

## AGUAS MUY POCO PROFUNDAS EN ACÚSTICA SUBMARINA. FACTORES QUE LIMITAN LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES

PACS. 43.30.Cq

Carlos Ranz Guerra  
Instituto de Acústica-CSIC  
C/ Serrano 144  
28005 Madrid  
Tel. 915 618 806  
Fax. 914 117 651  
E-Mail: director.ia@csic.es

### ABSTRACT

By very shallow waters, **app**, is meant that part of the sea closer to shore. They are a part of the shallow waters region. The **app** limits most of the human activity in relation with the sea: industries, arid extraction, transport, civil engineering, sports, tourism, fishing, fish factories, archaeology, etc., so the **app**, has become one important environment and its control is necessary. Under an acoustic point of view the **app** zone shows an important variability, of those parameters intervening in the acoustic propagation. This paper presents an operative definition of very shallow waters and analyzes the parameters involved, specifically how significant are, how they vary, and the steps to make their evaluation.

### RESUMEN

La zona definida como aguas muy poco profundas, '**app**', es una parte del mar incluida en las aguas poco profundas. Las **app**, se han convertido en entornos muy importantes en la actividad humana: industrias, áridos, transporte, ingeniería civil, deporte, turismo, pesca, piscifactorías, arqueología, etc., y su control es cada vez más necesario. Bajo el punto de vista acústico es una zona de gran variabilidad en los parámetros que intervienen en la propagación acústica. El trabajo que se presenta, propone una definición de **app**, de tipo operativo, y analiza qué parámetros intervienen y cómo varían y de que manera algunas de estas variaciones se puede valorar.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las **aguas muy poco profundas**, forman parte del entorno, más amplio, que se ha venido en llamar, en Acústica Submarina, las aguas poco profundas, '*shallow waters*'. El interés por esta zona del mar ha crecido en los últimos tiempos. Tanto política como económicamente han surgido conflictos en los que se han visto involucrados países con zonas costeras. Las aguas poco profundas forman alrededor del 5% de todas las zonas oceánicas y en ellas se sitúa una gran parte de la actividad económica de los países ribereños. Se calcula además que en el plazo de 50 años más del 70 % de la población mundial tendrá su hábitat en una franja de 50 km., bordeando los mares. La parte más cercana a tierra conforma un entorno peculiar frente a su control y/o explotación por el hombre.

Las aguas muy poco profundas, vienen delimitadas por dos profundidades: a) una primera, en torno a los 30 m., que es la profundidad máxima a la que un submarino puede operar, es también a la que el hombre, autónomamente, puede acceder con determinadas precauciones, pero sin sofisticados soportes, y la profundidad máxima a la que ciertas obras civiles pueden llevarse a cabo sin la necesidad de espaciaísimas infraestructuras. Las aguas poco profundas, vienen delimitadas, en la dirección a tierra, por la zona del rompiente de olas. Desde el rompiente de olas hasta la 'línea de costa' el entorno es sumamente tan complejo, que requeriría un estudio exclusivo .y muy específico.

Por lo tanto la zona de aguas muy poco profundas estará limitada por el veril de los 30 m y otra cota dependiente del rompiente de olas, el cual depende de factores que no están bajo control, p.e., del viento, y del tipo de fondo marino.

## 2. ASPECTOS GENERALES

La propagación del sonido en entornos marinos típicos, no es un proceso que pueda ser descrito de manera sencilla.

La propagación sonora viene controlada por varios hechos como son la estructura variable de la velocidad del sonido, y a la presencia de la superficie del mar y del fondo. La velocidad del sonido en el mar, varía como consecuencia de los cambios en temperatura, salinidad y presión. La superficie marina es, en general, rugosa, por lo que la reflexión del sonido en ella, es un problema complejo y cambiante con el tiempo. El fondo del mar se aproxima a un medio formado por una superposición de capas sedimentarias y roca. El sonido submarino puede reflejarse en la interfaz agua-sedimento o puede entrar en el fondo, para emerger hacia la columna de agua como resultado de la reflexión y refracción en las capas sedimentarias o rocosas.

Las variaciones de los parámetros marinos medioambientales, en el plano horizontal son, en general, mucho más pequeñas que las variaciones en el plano vertical. Con independencia de este hecho, los primeros intentos de predecir la propagación acústica en el mar se hacen bajo el supuesto de que ningún parámetro medioambiental varía con la distancia. Estos métodos no son adecuados, por imprecisos, en zonas que contienen cambios apreciables, con la distancia: rompientes, ondas internas, dunas en el fondo, montañas submarinas, fondo marino muy rugoso, etc.. En tales entornos una solución puramente tridimensional de la ecuación de ondas es también difícil de implementar. La solución intermedia es suponer que los parámetros medioambientales varían con la distancia pero no con el ángulo azimutal, o sea tenemos un entorno cilíndricamente simétrico respecto de la fuente. Estas aproximaciones no pueden recoger el scattering procedente de superficies no incluidas en el plano vertical definido por la fuente y el receptor. Si la variación azimutal no puede ignorarse hay que intentar una solución 3D. Una alternativa simple es repetir el modelo de propagación 2D en planos a diferentes ángulos definidos partiendo de la vertical de la fuente; así se puede obtener, interpolando, una pseudo representación 3D, denominada representación  $N \times 2D$ . La interpolación entre representaciones contiguas puede ser una representación adecuada aunque no sea, en puridad, una solución 3D.

Una descripción completa de cómo el sonido viaja a través del entorno marino requiere una solución de la ecuación de ondas, incluyendo la estructura de la velocidad del sonido y las condiciones en los límites: la superficie y el fondo.

Esta solución no puede obtenerse analíticamente, excepto en casos muy simples de entornos marinos idealizados. En ausencia de soluciones analíticas concisas es necesario acudir a métodos numéricos, a técnicas empíricas o a métodos analíticos y numéricos aproximados. Las técnicas analíticas tendrán que basarse, en muchos casos, en un gran número de aproximaciones para que la ecuación de ondas pueda reducirse a formas más simples. Si el escenario es tal que invalida cualquiera de las aproximaciones, las soluciones analíticas no serán lo suficientemente precisas

Las técnicas numéricas parten de datos que intentan definir el entorno y pretenden resolver la ecuación de ondas, o cualquier forma aproximada de la misma, usando algoritmos que corren en ordenadores. Los métodos empíricos emplean datos de pérdidas por propagación y usan las posibles relaciones/interacciones entre las pérdidas y los parámetros como son la profundidad de la columna de agua, o la velocidad del viento.

Los métodos numéricos pueden proporcionar soluciones muy precisas de la Ecuación de Ondas si las infraestructuras de cálculo lo permiten. Al usar métodos numéricos, será preciso asegurarse de que estos están libres de errores procedentes del tipo de algoritmo. Por ejemplo al dividir el plano alcance-profundidad en una malla en la que calcular el campo en cada uno de los rectángulos de la misma, las dimensiones de esta malla habrán de ser inferiores, o del orden, de una longitud de onda si se quiere que las soluciones sean significativas.

