

Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (I)

Joaquín Aparicio, Enrique García; Ana Jiménez; Fernando Álvarez†; Jesús Ureña
Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá
†Departamento de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad de Extremadura

En este artículo se describe la propagación de las señales acústicas en entornos subacuáticos, en los cuales las mismas cobran una importancia análoga a la radiofrecuencia en aire. En esta primera parte se abordará una breve revisión histórica, los parámetros fundamentales de los que depende la propagación acústica en el agua y diversos modelos existentes que estudian dicha propagación. En una segunda parte se verán otros mecanismos que afectan a la propagación de las ondas acústicas en el agua, y se mostrarán diversas simulaciones de la propagación acústica bajo diferentes condiciones.

1. Introducción.

En las últimas décadas ha cobrado especial importancia el empleo de las señales acústicas en medios subacuáticos, debido a la necesidad de monitorizar diversos sensores medioambientales, controlar robots sumergidos con cierto grado de libertad, el uso del sónar, etc. Ya que la utilización de cables no es económica o práctica de forma general en este medio, las comunicaciones inalámbricas, y más concretamente las acústicas, ha sido la solución más empleada para solventar esta restricción.

El medio subacuático presenta unas propiedades que favorecen especialmente el empleo de ondas acústicas en lugar de las ondas electromagnéticas. Las ondas electromagnéticas experimentan una atenuación muy elevada en el agua, del orden del $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$ para una frecuencia de 30 kHz, mientras que una onda acústica a esa misma frecuencia presenta una atenuación del orden del $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Por otra parte, las frecuencias ópticas se encuentran tan afectadas por el *scattering* y la dispersión que el medio se vuelve opaco más allá de distancias superiores a 200 metros para estas frecuencias [1]. Debido a estos problemas, el uso de las ondas electromagnéticas en el agua se encuentra muy restringido.

En general, el medio subacuático presenta unos efectos muy parecidos al atmosférico: atenuación y absorción de la señal por el medio, la presencia de ruido, la variabilidad espacial y temporal que presenta, efecto Doppler, capas de burbujas, corrientes internas y muy especialmente el multicamino. Estos mecanismos provocan que la señal pueda llegar al receptor bastante degradada.

2. Breve revisión histórica

De forma general, se considera que el precursor de la investigación de la propagación acústica en el agua es Leonardo da Vinci, que ya a finales del siglo XV sentó las bases para un rudimentario sónar pasivo (basado en la recepción de una señal generada por el objetivo, no un eco). La idea de Leonardo da Vinci, era que si una persona viaja en un barco y éste se para en mitad del mar, colocando un extremo de un tubo lo suficientemente largo en el agua y acercando el oído al otro extremo, se podrían escuchar barcos distantes [2].

Años más tarde, en 1827, se midió la velocidad del sonido en el agua mediante un experimento realizado en el lago Geneva por el físico Daniel Colladon y el matemático Charles François Sturm. Para ello se generaron dos señales simultáneas: un destello luminoso y el sonido de una campana sumergida, y se midió el intervalo de tiempo entre la observación de ambas recepciones. Este experimento permitió estimar la velocidad del sonido en el agua en $1435 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para una temperatura de 8°C [3].

Dentro del siglo XIX habría que destacar también la contribución que tuvieron los avances en otros campos, como el descubrimiento del efecto de magnetostricción en 1840 por James Joule, y del efecto piezoeléctrico en 1880 por Pierre y Jacques Curie [2]. Estos efectos permitirían generar ondas acústicas de un contenido espectral específico.

En el siglo XX se produjeron varios avances relacionados con las Guerras Mundiales. En la Primera Guerra Mundial se utilizaba todavía un sónar basado en la idea de Leonardo da Vinci, pero modificado con un segundo tubo para discriminar mejor la dirección de llegada de las ondas acústicas. Durante esta guerra se comenzaron a desarrollar los primeros experimentos encaminados a un sónar activo, es decir, basado en el reconocimiento del eco producido por la señal acústica en un objeto. Se llegaron a detectar ecos de submarinos a distancias de un kilómetro y medio [2].

En 1919 se publica el que se considera el primer artículo de investigación sobre acústica subacuática. El autor fue H. Lichte, y estudiaba la influencia de capas horizontales de distinta temperatura en la propagación de las ondas acústicas [2].

En 1945 se desarrolló uno de los primeros sistemas de comunicación subacuática, que se empleaba en submarinos y tenía un alcance de varios kilómetros de distancia. Empleaba una modulación en banda lateral única y un rango de frecuencias entre 8 y 11 kHz [4].

A partir de este punto, y más tarde con el desarrollo de la tecnología VLSI (*Very-Large-Scale Integration*) en circuitos integrados y la aparición de los DSP (*Digital Signal Processor*), se comienza a experimentar con distintas modulaciones, ecualizaciones y proceso de corrección de errores que fueron mejorando progresivamente el rendimiento de estos sistemas.

A principios de los años 70, C.S. Miller y C.E. Bohman emplearon el salto de frecuencia como medida para disminuir los efectos provocados por el multicamino, utilizando además una modulación en fase combinada con una modulación en frecuencia [5]. De entre todos los efectos presentes, se identificaba al multicamino como la principal dificultad a la hora de establecer una comunicación. Este efecto es más notable en transmisiones a lo largo del eje de distancias, puesto que aparecen más rebotes que en una transmisión en el eje de profundidades. La Figura 1 representa una situación donde se realiza una propagación en el eje de distancias, y en la que aparecen distintos caminos que puede seguir la señal hasta el receptor (camino directo, un rebote en el fondo, etc.), formando así el multicamino.

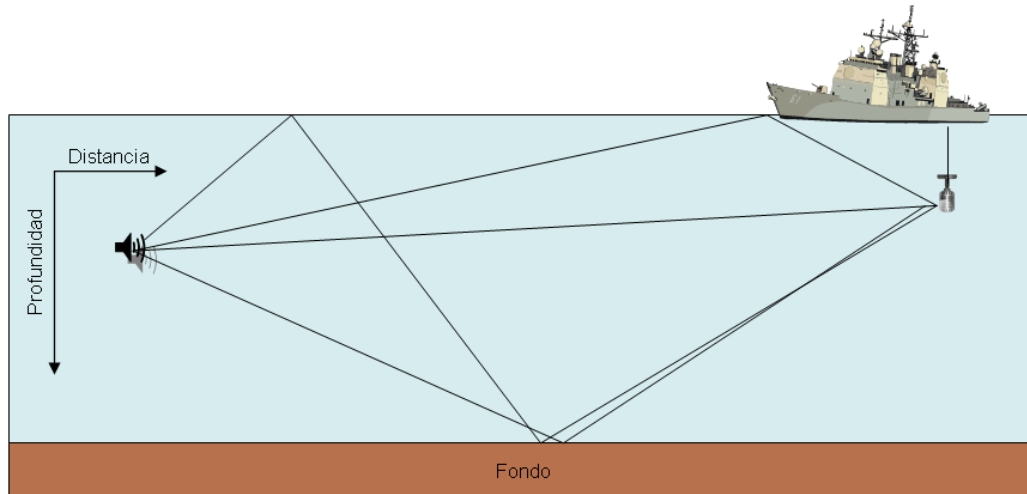


Figura 1. Representación del multicamino

Las velocidades de transmisión alcanzadas durante la década de 1980 rondaban el kilobit por segundo, en experimentos realizados mediante modulación en frecuencia o modulación en fase, como los recogidos en [6] o [7].

En la década de los 90 se comienza a generalizar el uso de la modulación en fase en detrimento de la modulación en frecuencia. En 1992, empleando esta modulación, se alcanzan velocidades de 16 kbps en una transmisión a lo largo del eje de profundidades [8]. En 1994 R. Galvin y R.F.W. Coates desarrollan un sistema que alcanza velocidades de 10 kbps para una transmisión en el eje de distancias, donde el emisor y el receptor están separados 2 km [9]; en el caso de situar el receptor a 900 m del emisor, la velocidad de transmisión era de 20 kbps. Y un par de años más tarde, en 1996, el Instituto Oceanográfico de Woods Hole desarrolla un sistema que alcanza cotas de 40 kbps para una distancia de 2 km [10].

A partir de este punto las distintas contribuciones no consisten tanto en aumentar la velocidad, sino en emplear otras configuraciones. Por nombrar algunos ejemplos, en 1999 aparece un sistema desarrollado por E.M. Sozer *et al.* basado en la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (*Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS*) [11]. En 2004 D. Kilfoyle utiliza la técnica de modulación espacial (*spatial modulation*) y un receptor multiusuario que aprovecha la variabilidad espacial del multicamino, consiguiendo incrementar la capacidad del canal entre dos y tres veces [12]. Comienzan a aparecer cada vez más estudios para implementar redes de sensores subacuáticos, como el publicado por Akyildiz *et al.* en 2005 [13], y aparecen otras posibilidades para la modulación, como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [14]. En 2007, S. Roy *et al.* proponen la codificación espacio-temporal (*space-time coding*) junto a una ecualización iterativa, obteniéndose velocidades de 48 kbps [15].

3. Parámetros fundamentales de la propagación acústica subacuática.

La velocidad del sonido y las pérdidas de transmisión son los dos parámetros fundamentales en lo que respecta a la propagación de una onda acústica en un medio subacuático. La variación de la velocidad del sonido con la profundidad determinará lo que se conoce como “perfil de la velocidad del sonido”, que según su forma favorecerá la propagación de la onda acústica de una manera particular. Las pérdidas de transmisión vienen dadas por los distintos factores que atenúan la onda acústica en su recorrido por el medio subacuático.

3.1 Velocidad del sonido

De forma rigurosa, la velocidad del sonido se obtiene a partir de la ecuación de ondas lineal [1], y su valor es el que aparece en la ecuación (1):

$$c^2 = \gamma \frac{\beta_T}{\rho_0} \quad (1)$$

Donde c es la velocidad del sonido en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, γ es el índice adiabático, β_T es el módulo de compresibilidad isotérmico y ρ_0 la densidad de equilibrio. A su vez, estas tres magnitudes son función de la temperatura y de la presión del agua.

Obtener una expresión donde queden reflejadas de forma clara estas variaciones es complicado, de forma que lo habitual es expresar la velocidad del sonido mediante expresiones semi-empíricas, que dependerán entonces de las medidas realizadas, existiendo un amplio número de ecuaciones. Por ejemplo, una ecuación para el agua destilada es la expresada en la ecuación (2) [1]:

$$c(P, t) = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2) \left(\frac{P_G}{100} \right) \quad (2)$$

Donde c es la velocidad del sonido en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $t = T/100$, donde T es la temperatura en grados Celsius, y P_G es la presión de gauge expresada en bares, donde un valor igual a

0 bar indica una presión de equilibrio de 1.01325 bar (1 atm). Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 100°C, y presiones de gauge entre 0 y 200 bar.

El medio subacuático más utilizado en la propagación de las ondas acústicas es el océano (o los distintos mares), y por ello se hablará por defecto de fondo marino o fondo oceánico, así como de superficie del mar, aunque los resultados se pueden extrapolar a otros medios subacuáticos. El agua de mar es distinta de la destilada en lo que respecta a las variables que influyen en la velocidad del sonido, introduciendo otro factor más: la salinidad. A lo largo de las últimas décadas, han surgido diferentes ecuaciones para expresar la velocidad del sonido en medios marinos, donde las más importantes son las ecuaciones de Del Grosso y de Chen y Millero. Esta última ecuación fue reconocida por la UNESCO como el algoritmo estándar para calcular la velocidad del sonido para medios subacuáticos [16].

La ecuación de Del Grosso data originalmente de 1974 y se expresa, en su forma corregida posteriormente, según la ecuación (3). Los coeficientes ΔC_i engloban a su vez a otros (un total de 18) que pueden ser función de la temperatura (T), presión (P) y salinidad (S) [16]:

$$c(S, T, P) = 1402.392 + \Delta C_S + \Delta C_T + \Delta C_P + \Delta C_{STP} \quad (3)$$

Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 30°C, salinidades entre 30‰ y 40‰, y presiones entre 0 kg·cm² y 100 kg·cm².

La ecuación de Chen y Millero data por su parte de 1977, y en su forma corregida posteriormente se expresa según la ecuación (4), donde al igual que en el caso anterior, los coeficientes que aparecen engloban a su vez a otros (un total de 42), que pueden depender de la temperatura (T), presión (P) y salinidad (S) [16]:

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P) \cdot S + B(T, P) \cdot S^{3/2} + D(T, P) \cdot S^2 \quad (4)$$

Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 40°C, salinidades entre 0‰ y 40‰ y una presión entre 0 y 1000 bar.

