

LA ECOSONDACIÓN COMO MÉTODO DE ESTUDIO DE LA DINÁMICA POBLACIONAL DE PECES

R. Moreno-Amich

Laboratori d'Ictiologia i Institut d'Ecologia Aquàtica.

Estudi General de Girona, Universitat Autònoma de Barcelona. Hospital, 6. 17071 Girona.

RESUM

Es fa una revisió de l'ús de l'ecosondació com a metodologia. Es presenta de forma resumida el funcionament de l'ecosonda i els fonaments físics en què es basa. S'exposen els principals mètodes d'estimació de la biomassa de peixos, basats en l'ecosondació (recompte d'eco-traces i eco-integració) i es discuteixen els avantatges i limitacions de l'ecosondació. Finalment es fan algunes consideracions sobre el disseny mostral, per tal de tenir en compte la heterogeneïtat espacial en la distribució de les poblacions, i sobre els càlculs estadístics associats.

ABSTRACT

The echo-sounding methods are reviewed. We summarize the functioning of echo-sounder and his physical basis. The most common echo-sounding methods for estimating the fish biomass (i.e. counting traces, and integration), with advantages and limitations of the echo-sounding methods are presented. Some remarks on the sampling design, for considering spatial heterogeneity, and on the statistical calculations are also presented.

LOS SISTEMAS SONAR. LA ECOSONDA

La utilización de técnicas acústicas en el agua se remonta al período de entreguerras mundiales con el empleo de «sondeadores» para detectar el fondo. Más tarde, la detección acústica fue utilizada para localizar organismos vivos, en particular peces, e inmediatamente después para estimar su biomasa.

Genéricamente, los sistemas de detección acústica reciben la denominación de sistemas sonar (sonar es la abreviatura de «SOund, NAvigation and Ranging») y obtienen información sobre el fondo u objetos sumergidos, por medio de la transmisión de ondas sonoras y la observación de los ecos devueltos. Se denomina «ecosonda» a un sistema sonar que transmite verticalmente, y «sonar» a un sistema sonar que transmite horizontalmente. A continuación nos referiremos exclusivamente a la

ecosonda, aunque el funcionamiento de ambas clases de aparatos es el mismo.

La ecosonda genera sonido en pulsos discretos, y después de cada pulso el sistema espera durante un cierto período de tiempo para recibir ecos de obstáculos (por ejemplo peces, el fondo, etc.) que se encuentran en el volumen de agua cubierto. Las ecosondas utilizadas en trabajos de pesquerías emiten ultrasonidos con una frecuencia de trabajo usualmente entre los 20 i los 200 kHz.

Un pulso se genera cuando un marcador de tiempo (usualmente el estilo de la registradora desplazándose a velocidad constante) activa un transmisor eléctrico durante un período fijo (Fig. 1). La oscilación eléctrica del transmisor es convertida mecánicamente en presión oscilante (ondas sonoras) en el agua, en la cara vibrante del transductor, que continúa generando sonido hasta que el marcador de tiempo apaga el transmisor. El resultado es un pulso sonoro de cierta duración que se desplaza a través del agua, partiendo de la cara del transductor. Cualquier obstáculo en la trayectoria de este pulso, devolverá un eco al transductor, el cual, en el modo de espera, convierte las oscilaciones de presión (el eco) sobre su cara en

