

NUEVOS CONCEPTOS Y CRITERIOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE DRAGADO.

M en C. Etelberto D. Serrano Flores, Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl, Ing. Arq. María de Lourdes Méndez Reyes, M en C. María Dolores Servín Lugo, Top. Edy Nelson Sanchez Blanco.

eserrano@imt.mx; rramirez@imt.mx; Lourdes.mendez@imt.mx; dservin@imt.mx; esanchez@imt.mx

**Instituto Mexicano del Transporte, Km 12+000, Carretera Estatal No. 431 "El Colorado Galindo"/ Parque Tecnológico Sanfandila / Mpio. Pedro Escobedo / Edo. Querétaro / C.P.76703 / Tel (442)2.16.97.77*

RESUMEN

Con el paso del tiempo, se han adoptado nuevos conceptos y criterios con el fin de asegurar la calidad en los trabajos de dragado de los puertos del mundo. A su vez se ha contado con diversos tipos de equipos para la medición de profundidades, así como para realizar análisis de sedimentos previo y durante la ejecución de los trabajos de dragado. Términos como retrodispersión, UKC (Under Keel Clearance) - profundidad bajo la quilla, profundidad náutica, límite de elasticidad ("yield stress"), parámetros reológicos "in situ", forman parte del vocabulario actual que es considerado en la determinación de la profundidad segura de dragado en los puertos. Aún queda por resolver la pregunta sobre cuál es la mejor forma de obtener y promover una implementación internacional del nuevo criterio relacionado con la definición de la profundidad náutica, actualmente se encuentra bajo investigación en diferentes grupos en todo el mundo. En el caso de los estudios que se realizan en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, resulta de gran utilidad integrar la información obtenida tanto del levantamiento batimétrico y del levantamiento del patrón de corrientes, los cuales aportan información respecto a la profundidad y al espesor de las diferentes capas de sedimento de acuerdo a su densidad, por otra parte, la información resultante de los análisis de los sedimentos, sirven como soporte de la densidad de los mismos, así como la determinación de la plasticidad de las muestras con lo que se justifica según sea el caso, la necesidad de aumentar los requerimientos en la profundidad del dragado.

INTRODUCCIÓN.

Los trabajos y estudios batimétricos tienen como objetivo la medición de la profundidad del fondo marino para determinar los calados existentes en una determinada área, en este sentido, la hidrografía se encamina al estudio y descripción de las áreas y fondos marinos, lacustres, fluviales y de sus costas adyacentes. Entre sus resultados destaca la confección de cartas náuticas, tablas, derroteros y cuanta información resulte útil y necesaria para la navegación. Los trabajos hidrográficos y sus resultados 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, por lo que, uno de los aspectos más importantes, es determinar la eficacia y fiabilidad de los sistemas que se utilizan.

Las cartas náuticas son una de las ayudas básicas y necesarias para garantizar la seguridad en la navegación, históricamente han sido confeccionadas por países con potencial económico, a fin de establecer las rutas marítimas, y las cuales, hoy permiten establecer y abordar la necesaria organización del tráfico marítimo.

Los estudios realizados a la configuración del fondo marino, es una herramienta tradicional de la ingeniería costera, ya que, se consigue de esa manera una completa caracterización morfológica de los fondos, y si se realizan diferentes levantamientos batimétricos, es posible determinar los cambios que se registran en la zona de estudio e identificar las zonas donde se produce una reducción en la profundidad.

En todos esos casos, para el estudio y análisis de los procesos litorales, se hace necesario disponer de una precisión y fiabilidad suficientes en los trabajos batimétricos. En este sentido, durante el proyecto, construcción y explotación de obras marítimas se realizan estudios y trabajos batimétricos para el replanteo, la medición y la caracterización del fondo marino, y en muchas ocasiones dicha información batimétrica condiciona las posibles soluciones

Cabe señalar que, para la ingeniería costera, es de gran importancia la cuantificación y caracterización del transporte de sedimentos en el lecho marino, lo cual permite conocer cómo se llevan a cabo los procesos de erosión y deposición, su efecto sobre las estructuras de protección portuaria y costera, y en casos de las desembocaduras de los ríos, la capacidad del cauce.