No existe una diferencia apreciable entre los resultados obtenidos por ambas ecuaciones en los rangos de validez donde se solapan. Por ejemplo, se puede estudiar cómo varían las velocidades obtenidas por ambas expresiones cuando se varía la temperatura. Este resultado se muestra en la Figura 2, donde se aprecia que el valor obtenido es prácticamente idéntico. Se obtiene un resultado análogo si se consideran variaciones con la presión o la salinidad.

Una vez que se obtiene un valor para la velocidad del sonido en función de la temperatura, la presión y la salinidad, se puede estudiar cómo varía esta velocidad respecto a la profundidad, para obtener así el perfil de la velocidad del sonido. Para ello, hay que conocer cómo varían la temperatura, la salinidad y la presión respecto a la profundidad.

En general, la variación de la salinidad con la profundidad es despreciable, salvo en regiones específicas como zonas polares o estuarios. La velocidad del sonido varía 1 m·s⁻¹ por cada parte por mil que varía la salinidad, y ésta no suele variar más de 3‰ en una región dada, y 10‰ entre distintos océanos y zonas del mundo. Por otra parte, la velocidad del sonido varía 5 m·s⁻¹ por cada grado Celsius, y 1.6·10⁻⁶ m·s⁻¹ por cada Pascal, donde a su vez, tanto la temperatura como la presión dependen de la profundidad [3]. La variación de la velocidad del sonido con la presión puede parecer despreciable, pero ésta aumenta a un ritmo de 1 atm por cada 10 m de profundidad. A 1 km la presión sería aproximadamente de 100 atm, o lo que es lo mismo, 10132500 Pa, de manera que la velocidad del sonido varía aproximadamente unos 16 m·s⁻¹ en el primer kilómetro [1]; este efecto es notable en los océanos, donde la profundidad puede alcanzar algunos kilómetros.

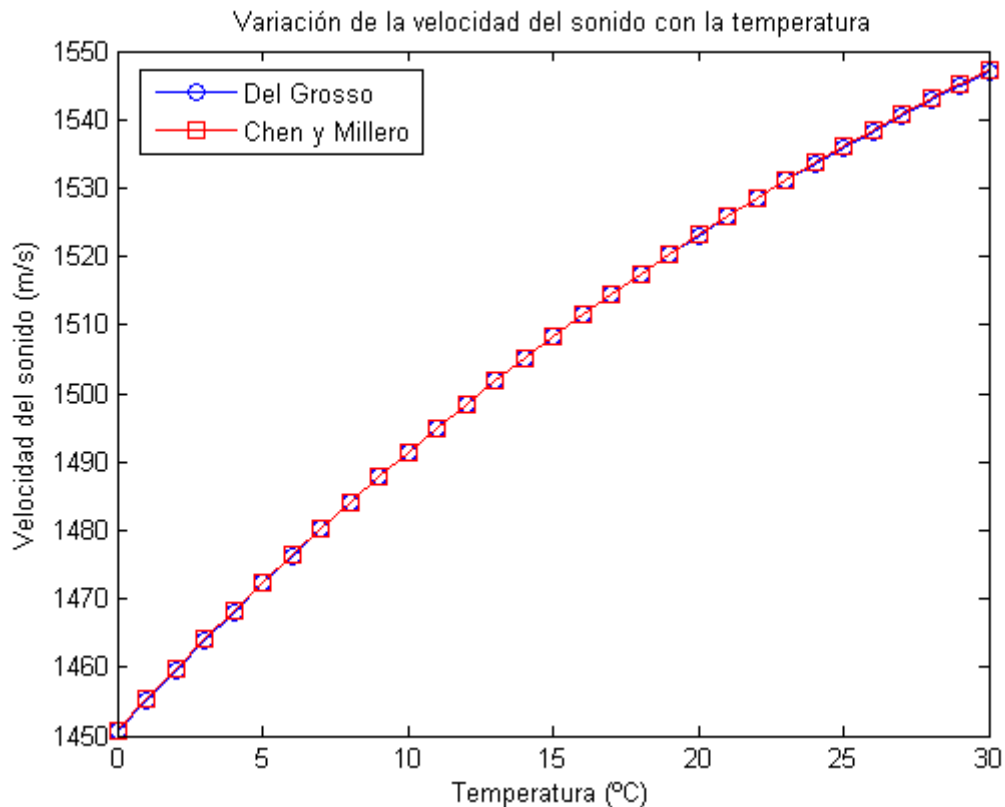


Figura 2. Variación de la velocidad del sonido obtenida por las ecuaciones de Del Grosso y Chen y Millero con la temperatura

Teniendo en cuenta todos estos efectos, se obtiene el perfil de la velocidad del sonido, que para latitudes medias tiene la forma típica dada en la Figura 3. A profundidades elevadas, la temperatura se mantiene prácticamente constante, de manera que como la salinidad apenas varía con la profundidad, los cambios en la velocidad del sonido vienen dados por la variación de la presión con la profundidad. Ésta disminuye a medida que la superficie está más cerca, por lo que la velocidad del sonido disminuye también. En la Figura 3, este comportamiento se da hasta una profundidad en torno al kilómetro, donde se produce un mínimo en el valor de la velocidad del sonido. La región que ocupa desde el fondo oceánico hasta el mínimo, se denomina capa isotérmica profunda.

Para valores menores de esta profundidad, comienza a notarse el efecto de la temperatura, aumentando a medida que se aproxima la superficie del mar, siendo éste efecto más importante que el de la variación de la presión con la profundidad. Esta zona, que se extiende desde los 1000 m hasta una profundidad de 200 m aproximadamente, se denomina termoclina principal, y en ella el efecto de las estaciones es despreciable. Entre los 200 m y los 100 m se tiene una región donde los efectos estacionales sí son apreciables, de manera que la forma del perfil en esta región varía en función de la estación. Esta región se denomina termoclina estacional. Entre los 100 m y la superficie aparece una zona expuesta a los cambios atmosféricos, ya sea el viento o cambios bruscos de temperatura y movimiento de masas de agua. Este movimiento de masas de agua produce una mezcla que hace que esta región pueda considerarse como isoterma, a pesar de los cambios bruscos de temperatura que pueda sufrir. Por ello se denomina capa superficial o de mezcla.

El perfil aquí descrito es válido para latitudes medias, pero de forma general varía con la latitud y las condiciones particulares del lugar. Por ejemplo, en una región polar no se produce el aumento de temperatura a medida que se aproxima la superficie, por lo que la capa isotérmica profunda se extiende hasta la superficie, y en otras zonas, la profundidad del mínimo de la velocidad del sonido puede ser distinta al kilómetro.

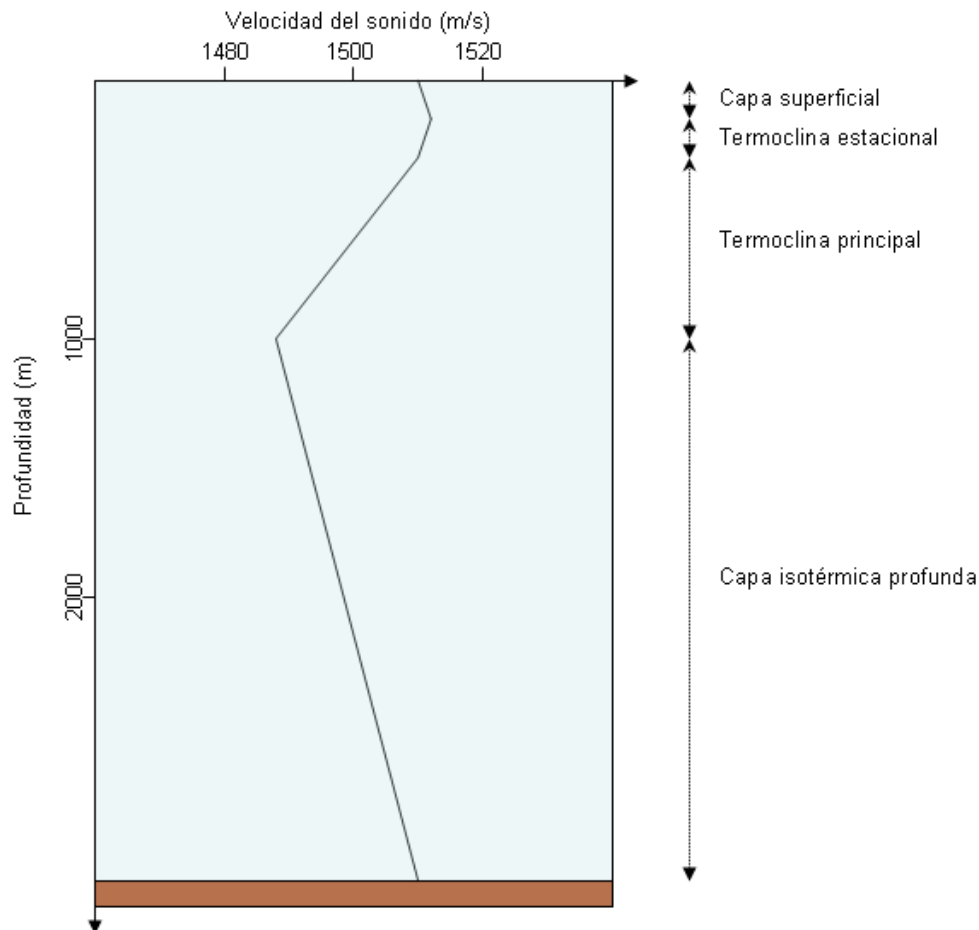


Figura 3. Perfil típico para latitudes medias

Una vez que se conoce la forma del perfil de la velocidad del sonido, se puede determinar cómo se va a propagar la señal acústica por el medio subacuático. Debido al principio de Huygens y dada la forma del perfil de la velocidad del sonido, se forman zonas donde las ondas que surgen de los frentes de onda se propagarán a velocidades distintas en función de la profundidad a la que se encuentren dichos frentes. El efecto neto es la curvatura de la onda acústica hacia la región donde la velocidad del sonido es menor. La forma del perfil de la velocidad del sonido y este efecto de la curvatura de las ondas acústicas hacia las zonas donde esta velocidad es menor, es clave para la aparición de distintos tipos de propagación, tal y como se verá más adelante.

3.2 Pérdidas de transmisión

En la propagación de la señal acústica por el medio subacuático, ésta sufrirá distintas pérdidas debido a tres contribuciones principales: la divergencia geométrica, la absorción del medio y los rebotes producidos en las superficies. Estas pérdidas se engloban en un parámetro denominado pérdidas de transmisión, TL (*transmission loss*).

La divergencia geométrica se produce como consecuencia de la propagación de la onda acústica. La forma natural de propagación de una onda acústica es esférica, y por tanto la energía que transporta la señal se va repartiendo a medida que aumenta la distancia. Sin embargo, cuando la relación entre la distancia a la que se propaga la onda y la profundidad del fondo es tal que la onda queda confinada entre la superficie del mar y del fondo, se considera que la propagación es cilíndrica.

A priori, las pérdidas de transmisión se calculan a partir de la intensidad acústica, aunque es más cómodo utilizar una expresión en función de la distancia. Para una distancia determinada r , las pérdidas de transmisión por divergencia geométrica, si

ésta es esférica, es el doble que si fuera cilíndrica. En concreto, para una divergencia esférica las pérdidas de transmisión, en dB, vienen dadas por (5), y para una divergencia cilíndrica, por (6) [1]:

$$TL_{esf} = 20 \log r \quad (5)$$

$$TL_{cil} = 10 \log r \quad (6)$$

Durante la propagación de la señal acústica, parte de la energía de ésta pasará al medio en forma de calor; este proceso se conoce como absorción por el medio, y consta de dos contribuciones principales: la viscosidad del agua y procesos de relajación. En agua dulce sólo aparece la primera de las contribuciones, mientras que la segunda aparece en agua salada, debido a los procesos de relajación iónica del sulfato de magnesio y del ácido bórico.

Estas contribuciones se recogen en el parámetro denominado coeficiente de absorción, que se expresa de forma semi-empírica, conociendo diversas fórmulas a lo largo de las últimas décadas. Una de las expresiones más utilizadas es la de Thorp (7), que data de finales de los años 60 y es válida hasta frecuencias de algunos kilohercios [17]:

$$\alpha = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f} + 2.75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (7)$$

Donde α tiene unidades de $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ y f es la frecuencia de la señal en kHz. El último término es una corrección que tiene en cuenta la absorción a muy baja frecuencia, siendo esta ecuación válida para temperaturas de 4°C y una profundidad de 900 m, que es donde se tomaron las medidas [2].

Otra expresión más moderna, de principios de los años 80, es la suministrada por Francois y Garrison, válida para frecuencias entre 100 Hz y 1 MHz, y que se expresa según la ecuación (8) [18]:

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (8)$$

Donde α tiene unidades de $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ y f es la frecuencia de la señal en kHz. El primer término proviene de la contribución del ácido bórico, el segundo de la contribución del sulfato de magnesio y el tercero de la viscosidad del agua, f_1 y f_2 son las frecuencias de relajación del ácido bórico y el sulfato de magnesio respectivamente, en kHz, y los coeficientes A_i y P_i pueden depender del pH, la salinidad, la profundidad, la temperatura y la velocidad del sonido.

