

LA CUANTIFICACION DEL ERROR DE LAS BATIMETRIAS EN EL SEGUIMIENTO DE PLAYAS

José Serta, José Aguilar, Vicente Esteban y Josep R. Medina

Laboratorio de Puertos y Costas Universidad Politécnica de Valencia

RESUMEN: El desarrollo reciente de las técnicas de regeneración de playas en la protección de costas ha puesto de relieve la importancia de los estudios de seguimiento de playas. La estimación del clima marítimo y la batimetría de las playas constituyen elementos esenciales del seguimiento y las bases sobre las que se asentará la valoración o interpretación de los fenómenos observados en la misma. 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. En este artículo se analiza el problema de medición de profundidades dentro del seguimiento de la Playa de El Saler (Valencia), se presenta un medidor de profundidad de alta precisión y se comparan los errores de medida típicos de los sistemas de medición de profundidades habituales señalando los niveles de error que caben esperar según sea el procedimiento utilizado.

INTRODUCCION

La importancia creciente de los aspectos estéticos y ambientales de las actuaciones en la costa ha favorecido el desarrollo de las técnicas blandas de protección de costas. Si se comparan los Manuales Americanos de Protección de Costas de 1975 y 1984 (SPM, 1975; SPM, 1984), se puede observar que los cambios más importantes en la guía de diseño americana lo constituyen las obras de regeneración de playas.

En España la apuesta por las técnicas blandas de protección de costas es más clara que en ninguna otra parte del mundo, debido al fuerte incremento de la inversión pública y el desarrollo de la Ley de Costas (DGC, 1994). La regeneración de playas se ha convertido pues en la técnica de protección de costas de mayor expansión en los últimos años, especialmente en los países y zonas turísticas donde la playa constituye un recurso natural muy importante en el desarrollo económico.

La utilización 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 en gran medida los 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 pues tan 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 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 señalado anteriormente, el seguimiento de playas permite acumular información valiosa para impulsar el desarrollo del conocimiento sobre los procesos litorales.

España puede considerarse un país pionero en el seguimiento de playas, con la realización de numerosos estudios geofísicos para la detección de bancos de arena aptos para regeneraciones y estudios de seguimiento de playas para la mayoría de los grandes proyectos de regeneración realizados en las costas españolas durante los últimos años. 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 and Smith, 1994) y mediciones de campo localizadas (Lee and Birkemeier, 1993; Stauble et al., 1993). Sin embargo, a pesar del gran esfuerzo en investigación básica y el desarrollo de paquetes 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

este contexto, 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.

En este artículo se describe primero el papel del seguimiento de playas en la comprensión y control de los procesos litorales, particularizando el tema para el caso de la Playa de El Saler y su seguimiento. En segundo lugar se plantea el problema de la medición de profundidades y las fuentes de error dependiendo de la técnica y método empleado. En tercer lugar se presenta el profundímetro de precisión desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia para la verificación y contraste de medidas de profundidades litorales, el

recurso se ha perdido o se encuentra seriamente amenazado por las acciones antrópicas, en especial por las inducidas por los grandes beneficios económicos que las propias playas generan. La Playa de El Saler y su problemática constituye un ejemplo particular típico del litoral mediterráneo español. La descripción del caso de El Saler no puede servir de referencia en el Cantábrico, donde las mareas y el clima imponen unas condiciones muy distintas, pero si puede servir para señalar la problemática de un buen número de nuestras mejores playas mediterráneas.

Durante casi todo el S.XX, las playas al Sur del Puerto de Valencia se han visto sometidas a un proceso erosivo significativo del orden de cien mil m³/año. Este proceso erosivo histórico aumentó considerablemente su importancia al urbanizar parte de El Saler y

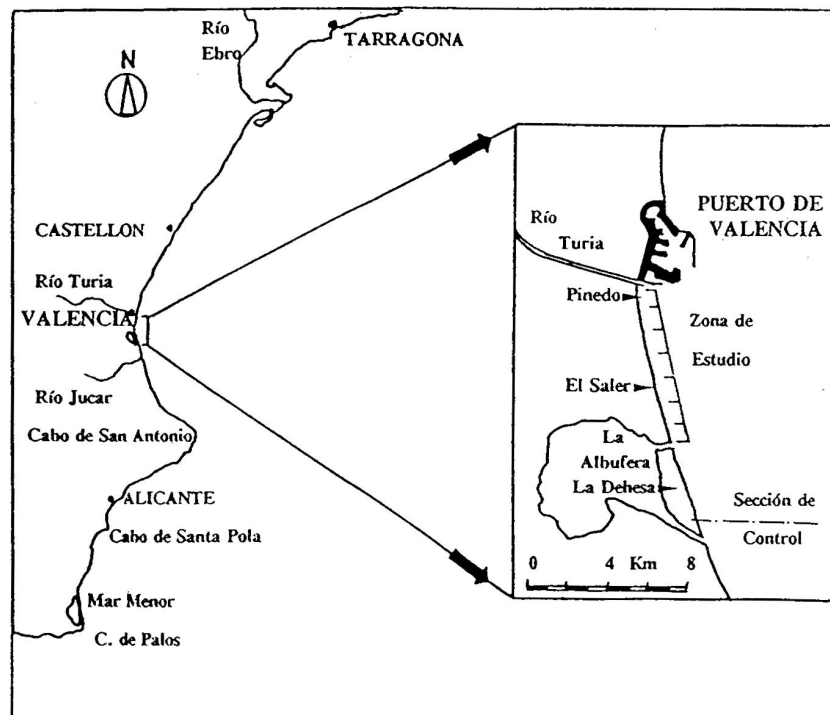


Figura 1. Zona de estudio

obtenidas con las técnicas habituales utilizadas en el seguimiento de playas. Finalmente se estudian las batimetrías automatizadas y se presenta una estimación de los errores que se cometen con el uso de cada técnica.

PROCESOS LITORALES Y SEGUIMIENTO DE PLAYAS

Las playas del litoral mediterráneo español constituyen uno de los principales recursos naturales con los que cuenta el país. Es un recurso escaso y valioso que en el mejor de los casos se encuentra en régimen de estabilidad dinámica a medio plazo. En muchas zonas

destruir la dinámica dunar que de forma natural frenaba los efectos erosivos. En la actualidad, se admite de forma general que el Puerto de Valencia constituye una barrera total al transporte longitudinal de sedimentos y que, por tanto, las playas situadas al Sur se erosionan unos centenares de miles de m³ por año, según la intensidad y dirección de los temporales de cada año.

Aunque la reserva de arena de playa de El Saler es muy importante, decenas de millones de m³, y no parece que la erosión vaya a dañar a corto plazo estructuras vitales, la importancia social y económica de estas playas aconsejaba establecer un seguimiento sistemático para poder abordar de manera eficaz las acciones sobre la

misma. Por otro lado, la existencia de un programa sistemático de seguimiento de las playas permitiría obtener una información objetiva de alta calidad que evitaría las exageraciones sobre la importancia de la erosión y también el desprecio de la misma.