Los métodos empíricos tienen la ventaja de que se derivan, directamente, de medidas acústicas. Sin embargo, generalizar desde unos resultados específicos, a relaciones universales entre pérdidas y entorno, no es siempre factible. Aunque los métodos empíricos se basan en la experiencia no quiere decir que sean más fiables que otros métodos.

El utilizador del modelo acústico deberá asegurarse de que el método seleccionado es el más adecuado para la situación que quiere estudiar. La selección de un modelo acústico estará fundamentada en un conocimiento profundo de las bases físicas en que se basa y en un conocimiento, también, de sus limitaciones.

La selección de los modelos viene dificultada por el hecho de que las limitaciones de los métodos matemáticos raramente están expresadas con sencillez. Es fácil decir que un modelo es bueno para “bajas” frecuencias y aguas “poco” profundas, pero es más complicado definir matemáticamente que se entiende por “bajas” y por “poco”.

Aunque la selección de un modelo se lleve a cabo con gran cuidado, este proceso de selección no asegura que las predicciones vayan a concordar con las medidas hechas en el mar. Buenos acuerdos entre medidas y modelos sólo son posibles cuando el entorno es muy bien conocido. Sin un claro conocimiento de los parámetros “acústicos” del entorno marino, es muy difícil que el modelo proporcione predicciones útiles. El tipo de parámetro del entorno, que es acústicamente importante, va a depender, en gran medida, de la frecuencia de trabajo. Las bajas frecuencias aparecen muy afectadas por el tipo de fondo marino, mientras que las altas frecuencias lo vienen por la superficie del mar y los procesos de scattering que allí se producen. Los valores mas pequeños de pérdidas por propagación se encuentran en situaciones en las que la estructura de la velocidad del sonido en la columna de agua, permite canalizar la señal sonora.

Resumiendo, brevemente, lo expuesto más arriba, podemos decir que para conocer y modelizar, con precisión, la propagación sonora en un entorno marino es necesario entender:

- + Los procesos físicos importantes.
- + La validez de los métodos empleados en modelar esos procesos
- + Los parámetros del entorno, acústicamente importantes, en el área marina de interés.

## 2.1 Algunos fundamentos analíticos generales.

El problema básico en la propagación sonora, en Hidroacústica, es la resolución de la ecuación

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad [1]$$

donde:  $p$  es la presión;  $c$  es la velocidad del sonido,  $t$  es el tiempo, y  $\nabla$ , es el operador diferencial espacial

La ecuación 1, es muy concisa y muy fácil de expresar, pero su solución es difícil a no ser que se hagan ciertas simplificaciones. La simplificación más habitual es suponer que la fuente radia una sola frecuencia, lo que reduce la ecuación de ondas a una ecuación de Helmholtz,

$$\nabla^2 p + \frac{(2\pi f)^2}{c^2} p = 0 \quad [2]$$

donde  $f$  es la frecuencia de radiación de la fuente..

A pesar de todo esta ecuación sigue siendo difícil de resolver en muchos de los entornos reales que se encuentran en Acústica Marina debido a tres factores fundamentalmente: la estructura de la velocidad del sonido con la profundidad, la naturaleza compleja del fondo marino y la similar complejidad de la superficie del mar.

## 2.2. Efecto de la estructura de la columna de agua en la propagación sonora

La estructura de la velocidad del sonido en el mar viene influenciada por la temperatura, la salinidad y por la presión en el punto del entorno que se considere. Existen numerosas relaciones empíricas entre la velocidad del sonido,  $c$ , y salinidad y presión. Cualquier incremento de uno o más de estos parámetros implica un crecimiento de la velocidad del sonido. Así en una capa superficial, que es isoterma e isohalina, como ocurre en muchos casos en las aguas muy poco profundas, la velocidad  $c$  crece con la profundidad (presión) En zonas en las que los tres parámetros cambian, el cambio y la dirección de este cambio en la velocidad del sonido es de difícil predicción.

El sonido siempre se refracta hacia las zonas de velocidad mínima. Por lo tanto en capas de mezcla e isotermas, (aguas poco profundas), el sonido se curva "hacia arriba".. El grado de inclinación, del rayo, depende del ángulo con el cual viaja el sonido; y sabemos que el coseno del ángulo que forma el "rayo" sonoro con la horizontal es igual a una constante multiplicada por la velocidad del sonido a la profundidad en cuestión (Ley de Snell); la constante depende del ángulo con el que el rayo sonoro salió de la fuente. Por lo tanto, el ángulo del rayo sonoro a la profundidad  $x$  se deduce de

$$\cos(\theta(x)) = \frac{c(x)}{c(x_F)} \cos(\theta(x_F)) \quad [3]$$

donde  $x_F$  es la profundidad de la fuente, y  $\theta$ , es el ángulo medido desde la horizontal.

Para el sonido que surge de la fuente a ángulos altos, el efecto del medio es despreciable y el sonido golpea sucesivamente la superficie y el fondo. Por el contrario para ángulos pequeños el sonido queda atrapado (canalizado) en el mar sin llegar a golpear ni la superficie ni el fondo.

## 2.3. Efectos de fondo y superficie

El sonido que golpea el fondo se refleja y se transmite. La relativa importancia de la reflexión y de la transmisión viene determinada por el cambio en Impedancia Acústica en la interfase. La impedancia acústica se mide por el producto de la densidad del medio de propagación y la velocidad del sonido. Si la diferencia entre impedancias (del agua y del fondo) es grande (por ejemplo fondos rocosos), casi toda la energía sonora se reflejara hacia el medio del que proviene; si la diferencia de impedancias es pequeña (arenas y fangos, por ejemplo), gran parte de la energía se transmitirá al segundo medio, y por tanto muy poco sonido será reflejado.

Si la diferencia de impedancias (desacoplo) es grande, hemos visto que gran parte del sonido se refleja. Esto es lo que ocurre con la superficie del mar. La densidad y velocidad del sonido en el aire son mucho más pequeñas que las del agua. De hecho el aire se puede modelar, en

muchos casos, como el vacío con velocidad y densidad nulas. Este modelo de superficie marina se conoce como “pressure release”.

Según crece el ángulo de incidencia, la reflexión no cambia de manera apreciable hasta que se alcanza el “ángulo crítico” en cuyo momento el sonido comienza a penetrar dentro del fondo y las pérdidas por reflexión se incrementan apreciablemente. El ángulo crítico  $\theta_c$  viene dado por el cambio en velocidad del sonido entre el agua y en el fondo,

$$\cos(\theta_c) = \frac{c_a}{c_s} \quad [4]$$

donde  $\theta_c$  es el ángulo crítico medido desde la horizontal,  $c_a$  es la velocidad del sonido en el agua, y  $c_s$  es la velocidad del sonido en la capa sedimentaria del fondo. La diferencia de nivel entre las pérdidas para pequeños ángulos (menores que el crítico), y las pérdidas para ángulos iguales o superiores al crítico, viene también influenciada por la absorción en el fondo marino. Aunque la relación exacta es difícil de evaluar sí se puede decir que para pequeñas atenuaciones, en el fondo, aparecen diferencias de nivel muy grandes y por el contrario, grandes atenuaciones en el fondo marino implican diferencias de nivel más reducidas.