Mediante la ecuación de Francois-Garrison se ha obtenido la gráfica que se muestra en la Figura 4, donde se representa la variación del coeficiente de absorción con la frecuencia, para el rango comprendido entre 100 Hz y 1 Mhz. Este resultado se ha obtenido para un pH de 8, salinidad de 35‰, temperatura de 5°C y una profundidad de 0 m.

Se puede obtener una conclusión importante a la vista de la Figura 4: para realizar transmisiones a distancias elevadas, del orden de varios kilómetros, habría que emplear frecuencias del orden de decenas de kHz, puesto que en caso contrario la absorción será demasiado grande; para transmisiones a distancias cortas, menores de 1 km, se podrían emplear frecuencias del orden de centenares de kHz.

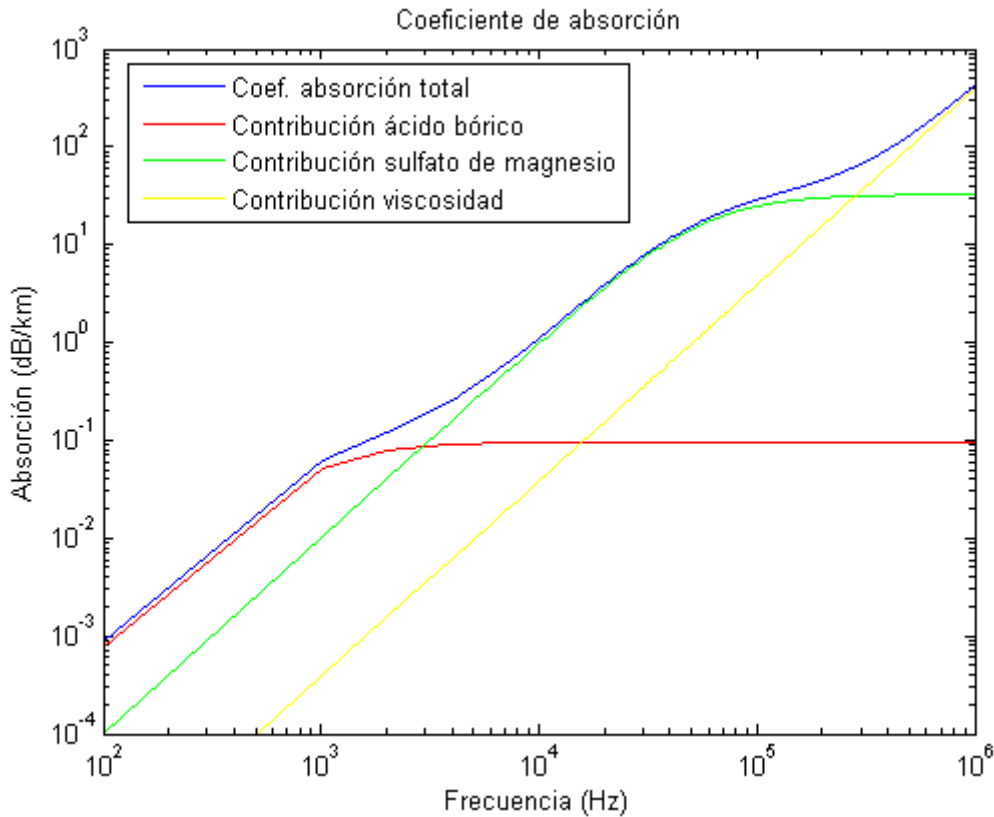


Figura 4. Variación del coeficiente de absorción con la frecuencia

La última contribución a las pérdidas de transmisión se debe a los rebotes de la señal en la superficie del mar o el fondo. En el caso de la superficie del mar, si ésta es totalmente lisa, la reflexión se puede considerar especular y apenas se pierde energía en el proceso. En el caso de que la superficie no sea lisa, parte de la señal se reflejará en direcciones distintas a la que tendría en el caso de una reflexión especular, por lo que se pierde energía. Se suele utilizar el parámetro de Rayleigh, dado en la ecuación (9), para caracterizar la regularidad de la superficie del mar [19]:

$$R = 2ak \sin \theta \quad (9)$$

Donde k es el número de ondas, θ el ángulo de incidencia sobre la superficie del mar, y $2a$ es el valor rms de la altura de las olas, desde su punto más alto hasta el más bajo, considerando un tercio de las olas más altas. Mediante distintos experimentos, se ha podido determinar que para frecuencias inferiores al kHz las pérdidas de transmisión son de 1 dB/rebote, mientras que para frecuencias mayores que 25 kHz, estas pérdidas rondan los 3 dB/rebote [19]. Este aumento en las pérdidas se debe a que a medida que aumenta la frecuencia disminuye la longitud de onda, y por tanto afectarán al rebote irregularidades más pequeñas en la superficie, que en el caso de longitudes de onda mayores pasarían desapercibidas.

Para el caso del fondo marino, el estudio es a priori análogo, aunque resulta más complejo debido a la irregularidad que tiene el fondo en cuanto al terreno y material del que está compuesto. Existen diversos modelos que tratan de reproducir el comportamiento de los rebotes de la señal acústica en el fondo, desde el caso ideal del modelo de Rayleigh a otros como el de Sommerfeld o los geoacústicos. Además del rebote de la señal en el fondo, hay que tener en cuenta la capa de sedimentos sobre éste, que contribuye a la atenuación de la señal.

Teniendo en cuenta todas las contribuciones vistas, las pérdidas de transmisión se pueden expresar según la ecuación (10) para una propagación esférica, o la ecuación (11) para una propagación cilíndrica:

$$TL_{esf} = 20 \log r + \alpha r \cdot 10^{-3} + TL_{reb} \quad (10)$$

$$TL_{cil} = 10 \log r + \alpha r \cdot 10^{-3} + TL_{reb} \quad (11)$$

Donde la distancia r , que es donde se quieren medir las pérdidas (generalmente en el receptor), está expresada en metros, y se ha dejado de forma genérica la contribución de los rebotes, al depender de demasiadas condiciones y modelos para dar una expresión explícita.

4. Modelos de transmisión

Existen diversos modelos matemáticos que estudian la propagación acústica en medios subacuáticos, destacando los modelos de trazado de rayos, modos normales, ecuación parabólica e integración espectral. Sin embargo, la configuración de estos modelos matemáticos requiere de diversos parámetros cuyo valor no siempre es conocido con exactitud, lo que puede conducir a resultados poco fiables. Como consecuencia de este problema, han surgido a lo largo de las últimas décadas diversos modelos semi-empíricos para estudiar la propagación acústica en medios subacuáticos, distinguiendo distintos tipos de propagación. Como la inmensa mayoría de estudios se ha realizado sobre el mar, se hablará por defecto del medio marino, pero los resultados son aplicables a otros tipos de medios subacuáticos con las consideraciones oportunas.

No se va a profundizar en este artículo en los modelos matemáticos, aunque se comentará brevemente a continuación los resultados que proporciona el modelo de trazado de rayos, que es el más versátil y utilizado. El modelo de trazado de rayos se basa en la consideración de que la energía de la onda se puede concentrar en caminos definidos, de manera que se puede pensar en rayos en lugar de ondas. Esta consideración es válida siempre que la amplitud de la onda y la velocidad del sonido no varíen mucho en una longitud de onda, por lo que esta condición se cumplirá mejor para altas frecuencias, ya que la longitud de onda será más pequeña. El modelo de trazado de rayos calcula las ecuaciones que siguen los rayos, así como el campo de presiones que generan, a partir del cual se puede obtener las pérdidas de transmisión, y el tiempo de propagación de dichos rayos.

4.1 Propagación en aguas poco profundas

Cuando la profundidad a la que se encuentra el fondo es tal que se producen múltiples rebotes de la señal entre la superficie del mar y el fondo, se considera que la propagación se está realizando en un entorno de aguas poco profundas. La Figura 1 puede servir como ejemplo gráfico de este tipo de transmisión.

En la propagación en aguas poco profundas existe una interacción muy importante de la señal acústica con el fondo. Esta interacción es bastante compleja, puesto que hay que tener en cuenta el tipo de fondo, los sedimentos, cómo están distribuidos, las posibles variaciones que sufra en cuanto a su profundidad, etc. Todas estas dificultades hacen que el uso de modelos matemáticos como el de trazado de rayos sea arriesgado. Aparecen entonces los modelos semi-empíricos, entre los que destaca especialmente el modelo Colossus [20].

Este modelo se obtuvo a partir de una serie de medidas realizadas entre 100 Hz y 10 kHz. Tiene en cuenta la altura de las olas (en función del estado del mar), el tipo de fondo, la profundidad de la columna de agua, la frecuencia y el perfil de la velocidad del sonido. Este perfil se considera formado por dos segmentos constantes: desde la superficie del mar hasta una determinada profundidad L , en metros, la velocidad del sonido aumenta linealmente con la profundidad, mientras que para profundidades mayores que L , la velocidad disminuye con la profundidad hasta alcanzar el fondo.

Si se define la distancia de salto o de transmisión, H , como aquella distancia máxima a la que un rayo hace contacto con la superficie o con el fondo de la forma

dada en la ecuación (12), donde D es la profundidad de la columna de agua en metros, se obtienen las pérdidas de transmisión según las ecuaciones dadas en (13) [20]:

$$H = \left(\frac{L+D}{3} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$\begin{cases} TL = 20 \log R + \alpha R + 60 - k_L, & \text{para } R < H \\ TL = 15 \log R + \alpha R + \alpha_T \left(\frac{R}{H} - 1 \right) + 5 \log H + 60 - k_L, & \text{para } H < R < 8H \\ TL = 10 \log R + \alpha R + \alpha_T \left(\frac{R}{H} - 1 \right) + 10 \log H + 64.5 - k_L, & \text{para } R > 8H \end{cases} \quad (13)$$

Donde R es la distancia en km, α el coeficiente de absorción en $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$, k_L es un parámetro denominado anomalía de campo cercano, que mide la ganancia debida a los rebotes entre el fondo y la superficie, en dB, y α_T es el denominado coeficiente de atenuación efectivo, que tiene en cuenta las pérdidas debidas al acoplamiento de energía entre la superficie y el fondo, expresado en dB/rebote. Los valores de estos dos últimos coeficientes aparecen tabulados para distintos tipos de fondo y estado del mar, por ejemplo en [2].

4.2 El canal superficial

En la región de la columna de agua cercana a la superficie es donde se obtienen las variaciones más importantes de temperatura. No obstante, el movimiento de masas de agua producido por las olas produce la mezcla del agua de esta región, de forma que se puede considerar isoterma. Si la salinidad es constante, la velocidad del sonido varía únicamente con la profundidad, obteniéndose entonces un gradiente positivo de la velocidad del sonido con la profundidad hasta cierta profundidad, donde aparece la termoclina.

Como las ondas acústicas se curvan hacia las zonas de menor velocidad del sonido, si se coloca un emisor en esta región cercana a la superficie, que se denomina canal superficial, las ondas acústicas queden atrapadas dentro de éste si el ángulo de emisión es suficientemente pequeño y la longitud de onda no es mayor que la anchura del canal. De este modo, la señal acústica se propaga rebotando con la superficie del mar y curvándose para volver a rebotar contra esta superficie, sin tocar el fondo, tal y como muestra la Figura 5.

Hay que tener en cuenta que la señal se propaga de forma esférica al principio, pero a partir de cierta distancia r_t , denominada distancia de transición, se puede considerar la propagación como cilíndrica, al estar confinada la energía. En este caso, las pérdidas de transmisión se pueden expresar según la ecuación (14), donde la distancia de transición viene dada por la ecuación (15) [2]:

$$TL = 10 \log r_t + 10 \log r + (\alpha + \alpha_L) r \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

$$r_t = \frac{0.3048}{2} H \sin \theta \quad (15)$$

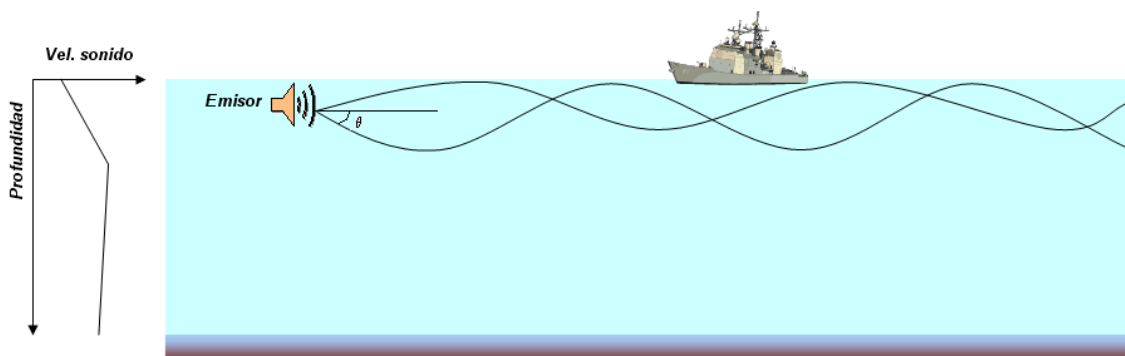


Figura 5. Propagación por el canal superficial

Donde r es la distancia en metros, α es el coeficiente de absorción en $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ y α_L es el denominado coeficiente de fugas, también en $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Este coeficiente de fugas tiene en cuenta la energía que escapa del canal debido al *scattering* de la señal en la superficie y a la difusión transversal, que se origina en la discontinuidad del perfil de la velocidad del sonido en la base del canal; H es la profundidad del canal en metros, y θ el ángulo del rayo atrapado con mayor inclinación dentro del canal, tal y como muestra la Figura 5.