Con objeto de conocer con precisión la dinámica de las playas de Pinedo y El Saler para planificar adecuadamente las posibles respuestas a la erosión que sufren, la Dirección General de Costas del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente ha considerado oportuno establecer un programa de seguimiento intensivo de las playas, firmando con la Universidad Politécnica de Valencia el Convenio *Estudio de la Dinámica Litoral y Seguimiento de la Playa de El Saler (Valencia)*. Este Convenio desarrolla un programa de seguimiento intensivo de playas que permitirá describir con alta precisión dos elementos básicos en la predicción de evolución de playas: (1) Altimetría y batimetría de las playas, incluyendo la cuantificación de los errores de las medidas y (2) Clima marítimo, incluyendo H_s , T_m , direcciones medias del oleaje y niveles medios del mar.

Así pues, se establece una *Zona de estudio* (Figura 1), correspondiente a las playas de Pinedo y El Saler entre la desembocadura del Turia y la Gola del Puchol, más una *Sección de Control* en el tramo estable de la playa de la Dehesa, frente al Parador Nacional de Turismo "Luis Vives".

La metodología de trabajo en el estudio es similar a la utilizada en los estudios habituales de dinámica litoral, pero con tareas adicionales para cumplir los objetivos previstos. Durante el tiempo de seguimiento se han realizado campañas topográficas y batimétricas automatizadas y el levantamiento de tres perfiles batimétricos de control con periodo bimensual; paralelamente se ha desarrollado un método alternativo para la medida de profundidades y posicionamiento de puntos en el mar con precisión a fin de cuantificar errores en la medida, objeto principal del presente artículo.

Los estudios de seguimiento se reforzaron con el inicio de un segundo programa de investigación básica en colaboración con el CEDEX dentro del programa europeo **MAST II**. El programa de seguimiento contó con la información marítima suministrada por la boya registradora fondeada a 19 m. de profundidad frente al Puerto de Valencia (Figura 2), y el mareógrafo del puerto; a estos instrumentos de medida hay que añadir la estación instalada para el seguimiento frente al Parador Nacional, y que contó con un correntímetro electromagnético y registrador de presión fondeado a 8 m. de profundidad y una boya direccional fondeada a 45 metros. Temporalmente se ha contado con un segundo correntímetro fondeado entre el anterior y la línea de costa. Finalizada la primera fase de seguimiento, que se continuará con una segunda fase de mayor extensión y menor intensidad, se cuenta con un importante volumen de información que, una vez finalizado el proceso de

elaboración permitirá ampliar nuestro conocimiento sobre el funcionamiento y la operatividad de los diferentes equipos registradores de oleaje, así como la precisión y eficiencia de diferentes métodos de medición de profundidades.

MEDICION DE PROFUNDIDADES. FUENTES DE ERROR

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 están concretados tanto el ámbito de trabajo como el correspondiente sistema de referencia, procede establecer la recogida de datos. En la solución del problema planteado es necesario tener presente que los sistemas de adquisición de datos y los métodos de trabajo han sufrido recientemente cambios importantes, sobre todo en lo que se refiere al equipamiento electrónico y a los sistemas de posicionamiento en el mar. La recogida de datos requiere tomar: (1) nivel medio del mar (Z), (2) profundidad (h_i), (3) posiciones (x_i,y_i) y (4) otras variables de interés para el análisis y tratamiento de los datos (t_i , oleaje, temperatura del agua, corrientes, etc.). Con las observaciones anteriores se determina finalmente un conjunto de batimetrías brutas (X_j,y_j,h'_i) para definir perfiles o el levantamiento completo de la playa.

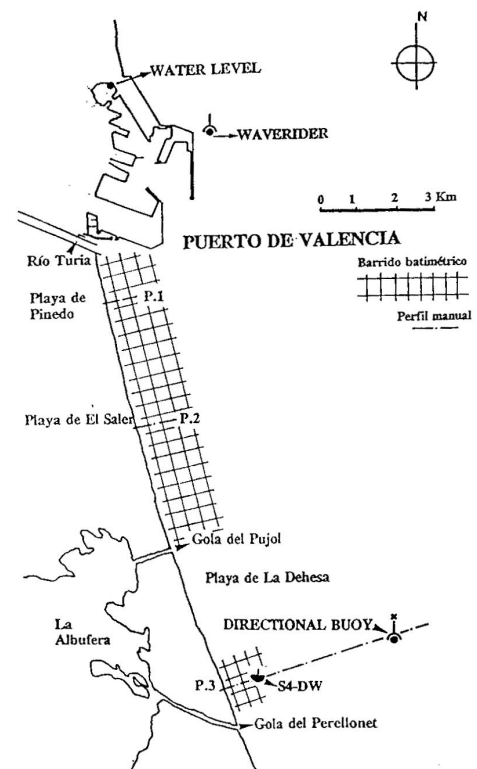


Figura 2. Levantamiento batimétrico. Perfiles de control. Instrumentos de apoyo.

Los sistemas de medición y trabajo utilizados (Granboulan et al., 1991) habitualmente son:

1. Nivel, Z

Escala graduada y/o mareógrafo (flotante, de presión, transmisor, etc.).

2. Profundidad, h

Escandallo y/o ecosonda (de destellos, haz. etc.).

3.- Posición, (x,y)

Alineación visual (marcas, etc.), cabo guía, teodolito (bisección), nuevos sistemas ópticos y sistemas de radioposicionamiento (telemétricos, sistemas de fases, GPSy GPS diferencial, etc.).

Existen importantes consideraciones en cada uno de los sistemas, sobre todo en cuanto a calibración, precisión y fiabilidad. A continuación se revisarán algunos aspectos. Un primer punto a considerar, previo a los señalados anteriormente, es el de las características de la embarcación que se utilice para la ejecución de los trabajos batimétricos. Existen en el mercado desarrollos de flotadores autónomos que son capaces de desplazarse en superficie libre de la mar, y grabar o remitir la información batimétrica que van adquiriendo. No obstante, las batimetrías son ejecutadas habitualmente con el apoyo de embarcaciones pilotadas manualmente, por lo que nos referiremos a ellas en primer lugar.

Embarcación de trabajo

El tipo de embarcación a utilizar para los levantamientos batimétricos se halla estrechamente ligado a la tipología del trabajo a ejecutar. Las características del trabajo a realizar condicionan de una manera clara las mejores condiciones de la embarcación. Así por ejemplo la extensión y duración del trabajo, las condiciones meteorológicas generales y marítimas son cuestiones fundamentales a tener en cuenta en la elección del tipo de embarcación.