El sonido que penetra en el fondo, no se pierde, necesariamente. En general el fondo marino está formado por una sucesión de capas sedimentarias de origen geológico distinto. En cada interfase el sonido puede reflejarse y parte de este sonido puede volver a penetrar, por refracción “hacia arriba”, en la capa de agua. Dado que la atenuación del sonido en las capas sedimentarias, es en general muy alto, el sonido atrapado en el fondo tiene menos capacidad de contribuir a la señal recibida en el agua que el sonido “atrapado” en el agua tan solo. La excepción a esta regla aparece, únicamente, en bajas frecuencias para las que la atenuación del sonido en el fondo es igualmente muy pequeña, y a otros procesos generados en lo que se conoce como ondas de “interfase” que es un tipo de onda sísmica, [3].

La distancia a la fuente para la cual el sonido reflejado es importante, depende no sólo del coeficiente de reflexión del fondo sino, además, de la profundidad de la zona en cuestión. Para profundidades pequeñas, el número de interacciones con el fondo crece, y lo hace el nivel de la señal, que disminuye drásticamente. La difracción es otro efecto dependiente de la profundidad. Si la profundidad llega a ser menor que una longitud de onda, el sonido que se propaga sufre fuertes procesos difractivos, [4], similares a los efectos, en Óptica, de las redes de difracción.

Una medida de la naturaleza difractiva de la propagación del sonido en el mar es el número de modos normales que se pueden propagar. Un modo normal es una onda “atrapada” que se propaga cilíndricamente. El número de modos normales crece con la frecuencia, con la profundidad del agua y con la reflectividad del fondo.. Si hay pocos modos, la difractividad es alta, y por el contrario, si hay muchos modos es que la difractividad es baja.

### 3. AGUAS MUY POCO PROFUNDAS

#### 3.1. Aspectos generales.

La clasificación del agua como “profunda” o “poco profunda” es arbitraria. Bajo un punto de vista acústico, la profundidad no es importante, pero sí lo es la relación entre la profundidad y la longitud de onda del sonido. Para una misma profundidad el entorno marino presentará efectos difractivos a bajas frecuencias y no los presentará a altas.

Aguas muy poco profundas son aquellas en las que la profundidad de la columna de agua es un número pequeño de longitudes de onda, y por lo tanto la naturaleza ondulatoria del sonido decidirá su posible, o no posible, capacidad de propagarse lo que equivale a decir que puede que no existan muchos modos capaces de propagarse y que, además, los efectos de la difracción sean muy importantes. El número de modos no sólo lo proporciona la profundidad, sino también, la calidad del fondo marino. Sólo aquellos modos con ángulos de propagación horizontal menores que el ángulo crítico correspondiente, se propagarán a distancias mayores

que unas pocas veces la profundidad de la columna de agua. Si fuente y receptor están separados por una distancia que es sólo unas pocas veces la profundidad del agua, el sonido que viaja a ángulos mayores que el crítico constituirá la porción significativa, del campo acústico.

En la transmisión acústica en aguas muy poco profundas intervienen factores de tipo aleatorio que complican, aun más, este proceso. La Tabla I singulariza lo que se puede denominar 'Escala de fluctuaciones en el Océano'.

<i>Tipo de Escala</i>	<i>Escala Espacial</i>		<i>Temporal</i>	<i>Tendencia Estocástica</i>
	<b>Horizontal</b>	<b>Vertical</b>		
<b>Submesoescala</b>	<b>10<sup>2</sup>-10<sup>4</sup> m</b>	<b>1.0-10<sup>2</sup> m</b>	<b>Horas-Días</b>	Estadística
Escala Fina o Microescala	0.1-10 m	10 <sup>-2</sup> -1.0 m	Min-Horas	Estadística

Tabla I. Escala de fluctuaciones oceánicas correspondiente a la zona de las aguas muy poco profundas, [1]

En la resolución concreta de un proceso de comunicación sonora en aguas muy poco profundas, hay que considerar entre otros aspectos, aquellos que limitan la operatividad en la transmisión de información. Uno de estos aspectos, importantísimo, es el ruido de fondo. El ruido de fondo tiene su origen en el viento puesto que el de otros orígenes como es el precedente del tráfico está limitado a muy altas frecuencias que serían las únicas capaces de superar el 'corte' debido a la baja profundidad. Los resultados experimentales que existen, no son numerosos, a pesar de la relativa fácil accesibilidad de estas aguas. Para el lector interesado recomendamos acudir a Urick en su trabajo 'Ambient Noise in the Sea', [2].

Cuando hay muy pocos modos normales, la naturaleza del fondo influye en cómo el sonido se propaga. Esta influencia puede incluso superar a la de la profundidad, lo que hace que la propagación sea poco sensible, a bajas frecuencias, a fenómenos del tipo "frentes". Estas situaciones tienden a superponerse a las condiciones de pobre propagación, al atenuarse el sonido más rápidamente en el fondo que en el agua. A medida que la frecuencia crece, la importancia del fondo disminuye, y la propagación mejora.

Cuando las aguas se hacen menos profundas, crece el número de reflexiones en la superficie por unidad de longitud (en alcance). Esto quiere decir que en aguas muy poco profundas la reflexión superficial, y las pérdidas consiguientes, se incrementarán. Por otro lado las pérdidas por reflexión crecen con la frecuencia y para frecuencias bajas pueden ser inapreciables. Al disminuir la profundidad del agua, la influencia de la superficie marina (oleaje) crecerá siempre que el resto de parámetros permanezca constante.

En entornos en los que la profundidad no es grande, las irregularidades en el perfil del fondo marino pueden conducir a importantes variaciones en la altura de la columna de agua. Por esto, en aguas muy poco profundas, cambios o irregularidades en el perfil del fondo pueden conllevar cambios acústicamente significativos.

### 3.2. Fondos inclinados

El entorno de aguas poco profundas se caracteriza, en general, por tener un fondo inclinado. Un fondo marino inclinado tiene una serie de efectos en la propagación del sonido. Un dato importante es el ángulo de inclinación del fondo,  $\varphi_f$ .

Cuando el sonido se propaga "hacia arriba" en el plano de la fuente y el receptor, cada reflexión incrementa el ángulo con el que se propaga la señal al doble del ángulo  $\varphi_f$ . Según el rayo avanza el ángulo de incidencia puede superar el ángulo crítico, en el fondo, y perderse en el mismo sin emerger. Bajo el punto de vista de modos este hecho se explica diciendo que la columna de agua es de tal profundidad que impide que la señal se propague, o sea, aparece

“un corte” y ese modo no puede propagarse. La distancia, desde la fuente, a la que el sonido desaparece de la columna de agua depende de: la inclinación del fondo, el perfil de la velocidad del sonido, del tipo de fondo y del ángulo con el que el rayo salió de la fuente. Cualquier imprecisión en estos parámetros se traduce en imprecisión en el valor de la distancia a la que el rayo sonoro desaparece en el fondo.

Cuando el sonido se propaga “hacia abajo”, la situación es menos complicada. Así cualquier rayo sonoro que abandona la columna de agua y entra en el fondo, lo hace a distancias cortas de la fuente. A medida que el sonido “desciende”, las sucesivas reflexiones reducen el ángulo de incidencia, lo que implica que sonidos que interaccionan con el fondo a alcances cortos, llegan a ser atrapados (canalizados) en la columna de agua a mayores distancias, Figura 1.