4.3 El canal acústico profundo

En la Figura 3 se representaba un perfil típico para latitudes medias. En este perfil, a la profundidad de 1 km aproximadamente, aparecía un mínimo en la velocidad del sonido. Este mínimo marca el denominado eje del canal acústico, y provocará que una señal acústica emitida en las cercanías de esta profundidad se curve hacia este mínimo, por lo que si el ángulo de emisión es lo suficientemente pequeño, la señal se propaga sin rebotar con la superficie o el fondo. Se forma así un canal de propagación, denominado canal acústico profundo, representado en la Figura 6.

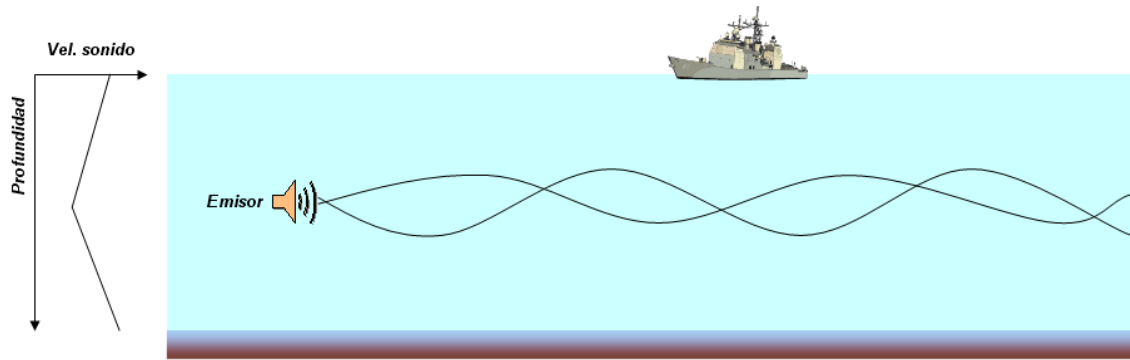


Figura 6. Propagación por el canal acústico profundo

En este caso, las pérdidas de transmisión vendrán dadas por la divergencia geométrica de la señal y la absorción del agua. En un principio la divergencia geométrica será esférica, hasta que alcanza la distancia de transición r_t , a partir de la cual se puede considerar que es cilíndrica. No existe ahora contribución debido a los rebotes en el fondo o en la superficie del mar. Las pérdidas de transmisión se pueden expresar según la forma dada en (16), siempre y cuando la distancia r sea tal que la divergencia ya sea cilíndrica [1]:

$$TL = 10 \log r + 10 \log r_t + \alpha r \cdot 10^{-3} \quad (16)$$

Donde r es la distancia en metros donde se quieren calcular las pérdidas de transmisión, y α es el coeficiente de absorción en $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$. La distancia de transición se puede calcular según la ecuación (17) [1]:

$$r_t = \frac{r_s}{8} \left(\frac{D_s}{z_s} \right)^{1/2} \quad (17)$$

Donde D_s es la profundidad a la que se sitúa el mínimo de la velocidad del sonido en el canal superficial, z_s es la profundidad del emisor medida desde la base del canal superficial, que marca el inicio del canal acústico profundo, y r_s es la distancia de salto. Esta distancia de salto depende de las distancias entre el eje acústico y los límites del canal acústico profundo, del valor de la velocidad del sonido en la base del

canal superficial, y de la diferencia entre este valor y el mínimo, obtenido en el eje del canal acústico.

4.4 Otras formas de propagación y comentarios adicionales

Se han comentado hasta ahora los tres canales más relevantes en una propagación acústica en cuanto a la importancia de la forma del perfil de la velocidad del sonido, pero existen otras formas de propagación. Además del camino directo, es decir, una transmisión directa entre emisor y receptor, que se dará para distancias muy cortas, hay que destacar las zonas de convergencia, el canal acústico confiable y los canales árticos.

Las zonas de convergencia se forman por la acumulación de rayos en una determinada zona cercana a la superficie, pero sin tocar el fondo o la propia superficie del mar, lo que provoca un reforzamiento de la señal. En estas zonas las pérdidas de transmisión serán menores debido a la aparición de un término denominado ganancia de convergencia.

El canal acústico confiable aparece cuando se tiene un emisor a una profundidad elevada, por debajo del eje acústico, y un receptor cercano a la superficie. Al emitir la señal, la capa isotérmica profunda hará que los rayos se curven hacia la superficie, donde llegarán al emisor sin tocar ni el fondo ni la superficie, y como no interacciona con ninguna de ellas, se denomina confiable.

En los canales árticos puede existir una capa de hielo sobre la superficie del mar, lo que aporta una fuente de ruido extra por la ruptura y caída de trozos de hielo al agua, y más incertidumbre en la reflexión de los rayos debido a la irregularidad de esta capa de hielo, además de procesos de *scattering*. Las condiciones de temperatura de estas regiones forman un perfil de la velocidad del sonido en donde dicha velocidad aumenta linealmente con la profundidad de forma permanente, por lo que se puede considerar que el eje acústico se sitúa en la superficie. Todos los rayos emitidos acabarán curvándose hacia la superficie y rebotando contra ésta e interaccionando con la capa de hielo, que actúa como un filtro paso-bajo debido al *scattering*.

En general, los modelos estudiados pueden dar una buena aproximación de los valores de las pérdidas de transmisión que se obtendrían para un caso determinado. Sin embargo, existen factores adicionales que pueden influir en el resultado y que no están presentes, como turbulencias, remolinos, corrientes internas o ruido ambiental. Todos estos factores pueden alterar los resultados obtenidos, tal y como se verá en la segunda parte de este trabajo.

[Referencias al final de la segunda parte]

Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (II)

Joaquín Aparicio, Enrique García; Ana Jiménez; Fernando Álvarez†; Jesús Ureña
Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá

†Departamento de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática, Universidad de Extremadura

En la segunda parte de este trabajo, se estudiarán otros mecanismos que afectan a la propagación de las ondas acústicas en el agua, y se mostrarán diversas simulaciones de la propagación acústica bajo diferentes condiciones.

5. Mecanismos adicionales en la propagación acústica subacuática

En la propagación acústica subacuática, como se ha analizado anteriormente, influyen de manera especial la forma del perfil de la velocidad del sonido, y el valor de la atenuación que sufra la señal, debido a la divergencia geométrica y los procesos de absorción y rebotes. Sin embargo, considerar únicamente estos efectos conformaría un caso ideal dentro de las aplicaciones prácticas. Numerosos mecanismos adicionales pueden aparecer cuando se realiza una propagación acústica en medios subacuáticos, algunos de los cuales provocarán fluctuaciones de la señal, tanto en amplitud como en fase. Por defecto, se hablará de medios marinos, pero en general estos efectos pueden aparecer en otros medios subacuáticos.

Un mecanismo que aparecerá siempre será la reverberación. La reverberación es la energía dispersada en otras direcciones como resultado de la interacción de las ondas acústicas con el medio, como los rebotes en las superficies o el encuentro de las ondas con partículas en suspensión en el agua. La Figura 7 muestra un ejemplo de distintos procesos de reverberación, donde en trazo discontinuo aparece la señal reflejada que provoca reverberación.

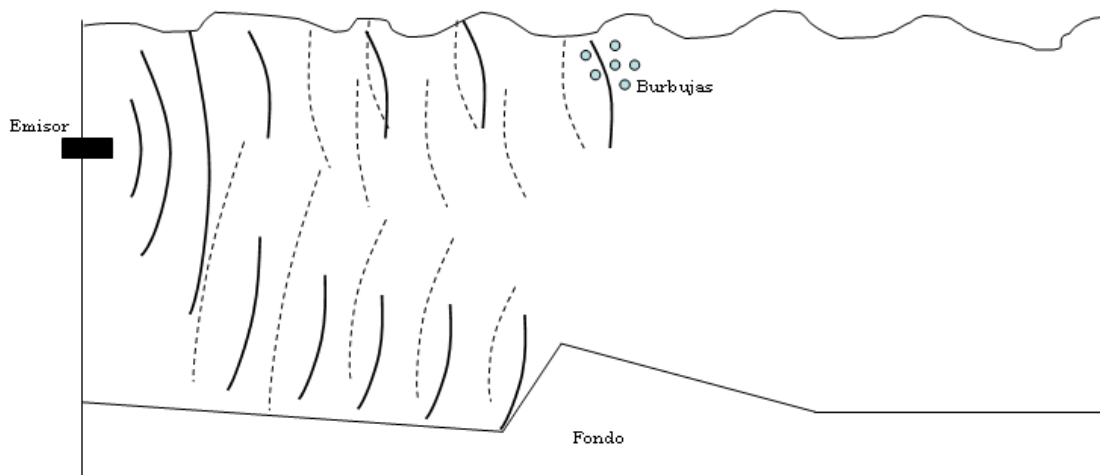


Figura 7. Proceso de reverberación debido a la superficie del mar, el fondo y una pequeña región con burbujas presente en el agua

Se pueden considerar dos tipos de reverberación: volumétrica y superficial. La reverberación volumétrica se produce en el volumen de agua donde tiene lugar la propagación, y se debe fundamentalmente a las partículas en suspensión y a la existencia de vida marina. Hay que destacar especialmente la contribución a la reverberación volumétrica de la capa de *scattering* profunda, de origen biológico, y que proporciona un nivel de *scattering* superior al resto [2]. Debido a este origen biológico,

la capa de *scattering* profunda tiene un comportamiento variable en lo que respecta a su profundidad a lo largo del día, en función del movimiento de los animales, y a la respuesta que proporciona a diferentes frecuencias de la señal acústica, en función del tamaño de estos, lo que muestra que está formada por diversas subcapas.

La reverberación superficial procede del *scattering* producido por la interacción de las ondas acústicas con las superficies y partículas próximas a ellas, como sedimentos o capas de burbujas introducidas por las olas o el paso de los barcos, por ejemplo. En lo que respecta a la superficie del mar, el nivel de *scattering* dependerá de la frecuencia, el ángulo de incidencia y la irregularidad de dicha superficie, donde esta irregularidad dependerá de la velocidad del viento en la superficie [2]. Si existe además una capa de hielo sobre esta superficie, la reverberación producida será mayor. En el fondo, el nivel de *scattering* dependerá además del material del que está formado: fondos rocosos provocan más reverberación que fondos arenosos. La contribución del fondo a la reverberación es la más compleja de predecir, puesto que la interacción de las ondas acústicas con el fondo es la más complicada de resolver.

Por otra parte, las burbujas de gas presentes en el agua acaban formando parte de los procesos de compresión y rarefacción de la onda, donde la magnitud de esta respuesta a la señal acústica dependerá de la frecuencia y del tamaño de las burbujas. En este proceso, las ondas acústicas pierden energía en favor de las burbujas, que las radiarán en todas direcciones, provocando la reverberación, que será máxima cuando las burbujas entran en resonancia [2].

Además de este efecto, y aunque no es reverberación, cabe mencionar que las burbujas de gas provocan la variación de la velocidad del sonido al pasar por una región donde esté presente una capa de burbujas. Si el tamaño de las burbujas es menor que el de resonancia para la frecuencia de la señal, la burbuja se comprime durante la fase de compresión de la onda acústica, se reduce entonces el módulo de compresibilidad y se reduce por tanto la velocidad del sonido; si el tamaño es mayor, la burbuja se expande durante la fase de compresión, aumenta el módulo de compresibilidad y aumenta por tanto la velocidad del sonido [3]. Estas variaciones de la velocidad del sonido afectarán a la forma del perfil, con las consecuencias que esto conlleva.