Las características geométricas del barco (eslora, manga y calado), condicionan directa e indirectamente los resultados que se obtienen, especialmente en lo que se refiere a rendimientos, precisión y fiabilidad. Embarcaciones con calados pequeños permiten realizar trabajos en aguas someras, pero suponen mayores oscilaciones en la embarcación y menores rendimientos. La maniobrabilidad y velocidad constituyen otras de las características determinantes de la ejecución de este tipo de trabajos. Preferiblemente la embarcación debe disponer de una cabina amplia y con muy buena iluminación. Aunque ligado parcialmente a las características geométricas de la embarcación, hay que referirse igualmente a la importancia de la posición de los transductores en relación con los movimientos generales de la embarcación y, sobre todo, con los que afectan o pueden afectar la fiabilidad de las batimetrías, principalmente arfada, balanceo y "squat".

La embarcación debe disponer de equipos autónomos de suministro eléctrico para las diferentes unidades de trabajo, de manera que se garantice el abastecimiento. Por último, conviene señalar aquí la trascendencia que tiene en el desarrollo y resultados de los trabajos la experiencia del personal que los ejecuta, así como el

conocimiento y adiestramiento que tenga de los equipos que se utilicen. El equipo humano y su adiestramiento es un aspecto que generalmente no es valorado suficientemente.

Nivel medio del mar (Z)

Habida cuenta de los cambios y variaciones, periódicas y no periódicas, que registra el nivel medio del mar, es necesario establecer un plano de referencia constante. El "ero datum", o cero de referencia en las cartas náuticas, al cual se refieren las sondas con signo positivo, se establece por el Instituto Hidrográfico de la Marina en el nivel de la mayor bajamar. En mares con marea la referencia se establece a la bajamar viva equinoccial escorada. En mares sin marea astronómica, sin embargo, la referencia suele ser un cero arbitrario, que puede ser producto de un determinado período de registro. Por otra parte, las cartas náuticas, tal y como en ellas queda indicado, recogen las elevaciones referidas al nivel medio del mar. En cualquier caso, sin ningún género de duda, los trabajos batimétricos requieren en cada momento conocer la referencia al nivel del mar, sea cual sea el criterio adoptado respecto a su origen, a fin de poder homogeneizar los resultados que se van obteniendo.

No cabe duda de que es éste un punto fundamental al que en ocasiones no se presta suficiente atención. En el Mediterráneo a veces se ha considerado el nivel del mar como invariable, y así puede leerse en numerosos textos. En muchos casos nos encontramos ante situaciones en las que se definen distintos ceros, constituyendo amplios abanicos de "ofertas de ceros" Tal es el caso de planos de proyectos de obras marítimas que incluso contienen adicionalmente otras nivelaciones y ceros particulares. Es habitual trasladar definiciones del "cero datum" del Cantábrico al Mediterráneo, suponer correctos los "ceros" utilizados históricamente y encontrar contradicciones significativas entre diferentes "ceros" de una misma área geográfica. Lo peor de todo es que son muy pocos los técnicos que son conscientes de las sorprendentes y graves repercusiones que puede tener asumir un "cero" como cero verdadero y, por consiguiente, los errores y el problema global no tiende a solucionarse con el tiempo. Ciertamente sería interesante coordinar esfuerzos y establecer directrices con el fin de homogeneizar criterios y actuaciones, en las que la nueva red de mareógrafos y nivelaciones de precisión del CEDEX puede jugar un papel determinante.

Resulta igualmente importante la ubicación que se elija para la escala o mareógrafo. Y ello por tres razones básicas: en primer lugar porque la ubicación debe ser representativa del nivel del mar en la correspondiente área de trabajos, en segundo lugar porque las agitaciones extrañas (paso de embarcaciones, oscilaciones naturales de las dársenas, etc..) no deberían afectar al registrador y, por último, porque se debe comprobar fehacientemente que la ubicación adoptada no esté afectada por anomalías en la propagación de las ondas largas. La verificación del sistema debe ponerse

en relación con la elección o fijación del cero correspondiente; ello requiere, o en todo caso resulta recomendable, que se establezcan nivelaciones precisas. Por último, hay que destacar la necesidad ineludible de realizar las labores de mantenimiento y calibración periódica de los equipos.

Medición de la profundidad (h)

Establecido previamente cuál es el plano de comparación o de referencia superior, es necesario determinar concretamente el calado existente en un punto. Para ello hay que definir dónde se encuentra el fondo. Este no está definido de igual manera si se habla de navegación (profundidad náutica) que para otros efectos. En áreas con fondos rocosos irregulares la escala de trabajo delimita principalmente el detalle observable, pero también lo hacen otras cuestiones de trabajo a las que más adelante aludiremos. En lugares en los que los fondos presentan materiales muy finos frecuentemente se encuentra un gradiente de densidades al ponerse dichos materiales en suspensión. Así, la profundidad náutica en esos casos queda delimitada por aquélla en la que la densidad es de 1200 Kg/m^3 (BPA, 1987). A otros efectos no resulta tan clara la especificación de la profundidad existente en un punto allí donde eso ocurre, por lo que se necesita definirla previamente.

Toda vez que en la actualidad la mayoría de levantamientos batimétricos se ejecuta mediante la utilización de ecosondas, algunos aspectos de suma trascendencia condicionantes del desarrollo de los trabajos serán tratados en capítulo aparte.

Medición de la posición (x,y)

Ya se han señalado los sistemas que son utilizados habitualmente. En función de los condicionantes de precisión, algunos de ellos han quedado automáticamente descartados por el desarrollo tecnológico reciente. Por otro lado, sistemas como el láser, GPS, etc., están registrando avances y perfeccionamientos tales, que cada año son más importantes las prestaciones y precisiones que son posible obtener. En general, la precisión requerida en el trabajo es factor condicionante de la elección del sistema. Otra limitación proviene en algunos casos de la distancia máxima a la línea de costa a la que se vaya a tener que trabajar. Como regla general, cabe señalar que la extensión y el presupuesto del trabajo a ejecutar son fundamentales para determinar la elección del sistema más adecuado.

Análisis y tratamiento de datos (x,y,h',t)

Los trabajos de campo llevan a disponer de un conjunto de datos que oportunamente deben ser transformados en los resultados brutos finales (x_i, y_i, h'_i), teniendo en cuenta la función o funciones $h'_i = f(h_i, Z_i, t_i)$. La frecuencia de registro, la velocidad de la embarcación y la distancia entre transectos de la embarcación determinan la distancia entre observaciones o, dicho de otra forma, la densidad de registros existentes. Es este otro aspecto a definir previamente a la ejecución de los trabajos y que, por otra parte, condiciona las posibilidades de interpolación y extrapolación de resultados en el levantamiento final de la playa.