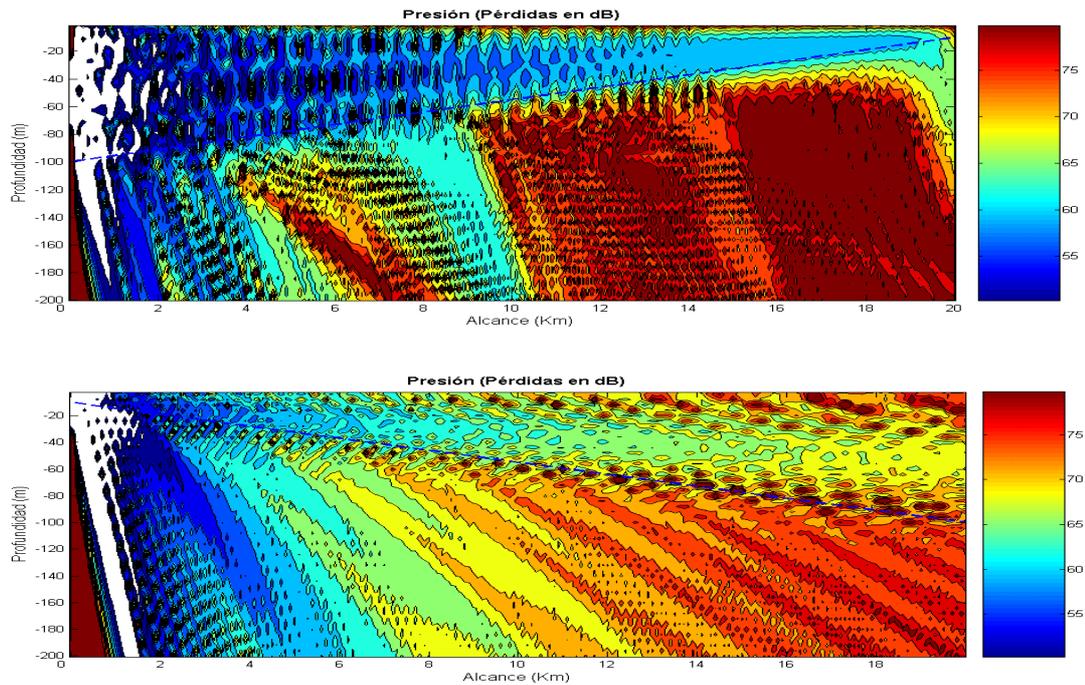


Figura 1. Propagación “hacia arriba” y “hacia abajo” e un fondo inclinado

La profundidad del agua influye en la cantidad de modos que se propagan, con lo que también se condiciona la aplicabilidad de la aproximación matemática de los modos de propagación. Si el número de modos es grande, los modelos más adecuados serán los basados en la teoría de rayos. Por el contrario la teoría de rayos es poco precisa sí el número de modos es pequeño; en estos casos cualquier método que esté basado en la solución de la ecuación de ondas será más apropiado. Si la pendiente del fondo es muy alta es posible que métodos utilizables a grandes distancia de la fuente no sean adecuados para distancias próximas a la misma.

### 3.3. Superficie del mar

El efecto de la superficie rugosa, con oleaje, sobre la propagación de una señal sonora es un fenómeno no muy bien comprendido. En este proceso el sonido es dispersado en direcciones distintas de la dirección de incidencia. El primer resultado es una pérdida de coherencia en el campo acústico resultante. Este proceso se modela, a veces, definiendo unas pérdidas por reflexión, cada vez que el sonido impacta con la superficie. Sin embargo estas pérdidas no se aplican a la parte incoherente del campo que crece, por otro lado, después de cada reflexión y que depende, como es lógico, de la rugosidad de la superficie.

La energía sonora también se pierde por absorción en los campos de burbujas creadas por la acción de las olas. Las burbujas resonantes bajo la influencia de la señal sonora, reducen la amplitud de tal señal por procesos de scattering del sonido y por conversión de la energía acústica en calor.

Existen formulaciones en las que se relacionan las pérdidas por reflexión en función del ángulo de incidencia y de la velocidad del viento, que se supone en el origen del campo de olas. Hablar de velocidad del viento es equivalente, aunque no siempre ni de manera inmediata, a hablar de Estado de mar y/o de Altura de ola. Algunas de las formulaciones citadas están basadas en métodos empíricos mientras que otras están basadas en teoría de scattering. No se conoce, con precisión, cual de los mecanismos de pérdidas en la superficie marina: burbujas, o rugosidad, es el dominante. Incluso, cuando hablamos de scattering, la tarea de decidir que expresión matemática hay que usar, no es fácil porque algunos autores definen el scattering partiendo de la rugosidad superficial, mientras que otros lo hacen partiendo de la velocidad del viento. No es una tarea inmediata la conversión entre velocidad de viento y altura de ola y esto complica las tareas de comparación.

Todas las expresiones que proporcionan las pérdidas en la superficie están de acuerdo en que estas crecen con la frecuencia. La razón reside en que a bajas frecuencias la superficie marina es muy "suave" (o sea poco rugosa) en relación a la longitud de onda, que es nuestro patrón para medir longitudes. Cuando esto ocurre la superficie se puede suponer como una superficie plana y de presión resultante cero. El efecto de las burbujas también se reduce en las bajas frecuencias. Dado que la frecuencia de resonancia de las burbujas es alta, el efecto, a bajas frecuencias, es reducido, aunque en otros casos viene compensado cuando nubes de burbujas aparecen en el medio y es imposible el resolver, la nube, en burbujas individuales, con lo cual la radiación ve el medio como parcialmente lleno de aire; el resultado es una disminución apreciable en la velocidad de propagación del sonido. Estas regiones pueden resonar ocasionando, a ciertas frecuencias, una degradación en la propagación acústica y un incremento en el sonido dispersado en la dirección de incidencia.

### **3.4. Fondo del mar**

El fondo marino es de importancia crucial en aguas muy poco profundas y a bajas frecuencias. La descripción de estos efectos puede hacerse bien a través de tablas que relacionan las pérdidas por reflexión en función del ángulo de incidencia, o bien a través de una descripción completa de las propiedades geoacústicas del fondo.

El primer método es más útil a altas frecuencias, pues el sonido que entra en el fondo a esas frecuencias se atenúa rápidamente y no influye ya en la propagación a través del agua. Por el contrario a bajas frecuencias el sonido puede volver al agua por procesos de reflexión y de refracción. Hay que concluir, por tanto, que la influencia del fondo marino a bajas frecuencias no podrá tratarse como una simple tabla de valores del coeficiente de reflexión para unos determinados ángulos de incidencia.