De forma general, si se emite un pulso sinusoidal la señal procedente de la reverberación aparecerá como un tono irregular que va decayendo con el tiempo, aunque pueden aparecer picos de intensidad en algunos instantes. Este tono sufrirá un desplazamiento en frecuencia y un ensanchamiento del espectro, debido al movimiento de las partículas en suspensión, fauna marina, la posibilidad de que la reverberación recibida de diferentes direcciones haya sufrido desplazamientos Doppler diferentes, etc. La reverberación será mayor a medida que aumenta la potencia transmitida y la señal acústica se emita en un rango de ángulos más amplio.

El efecto Doppler es otro de los mecanismos adicionales a considerar. Dada la naturaleza del medio subacuático, el emisor o el receptor (o ambos) pueden estar en movimiento al realizar las medidas, como por ejemplo, en un barco (Figura 8). En ese caso, se produce el efecto Doppler, consistente en un desplazamiento de la frecuencia; si la señal puede recorrer distintos caminos (multicamino), aparecen diferentes desplazamientos Doppler que dan lugar a un ensanchamiento del espectro en el receptor.

Además, aunque los instrumentos estuvieran perfectamente quietos, puede existir también un ensanchamiento Doppler debido al movimiento de masas de agua mientras se transmite la señal, como el que se da en las olas, que alteran la superficie de reflexión. Otra contribución puede venir por las corrientes internas, provocando el desplazamiento de masas de agua, lo que afectará a la propagación acústica.

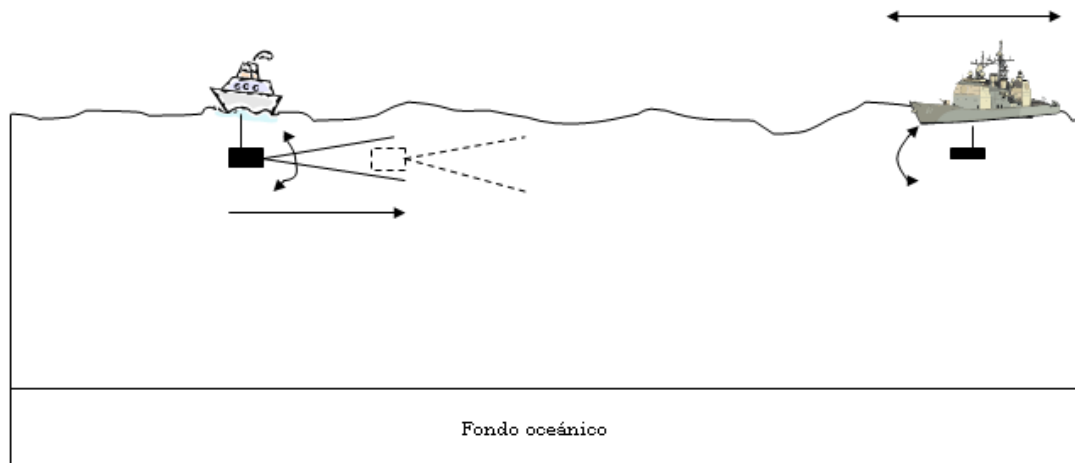


Figura 8. Efecto Doppler producido por el movimiento del instrumental

Para evitar las consecuencias de este ensanchamiento, la duración de la señal debe cumplir la relación dada en la expresión (18) [7]:

$$\frac{1}{T} \gg B \quad (18)$$

Donde T es la duración de la señal y B el ensanchamiento Doppler. Este ensanchamiento Doppler aumenta con la frecuencia, por lo que será de especial importancia en distancias cortas (un kilómetro o menores), donde se pueden emplear varias decenas de kHz [4].

El ensanchamiento Doppler resulta de interés junto al retardo asociado al multicamino, que aparecerá debido a los rebotes en la superficie y a la refracción de los rayos hacia el mínimo de la velocidad del sonido, por lo que la disposición del emisor y el receptor es crítica. El retardo de multicamino es el tiempo entre la llegada de la primera señal y la del camino más largo.

Una propagación en el eje de distancias puede provocar un ensanchamiento temporal debido al multicamino bastante importante, provocando el efecto conocido como interferencia entre símbolos, ISI (de *Intersymbol Interference*). Como ejemplo, para una tasa de transmisión de 10 ksp/s (kilosímbolos por segundo) sobre un canal de aguas poco profundas que se puede extender entre 1 y 10 km, se produce un retardo de multicamino de 10 ms, que provocará que la ISI se extienda sobre 100 símbolos [4]. Para evitar los efectos de estas múltiples llegadas al receptor procedentes del multicamino, se debe cumplir la relación dada en la ecuación (19) [7]:

$$\frac{1}{W} \gg \tau_L \quad (19)$$

Donde W es el ancho de banda y τ_L el retardo de multicamino. Lo que se busca en todos los sistemas es que el producto $B \tau_L$ sea menor que la unidad; en caso contrario se dice que el sistema está sobre-ensanchado y no se puede usar el canal de forma correcta salvo que se trate previamente la señal acústica.

Además de estos efectos, hay que tener en cuenta que el medio subacuático es dinámico, es decir, existen diversos procesos que provocan cambios en el medio. Estos procesos se suelen clasificar en función de la extensión espacial que presentan, en fenómenos de gran escala (más de 100 km), de mesoescala (entre 100 m y 100 km) y de pequeña escala (menos de 100 m) [19].

Entre los fenómenos de gran escala se encuentran la circulación debida al viento producida en los primeros cientos de metros de profundidad, y la circulación

termohalina, debida a cambios en la densidad producidos por variaciones en la temperatura y salinidad del agua.

Dentro de los fenómenos de mesoescala se encuentran los frentes oceánicos, los remolinos y las ondas internas. Los frentes oceánicos son zonas de transición que separan masas de agua de características diferentes, especialmente temperatura y salinidad. Los remolinos consisten en masas de agua que fluyen de forma circular cerrándose sobre sí mismas, por lo que se pueden considerar un caso particular de frente oceánico, al mostrar unas características distintas que sus alrededores. Por su parte, las ondas internas son ondas que se propagan por las interfases entre capas de fluidos de distinta densidad, o en un mismo fluido que presente un gradiente de densidad.

Por último, entre los fenómenos de pequeña escala destaca el conocido como escalera termohalina, que aparece generalmente en la termoclina principal y que consiste en zonas de varios metros de profundidad donde la temperatura y la salinidad son uniformes, separadas por otras donde existe un gradiente apreciable en estas magnitudes. Este efecto aparece más frecuentemente en zonas donde existe mezcla de agua dulce con salada.

Otro mecanismo a tener en cuenta es la dispersión de la velocidad del sonido (a distinguir del *scattering*). La dispersión consiste en la propagación a distinta velocidad de las componentes de diferente frecuencia de la señal. Debido a que generalmente no está presente, las fórmulas semi-empíricas que aparecen en la bibliografía no tienen en cuenta esta dependencia; sin embargo, puede aparecer bajo determinadas circunstancias, como por ejemplo atravesar una capa de burbujas [21] o según la forma que tenga el canal (dispersión geométrica) [22]. Los efectos de dispersión pueden ser muy importantes si se codifica la señal acústica, puesto que esta señal puede llegar irreconocible al receptor.

El último mecanismo a considerar es el ruido ambiental, es decir, toda aquella señal que se sigue recibiendo cuando se ha eliminado toda fuente de ruido conocida. Este ruido ambiental se suele escuchar como un murmullo de baja frecuencia, generalmente del orden del hercio.

En alta mar, cuando se puede considerar una propagación de aguas profundas, existen diversas fuentes posibles de ruido ambiental: las olas, mareas y turbulencias, que provocan cambios en la presión que registran los hidrófonos, la ruptura de las olas en la superficie del mar y la de las burbujas en el agua, movimientos sísmicos, la presencia de barcos y el denominado ruido térmico de las moléculas. Casi todas estas contribuciones son de baja frecuencia, generalmente inferiores a 100-500 Hz, excepto la ruptura de olas y burbujas, que pueden llegar a 30 kHz, y el ruido térmico, que puede llegar a los 100 kHz [2].

En aguas poco profundas, las fuentes posibles de ruido ambiental son conocidas también, pero su variabilidad, tanto espacial como temporal, es mayor. Estas fuentes son la pesca y el ruido provocado por la industria, el viento y el ruido biológico, provocado por la vida animal, como por ejemplo los crustáceos. De forma general, el ruido ambiental en aguas poco profundas afecta más a bajas frecuencias, al igual que en el caso anterior.

Existen dos contribuciones más. Una es común a las aguas profundas y poco profundas, y consiste en el ruido provocado por las gotas de lluvia al chocar contra la superficie del mar. Este ruido puede llegar a frecuencias de 10 kHz [2]. La otra contribución es específica de regiones polares, donde la pesca y el viento afectan en menor medida debido a la capa de hielo que cubre la superficie del mar, pero la ruptura de estas capas es una fuente de ruido importante y que puede llegar hasta frecuencias de 1 kHz [19].

6. Simulaciones

Se muestran a continuación diversas simulaciones realizadas por el método de trazado de rayos, que es el más utilizado en la bibliografía. Se distinguen tres casos fundamentales: canal de aguas poco profundas, el canal superficial y el canal acústico profundo. En todos los casos, se considera una columna de agua, de densidad $1024 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, sobre un fondo de arena fina, de densidad $1941 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. No se considera la presencia de ondas transversales en el fondo, que por otra parte es totalmente liso, al igual que la superficie del mar. En todos los cálculos de las pérdidas de transmisión se ha considerado la fase de los distintos rayos (cálculo coherente), puesto que se han asumido superficies totalmente lisas, y no existe por tanto incertidumbre en la interacción de la señal con estas superficies.

6.1 Simulación de un entorno de aguas poco profundas

Se muestra en primer lugar la propagación acústica en un entorno de aguas poco profundas, es decir, caracterizado por varios rebotes entre el fondo y la superficie. En este caso particular, el fondo está situado a 100 m de profundidad, y se supone una red de receptores, situados cada 5 m de profundidad, a 2 km de distancia del emisor, que se encuentra a 10 m de profundidad.

El perfil de la velocidad del sonido viene dado por la Figura 9, que muestra una velocidad constante en el agua igual a 1500 ms^{-1} , y una velocidad constante en la arena fina igual a 1749 ms^{-1} .

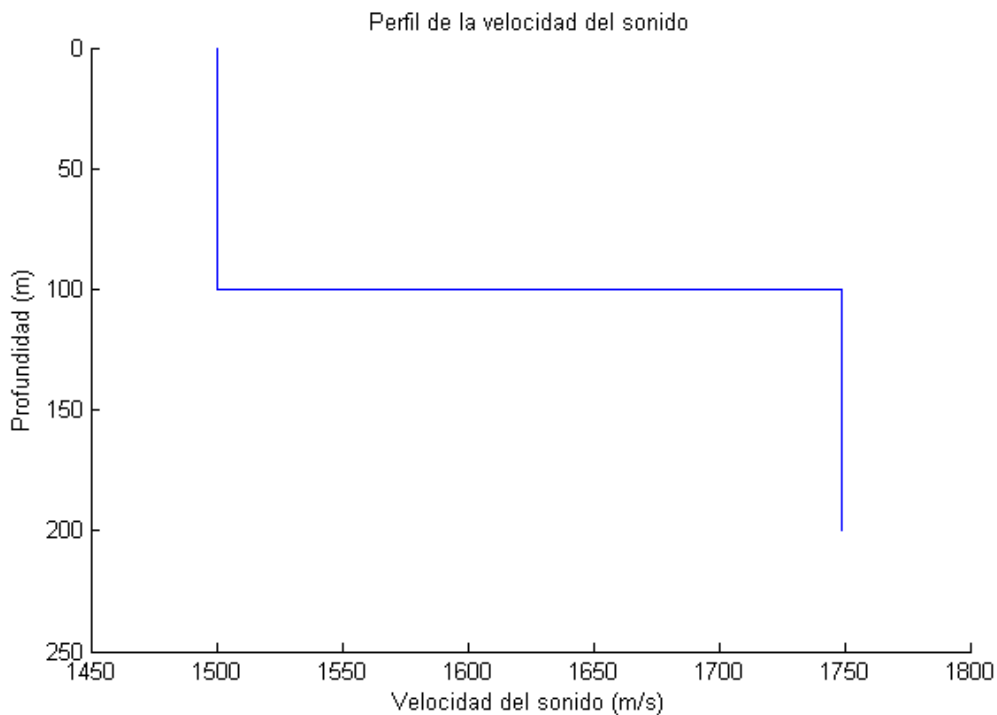


Figura 9. Perfil de la velocidad del sonido para el entorno de aguas poco profundas

Los rayos se emiten con unos ángulos comprendidos entre $\pm 10^\circ$, a una frecuencia de 30 kHz. La Figura 10 muestra el camino que siguen dichos rayos hasta el receptor, donde se ha elegido representar 21 rayos por motivos de claridad visual. En esta figura se puede observar cómo hay rayos que llegan sin rebotar hasta la red de receptores, mientras que otros sufren algún rebote con el fondo o la superficie, o varios rebotes con ambas.