MEDICIÓN DE LOS SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

La cuantificación de sedimentos en suspensión ha sido descrita y desarrollada durante más de tres décadas basados en su mayoría en la expresión conocida como ecuación del sonar, la cual relaciona una variable acústica, como por ejemplo la amplitud del retorno acústico generalmente expresada en decibeles (dB), con la concentración de sedimentos en suspensión usando una regresión lineal.

Los sonares o ecosondas envían pulsos de sonido para localizar objetos, el sonido viaja en ondas, no en líneas rectas, y estas ondas se expanden en conos, haciendo cada vez más amplias. La mayoría de los sonares pueden controlar el rango del cono de onda de sonido cambiando la frecuencia de exploración, entre las que se destacan:

- El escaneo amplio (generalmente con ángulos de 40° a 60°) es bueno para escanear rápidamente grandes áreas y obtener información general sobre la profundidad y la estructura del fondo, pero la precisión y los detalles serán menores.
- El escaneo de frecuencia alta es más adecuado para aguas menos profundas porque mientras más profundo escanea el cono cubre un área más amplia. Esto significa que si está escaneando a una profundidad de 45 pies (13.7 m) verá objetos en un área que tiene un diámetro de 47 pies (14.3 m).
- El escaneo de frecuencia baja (ángulos de 10° a 20°) brinda una imagen más precisa, pero cubre un área más pequeña. La exploración de frecuencia baja, también es más adecuada para aguas más profundas, ya que el cono no se extiende tan ancho.

La frecuencia de una onda es el número de veces que se genera la onda por unidad de tiempo, y se mide en hercios (Hz). Así, una sonda de 200 kHz emite doscientas mil ondas por segundo, sin embargo, la importancia de la frecuencia en los trabajos batimétricos no se trata de cuántas ondas se emiten, sino de la distancia que son capaces de alcanzar.

La frecuencia es inversa a la longitud de onda, es decir, cuantas más ondas se producen en un segundo más corta es la distancia entre ellas, y esa frecuencia también es inversa a la distancia, una onda de baja frecuencia llega más lejos que una de alta frecuencia, en este sentido, la frecuencia alta (200 - 600 kHz) está indicada para fondos someros, al tratarse de una longitud de onda corta, permite tener muchos detalles al proporcionar una mejor resolución y definición de estructuras sumergidas y de bancos, mientras que, la baja

frecuencia (50 kHz) es adecuada para fondos profundos al tener una mayor capacidad de penetración, es decir, alcanzan profundidades mayores, sin embargo su definición es inferior. El ancho del haz (o ángulo de cono) de un transductor determina el área que será capaz de explorar bajo el agua. Cuanto más ancho es el ángulo del haz, mayor será la superficie que podrá cubrir. Es importante señalar que cuanto más grande sea el haz menos precisa será la medición de profundidad en zonas del lecho rugoso o variable. Otros aspectos que afectan el alcance son: las condiciones y tipo de agua (todas las sondas logran mayores alcances en agua dulce, que en salada) y la tipología del fondo.

Los sonares miden tanto el tiempo que tarda un pulso de sonido en regresar, como la intensidad de la señal que también regresa, esto le permite mostrar cuán duros o blandos son los objetos bajo el agua, debido a que los objetos suaves de baja densidad devuelven una señal más débil, mientras que los objetos duros de alta densidad devuelven una señal más fuerte.

La tecnología acústica Doppler, en especial el ADCP, es una de las herramientas más recurrentes para medir concentración de sedimentos en suspensión *"in situ"*. Su principal ventaja, es la capacidad de obtener datos en todo el haz acústico, o bien en toda la profundidad del flujo o el ancho de la sección, dividido en celdas de determinado tamaño, sin tener que introducir el equipo en la columna de agua a una distancia grande, esto, sumado a la posibilidad de realizar mediciones en movimiento, permite obtener mediciones en una sección transversal con una gran resolución espacial cuando se utiliza una configuración vertical hacia abajo con los haces acústicos. Estos instrumentos a partir de los sensores acústicos de retrodispersión, envían una señal acústica al medio y al rebotar con las partículas presentes se modifica la intensidad de señal de retorno, a partir del cambio de fase entre la señal emitida y la de retorno se calcula la velocidad del fluido, asumiendo que es igual al de las partículas. Y dado que la señal de retorno depende de las características del sedimento, es posible aplicar esta técnica para la medición de concentración de sedimentos en suspensión y la cuantificación del transporte de fondo.