Existen varios condicionantes en esta fase del trabajo. El primero que se va a referir es el de la ausencia de sincronización de los registros: estos tienen un tiempo variable de registro y los desfases son igualmente variables. La diferente posición de los transductores obliga a realizar correcciones, si bien con carácter sistemático. Existe, por otro lado, la necesidad de establecer correcciones de los datos de posición fijando las distancias verdaderas, etc.. En algunas ocasiones la opacidad de los sistemas integrados es uno de los inconvenientes a la hora de la calibración, convirtiéndose de hecho en sistemas no versátiles a tales efectos, lo que supone una clara desventaja operativa. Los denominados programas de curvado, utilizados para la obtención definitiva de resultados (isobatas, perfiles arbitrarios, etc.), constituyen igualmente un apartado relevante. Los diferentes sistemas existentes deben ser analizados exhaustivamente a fin de determinar para cada caso las mejores hipótesis de trabajo que resulten de aplicación.

Tipología y calibración de ecosondas: factores condicionantes

Establecida la relación entre lecturas del nivel del mar y el resto de mediciones la determinación de los calados suele realizarse mediante el uso de ecosondas. Otros sistemas como el escandallo tienen un uso mucho más restringido. Las ecosondas pueden ser de destellos o de haz. Su tipología, no obstante su gran variedad, 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; ondas de baja frecuencia, alrededor de 15 KHz, se reflejan en capas de alta densidad, esto es, en fondos consolidados. Ello se liga, por tanto, a cuanto se ha referido a la definición previa del fondo, especialmente en aquéllos en que existe gradiente de densidades. 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 correspondiente de trabajo más apropiada. El uso de las bandas de frecuencia de trabajo de las ecosondas debe ser adecuado a la tipología y características de los materiales del fondo, dependiendo, por tanto, de la penetración (BPA, 1987).

El tamaño del cono del haz determina igualmente los resultados. Conos amplios integran mayor información, perdiéndose el detalle. Por contra, la estrechez del cono proporciona mayor detalle aunque, por otro lado, 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 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 de mar, movimientos de la embarcación (escoras, "squat", cargas, etc.), definición del fondo, etc., son aspectos de mayor o menor trascendencia en función de los objeti-

vos 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, procediendo a la oportuna calibración. Dicha operación se realiza con la embarcación estacionaria lo que plantea el problema inicial de la no consideración del "squat". Este deberá ser compensado a partir de los resultados correspondientes a ensayos de comportamiento de la embarcación. Otros movimientos de ésta, tales como la arfada y el balanceo, precisan a su vez de compensadores, si bien una cuestión importante es proceder precisamente a su calibración. Resulta imprescindible mantener el calado del transductor, para lo cual es muy importante no introducir modificaciones en la distribución de pesos que repercutan en asientos de la embarcación (fuel, personas, etc.). Otro aspecto, ya referido en apartados anteriores pero también ligado al que aquí se aborda, es el de la necesidad de fijar previamente la densidad de sondas registradas, lo que se traduce en delimitar distancias entre perfiles, orden y sentido de ejecución, etc. (Herbich, 1992).

Se ha dejado para el final cuanto se refiere a la calibración de las ecosondas en relación con la variación de la temperatura del agua de la mar. En una vertical generalmente se observan variaciones muy importantes, así como procesos de inversión térmica en determinados períodos. De la misma manera, también se observan variaciones en la salinidad. En el Mediterráneo se puede comprobar cómo existe un gradiente del orden de los 4 m/seg/°C para las salinidades, lo que se traduce en desviaciones de aproximadamente el 0,3 % por cada °C de variación. De ahí que los registros obtenidos por ecosondas en zonas o épocas con variaciones importantes de temperatura bien a lo largo de perfiles transversales, bien en la vertical, contienen o pueden contener importantes desviaciones. Y ello a pesar de ejecutar calibraciones periódicas. El sistema de "barcheck" integra y promedia valores de temperatura a efectos de calibración. Las posibles soluciones a este problema pasan por la calibración continua, cuestión difícilmente asumible si no se procede a su automatización. Todo ello se ve agravado si se trata de aguas confinadas o estuarios, donde se registran procesos de mezcla, y las variaciones son de gran intensidad, tanto en el espacio como en el tiempo. Herbich(1992) señala cómo existen ensayos que concluyen que el sistema de "barcheck" puede proporcionar en ocasiones registros de calados inferiores en 0.3-0.6 m. a la profundidad realmente existente.

PROFUNDIMETRO DE PRECISIÓN

Dentro del programa de trabajos del "Estudio de la Dinámica Litoral y Seguimiento de la Playa de "El Saler" (Valencia)", se planteó el objetivo de determinar el error en las batimetrías, con la finalidad de establecer el grado de fiabilidad de las mismas. La metodología planteada se basa en comparar los valores determinados por los sistemas habitualmente empleados en la determinación de batimetrías con los establecidos por un

sistema alternativo de alta precisión. Para poder realizar tal tipo de comparación se precisa de un método altamente fiable, o muy contrastado, que bien puede ser de los habituales en este tipo de trabajo, o bien diseñar un sistema que ofrezca suficientes garantías y se pueda determinar su propio error.

Planteado el objetivo señalado anteriormente, se ve la posibilidad de que el instrumento de medida pueda tener una segunda aplicación que permita la realización de perfiles batimétricos, o pequeñas batimetrías. Ante esta segunda posibilidad, se marcaron como objetivos que el *profundímetro de precisión* debía ser ligero, fácilmente transportable, de montaje y puesta en servicio rápido, alto rendimiento, capacidad de trabajo en condiciones climáticas adversas y, sobre todo, de alta fiabilidad en la determinación de las variables (X, Y, Z).

Con las premisas marcadas, y partiendo de los primeros diseños realizados, se trabajó en la idea de llevar al mar el sistema habitual topográfico de medida en tierra, empleando para ello una estación total de infrarrojos en tierra y un jalón especial en el mar, aunque este último había que adaptarlo al medio en el cual debe trabajar de forma que se asegure la toma de medidas a diversas profundidades con la misma seguridad y precisión que puede conseguirse en tierra.