Los sedimentos son una mezcla de fluidos y sólidos por lo que tanto ondas transversales como longitudinales pueden propagarse en ellos. Cuanto más roca exista mayor puede ser la conversión de ondas compresionales (en el agua) en ondas shear, en especial en las interfases geológicas. Las ondas transversales se atenúan con más rapidez que las compresionales y el efecto del fondo sobre la propagación acústica se resuelve introduciendo un coeficiente de atenuación mayor en el sedimento. Si se quieren introducir en los modelos la acción del fondo sobre las ondas transversales, el modelo acústico deberá permitir la incidencia del sonido a ángulos muy lejos de la horizontal. Esto es debido a que las ondas transversales en los sedimentos tienden a viajar a menor velocidad que las ondas compresionales en el agua y por lo tanto viajan a ángulos más inclinados. El efecto de las ondas transversales es más acusado en la zona de las bajas frecuencias debido a la mayor penetración en el fondo del mar.

La rugosidad del fondo puede tener también un efecto importante en la propagación sonora. Si el fondo es muy rugoso, en relación con la longitud de onda, el sonido no será sólo reflejado. La componente coherente del campo acústico se reducirá con la distancia.

### **3.5. Coherencia temporal y espacial**

Además de los cambios de amplitud de la señal sonora cuando se propaga, la coherencia de la señal viene influenciada, también, por la propagación. Por **coherencia** se entiende la similitud de la señal medida en diferentes momentos (coherencia temporal) o en diferentes posiciones

(coherencia espacial). Así una señal que se transmite en un entorno bien ordenado presentará una alta coherencia, lo que quiere decir que el conocimiento de la señal en un instante dado, o en un lugar dado, permitirá predecir, con gran seguridad, la naturaleza de la señal en un tiempo posterior o en un lugar distinto. Por el contrario la propagación en un medio por diferentes tipos de caminos y con propiedades aleatorias numerosas, la coherencia espacial y temporal será, en consecuencia, muy débil.

Si la señal acústica se mide en un cierto instante y se determina su coherencia temporal (mediante **correlación cruzada** de la amplitud de la señal), la coherencia disminuirá con el paso del tiempo. La coherencia entre señales separadas por breves espacios de tiempo es muy alta (el valor máximo se alcanza cuando la señal se compara con sí misma). Por el contrario aquellas señales separadas por intervalos grandes de tiempo, presentarán una coherencia baja. El ritmo al cual la coherencia entre dos muestras de una misma señal temporal disminuye con el tiempo, puede caracterizarse por un **tiempo de correlación**. Este tiempo da una estimación del orden de magnitud del tiempo durante el cual la señal permanece invariable. De manera muy semejante se puede definir una **longitud de correlación**, en el caso de correlación espacial.

El tiempo y la longitud de correlación de una señal acústica están relacionados con el tiempo y la longitud de correlación del medio dispersivo (origen del scattering). Cuando el scattering crece, caso de una superficie marina rugosa (con oleaje), la coherencia de la señal acústica que se propaga, decrece. Cuanto más pequeño es el tiempo de correlación de la señal, más corto es el tiempo de correlación de la superficie marina. La relación entre la estructura de coherencia del medio origen del scattering y el de la señal acústica, no es, por otro lado, inmediata.

La coherencia de las señales es de particular importancia en los procesos de **beamforming**. Si partimos de un **array**, en el cual la separación de los elementos es superior a la distancia de correlación, el array así generado no será válido. Por lo mismo si introducimos unos retardos temporales superiores a los tiempos de correlación, la validez de esta técnica será nula. Este es un dato de crucial importancia cuando consideramos sistemas de escucha específicos para aguas muy poco profundas. Un array puede ser útil en un momento dado y no serlo un instante después.

Una solución completa de la ecuación de ondas incluye los efectos de interferencias entre los diferentes caminos. Esta solución se conoce como suma coherente de caminos y está basada en el conocimiento de las fases que presenta la señal al propagarse por cada uno de los caminos acústicos. Si el sonido es dispersado por procesos aleatorios (superficie con oleaje, ondas internas, nubes de burbujas, partículas en suspensión, etc...), la diferencia de fase entre los múltiples y diferentes caminos, no es bien conocida; en estas situaciones es más realista trabajar con las intensidades de las señales que viajan por los diversos caminos y sumarlas. Este tipo de **solución "incoherente"** proporciona soluciones más "suaves" de los valores de pérdidas por propagación que los dados con soluciones coherentes. La explicación reside en que se han quitado las fases con lo que desaparecen todos los patrones de interferencia. Estas soluciones hacen que los modelos sean más simples, pero puede ocurrir que no sea factible detectar efectos importantes como las convergencias. Esta es la razón por la que los modelos que usan soluciones de la ecuación de ondas, excepto las de los modos normales, sólo utilicen soluciones coherentes, que son por otro lado las únicas soluciones. Los resultados "incoherentes" se obtienen de las anteriores por procesos de suavizado. Chernov, [5], con su libro ya clásico, aporta una visión completísima sobre toda esta serie de problemas derivados de la aleatoriedad del medio en entornos como el de aguas poco profundas.

### 3.6. Modelos y Métodos

Existen varios modelos que ayudan a entender los procesos de propagación de la señal en Aguas Poco Profundas. Todos los modelos tienen ventajas e inconvenientes. En lo que sigue vamos a intentar presentarlos, eso sí ciñéndonos a aquellos que pueden ser de utilidad en el entorno que nos interesa. Creo de mayor interés acudir a alguno de los trabajos citados al final, pues en ellos se explicitan con precisión las características (incluidas ventajas e inconvenientes) de los modelos que citamos brevemente en lo que sigue.

En general los modelos que son útiles en el entorno que interesa son modelos basados en soluciones a la ecuación de ondas. Estas aproximaciones incluyen los efectos de difracción introducidos por la pequeña profundidad del entorno frente a la longitud de onda..

Hay que recordar que aunque los modelos pueden agruparse bajo similares encabezamientos, no quiere decir que todos los modelos así agrupados proporcionen las mismas soluciones (predicciones) a un mismo problema.

El modelo más simple es el de una fuente que radia a una única frecuencia.. Si la fuente radia varias frecuencias, los modelos proporcionan soluciones corriéndolos, sucesivamente, a las frecuencias de interés y combinando sus resultados y simulando así, el efecto de una fuente radiando en una banda finita; mas adelante se discuten los problemas que pueden presentarse. Otros modelos permiten, de una sola vez, predecir los efectos, en la propagación, de una fuente radiando en una banda finita de frecuencias. Si el rango de las frecuencias empleado es una pequeña fracción de la frecuencia media, entonces son aplicables técnicas de perturbación para ver el efecto del ancho de banda. Estos resultados sugieren que el efecto de la interferencia que aparece en el caso de una única frecuencia de radiación puede promediarse (suavizarse), y desaparecer, como consecuencia de la modelización a varias frecuencias.

### 3.6.1. Modos Normales

En esta aproximación la parte vertical de la ecuación de ondas se resuelve por métodos numéricos que proporcionan los valores propios de la ecuación o números de onda horizontales, así como las funciones propias o modos.