Según lo reportado en varias referencias bibliográficas consultadas, a bajas frecuencias se absorbe mayor porcentaje de dB, con un objetivo más enfocado al modo de operación de un perfilador de subfondo que en realidad penetran por debajo del lecho marino (más de 18 m) pero registran la misma profundidad del lecho marino como se muestra en la Figura 1.

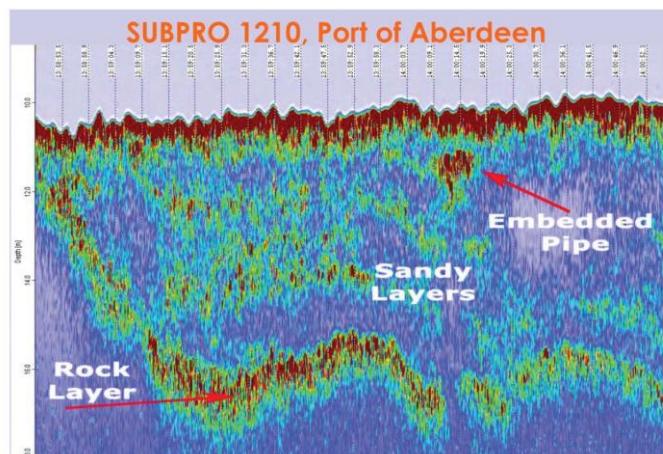


Figura 1. Imagen realizada con perfilador de subsuelo con baja frecuencia en el Puerto de Aberdeen Escocia.

Retrodispersión acústica

León M.J.D. 2004 define retrodispersión acústica o Backscatter a la energía devuelta de manera incoherente de un pulso acústico que ha sido transmitido a través de una columna de agua, a una determinada distancia y con un cierto ángulo, en un área concreta del fondo submarino, la variabilidad espacial del Backscatter es determinado por un sistema multihaz gracias a la relación existente entre las propiedades físicas del fondo marino y la energía acústica. En este sentido, la retrodispersión acústica depende de:

- El coeficiente de reflexión, debido a la diferencia de impedancia acústica entre el agua y los materiales del fondo marino.
- El volumen de reverberación, expresado en términos de longitud de onda.
- La rugosidad de la superficie del fondo.

En teoría, la diferente composición de los fondos marinos, producen un distinto tipo de retorno de los haces acústicos que son reflejados por la superficie, es como una firma característica, que hace viable la utilización de una herramienta capaz de reconocer las diferentes firmas y así poder clasificar los diferentes tipos de suelo. Pero en la práctica, este problema tiene una compleja solución ya que los factores mencionados anteriormente y de los que depende la retrodispersión tienen individualmente una compleja solución, pero en la naturaleza aparecen combinados por lo que su solución es casi imposible.

La retrodispersión también varía en función del ángulo de incidencia del haz transmitido, las variaciones angulares de intensidad, normalmente se comportan como el modelo de Lambert asumiendo una superficie lisa; en la práctica, el modelo de Lambert no es totalmente apropiado ya que la superficie del fondo marino no es completamente plana.

Esta es una de las ventajas de los sistemas multihaz, donde de manera instantánea, las diferentes medidas de secciones transversales de la superficie, pueden ser usadas para llevar a cabo una apreciación del perfil submarino, en función al posterior cálculo del ángulo real de incidencia y el tamaño del área registrada. Adicionalmente, unas cortas series de pulsos pueden ser usados para corregir el ángulo real de incidencia en la dirección longitudinal donde las variaciones en la inclinación también contribuyen a una dependencia angular. Por lo tanto, una herramienta útil para la creación de mapas de retrodispersión, es el uso de las variaciones de intensidad de la misma, debida a la distinta composición de los fondos marinos.