Desarrollo y Descripción de Profundímetro de Precisión

El equipo reseñado anteriormente, se compone de dos partes (Figuras 3 y 4): (1) en tierra, el equipo topográfico convencional de estación total de infrarrojos, y (2) en el mar, una embarcación ligera y el *profundímetro de precisión* tipo barra autoflotante coronada que se describe seguidamente:

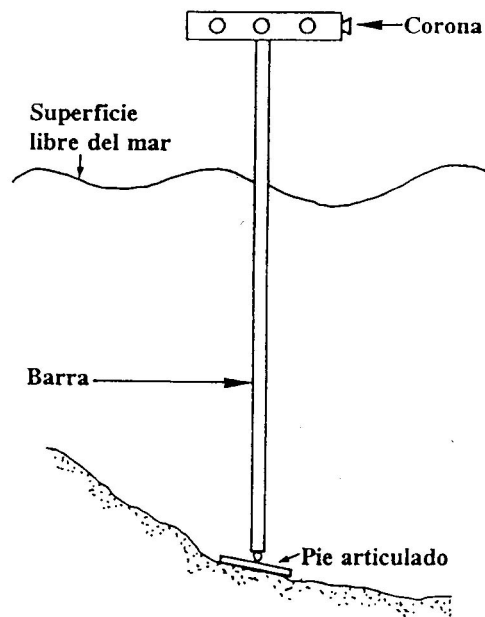


Figura 3. Profundímetro

1. Barra de aluminio de treinta y cinco milímetros de diámetro, hueca y sellada en sus extremos para dotarlas de cierta flotabilidad. Se cuenta con varias barras de distinta longitud. Las barras son empalmables, pudiéndose conseguir un intervalo de trabajo desde profundidades someras hasta los diez metros.

Comparación con otros instrumentos desarrollados

Casi en paralelo con los trabajos de seguimiento de la playa de El Saler, Stauble et al.(1993) están aplicando un sistema de medida de profundidades compuesto por un *trineo* sobre el que se levanta una barra con un reflector láser que es arrastrado, y desde tierra, con una

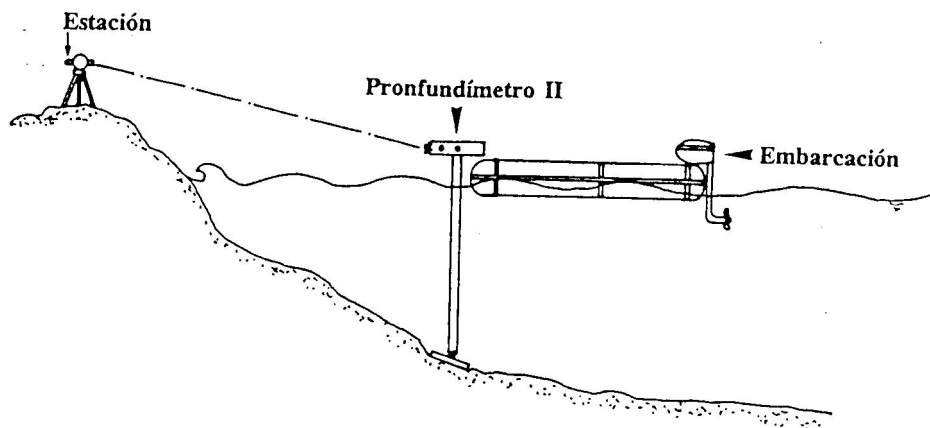


Figura 4. Esquema de trabajo con Profundímetro II

2. Pie de apoyo formado por un disco de plomo de dieciséis centímetros de diámetro y veinte milímetros de espesor con un peso de cuatro mil quinientos treinta y siete gramos.
3. Corona de plexi encastrable en la barra de aluminio con doscientos ochenta y ocho milímetros de diámetro y setenta y cinco milímetros de altura preparada para poderle roscar siete prismas reflectores de infrarrojos. En la práctica empleando tres se garantiza la puntería del taquímetro.

El conjunto lo forman el pie, acoplándole una barra, o serie de barras según la profundidad de trabajo, y en la cabeza la corona con los prismas. Para la determinación de las variables (X, Y, Z) se precisa un equipo topográfico, estacionado en tierra, y una embarcación ligera que se encarga de manejar el *profundímetro*.

La determinación de la sonda se realiza por los métodos de topografía terrestre. El sistema formado por estación topográfica y *profundímetro* es lo mismo que estación topográfica y jalón, por tanto la determinación del desnivel, corregida la altura del aparato y del prisma, y conocida la cota de la estación, da como resultado final la cota del punto muestreado. La posición se establece aplicando la metodología normal empleada en topografía terrestre.

El resultado final es el establecimiento de las coordenadas (X, Y, Z) , referidas al sistema UTM y respecto al cero en Alicante, siempre y cuando las bases de referencia estén en ese sistema.

estación topográfica, van tomándose visuales, obteniéndose los valores (X, Y, Z) , y/o el par distancia-desnivel (Figura 5).

El sistema es similar al desarrollado en Valencia, coincidiendo en las bases de partida, eliminación de medidas que introduzcan incertidumbre como la corrección del N.M.M. y traslación al mar de las técnicas de topografía terrestre; sin embargo, con diferencias en que la verticalidad está garantizada en el caso del *profundímetro* y mientras que depende del fondo en el caso del *trineo*. Existen además diferencias de rendimientos y costes de los dos sistemas que no pueden ser comparados por la falta de la información pertinente en la referencia señalada. El sistema del *trineo* viene empleándose en la determinación de perfiles en trabajos de control y seguimiento de playas, curiosamente para un trabajo muy similar al de El Saler. Si se compara la curva de la desviación estándar entre el *trineo* y el *profundímetro* (Figura 6), puede verse cómo es esta última la que presenta en general un valor más pequeño para la desviación, es decir, el *profundímetro* tiene una mayor precisión y fiabilidad.

Errores de medida

Con el *profundímetro* se han realizado varios trabajos de campo tendentes a establecer tanto sus condiciones de trabajo y maniobrabilidad, como las posibles fuentes de error y acotación el mismo; todos los aspectos estudiados se recogen posteriormente señalándose las conclusiones alcanzadas.

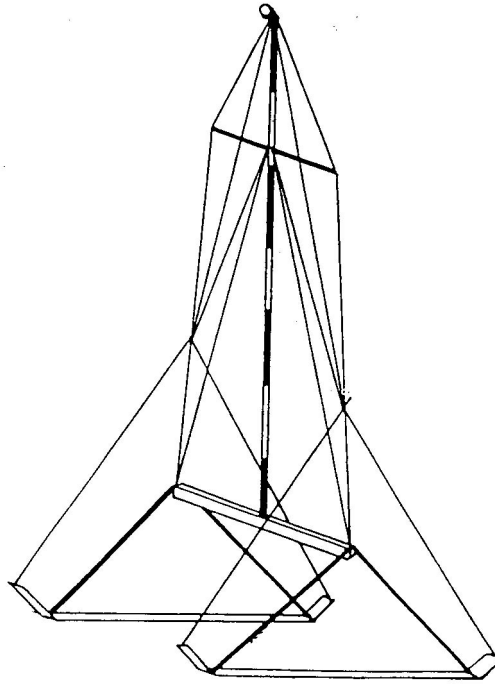


Figura 5. Trineo de medición utilizado por Stauble et al. (1993)