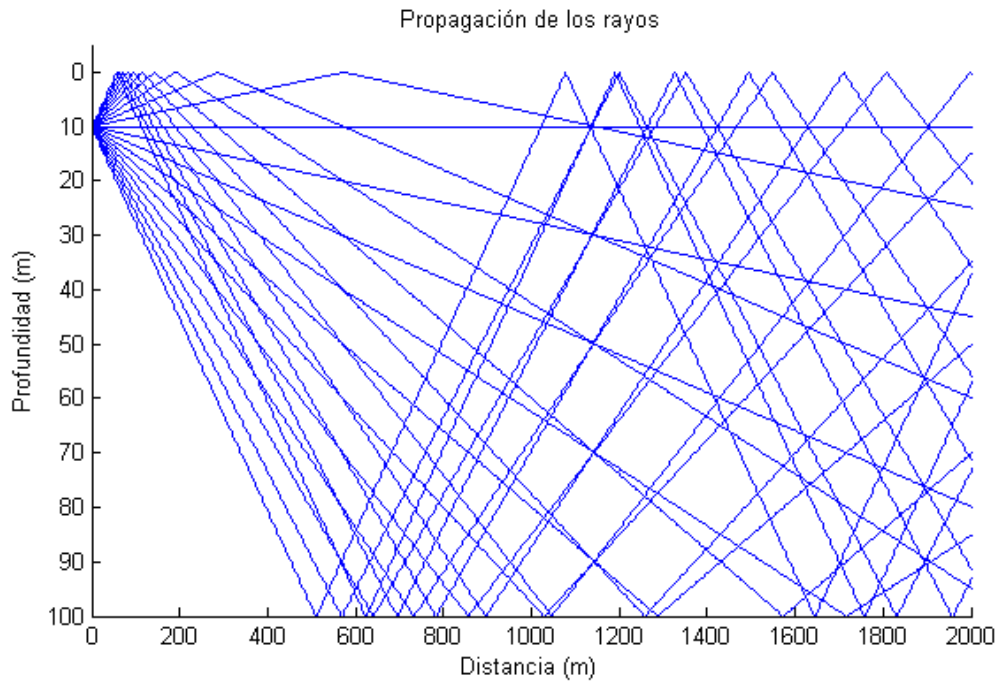


Figura 10. Camino seguido por los rayos en el entorno de aguas poco profundas

La Figura 11 muestra las pérdidas de transmisión en función de la distancia y la profundidad. Para calcular estas pérdidas, se ha dejado que el algoritmo elija el número de rayos que estime oportuno (muy superior a 21 rayos). Se puede apreciar en esta figura cómo hay zonas donde la señal interfiere de forma destructiva, en función de cómo sean las fases de las señales que convergen en esa zona, obteniendo zonas donde las pérdidas de transmisión decaen considerablemente a distancias cercanas al emisor.

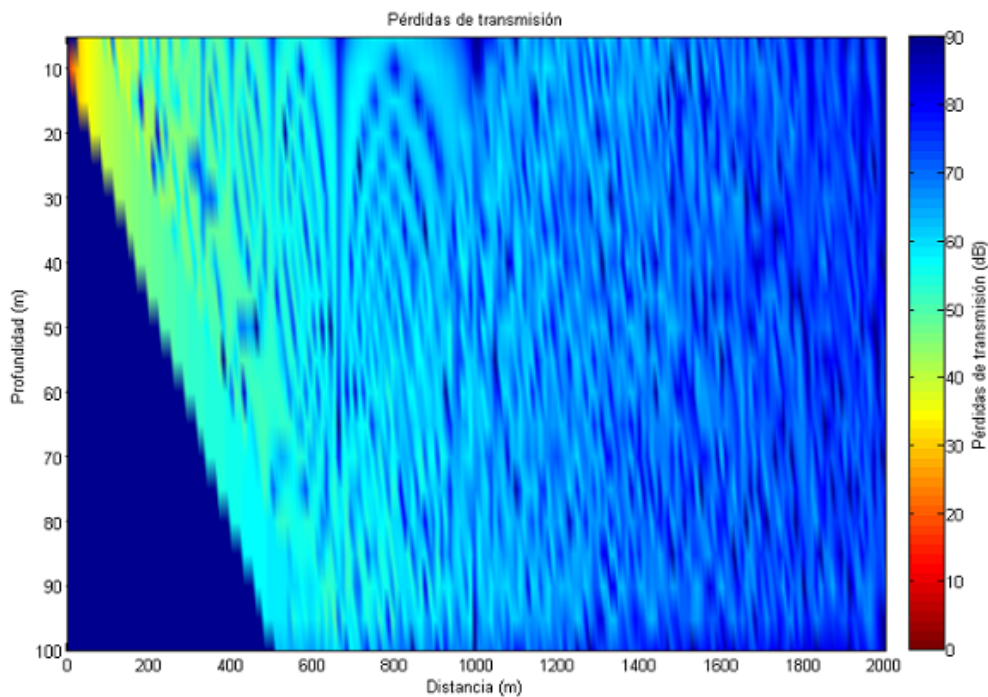


Figura 11. Pérdidas de transmisión en función de la distancia y la profundidad, para el entorno de aguas poco profundas

En la Figura 12 aparece representada la variación de las pérdidas de transmisión y la fase respecto a la profundidad, para la distancia de 2 km, donde estarían los

receptores. Los valores obtenidos para las pérdidas de transmisión coinciden con lo esperado para una divergencia geométrica a 2 km de distancia y la contribución de la absorción, que para la frecuencia de 30 kHz viene a ser aproximadamente de $8 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$. La fase sufre también varias fluctuaciones debido a la interacción con la superficie del mar y a la interferencia entre distintos rayos.

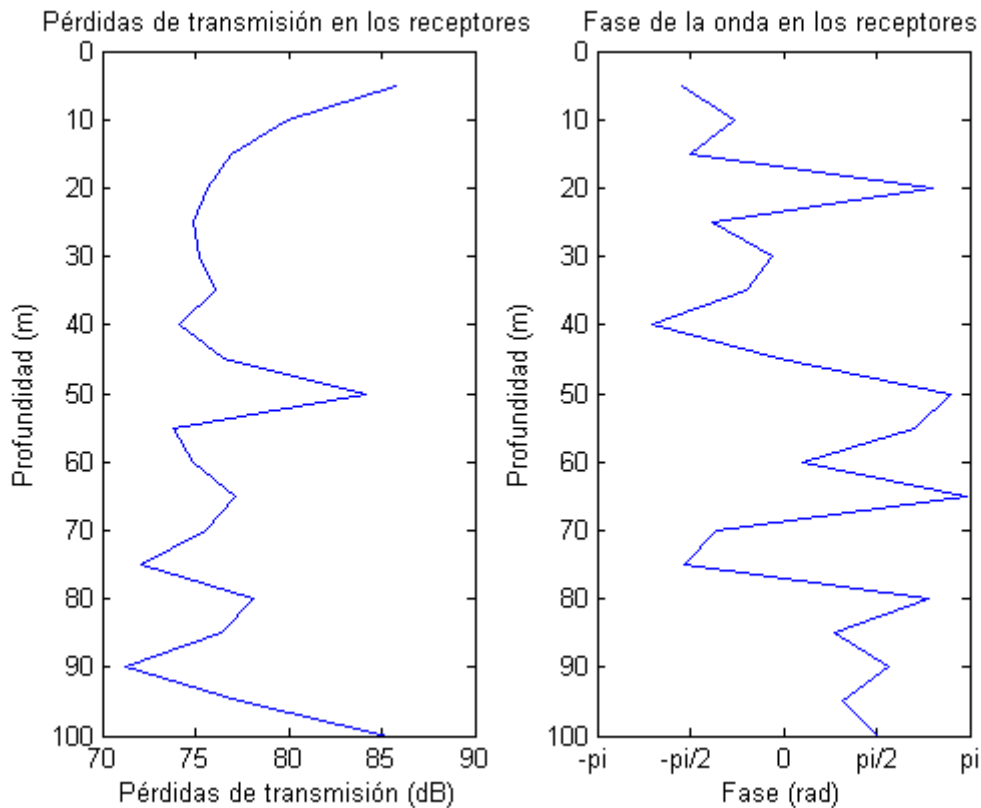


Figura 12. Variación de las pérdidas de transmisión y la fase respecto a la profundidad, para el entorno de aguas poco profundas

La Figura 13 representa las distintas llegadas de rayos a los receptores, es decir, el multicamino. Por ejemplo, para el receptor situado a 5 m, se detecta un primer rayo para un tiempo de propagación de aproximadamente 1.334 s (tiempo coherente con la distancia y la velocidad del sonido considerada), luego detecta cinco rayos muy seguidos alrededor de 1.34 s, y por último detecta otro rayo para un tiempo de propagación de 1.357 s, aproximadamente.

6.2 Simulación del canal superficial

Se presenta ahora la simulación de la propagación acústica en un canal superficial. El perfil de la velocidad del sonido se muestra en la Figura 14, donde la velocidad en la superficie es de 1485 ms^{-1} y va aumentando hasta alcanzar los 100 m de profundidad. A partir de ese punto, su valor es constante e igual a 1500 ms^{-1} . La red de receptores se sitúa a 2 km de distancia del emisor, que está a 50 m de profundidad, suponiendo un receptor cada 5 m. La frecuencia de emisión es de 20 kHz, donde los rayos salen con ángulos comprendidos entre $\pm 10^\circ$, y la profundidad a la que está el fondo es de 500 m.

En la Figura 15 se representan los caminos seguidos por los rayos en este canal, donde al igual que en el caso anterior, se han elegido 21 rayos por el mismo motivo. En esta figura se puede apreciar la curvatura que sufren los rayos hacia la superficie, donde se está el mínimo de la velocidad del sonido. En este caso no existe interacción con el fondo para la distancia a la que se sitúan los receptores, únicamente hay rebotes con la superficie del mar.