En la utilización de variación de intensidad para la generación de los mapas antes descritos, están incluidas las correcciones por variación automática de la ganancia (TVG), por calibración del haz acústico, y corrección por el relieve en la dirección transversal en el supuesto de que no existe refracción. En estimaciones cualitativas, algunos tipos de fondo con un alto contraste (afloraciones de roca, arena gruesa, arena fina, lodo) pueden ser diferenciados sin la aplicación de alguna de las correcciones mencionadas anteriormente, especialmente en fondos planos, sin embargo, en estimaciones cuantitativas esas correcciones deben ser aplicadas, además, se procede a la recopilación de las diferentes propiedades físicas del fondo como son el tamaño grano, la rugosidad superficial, la impedancia, etc. Al tener en cuenta todos estos factores, se pueden generar superficies que correspondan a la respuesta acústica obtenida.

Actualmente, la medida de la retrodispersión acústica de la mayoría de los materiales ya es conocida y gracias a esto, se han desarrollado equipos capaces de clasificar con una mayor exactitud, los diferentes fondos submarinos haciendo uso de la dependencia angular de la retrodispersión.

El tamaño de las partículas de los sedimentos del fondo marino y las irregularidades que estos provocan sobre la superficie afectan de distinta forma dependiendo de la longitud de onda empleada. Por ejemplo, en una determinada longitud de onda, las arcillas y el limo son lisos comparados con las arenas y gravas, sin embargo, estas diferencias son menos notables entre sedimentos de la misma clase como son las arcillas arenosas y las arenas finas (figura 2).

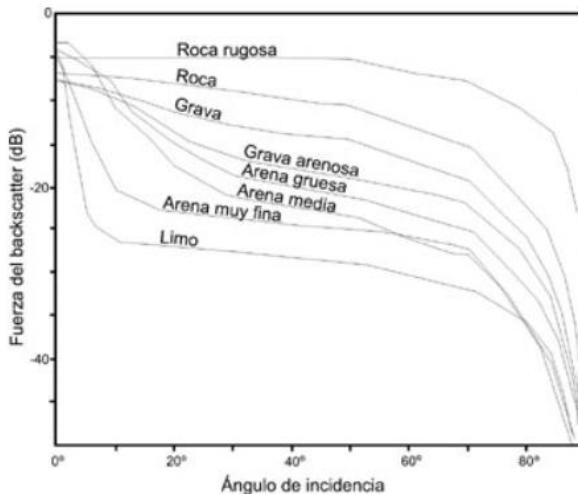


Figura 2. Relación entre intensidad de Backscatter y ángulo de incidencia, según tamaño de grano de sedimento para una frecuencia de 30 kHz (modificado de Moustier, 2002).

El tamaño del grano también afecta a la porosidad y al contenido de agua de los materiales de los que depende la velocidad de una onda de compresión. El producto de la velocidad de la onda de compresión v y la densidad de un volumen saturado de sedimentos ρ da como resultado la resistencia de un material a ser traspasado por una onda acústica. A esto se denomina impedancia. Las diferencias de impedancias entre dos medios, determinan en parte el comportamiento de un pulso acústico. Esta relación se expresa como:

$$R_0 = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2},$$

Donde R_0 es el coeficiente de reflexión entre los dos medios con velocidades v_1 y v_2 y densidades ρ_1 y ρ_2 respectivamente.

Las irregularidades de la superficie de contacto se miden en términos de longitud de onda λ , una cierta superficie puede parecer rugosa para una longitud de onda pequeña, respecto a la longitud de las irregularidades del fondo, lo que provoca un cambio de fase en la onda reflejada dándose interferencias entre los frentes de onda reflejados. Por otro lado, la misma superficie puede parecer lisa para longitudes mayores, porque los frentes de ondas son reflejados con diferencias de fase muy pequeñas respecto a la longitud de onda inicial.

Lodos fluidos

Un factor de mayor relevancia para la navegación segura, es el espacio que queda bajo la quilla del buque, conocido como UKC (Under Keel Clearance - profundidad bajo la quilla). Se puede lograr suficiente UKC mediante el establecimiento de una restricción en el calado máximo permitido para los buques que ingresan al puerto o mediante el mantenimiento de la profundidad gracias a intensas operaciones de dragado en áreas sedimentadas, la primera opción es indeseable desde un punto de vista económico y podría resultar en restricciones a las naves que ingresan normalmente al puerto, mientras que, la segunda opción es favorable en general, sin embargo, es de suma importancia considerar el costo y el impacto ambiental del dragado que se requiere para disponer del lodo fluido.