Las condiciones en los límites: superficie y fondo, indican que esta ecuación tendrá soluciones discretas (números de ondas discretos), que corresponden a los números de onda para los que aparecen ondas estacionarias verticales. Dadas la estructura de la velocidad del sonido y la densidad en la superficie y fondo marinos es posible resolver numéricamente la ecuación de ondas vertical, proporcionando el número total de modos, los valores propios o números de onda horizontales y las funciones propias o soluciones de los modos. Se requiere una normalización de los modos: si un modo se multiplica por sí mismo y el resultado se integra para todas las profundidades, el resultado es la unidad. Este es el proceso de normalización de los modos y el porqué se denomina este modelo, Modos Normales.

En el caso de entornos dependientes del 'alcance' (distancia), la teoría de los modos normales puede emplearse, con más facilidad, acudiendo a la aproximación adiabática. Esta aproximación supone que la energía sonora que acompaña a un determinado modo cuando sale de la fuente, solo desaparece de este modo debido a pérdidas en la superficie y en el fondo. La energía no 'salta' de un modo a otro. Este tipo de transferencia de energía, acoplamiento, sólo tiene lugar cuando el entorno cambia con la distancia, aunque este cambio es despreciable si el ritmo del cambio de los parámetros que interesan, es pequeño. Cual es el máximo valor de ese ritmo de cambio para que el acoplamiento entre modos siga siendo despreciable, no tiene una respuesta fácil y depende principalmente de la frecuencia. Por tanto la aproximación adiabática en un entorno preciso será válida a una frecuencia pero no a otra.

Los modos normales tienen ciertas ventajas: informan de datos más allá de los valores de la presión total del campo acústico, permiten una descripción del fondo en función de sus parámetros geoacústicos sin limitarse a unas simples pérdidas por reflexión en función del ángulo, el modelo es válido a cualquier frecuencia estando sólo limitado por el dispositivo de cálculo, y memoria, que lo soporta, una vez los modos se han calculado pueden ser empleados para repetir cálculos de pérdidas por propagación con configuraciones de fuente y receptor distintas, y los efectos de las ondas transversales pueden ser incluidos en el cálculo. Por otro lado la mayor dificultad que arrastra este modelo resulta de que sólo puede predecir los efectos presentes en los modos atrapados, o sea los que se propagan con ángulos inferiores al crítico, sobre el fondo marino; esto representa una gran dificultad en el caso de aguas muy poco profundas pues los errores, en la estimación del campo acústico, a distancias muy cortas, en las que la penetración en el fondo puede ser muy importante. Existen modelos modificados ('mode-based models') que consiguen, parcialmente, evitar estos problemas.

Sobre Modos Normales, veanse las referencias, [6, 7,y 9].

### 3.6.2. Modos Acoplados.

Las limitaciones implícitas en la aproximación adiabática se soslaya con los 'Modos Acoplados'. La solución se encuentra como en los Modos Normales, obteniendo los números de onda y las formas de onda. El cálculo de los modos se lleva a cabo repetidamente, cada vez para cada tramo constante, ya que un entorno dependiente de la distancia es equivalente a una serie de tramos (entornos escalonados) independientes de la distancia. La propagación desde la fuente a la interfase entre el primero y el segundo tramos de entorno, se calcula partiendo del primer conjunto de formas de onda, de números de onda y de atenuaciones. En la interfase se calculan las ecuaciones integrales que proporcionan, como solución, el nivel de acoplamiento entre modos. Este acoplamiento se refiere a la cantidad de energía que va desde un modo en el primer tramo de entorno, a otro modo en el segundo entorno. Recordemos que en la Aproximación Adiabática esta transferencia se hacía cero (modos distintos) y la unidad para modos iguales. La propagación del sonido desde la interfase hacia delante se calcula, entonces, usando el segundo set de modos, con el coeficiente de acoplamiento que da las amplitudes iniciales del segundo conjunto de modos en el punto de inicio del segundo tramo de entorno. Este proceso se repite para cada interfase, [7].

La dependencia con la distancia implica considerar también, la energía que se propaga 'hacia atrás'. Esta energía, es, en la mayoría de los casos, nula o muy pequeña. Sí se quiere introducir hay que definir dos conjuntos de modos acoplados uno viajando de la fuente al receptor y otro en dirección contraria. Las ecuaciones resueltas calculan el campo global incluyendo el campo retro-difundido (backscattered)..

Las ventajas de estos métodos son las señaladas para los Modos Normales. Sus inconvenientes, la gran cantidad de tiempo de cálculo requerido para obtener soluciones.

### 3.6.3. Teoría 'Fast Field.'

Es esta una solución para entornos independientes del alcance, en los que los parámetros representativos sólo pueden variar en profundidad y de tal manera que sea factible calcular, analíticamente, el campo acústico en función de los números de onda. Esta integración se consigue primero, dividiendo el entorno en una serie de capas en las que la velocidad del sonido (compresional y transversal), densidad y atenuación, varían linealmente con la profundidad, o son independientes de ella. El campo, función del número de onda, se convierte en el campo función de la distancia a través de la estimación numérica de la Transformada de Hankel. Este proceso es, con frecuencia, bastante difícil cuando se ha de integrar en el campo complejo cuyos contornos han de ser cuidadosamente seleccionados, [6]. Es un modelado que requiere un alto grado de experiencia.

Como ventajas citamos: los errores vienen delimitados por la precisión de la solución numérica de la Transformada de Hankel, el método es aplicable a cualquier frecuencia aunque las limitaciones en tiempo de cálculo y en memoria pueden restringir esta aplicación, en el caso de aguas muy poco profundas, a las bajas o muy bajas frecuencias, a las que los efectos de las ondas transversales se pueden evaluar sin limitación. Como inconveniente más importante señalamos el estar restringido a los entornos no dependientes del alcance, así como el alto grado de expertización requerido en el usuario, [7, 11]

### 3.6.4. Ecuación Parabólica.

Se supone que el campo acústico puede dividirse en dos partes: una que varía con la distancia y otra que lo hace con la profundidad y con la distancia pero, con ésta, muy lentamente. Así se define la hipótesis de partida en el Modelo de la Ecuación Parabólica. La parte del campo acústico que es independiente de la profundidad es la función de Hankel que contiene las variaciones, a escala de una longitud de onda. Con frecuencia se aproxima por una onda cilíndrica. La parte del campo que varía lentamente con la distancia contiene variaciones en escalas mayores que una longitud de onda. El campo acústico, viene así expresado por

$$p(r, z) = u(r, z)H_0^{(1)}(\xi_0 r) \quad [5]$$

donde  $p(r, z)$  es la presión función de la distancia y de la profundidad,  $\xi_0$  el número de onda horizontal dado por el cociente de la frecuencia angular de la fuente, dividida por una velocidad del sonido (referencia) en el medio,  $H_0^{(1)}$  es la función de Hankel de primera especie, Se puede encontrar una ecuación para  $u(r, z)$  y una ecuación con solución aproximada, haciendo la hipótesis de que el sonido se propaga según un determinado ancho de haz alrededor de la horizontal.. Esta ecuación aproximada se conoce con el nombre de Ecuación Parabólica, [6, 7, 8].