X	Y	Z
729737.600	4366709.943	- 2.241
729738.320	4366708.894	-2.239
729778.769	4366695.118	-3.808
729781.167	4366697.722	-3.806
729803.232	4366722.633	- 4.261
729806.633	4366725.864	- 4.271
729832.973	4366723.026	-4.549
729833.061	4366722.329	-4.554
729834.083	4366714.496	-4.587
729835.852	436711.197	-4.574
729846.339	4366712.475	-4.721
729847.279	4366713.168	-4.751
729872.684	4366725.044	-4.935
729873.318	4366729.079	-4.909
729902.944	4366724.145	-5.310
729908.354	4366724.713	- 5.327
729933.816	4366725.809	-5.530
729934.325	4366730.725	-5.522
729947.380	4366727.174	- 5.607
729947.810	4366726.418	-5.594

Entre los trabajos de campo destacan la toma masiva de sondas con la finalidad de comparar los valores de Z determinados, y que en la tabla adjunta podemos ver, observándose que puntos separados en un entorno de un metro, tienen diferencias de cota entre 0,002 m y 0,013 m, es decir una diferencia media cercana a 0,008 m. Otro de los trabajos realizados fue el levantamiento de un mismo perfil diez veces, con lo cual pudieron acotarse diversos errores, así como comparar nuestros resultados con los trabajos realizados con el trineo.

Con los trabajos realizados hasta el momento de redactar el presente artículo, y que se recogen en los anejos del “Estudio de la Dinámica Litoral y Seguimiento de la playa de “El Saler” (valencia), puede señalarse lo siguiente respecto de *profundímetro*.

1. Conveniencia: La valoración general realizada de la literatura consultada relativa a las técnicas batimétricas en playas indica que en los trabajos de seguimiento de playas se busca desarrollar sistemas alternativos de medida, más próximos al campo de la topografía terrestre que al empleo de elementos sofisticados y de tecnologías relacionadas con satélites y niveles medios del mar. El trineo desarrollado en el CERC, muy próximo conceptualmente al *profundímetro* de Valencia, es un ejemplo de la valoración anterior.

2. Maniobrabilidad del *Profundímetro*: El diseño realizado es muy maniobrable, la flotabilidad de las barras y su ligereza contribuyen a un mejor transporte y fondeo, no precisa de elementos auxiliares de flotación o fijación de la embarcación,

y el acoplamiento de los prismas al conjunto permite reducir la presencia de personas sobre la embarcación, mejorándose así el ritmo de trabajo. La reducción de personas en la embarcación, unida al poco peso del conjunto, permiten un fácil

transporte de todo el equipo, así como el rápido montaje y desmontaje de las piezas, incluso en malas condiciones, lográndose un mejor rendimiento en la toma de datos.

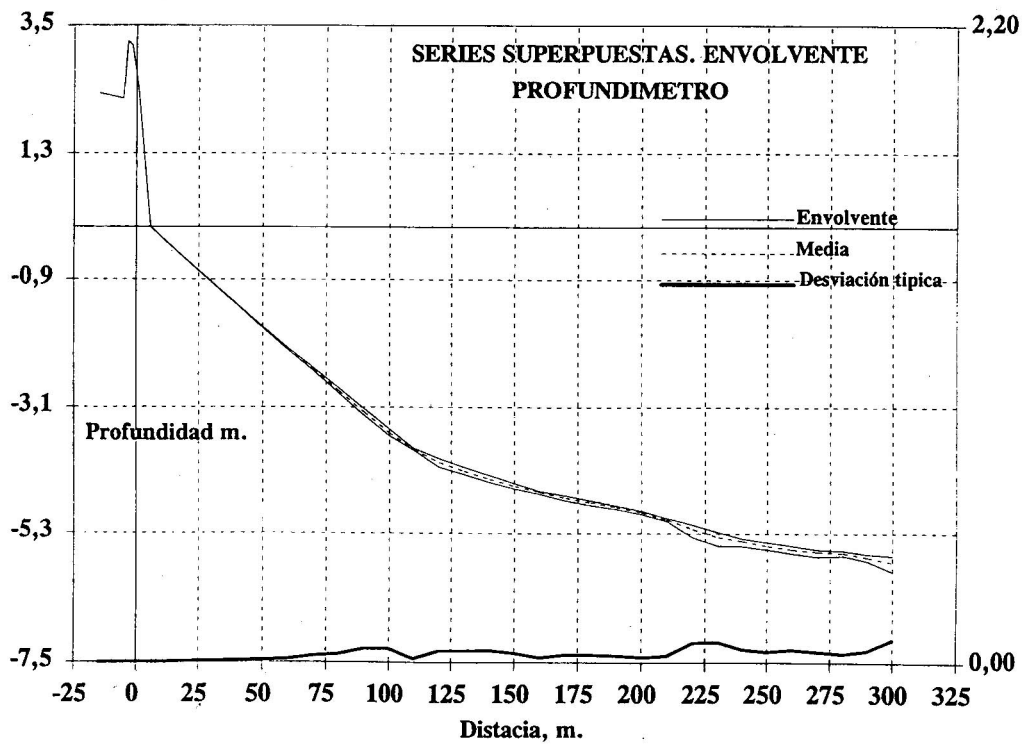
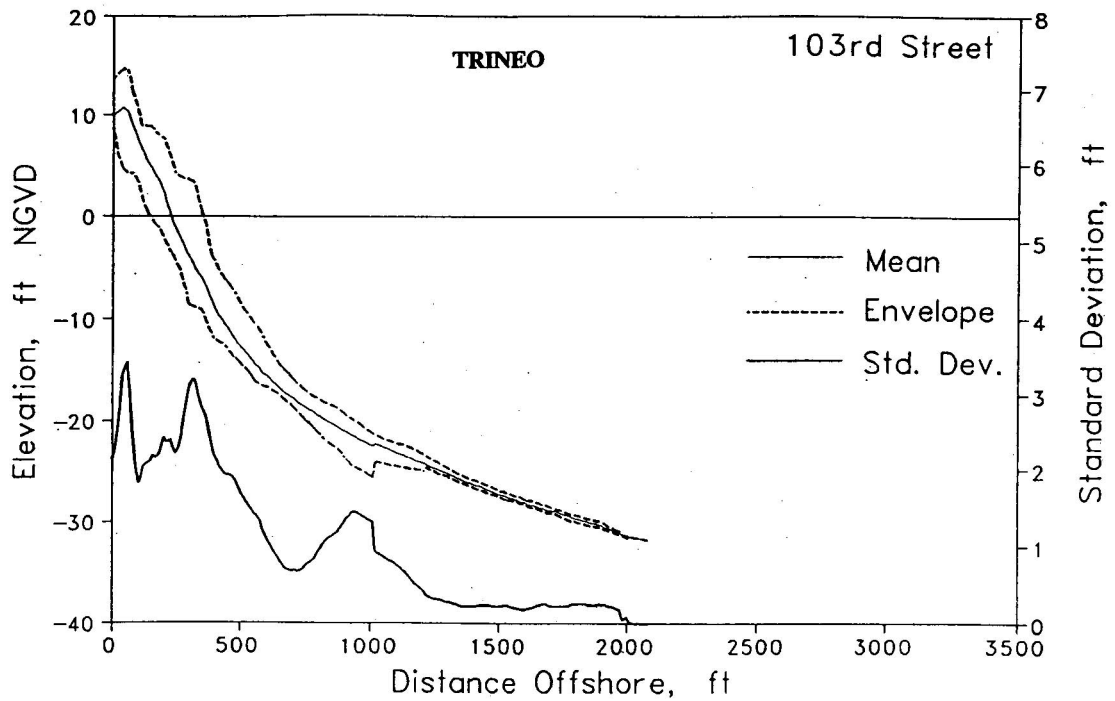