El lodo fluido es una suspensión altamente concentrada de partículas de sedimento con limos microbianos, los cuales pueden entenderse como una red de polí – electrolitos que mantienen las partículas de sedimento en suspensión, razón por la cual el lodo fluido puede entenderse como un fluido viscoso – elástico. El lodo fluido típicamente se deposita en el fondo del canal por el cual navega el buque cuando la tasa de sedimentación neta es mayor que la tasa de consolidación (*Winterwerp, J.C. & van Kesteren, W.G.M., 2004*).

DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD NÁUTICA

La navegación en puertos y canales que tienen lodo fluido sobre el lecho puede ser desafiante debido a varios factores. El lodo fluido no puede ser detectado de manera confiable por los métodos acústicos tradicionales. La interpretación de los datos acústicos medidos es ambigua en vista de que la posición del lecho sobre la carta acústica no es clara. Otro desafío para la navegación en áreas lodosas es la generación de ondas internas (ondulaciones). El control y la maniobrabilidad de un buque puede ser obstaculizada por tales ondas en el caso de un buque navegando en las cercanías de la interfaz agua – lodo. En particular, la amplitud de las ondulaciones afecta el timón y la eficiencia de la hélice, lo que se ha observado tanto “in situ” como en experimentos de laboratorio.

El concepto de la “profundidad náutica” se definió sobre la base de un experimento a escala real en el puerto de Rotterdam, en Bangkok y a lo largo de la costa de Surinam, en dichos experimentos se encontró que densidades del lodo fluido con valores superiores a 1200 kg/m³ tenían una influencia tolerable en la maniobrabilidad del buque. (ver figura 3).

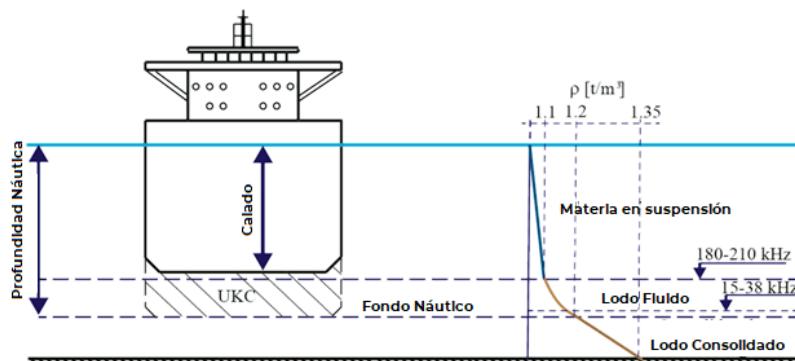


Figura 3. - Representación gráfica de UKC, fondo náutico y diferencia de medición con frecuencias.

En 1980, se realizaron una serie de experimentos a escala real en el puerto de Zeebrugge, para los cuales, se escogió como referencia para la estimación del UKC, la interfaz agua – lodo que se identificó mediante una ecosonda de alta frecuencia (180 – 210 KHz). Los experimentos se llevaron a cabo con UKC positivo y negativo que corresponden a los niveles por encima y por debajo de la profundidad del agua – lodo, con los cuales se concluyó que el lodo fluido con una baja densidad podría ocasionar cambios en el comportamiento náutico normal del buque, pero sin llegar a situaciones peligrosas.

Una relación profundidad – reología típica se muestra en la Figura 4, en la cual se indica que, justo debajo de la interfaz agua – lodo, las propiedades reológicas del lodo son apenas diferentes a las del agua. En un cierto nivel, definido como la "transición reológica", la tensión de rendimiento y la viscosidad aumentan muy rápidamente con la profundidad, además, las pruebas a gran escala con una draga de tolva de succión en Zeebrugge han demostrado que el comportamiento de un barco se vuelve inaceptable, si su quilla toca este nivel, volviendo al barco incontrolable y adopta el camino "más fácil" siguiendo el lodo, al mismo tiempo, es prácticamente imposible disminuir la velocidad, incluso a uno o dos nudos.