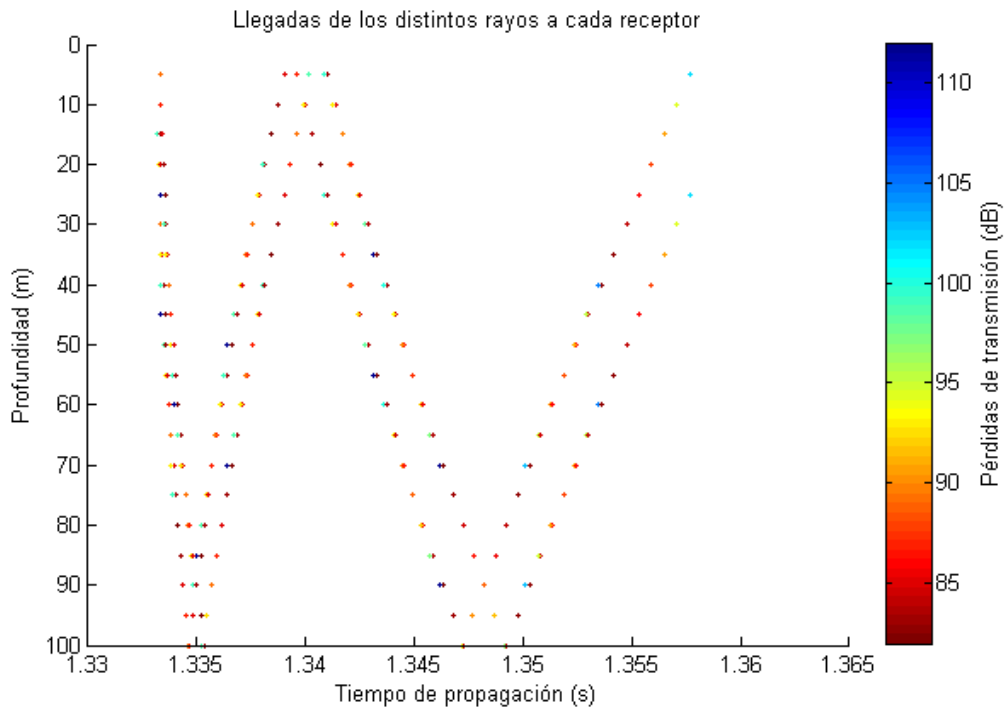


Figura 13. Multicamino en los receptores para el entorno de aguas poco profundas

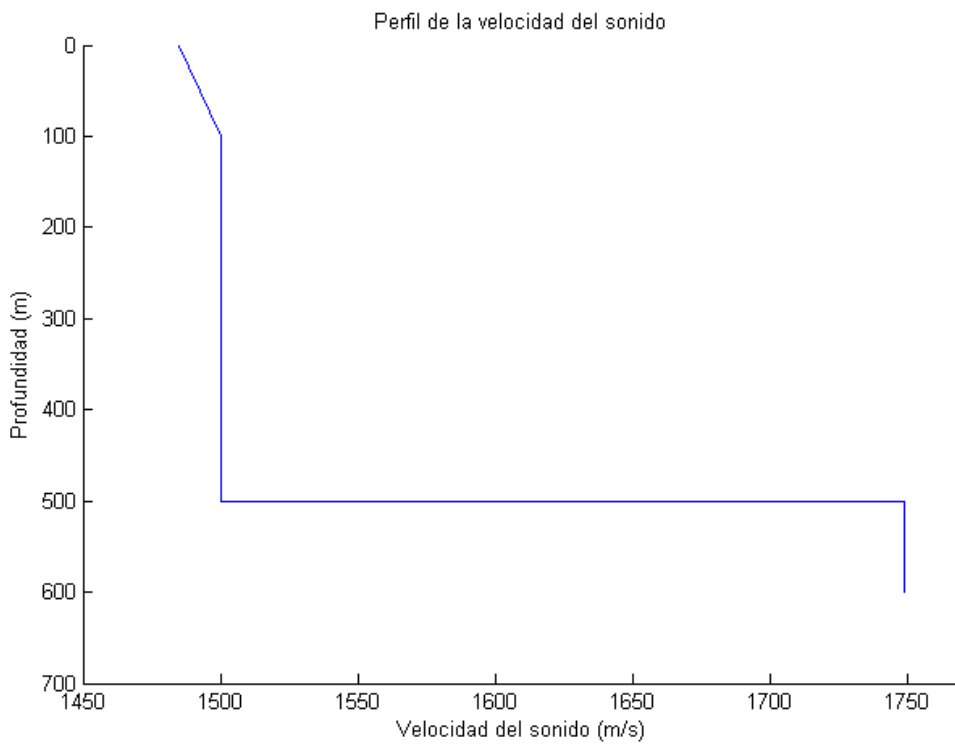


Figura 14. Perfil de la velocidad del sonido para el canal superficial

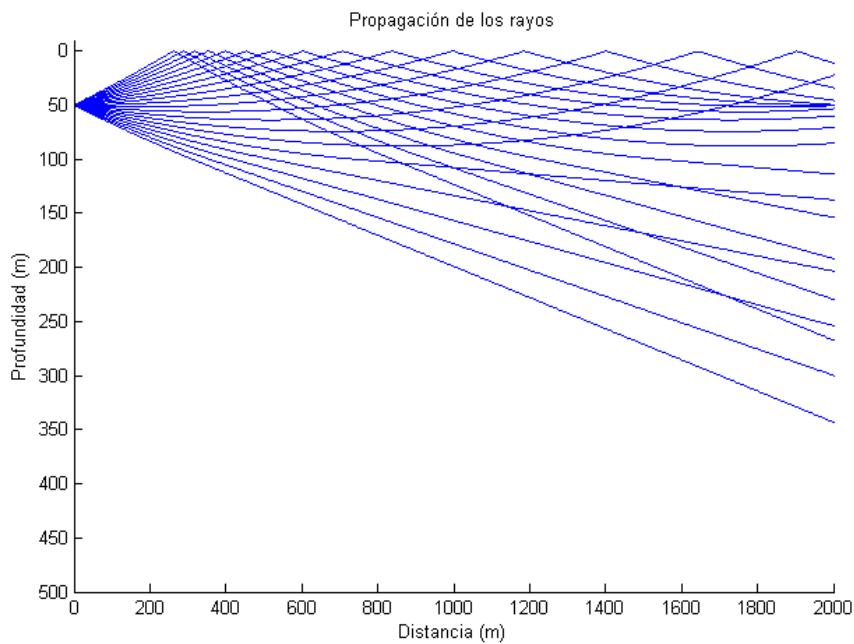


Figura 15. Camino seguido por los rayos en el canal superficial

Las pérdidas de transmisión en función de la distancia y la profundidad se representan en la Figura 16. En esta figura se observa, al igual que en el caso de aguas poco profundas, un patrón de interferencias formado por la interacción de rayos con distintas fases. Aparece ahora una zona situada a la distancia de los receptores y a unos 50 m de profundidad, donde las pérdidas son considerablemente menores que en su entorno; esto se debe a la concentración de rayos en esta zona, tal y como también se puede apreciar en la Figura 15.

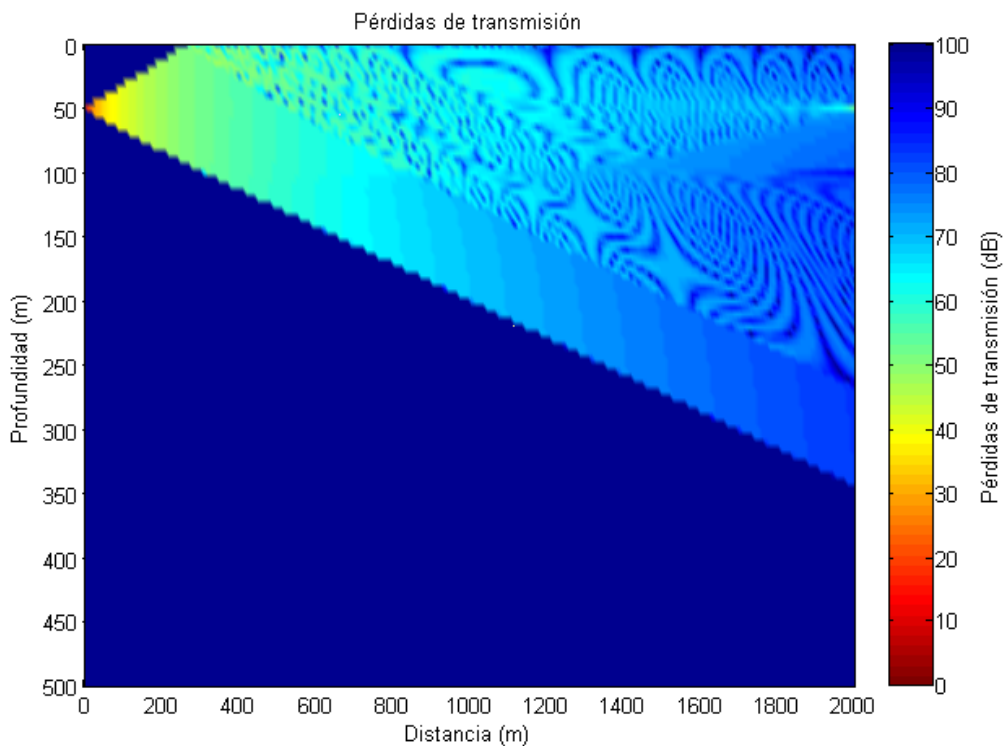


Figura 16. Pérdidas de transmisión en función de la distancia y la profundidad para el canal superficial

En la Figura 17, donde aparece la variación de las pérdidas de transmisión y la fase con la profundidad en los receptores, aparece también este mínimo en las pérdidas de transmisión, donde se aprecia la clara diferencia en los valores de las pérdidas para esta profundidad. La Figura 18 representa el multicamino obtenido para este caso que, de forma general, presenta menos detecciones para cada receptor que en aguas poco profundas, excepto el receptor situado a 50 m de profundidad. Esto se debe a que existen menos rebotes entre las superficies, y por tanto el multicamino será menor.

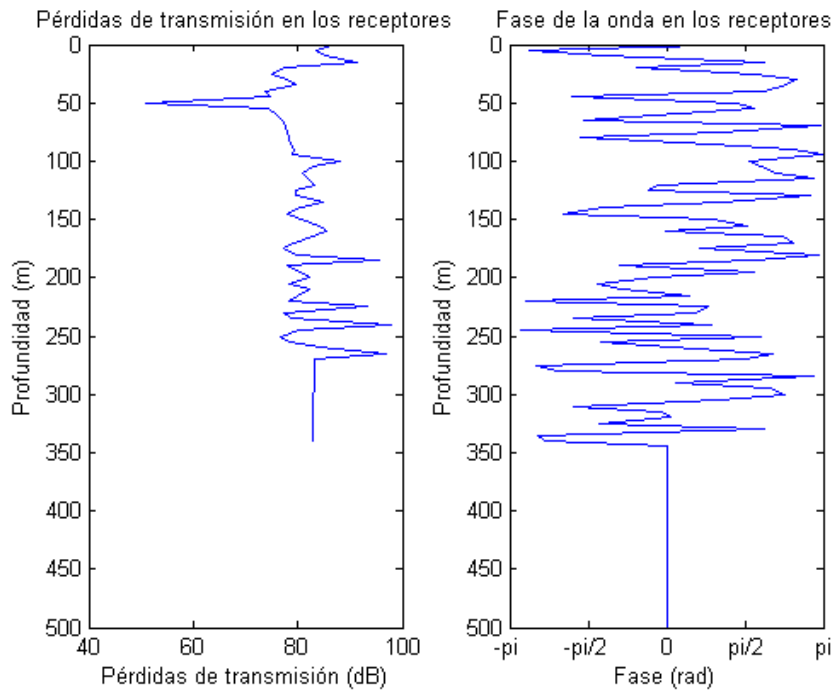


Figura 17. Variación de las pérdidas de transmisión y la fase respecto a la profundidad, para el canal superficial

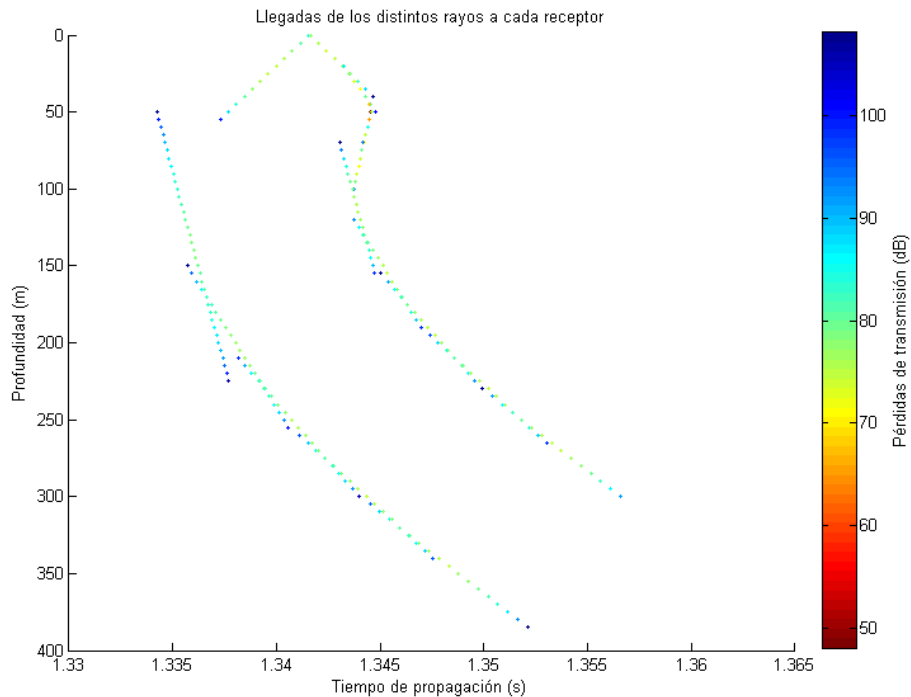


Figura 18. Multicamino en los receptores para el canal superficial

6.3 Simulación del canal acústico profundo

La última de las simulaciones presentadas es la del canal acústico profundo. La Figura 19 muestra el perfil que se ha considerado para este caso, donde la velocidad tiene un valor constante de 1510 ms^{-1} desde la superficie hasta los primeros 100 m, para posteriormente descender hasta 1485 ms^{-1} en el eje acústico, situado a 1 km; aumenta a continuación linealmente hasta alcanzar de nuevo los 1510 ms^{-1} en el fondo, a 4 km de profundidad. Los receptores se sitúan a 50 km de distancia, suponiendo uno cada 5 m, al igual que en los casos anteriores; el emisor está en el eje acústico. En este caso se ha empleado una frecuencia de 500 Hz para simular en todo lo posible un caso práctico, puesto que a 30 kHz las pérdidas en los receptores rondarían los 500 dB debido fundamentalmente a la absorción, por lo que sería una frecuencia inviable en la realidad para transmitir a esta distancia. Los rayos se emiten entre $\pm 10^\circ$.