Figura 6. Curvas desviación estándar (trineo – profundímetro)

3. Rendimiento: Con el *profundímetro* viene obteniéndose un rendimiento de punto por minuto, incluyendo en ese tiempo el del desplazamiento, fondeo de la barra, repetición de medidas asegurando la verticalidad y cambios de barras.

4. Nivel Medio del Mar Una de las grandes ventajas del *profundímetro* es que eliminamos un valor a introducir como es la variación del **N.M.M.**; trasladar al mar la topografía terrestre sólo obliga a determinar perfectamente la posición y cota de la base topográfica, ya que a partir de ella se determinan las coordenadas del punto muestreado, no precisándose la corrección por variaciones del nivel. Resulta evidente que la eliminación de un grado de incertidumbre, como es la marea y las variaciones de nivel por oleaje, reduce la posibilidad de errores en el resultado final, especialmente si el equipo humano que realiza los trabajos no es experto en trabajos marítimos.

Por otro lado, prescindir de las variaciones del **N.M.M.** tiene claras ventajas en el caso de la realización de perfiles batimétricos en áreas costeras lejanas a instalaciones portuarias, que suelen estar dotadas de mareógrafos o sistemas alternativos para medir niveles medios del mar. Sin puertos próximos, resultaría obligada la instalación de un sistema alternativo de toma de datos de variación del **N.M.M.** El empleo del sistema diseñado permite prescindir de dicho valor para la confección de perfiles y batimetrías, si bien es necesario contar con una excelente base topográfica terrestre que permita una correcta determinación de las cotas absolutas.

5. Profundidades de trabajo: La profundidad máxima óptima de trabajo está entre siete y ocho metros; profundidades mayores implican una longitud de barra excesivamente larga, crea incluso problemas en el desplazamiento de la embarcación, así como en el fondeo y desfondeo de la misma, y pando del conjunto que reduce la fiabilidad del método. En segundo lugar se ha observado que cuanto menor es la separación entre corona y **N.M.M.**, la medida es más rápida, mientras que cuando la corona sobrepasa más de metro y medio el **N.M.M.**, el conjunto tiende a inclinarse y la medida es lenta necesitando de sucesivas aproximaciones. La ventaja de poder trabajar con un amplio espectro de longitudes de barra permite ajustar el conjunto al intervalo de medidas, reduciendo la posibilidad de inclinación de barra y aumentando el rendimiento en la medida.

6. Condiciones de trabajo: El sistema puede funcionar en cualquier estado de mar, siempre que no afecte a las condiciones de navegabilidad y seguridad del equipo y personal; con condiciones excelentes de mar y viento se consigue un mejor rendimiento y una mayor fiabilidad. Cuando las condiciones son regulares o malas, puede seguirse la medición pero a costa de reducir el rendimiento, al aumentar el tiempo de toma de medida asegurando la verticalidad. Otro aspecto que hay que señalar es la diferencia observada entre la toma de datos próximos a la estación y lejos de la misma. Cuanto más

cerca está la corona de la estación topográfica, la medida es más lenta, mientras que cuanto más separadas están, se mide con mayor rapidez; este aspecto permite concluir que conviene situar la estación lejos de la orilla, sin que ello implique pérdida de visibilidad, para poder conseguir medir más eficazmente.

7. Posicionamiento: El conjunto formado por pie-barra-corona permite establecer correctamente el posicionamiento de las sondas, aspecto este que con otros sistemas similares no se garantiza.

8. Aplicación: El *profundímetro*, por su maniobrabilidad, fiabilidad, pequeño coste y fácil aplicación, se destaca como un sistema de aplicación en la determinación de perfiles batimétricos, está en concordancia con las últimas tendencias observadas en el campo de trabajos de seguimiento de playas y resulta un sustituto eficiente del tradicional escandallo, tiene muchas más ventajas y casi ningún inconveniente respecto del sistema manual tradicional.

9. Verticalidad: Uno de los inconvenientes que se planteaba al *profundímetro* era su verticalidad. La práctica adquirida y las deducciones establecidas tras las campañas realizadas, junto a la pericia y el buen hacer de los operadores es la garantía de reducir el error de verticalidad, junto con las condiciones del mar y viento. En cualquier caso el error más probable por verticalidad se cifra en cinco milímetros.

10. Linealidad: Como en el caso anterior y función del operador en tierra y de las condiciones de mar y viento, se puede conseguir una mejor o peor linealidad del perfil, ajustándose al rumbo prefijado. En cualquier caso y conforme se ha determinado en los trabajos realizados, variaciones de ángulo respecto al rumbo de $\pm 3^\circ$ podrían suponer errores en la cota de un centímetro.

11. Fiabilidad Con todo lo anterior se puede concluir que el sistema desarrollado destaca por su maniobrabilidad, eliminación de incertidumbre, paralelismo con otros sistemas desarrollados que están empleándose en trabajos de precisión, con reducidos errores por verticalidad y posicionamiento.

Si a todo lo anterior añadimos el análisis de los errores podemos concluir que el error medio es de tres centímetros (0,03 m), si bien podría establecerse que el error práctico como máximo es de **dos centímetros (0,02 m)**. Esta última conclusión puede establecerse al comprobar que medidas muy próximas en el espacio difieren en un centímetro.

BATIMETRÍAS AUTOMATIZADAS

Para la realización de batimetrías automatizadas se emplean últimamente sistemas de medida con un alto grado de precisión, según las especificaciones de los mismos. En ocasiones es el error predefinido del instrumental el que se emplea para definir el error

final, cuando no se emplea el del pliego de condiciones siempre y cuando los aparatos de medida se ajusten a los mismos.