Figura 4.- Reología en función de la profundidad en el puerto Zeebrugge: mediciones en 1987 (De Meyer y Malherbe, 1987) y 1997.

La razón por la que el fondo náutico generalmente se expresa en función de una densidad crítica, está relacionada con las desventajas de las mediciones reológicas *in situ*, debido a que no se dispone de un método de estudio reológico continuo, comparable al realizado con ecosonda, además, la reología del lodo está influenciada por el método de muestreo, lo que dificulta la comparación de datos de diferentes fuentes, esto es una consecuencia de la tixotropía del lodo fluido, el estrés de rendimiento disminuye si se altera el material, de modo que el lodo fluido se comporta más como un líquido después de que se ha agitado.

Actualmente la siguiente definición de "profundidad náutica" se usa para efectos náuticos en áreas lodosas: "**La profundidad náutica es el nivel en el cual las características físicas del fondo alcanzan un límite crítico, en el cual el contacto de la quilla del buque causa daños o efectos inaceptables en el control y la maniobrabilidad del buque**" (PIANC, 2014).

Profundidad náutica en la actualidad

Desde hace varias décadas, se reconoció la necesidad de definir adecuadamente los parámetros empleados en la determinación de la profundidad náutica, sin embargo, en esa época los experimentos reológicos “*in situ*” eran prácticamente imposibles, esto forzó a la comunidad a adoptar una parametrización alternativa basada en la densidad.

Con el paso de los años, se han desarrollado un nuevo conjunto de equipos que pretenden estudiar las propiedades reológicas de la capa de lodo fluido (p.e. Graviprobe, Rheotune, Rheocable), dichos equipos están siendo probados en diferentes puertos, pero aún queda por ser investigado si los parámetros obtenidos de los resultados experimentales son compatibles unos con otros, debido a que son necesarios métodos más avanzados como los métodos acústicos 3D con el fin de mapear las capas de lodo fluido.

La medición de los parámetros reológicos y en particular el límite de la elasticidad (“yield stress”), requieren de un protocolo bien pensado y que sea aceptado globalmente, en la medida que esos parámetros son fuertemente históricos – dependientes y llevan a efectos tixotrópicos, por lo que, la medición de parámetros reológicos “*in situ*” tiene que ser comparado con muestras analizadas en laboratorio para propósitos de calibración, se debe tener cuidado durante el muestreo, almacenamiento y análisis de esas muestras y la composición de las muestras de lodo (en términos de mineralogía, contenido de materia biológica y orgánica) deben ser relacionadas con las propiedades reológicas y el comportamiento tixotrópico del lodo.

Las propiedades del lodo (densidad, viscosidad, fluencia, espesor) son dependientes del tiempo debido a los procesos de consolidación en la capa de lodo fluido, más aún, las capas de lodo son móviles y se requiere más conocimiento para entender el comportamiento de las capas del lodo fluido en función del tiempo.

Investigaciones realizadas en el Instituto Mexicano del Transporte

En la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, se han realizado algunos estudios donde se ha integrado información detallada de un levantamiento batimétrico y de corrientes con un equipo Perfilador acústico tipo Doppler (ADCP) marca Teledyne, modelo Workhorse Monitor, a una frecuencia de 600 Hz y un muestreo de sedimentos con una draga tipo almeja a los cuales se les realizó un análisis de gravedad específica y un análisis granulométrico por medio de hidrómetro.

Como parte de los resultados obtenidos, en la figura 5, se presenta una sección con los perfiles de profundidad con una capa de sedimento en suspensión delimitado por la línea roja, un fondo en consolidación no navegable marcado con la línea azul, y un fondo bien consolidado marcado con la línea rosa.