Diferentes autores emplean diferentes métodos de solución. Todos ellos, sin embargo, especifican la presión acústica, función de la profundidad, en la fuente, como función de partida (por ejemplo es usual comenzar con una distribución gaussiana de presiones, centrada en la posición de la fuente). La solución numérica de la Ecuación Parabólica toma este campo inicial como una función de la profundidad y calcular el campo, función de la profundidad, a una pequeña distancia de la fuente. El proceso de cálculo de soluciones se puede repetir, a su vez, hasta que el campo, función de la profundidad, se calcula a todas las distancias de interés. Es lógico que la precisión en la solución dependa del número de puntos en los que se necesita una solución; este número de puntos debe de ser lo suficientemente numeroso para que se muestreen bien aquellas partes del campo que varían más rápidamente.

El método de la Ecuación Parabólica, presenta unas ciertas ventajas: la velocidad del sonido así como las propiedades del fondo pueden variar con la distancia sin que por ello la técnica implícita en la obtención de la solución, se altere; el fondo marino puede describirse con mucho detalle, incluso algunas soluciones incluyen la propagación 'shear'; la solución es técnicamente aplicable a cualquier frecuencia siempre que lo permita el tiempo de cálculo y la memoria disponible. Los inconvenientes que se pueden citar en el caso de aguas muy poco profundas, giran alrededor de la hipótesis de que el sonido se 'mueve' en una posición muy próxima a la horizontal, lo que induce errores importantes a distancias cortas en las que la interacción con el fondo es notable dado que la radiación no abarca hasta el ángulo crítico; también la apertura angular en un caso concreto de solución parabólica, no es, a veces, fácil de expresar lo que significa que los límites del modelo son difíciles de definir; la precisión de los resultados depende del muestreo en profundidad y en alcance, y dado que la solución no se conoce a priori, será necesario correr el modelo sucesivas veces para asegurar la debida convergencia.

### 3.6.5. Métodos por Elementos Finitos.

En este tipo de modelización, el entorno se subdivide en un gran número de entornos más pequeños en los que los parámetros que lo definen varían de una manera especificada. Cada elemento tiene un número de 'nodos' en los que se calcula la presión acústica. El campo acústico se supone que varía de una manera simple y sencilla entre nodos, de modo que la presión en un nodo se puede relacionar con la presión en los otros nodos a través de una ecuación matricial. Las soluciones numéricas de esta ecuación matricial proporcionan la presión en todos los nodos, siempre que el campo en la fuente sea un dato de entrada.

Son numerosas las soluciones: diferentes formas de elementos, y diferente número de nodos por elemento. También contribuye a esta diferencia el tipo de función sencilla que modeliza la variación de los parámetros acústicos y medio ambientales entre elementos. Es posible incluir también ondas transversales a expensas de incrementar el número de ecuaciones, lo que a su vez alarga el tiempo cálculo.

Como en todos los demás modelos conviene reseñar las ventajas e inconvenientes. Las ventajas son varias: una primera, muy útil para el caso de aguas poco profundas es que el método es válido tanto para entornos dependientes de la distancia como para entorno no dependientes de la distancia; El fondo marino se puede describir con todos sus parámetros geoacústicos, incluyendo propagación de ondas transversales; la precisión depende sólo del tamaño del elemento por lo que es posible conseguir soluciones muy precisas. Como inconvenientes hay que citar el ya señalado con la Ecuación Parabólica y es el referido a el número de elementos a considerar, por lo que será necesario correr el programa varias veces

hasta adecuar la solución a la convergencia buscada; el modelo es, bajo el punto de vista de cálculo, muy intenso, lo cual puede ser un factor que restrinja su uso en investigación, [6, 7].

### 3.6.6. Métodos Empíricos

Se sabe que es muy difícil de predecir la propagación sonora en aguas poco profundas y para determinadas bandas de frecuencia (función en muchos casos de esa poca profundidad). En algunos momentos ningún modelo proporciona soluciones, aproximadas, adecuadas. En estos casos es conveniente recoger tantas medidas de pérdidas por propagación, como sea posible, junto a la información correspondiente de los parámetros característicos del entorno. Esta colección de datos proporciona soluciones empíricas para las pérdidas por propagación. Por ejemplo estas expresiones pueden modelar las pérdidas de una manera simple como es el caso de una propagación cilíndrica, por tanto pérdidas asociadas a este tipo de propagación a las que se puede añadir un término que especifique la atenuación con la distancia además de un valor de partida. El valor de partida y el de la atenuación se obtienen por regresión en los datos experimentales. Por ejemplo la atenuación puede ser descrita como una función polinomial dependiente de la velocidad del viento, profundidad y frecuencia. Como se vé parámetros muy definitorios en el caos de aguas muy poco profundas.

Las ventajas inherentes en los modelos empíricos pueden cifrarse en: el estar basados en datos reales y por lo tanto garantizan que son tan precisos como lo sean los procesos de regresión, sobre esos datos experimentales concretos, y en las situaciones en las que se han obtenidos esos datos; otro punto favorable a estos modelos es que, en general, proporcionan funciones matemáticas muy simples y por lo mismo requieren poco tiempo de cálculo, Como inconvenientes habría que citar, entre otros: la poca, a veces nula, aportación a comprender la física de la propagación sonora en el mar, lo que es más verdadero en condiciones de aguas muy poco profundas; estos métodos ignoran los parámetros físicos que no se consideraron en la producción del modelo; por último hay que resaltar la imposible extrapolación de unos resultados a circunstancias diferentes, incluso aunque el conjunto de datos experimentales sea excepcionalmente grande.

### 3.6.7. Modelos de Rayos.

Los modelos de rayos sólo son eficaces cuando se contemplan altas frecuencias. En el caso de aguas poco profundas o muy poco profundas son necesarios desarrollos de aplicación civil. Con aplicaciones militares se han desarrollado algunos, entre ellos el propuesto por Weinberg y Keenan, [12]. Este modelo, GRAB, específico para altas frecuencias, se ha reclamado eficaz hasta en frecuencias del orden de 500 Hz, [13]. El enfoque de estos nuevos modelos de rayos reside en el tipo de radiación, que se considera formada por un haz de rayos con distribución gaussiana. De este tipo de radiación se derivan las ventajas como es el suavizado en las caústicas (valor infinito con los modelos clásicos), y un adecuado tratamiento de las reflexiones en los límites usando el concepto de rayos virtuales, lo cual es particularmente muy ventajoso en aguas muy poco profundas.

## 3.7. Carencias y líneas necesarias de investigación

En el caso de aguas poco profundas se identifican algunos tipos de problemas provenientes de unas determinadas carencias en el conocimiento del medio y entendimiento de los procesos que aparecen en la propagación sonora. Este hecho es mucho más evidente en aguas muy poco profundas.

### 3.7.1. Pérdidas por reflexión en la superficie marina

La carencia de una expresión para las pérdidas por reflexión en la superficie, expresión que sea bien comprendida y al mismo tiempo ampliamente usada, es uno de los grandes problemas en el modelado de la propagación sonora en el mar. Existen numerosas expresiones pero ninguna aporta una razón obvia para que ella sea preferida a cualquiera otra. El problema de modelar la reflexión del sonido sobre una superficie con rugosidad random es muy difícil. Incluso el cálculo de la rugosidad de la superficie marina, función de un determinado set de parámetros es, en general, problemática.