Sin embargo, son muchos los factores que intervienen y que pueden alterar los resultados finales, como con anterioridad se ha indicado, y que no deben perderse de vista, y a los que se podría añadir el error que se puede introducir cuando intervienen medidas tomadas por equipos ajenos a los específicos empleados en la realización de las batimetrías, como es el caso de la determinación de las variaciones del N.M.M., que en el mejor de los casos puede establecerse por un mareógrafo fijo, o bien por sistemas alternativos, en ocasiones manuales, que pueden introducir errores no previstos; incluso contando con un mareógrafo, este puede estar relativamente lejos de la zona de trabajo, o sometido a unas condiciones de contorno que, por un lado difieren bastante de las condiciones de una playa abierta, y por otro la dinámica local depende más de acciones antrópicas que de la natural, y/o esta última alterar los resultados.

En definitiva son muchas las variables que intervienen, así como muchos los instrumentos empleados, y no parece correcto que el error final sea el del instrumental de medida o el exigido en el pliego.

En las diversas campañas batimétricas realizadas en el *Estudio de la Dinámica Litoral y Seguimiento de la Playa de El Saler*, se ha empleado para el posicionamiento un sistema por satélite GPS-Diferencial (DGP-S), y para las profundidades un sondador digital, regulándose su velocidad en base a las condiciones de salinidad y temperatura. Del análisis de los datos obtenidos se puede ver cómo puntos muy próximos presentan diferencias de diez centímetros, que es además la unidad adoptada para representar los datos, y ese podría ser el error a asignar a las batimetrías.

No quisiéramos que de lo dicho se desprendiera la idea de que las batimetrías automatizadas sean erróneas, o que estamos en contra de las mismas; todo lo contrario, pensamos que el empleo de sistemas de medida de precisión es necesario en los programas de seguimiento de playas, pero debemos tener presente la necesidad de contrastar los resultados, establecer el error real cometido, e introducir sistemas alternativos de control de calidad que permitan obtener mejor rendimiento de los sistemas de medida, asegurando una mayor fiabilidad a los resultados finales.

CUANTIFICACION DE LOS ERRORES DE LAS BATIMETRÍAS EN EL SEGUIMIENTO DE PLAYAS

Los programas de seguimiento y control de playas se basan en gran medida en la comparación sistemática de perfiles y/o batimetrías, por ello es imprescindible por un lado conocer del error de las medidas tomadas y por otro trabajar con sistemas de medida de buena

fiabilidad.

Dentro del estudio de El Saler se ha trabajado con tres sistemas de medida que representan muy bien las necesidades manifestadas.

En primer lugar se ha trabajado con un sistema de medir profundidades como es el escandallo, que evidencia grandes carencias que lo relegan de su empleo en el seguimiento de playas. Esto es así porque precisa de corregir el N.M.M., introduciendo un grado de incertidumbre. Pero lo más grave de este sistema es el error de la medida, muy alto, con lo cual cuando se comparan perfiles se observan grandes variaciones, de manera que si no se considerara el error de la medida se obtendrían como resultado conclusiones erróneas y malas interpretaciones sobre la movilidad de los perfiles y movimiento de sedimentos.

Otro sistema ha sido la realización de batimetrías automatizadas, cuya precisión se ha estimado en diez centímetros. Por último hemos desarrollado el *profundímetro*, sistema con un error en la práctica de un centímetro.

El uso del *profundímetro* en la toma masiva de perfiles permite ver que a lo largo del período de puesta en práctica las variaciones de los perfiles no han sido tan importantes como las vistas al inicio del estudio. Las conclusiones que se pueden obtener es que la mejor precisión de un sistema de medida permite discriminar mejor las variaciones y movilidad dentro de los perfiles.

En cualquier caso lo más importante es determinar el error del sistema de medida, es su conjunto. No el error de cada uno de los instrumentos de medida, sino el error en la práctica de esa medición, lo cual puede permitir acotar y valorar las variaciones que pueden observarse en los perfiles y/o batimetrías.

Paralelamente a la realización de las batimetrías automatizadas se procedió a la toma masiva de datos, con la finalidad de comparar valores obtenidos por cada uno de los sistemas, e intentar acotar el error con el cual se determinan dichas batimetrías. Hasta el momento se cuenta con suficientes datos, que a falta de incorporar las últimas tomas masivas, permite avanzar que el grado de fiabilidad de las batimetrías automatizadas es de diez centímetros, que coincide con lo especificado en puntos anteriores.

CONCLUSIONES

De los estudios realizados hasta el momento en el Seguimiento de la Playa de El Saler, y con referencia a la cuantificación de los errores de las batimetrías, podemos entresacar las siguientes conclusiones:

- Para la realización de un seguimiento de playas es necesario cuantificar el error de las batimetrías y acotarlo con el fin de poder establecer de forma correcta las variaciones que puedan observarse.

- El profundímetro se muestra como un sistema adecuado para la realización de trabajos batimétricos de precisión, y seguimiento manual de playas, acorde con las últimas tendencias dentro de la Ingeniería de Costas.
- El error del profundímetro se ha establecido en tres centímetros, como valor medio, si bien de los trabajos realizados se podría concluir que el error es menor de dos centímetros.
- El profundímetro ha permitido establecer que el error de las batimetrías automatizadas, realizadas en El Saler, y conforme a los datos que se tienen actualmente, es de diez centímetros.
- Parece conveniente arbitrar sistemas de control de calidad de las batimetrías, similar a los empleados en otras ramas de la Ingeniería, siendo el profundímetro un sistema ideal para contrastar y calibrar las batimetrías que se realicen.
- La adopción de un sistema de control de calidad de las batimetrías puede permitir definir mejor el error en los pliegos de condiciones, acotándolo y obligando a ajustarse al mismo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Dirección General de Costas, del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente al apoyo financiero para la realización de este trabajo, así como la colaboración del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX en el desarrollo, instalación y procesado de la información de clima marítimo.

REFERENCIAS

British Ports Association. (1987). *An evaluation of echo-sounders for Hydrographic surveying in ports*. Londres.

Dirección General de Costas. (1994). *Recuperando la*

Costa/Recovering the Coast Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Junio 1.994.

Granboulan, J., Chaumet-Lagrange, M. (1991). *"Data collection and processing"*. *Terra et Acqua No 46*.

The Institution of Civil Engineers (ICE) and The Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). (1984). *"Guidelines for the preparation of hydrographic surveys for dredging"*.

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.

Stauble, D., García, A., Kraus, N., Grosskopf, W. and Bass, G. (1993). *Beach Nourishment Project Response and Design Evaluation: Ocean City, Maryland*. Technical Report CERC-93-13, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Kraus, N. and Smith, J.M. (1994). *Supertank Laboratory Data Collection Project Technical Report CERC-94-3*, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Lee, G. and 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.

Milne, P.H. (1980). *"Underwater engineering surveys"*. E & F.N. Spon Ltd. Londres, 1.980.

Shore Protection Manual (1975). Coastal Engineering Research Center, Dept. of the Navy, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Shore Protection Manual (1984). Coastal Engineering Research Center, Dept. of the Navy, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.