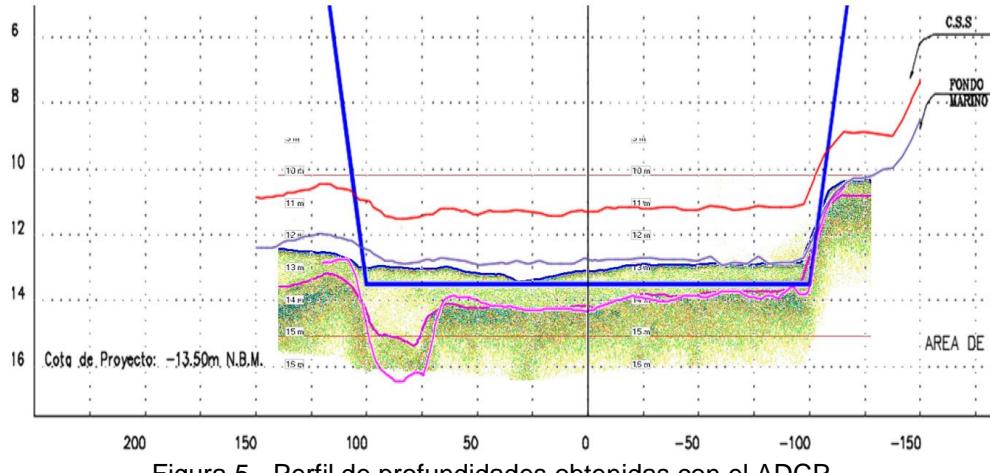


Figura 5.- Perfil de profundidades obtenidas con el ADCP.

ESTUDIOS DE MANIOBRABILIDAD EN AMBIENTES LODOSOS

En diversas partes del mundo, se han realizado algunas pruebas de modelos a escala y fueron desarrolladas para tratar de comprender mejor la maniobrabilidad de los buques en ambientes lodosos, estas pruebas fueron acopladas a modelos matemáticos de maniobrabilidad para cuantificar el efecto de la capa de lodo en el control del buque, sin embargo, los experimentos a escala con lodo real pueden ser problemáticos debido a los efectos del tiempo en el lodo (p.e. configuración y consolidación), por lo que, en dichos ensayos se emplea un fluido denso y viscoso para imitar el lodo fluido en un sistema de dos capas, cuyas propiedades físicas (densidad y viscosidad) se asemejan a las condiciones del lodo fluido.

En dichos estudios, se analizaron los efectos del lodo en el squat y en el trimado dinámico de un buque tanquero, en los cuales se observó que el buque se vuelve lento con UKC del 3 al 5% de calado por encima del fluido denso, sin embargo, las reducciones realizadas a valores negativos del UKC, hicieron al tanquero menos lento en sus maniobras, además, la presencia de fluido denso en el fondo tiende a reducir el movimiento estable y a acelerar los movimientos dinámicos.

Una observación muy importante fue la formación de ondas internas en la interfaz agua – lodo cuando pasa un buque, la amplitud de estas ondas internas, se incrementa con el espesor de la capa del fluido denso y con la reducción de la densidad del fluido, y afectan la eficiencia de la hélice.

Con base en lo anterior, en la figura 6 se observa que, la eficacia de la propulsión puede ser afectada en el segundo intervalo de velocidades, y en estas condiciones, también se esperan problemas de control con una hélice de respaldo, lo cual, pueden afectar la distancia de parada.

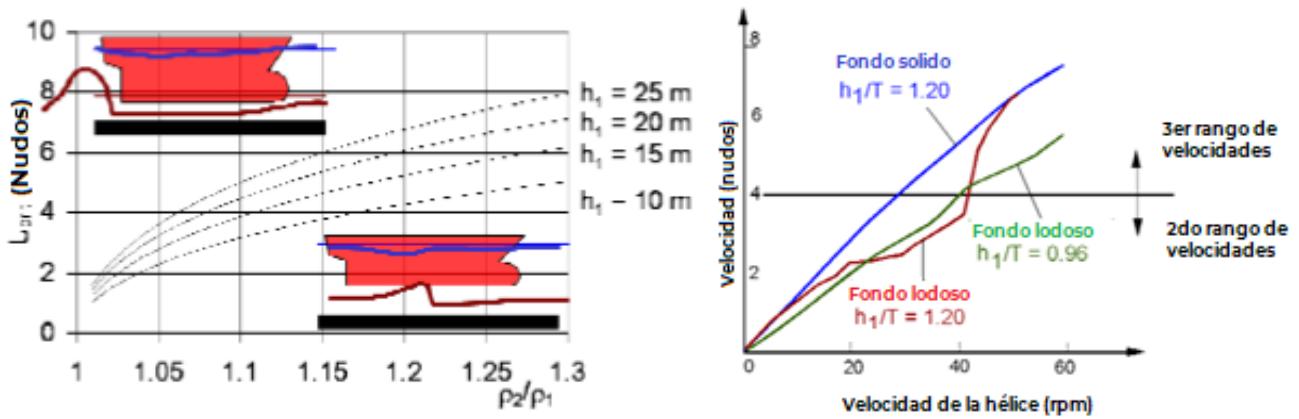


Figura 6.- Relación de velocidades y su influencia de las características del fondo sobre la UKC.