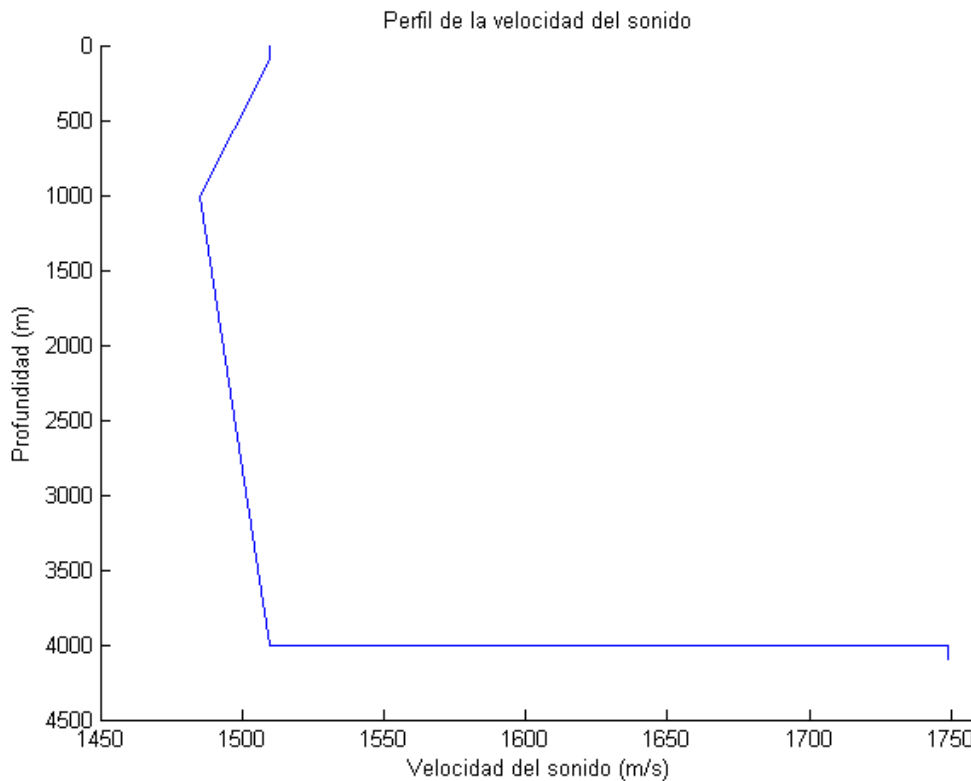


Figura 19. Perfil de la velocidad del sonido para el canal acústico profundo

La Figura 20 muestra las pérdidas de transmisión obtenidas para la distancia y la profundidad, donde se puede apreciar que las pérdidas de transmisión en la región cercana al eje acústico son menores que en las demás, debido al efecto de refracción de los rayos hacia esta zona, provocando la acumulación de estos. Por su parte, la Figura 21 representa la variación de las pérdidas y la fase respecto a la profundidad, en los receptores. En esta gráfica también se puede observar el mínimo en las pérdidas que se obtiene para la profundidad del eje acústico.

7. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una revisión de los fundamentos de la propagación acústica en medios subacuáticos, remarcando la importancia del conocimiento del perfil de la velocidad del sonido para la posterior propagación de una señal por diversos canales. Se han visto las ecuaciones teóricas más importantes para la velocidad del sonido, la absorción y las pérdidas para los distintos canales, y se han presentado de forma cualitativa diversos efectos que pueden afectar a la propagación

acústica subacuática. Adicionalmente, se han mostrado diversas simulaciones realizadas para los tres canales más significativos.

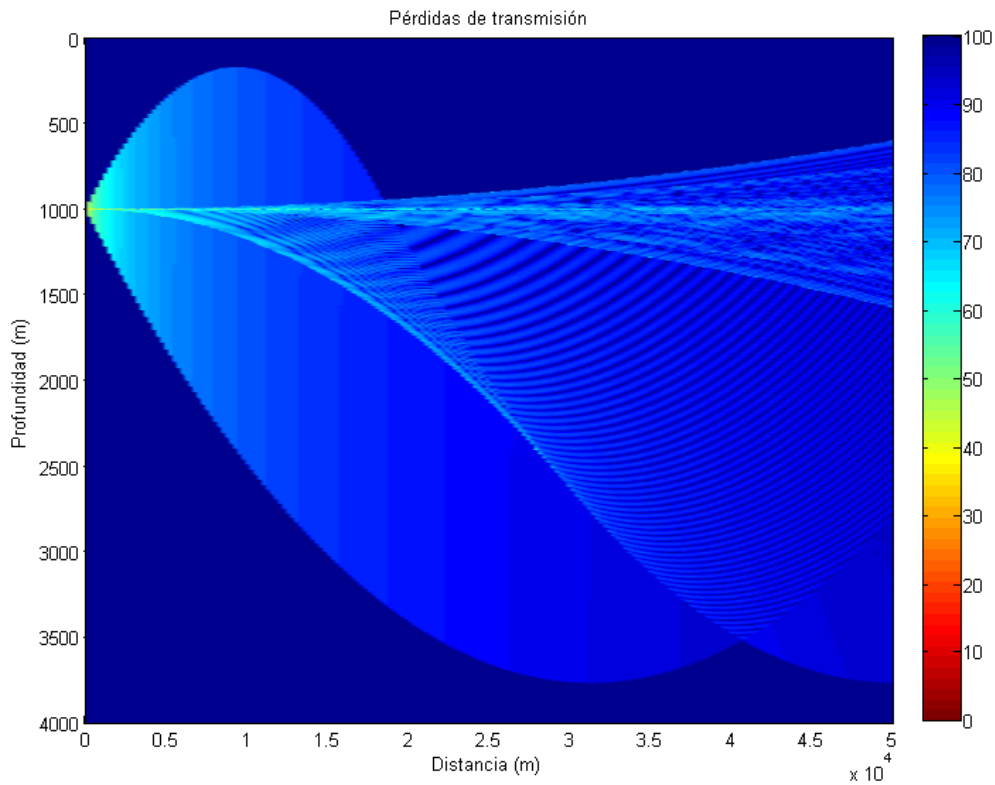


Figura 20. Pérdidas de transmisión en función de la distancia y la profundidad para el canal acústico profundo

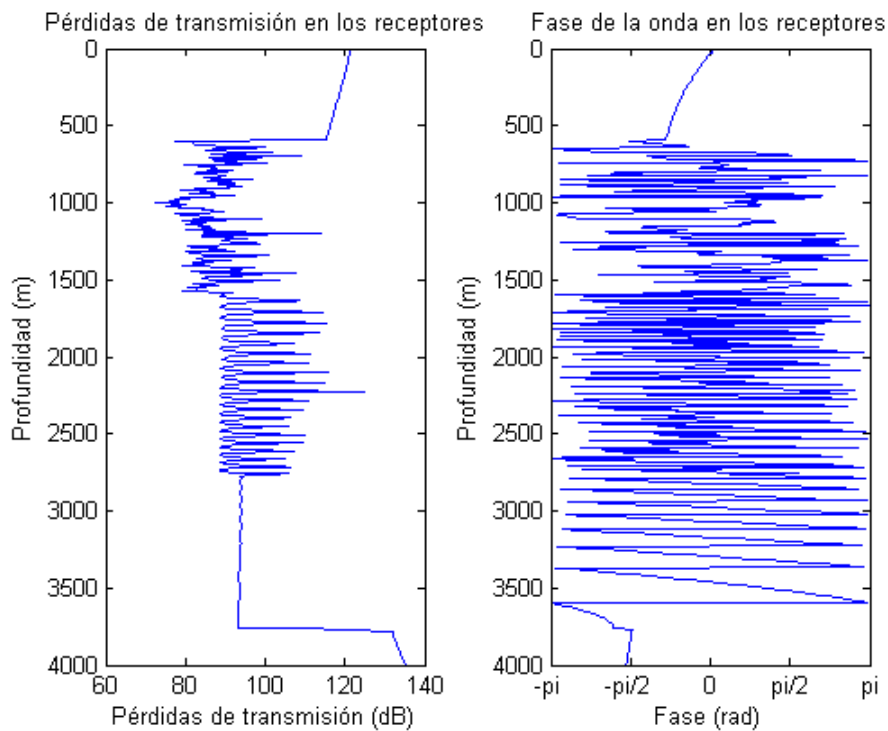


Figura 21. Variación de las pérdidas de transmisión y la fase respecto a la profundidad, para el canal acústico profundo

8. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al soporte de la empresa *GCM Communications Technology*. Para las simulaciones realizadas se ha empleado la herramienta *Acoustic Toolbox*, para Matlab, disponible en la página web del *Centre for Marine Science and Technology* (Curtin University of Technology, Australia) [23].

Bibliografía

- [1] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens y James V. Sanders, "*Fundamentals of Acoustics*", Ed. John Wiley & Sons, 4ª Edición, 2000.
- [2] Robert J. Urick, "*Principles of Underwater Sound*", Ed. Península Publishing, 3ª Edición, 1983.
- [3] T.G. Leighton, capítulo "*Fundamentals of Underwater Acoustics*", pp. 373-443, en *Fundamentals of Noise and Vibrations*, Frank Fahy y John Walker, Ed. Taylor and Francis, 1ª Edición, 1998.
- [4] Milica Stojanovic, "*Acoustic (Underwater) Communications*", en *Wiley Encyclopedia of Telecommunications*, John G. Proakis, Ed. John Wiley & Sons, 1ª Edición, 2003.
- [5] Chauncey S. Miller y Carl E. Bohman, "*An Experiment in High Rate Underwater Telemetry*", en *OCEAN 84*, Vol. 4, pp. 34-48, 1972.
- [6] Azizul H. Quazi y William L. Konrad, "*Underwater Acoustic Communication*", en *IEEE Communications Magazine*, Vol. 20, No. 2, pp. 24-30, 1982.
- [7] Arthur B. Baggeroer, "*Acoustic Telemetry – An Overview*", en *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 229-235, 1984.
- [8] M. Suzuki, T. Sasaki y T. Tsuchiya, "*Digital Acoustic Image Transmission System for Deep-Sea Research Submersible*", en *OCEANS'92 Proceedings*, Vol. 2, pp. 567-570, 1992.
- [9] R. Galvin y R.F.W. Coates, "*Analysis of the Performance of an Underwater Acoustic Communications System and Comparison with a Stochastic Model*", en *OCEANS'94 Proceedings*, Vol. 3, pp. 478-482, 1994.
- [10] Milica Stojanovic, "*Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communications*", en *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 125-136, 1996.
- [11] E.M. Sozer, J.G. Proakis, M. Stojanovic, J.A. Rice, A. Benson y M. Hatch, "*Direct Sequence Spread Spectrum Based Modem for Underwater Acoustic Communication and Channel Measurements*", en *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS'99*, pp. 228-233, 1999.
- [12] Daniel Kilfoyle, "*Spatial Modulation in the Underwater Acoustic Channel*". Editado por Ft. Belvoir Defense Technical Information Center. Página gestionada por Massachusetts Institute of Technology, disponible en: http://www.ll.mit.edu/asap/asap_04/DAY2/36_PA_KILFOYLE.PDF
- [13] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili y Tommaso Melodia, "*Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges*", en *Ad Hoc Networks*, Vol. 3, No. 3, pp. 257-279, 2005.
- [14] Milica Stojanovic, "*OFDM for Underwater Acoustic Communications: Adaptive Synchronization and Sparse Channel Estimation*", en *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2008*, pp. 5288-5291, 2008.
- [15] Subhadeep Roy, Tolga M. Duman, Vincent McDonald y John G. Proakis, "*High-Rate Communication for Underwater Acoustic Channels Using Multiple Transmitters and Space-Time Coding: Receiver Structures and Experimental Results*", en *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 663-688, 2007.
- [16] "*Technical Guides: Speed of Sound in Sea-Water*", página gestionada por Communication Technology. Disponible en: http://www.comm-tec.com/Library/Technical_Papers/speedsw.pdf
- [17] Milica Stojanovic, "*On the Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Communication Channel*", en *Proc. First ACM International*

Workshop on Underwater Networks (WUWNeT'06) / MobiCom 2006. Disponible en:

<http://www.mit.edu/~millitsa/resources/pdfs/wuw37-stojanovic.pdf>

- [18] Mari Carmen Domingo, “*Overview of Channel Models for Underwater Wireless Communication Networks*”, en *Physical Communication*, Vol. 1, No. 3, pp. 163-182, 2008.
- [19] Paul C. Etter, “*Underwater Acoustic Modeling and Simulation*”, Ed. Taylor and Francis, 3ª Edición, 2003.
- [20] M. Schulkin y J.A. Mercer, “*Colossus Revisited: A Review and Extension of the Marsh-Schulkin Shallow Water Transmission Loss Model*”, Applied Physics Laboratory, University of Washington, APL-UW 8508, 1985.
- [21] Herman Medwin y Clarence S. Clay, “*Fundamentals of Acoustical Oceanography*”, Ed. Academic Press, 1ª Edición, 1998.
- [22] I.B. Esipov, O.E. Popov, V.A. Voronin y S.P. Tarasov, “*Dispersion of the Signal of a Parametric Array in Shallow Water*”, en *Acoustical Physics*, Vol. 55, No. 1, pp. 76-80, 2009.
- [23] Centre for Marine Science and Technology, página gestionada por Curtin University of Technology, disponible en:
<http://cmst.curtin.edu.au>