### 3.7.2. Descripción del entorno de aguas poco profundas

Una importante fuente de desacuerdo entre las predicciones de los modelos y los resultados experimentales es la falta, cuantitativa y cualitativa, de detalle en los datos, disponibles, de entrada. La única solución ha de venir de modelos mejorados y de base de datos, oceánicos y geoaústicos, de calidad contrastada superior a las disponibles en estos momentos.

### 3.7.3. Descripción del fondo marino.

Este comentario es válido para cualquier tipo de entorno tanto de aguas poco profundas como de aguas muy poco profundas. La estructura del fondo marino no está tan bien conocida como lo es la de la columna de agua. Este desconocimiento implica modelar las pérdidas, en el fondo, con, a veces, alta imprecisión.

### 3.7.4. Comparación entre modelos

Aunque existen 'benchmarks' utilizables en entornos idealizados, [10], no hay, sin embargo, datos de comparaciones de modelos en entornos muy bien definidos experimentalmente y con parámetros valorados con precisión. Esto deberá hacerse con asiduidad de modo que los modelos se puedan comparar con la 'verdad' al mismo tiempo que se comparan entre ellos. Las buenas predicciones han de provenir no sólo de soluciones precisas de la ecuación de ondas, sino también de datos experimentales altamente fiables. Si esto último no ocurriera, los modelos no tendrán, nunca, oportunidad de representar la realidad de modo válido.

La comparación entre modelos implica obtener una valoración numérica que defina su discrepancia o su coincidencia, sin embargo este valor numérico no es obvio. Una medida numérica ideal podría estar basada en como se hacen las predicciones de pérdidas, por ejemplo a una determinada distancia. Dado que las estimaciones de pérdidas se hacen acudiendo a un extenso abanico de formas, esto significa que es necesario disponer de muchas y diferentes medidas. Una selección adecuada de estas medidas podría significar un paso importante en la comparación de distintos modelos.

### 3.7.5. Modelos Tridimensionales.

En algunos entornos los procesos de reflexión y refracción horizontal, aunque no son del todo bien conocidos, pueden requerir el ser modelizados. Las aguas poco profundas posiblemente presenten fenómenos de esta naturaleza, o parecida, en especial cuando se está cercano a la zona de rompientes; las nubes de burbujas no están distribuidas uniformemente en la zona y la menor velocidad de propagación del sonido hacen plausible la hipótesis de fenómenos de reflexión/refracción horizontales. Los modelos Nx2D se usan, con mucha frecuencia, como un paso intermedio aunque su validez como función de parámetros ambientales y de la frecuencia, no ha sido concluida explícitamente. Hay que puntualizar, que fuera de ciertos fenómenos las soluciones 2D parecen, por el momento suficientemente válidas, y esto a pesar de que el océano muestra una estructura claramente tridimensional.

### 3.7.6. Métodos Estocásticos.

El modelado estocástico de la propagación sonora frente a los modelos determinísticos está mucho menos desarrollado. Las curvas de pérdidas (generalmente frente a la distancia) no presentan ningún tipo de barras de error. Estos errores pueden proceder bien de errores en los valores de los parámetros medioambientales, o bien pueden ser de naturaleza aleatoria. Deberá, por tanto, intentar especificarse qué tipo de error existe y cuantificarlo, junto a los resultados de las pérdidas.

### 3.7.7. Señales de banda finita

Muchos modelos tratan las transmisiones como procedentes de fuentes que radian señales continuas formadas por un tono puro. Esto es una entelequia evidentemente. Las señales reales radiadas por cualquier (la mayoría) sistema sonar es más bien una señal de banda finita y pulsada. Es importante incorporar en los modelos este tipo de señales. En aguas poco

profundas aprenderíamos mucho de la respuesta del medio, tan especial, a señales específicas.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha dado una definición de aguas poco profundas dictada, únicamente, por criterios operativos tanto de Defensa, como de actividad humana y económico-industrial. En cualquier caso las aguas muy poco profundas tienen características que las diferencian de las aguas poco profundas.

Las aguas muy poco profundas conforman un entorno complejo cuando se considera la propagación de señales acústicas a su través. El fondo, en primer lugar, la superficie con su oleaje y la poca profundidad son los factores determinantes y limitativos de la transmisión sonora en esas aguas.

La modelización de la propagación puede ser enfocada desde muy diversos modos. Cada uno de ellos resuelve la ecuación de ondas siguiendo unos criterios que obedecen a simplificaciones válidas en determinadas circunstancias. Ningún modelo por sí solo es capaz de proporcionar una representación completa. Para que esto sea posible es necesario acudir a distintos modelos dando distintas soluciones, e incluso, en esos, casos, la solución no será representativa del todo ya que es necesario aportar, al o a los modelos, los datos del entorno, que no siempre son fáciles de estimar muy en especial en las zonas cercanas a rompientes.

Se han identificado, sin carácter exhaustivo cómo es lógico, algunas de las carencias que se observan en los Modelos actuales.

#### 5. REFERENCIAS

- [1]. A.R. Robinson and D. Lee. " *Oceanography and Acoustics. Prediction and Propagation Models*". American Institute of Physics. N.Y. 1994
- [2] R.J. Urick. " *Ambient Noise in the Sea*". Naval System Command. Washington DC 20362. 1984.
- [3]. T. Akal. " *Ocean Seismo-Acoustics*" in " *Acoustics and Ocean Bottom*". Eds A. Lara, C. Ranz y R. Carbó. CSIC. Madrid, pp 155-171. 1987.
- [4]. V.V. Ol'shevskii. " *Characteristics of Ocean Reverberation*". Consultants Bureau. N.Y. 1967.
- [5]. L. Al Chernov, " *Wave Propagation in Random Medium*" Dover Publication, N.Y., 1972.
- [6]. P. C. Etter. " *Underwater Acoustics Modelling. Principles, Techniques and Applications*". Elsevier Applied Science. N.Y. 1991.
- [7]. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter y H. Schmidt. " *Computacional Ocean Acoustics*". American Institute of Physics. N.Y. 1993.
- [8]. D. Huang. " *Finite Element Solution to the Parabolic Equation*". JASA, 84, pp 1405-1413. 1988.
- [9]. R. J. Urick. " *Sound Propagation in the Sea*". Península Publishing. Los Altos Calif. 1982
- [10]. E. A. Skelton, y J. H. James. " *Acoustic Finite Elements*" in " *Theoretical Acoustics of Underwater Structures*". Imperial College Press. 1997.
- [11]. F. R. DiNapoli and R. L. Deavenport, " *Theoretical and Numerical Green's function solution in a plane layered medium*". JASA, 67, pp. 92-105, 1980

[12]. H. Wienberg y R. E. Keenan. "*Gaussian Ray bundles for modelling high frequency propagation loss under shallow water conditions*". JASA 100, pp 1421-1431, 1996.

[13]. T. Akal y F. B. Jensen. "*Acoustic Propagation in Littoral and Very Shallow Waters*". Paper presented at the "New Concepts for Harbour protection , Littoral security and Shallow Water Acoustic Communication". Eds. T. Akal. W. A. Kuperman, S. E. Ramberg y K. B. Smith. Estambul, Julio 2005.