cambios, sobre todo derivados de cuanto se refiere al equipamiento electrónico. En función de los objetivos perseguidos, determinados sistemas resultan más adecuados, sobre todo por cuanto la precisión y fiabilidad requeridas varían de unos a otros. La evolución y desarrollo del equipamiento electrónico está llevando a la integración de equipos, con la consiguiente simplificación de operaciones y reducción de costes económicos.

La determinación en planta de la posición del punto donde se mide la profundidad se ha transformado con el desarrollo de los sistemas de navegación hasta llegar al más reciente, el sistema de posicionamiento global (GPS), hoy día ampliamente difundido, que permite situar puntos en el mar con un error inferior a 3 m. Para distancias inferiores a 5 km, los distanciómetros de infrarrojos y sistemas láser pueden obtener errores de posición inferiores a 5 cm. La profundidad en un punto es una variable mucho más difícil de medir, ya que está sujeta a la existencia de irregularidades, particularidades de la medición, variaciones del nivel del mar, etc. Para batimetrías de precisión, a fin de evitar algunos de los problemas en la medición de la profundidad, se recurre a los métodos con nivelación trigonométrica. Estos sistemas son los de mayor fiabilidad y se utilizan en el seguimiento de playas. Las batimetrías mediante sensores remotos se están desarrollando a gran velocidad, pero no han alcanzado niveles de precisión comparables a los anteriores; en el futuro puede que lleguen a sustituir las técnicas actuales por su menor coste y gran extensión.

Con el escandallo se pueden medir profundidades,  $h$ , con un error menor de  $15 \text{ cm} + 2\% (h)$ . Con ecosonda y mareógrafo pueden alcanzarse errores de 20 cm. Los sistemas de mayor precisión son los basados en nivelación trigonométrica, con los siguientes niveles de error : a) ecosonda, 20 cm; b) CRAB y perfilador hidrostático, 5 a 10 cm; c) trineo, 5 cm, y d) profundímetro de precisión, 1 a 2 cm.

## REFERENCIAS

- British Ports Association. (1987). An evaluation of echo-sounders for Hydrographic surveying in ports. Londres.
- Butler, M.J.A. (1990). Cartografía de recursos marinos : un manual de introducción. FAO.
- Gable, C.G. & Wanetick, J.R. (1984). *Survey techniques used to measure nearshore profiles*. ASCE. Proc. Coastal Engineering 1.984, Vol.II, pp 1879-1895.
- Gallardo, J., Fuente, E. & Fernández, A. (1992). *Batimetría mediante sensores remotos (I y II)*. Topografía y Cartografía. n.º 50 y 52. pp 17-26, pp 68-75. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía. Madrid.
- Granboulan, J. & Chaumet-Lagrange, M. (1991). *Data collection and processing*. Terra et Acqua No 46. IADC. Septiembre 1.991.
- Gravens, M.B. (1992). *User's Guide to the Shoreline Modelling System (SMS)*. Technical Report CERC-92-7, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Herbich, J. B. (Ed.). (1992). Handbook of Dredging Engineering. Me Graw - Hill, Inc.. U.S.A.
- The Institution of Civil Engineers (ICE) and The Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). (1984). Guidelines for the preparation of hydrographic surveys for dredging.
- Kraus, N. & Smith, J.M. (1994). *Supertank Laboratory Data Collection Prpject*. Technical Report CERC-94-3, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

- Laboratorio de Puertos y Costas, Universidad Politécnica de Valencia. (1994). Estudio de la Dinámica Litoral y Seguimiento de la playa de "El Saler" (Valencia). Convenio de Investigación. En ejecución.
- Lee, G. & Birkemeier, W.A. (1993). *Beach and Nearshore Survey Data: 1.985 - 1.991 CERC Field Research Facility*. Technical Report CERC-93-3, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- MacPhee, S.B., Dow, A.J., Anderson, N.M. & Reid, D.B. (1981). *Aerial hydrography laser bathymetry and air photo techniques for obtaining inshore hydrography*. The Hydrographic Journal, n° 22, October 1981. NE London Polytechnic. London.
- Milne, P.H. (1980). Underwater engineering survey. E & F.N. Spon Ltd. Londres, 1.980.
- Serra, J., Aguilar, J., Esteban, V. & Medina, J.R. (1994). *La cuantificación del error de las batimetrías en el seguimiento de playas*. Ingeniería del Agua. Vol. 1, n° 3, pp 7 - 18.
- Shore Protection Manual (1984). Coastal Engineering Research Center, Dept. of the Navy, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Stauble, D., García, A. , Kraus, N. , Grosskopf, W. & Bass, G. (1993). *Beach Nourishment Project Response and Desing Evaluation: Ocean City, Maryland*. Technical Report CERC-93-13, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.