Por lo tanto, en cuanto a la maniobrabilidad, basado en las simulaciones realizadas se puede concluir que:

- El efecto del lodo es mayor a velocidades bajas (3 nudos) que en velocidades altas (7 nudos).
- Las maniobras son más lentas cuando hay lodo, especialmente con una UKC positiva relativa a la interfase.
- El lodo disminuye los movimientos estables (velocidad, deriva, velocidad de giro durante las pruebas en círculo de giro), pero acelera los movimientos dinámicos (descenso y recorrido durante las pruebas en zigzag).

Por otro lado, la acción del timón se ve afectada por la presencia de una capa fluida de lodo de varias maneras, de las cuales, el efecto más notable es la llamada inestabilidad de la acción del timón, que se observó durante las pruebas de modelos autopropulsados en Flanders Hydraulics Research cuando la quilla del buque toca tanto el agua como el lodo.

CONCLUSIONES

Aún queda por resolver la pregunta sobre cuál es la mejor forma de obtener y promover una implementación internacional del nuevo criterio relacionado con la definición de la profundidad náutica, la cual, actualmente se encuentra bajo investigación por diferentes grupos en todo el mundo.

En resumen, la maniobrabilidad y la controlabilidad se ven afectadas principalmente a baja velocidad y pequeños positivos en la altura de la quilla referida a la interfaz agua – lodo.

En el caso de los estudios que se realizan en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, resulta de gran utilidad integrar la información obtenida tanto del levantamiento batimétrico y del levantamiento del patrón de corrientes, los cuales aportan información respecto a la profundidad y al espesor de las diferentes capas de sedimento de acuerdo a su densidad, así como la información de los análisis de sedimentos que sirven como evidencia de la densidad de los mismos y para la determinación de la plasticidad de las muestras con lo que se justifica en su caso, la necesidad de aumentar la profundización en el dragado hasta la cota requerida para la navegación segura de los buques que hacen uso de los puertos.

Cabe destacar que en cada puerto se encontraran diferentes tipos de suelo marino y composición de sedimentos así como, condiciones hidrodinámicas por lo que es necesario combinar equipos y métodos de análisis de muestras de sedimentos para una mejor interpretación del comportamiento en cada sitio, el uso de nucleadores o muestreadores de sedimentos tipo Beeker con un registro exacto de la profundidad seguramente aportara evidencias tangibles del tipo de sedimento y espesor de cada capa encontrado en el fondo (figura 7).

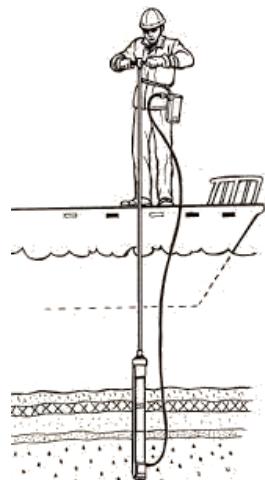


Figura 7.- Muestreador de sedimentos tipo Beeker.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Delefortrie, G., Vantorre, M. & Eloot, K. (2015) Modelling navigation in muddy areas through captive model tests. *Journal of Marine Science and Technology* 10.
- Delefortrie, G. & Vantorre, M. (2015) Ship manoeuvring behaviour in muddy navigational areas: state of the art. *Proceedings of the 4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction*.
- Delefortrie, G (2008) Manoeuvrability of deep drafted vessels in muddy navigation areas. *PIANC magazine* 133.
- León M.J.D. 2004. Del escandallo a los sondadores Multihaz. Escuela de hidrografía. España.
- PIANC (2014) Harbour Approach Channels - Design Guidelines, Report 121, PIANC, Brussels.