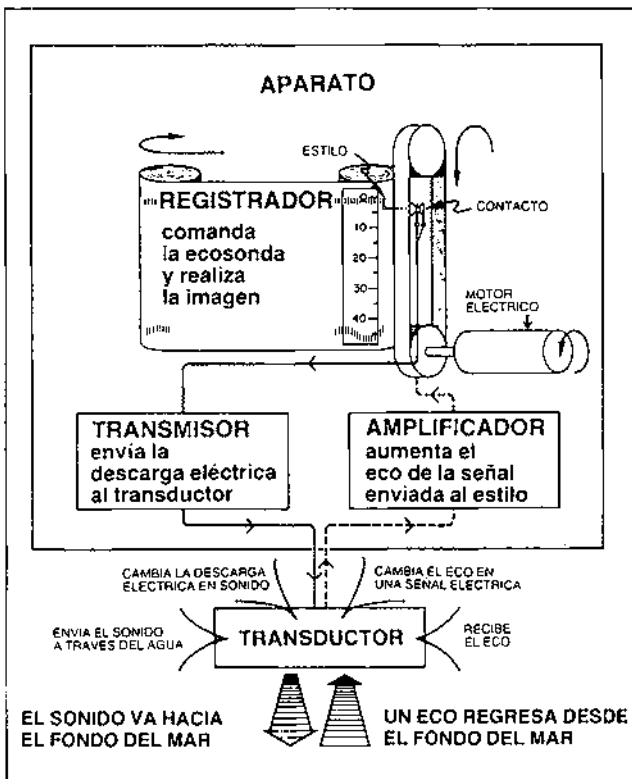


Figura 1. Esquema de funcionamiento de una ecosonda (de Burczynski, J. & M. Ben-Yami, 1985).

oscilaciones eléctricas (voltaje) que son amplificadas por el receptor y convertidas en alguna señal visible en la registradora en papel (una marca oscura denominada ecotrazo) o en un pico pronunciado en la pantalla del osciloscopio.

Puesto que la distancia (R) entre el obstáculo y el transductor es proporcional al tiempo (t) transcurrido entre la transmisión del pulso y la recepción del eco del obstáculo (según la fórmula: $R=ct/2$ donde c es la velocidad del sonido en el agua), el ecotrazo aparece a una distancia de la línea cero proporcional a la distancia del obstáculo al transductor. De hecho las escalas de las registradoras están simplemente marcadas en unidades de distancia (metros o brazas).

El poder de resolución de la ecosonda (capacidad de distinguir individualmente varios obstáculos próximos unos de otros) depende, en sentido horizontal, del ancho o ángulo del haz y, en sentido vertical, de la longitud (duración) del pulso.

La resolución horizontal es mejor con un transductor de alta frecuencia que con uno de baja frecuencia, puesto que el haz de un transductor de alta frecuencia presenta un ancho o ángulo del haz menor que uno de baja frecuencia; con un ángulo del haz pequeño la probabilidad de abarcar más de un pez a una determinada profundidad es muy baja, aunque ésta aumenta con la profundidad por efecto del incremento de la sección del haz; por otra parte el volumen total de agua cubierto es también menor con alta que con baja frecuencia.

En sentido vertical, la resolución aumenta cuanto menor sea la longitud del pulso. Con un pulso más corto que la distancia entre dos peces que nadan uno encima de otro se obtendrían dos ecos distintos y por tanto dos ecoseñales separadas; por el contrario, con un pulso más largo que esa distancia se obtendría un único eco largo para ambos peces y una sola ecoseñal.

Además, la distancia (con respecto al transductor) mínima de detección de obstáculos depende de la longitud del pulso. Esta distancia es aquella para la cual el eco producido por el obstáculo se recibe ya dentro del período de espera de la ecosonda y no dentro del mismo período de transmisión.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que, de existir, las señales de ruido enmascaran las ecoseñales y esto interfiere con la detección de objetos sumergidos, más cuanto más alto es el nivel de ruido en relación con la ecoseñal.

En electrónica, se denomina ruido a cualquier señal eléctrica no deseable, y en lo que atañe a la ecosonda el ruido es una combinación de ruido ambiental, reverberación y auto-ruido. El ruido ambiental está compuesto por sonidos naturales generados por olas, animales acuáticos, etc., y la reverberación es causada por la presencia de plancton, burbujas o partículas en suspensión que interceptan y reirradian una parte de la energía acústica transmitida.

El auto-ruido es causado por el mismo equipo: ruido generado por la vibración de la maquinaria y la hélice de la embarcación; ruido hidrodinámico del flujo de agua alrededor del transductor, y ruido electrónico propio de la ecosonda, aunque normalmente este último es negligible. Evidentemente, el nivel de auto-ruido aumenta con la velocidad de la embarcación.

Normalmente, las ecosondas comerciales vienen ya provistas de controles (STC o cronocontrol de sensibilidad, rechazador o supresor de interferencias, etc.)

que convenientemente regulados eliminan el auto-ruido, las interferencias de otras ecosondas y gran parte de la reverberación.

FACTORES QUE AFECTAN LA ECOSEÑAL

La intensidad de la señal reflejada depende (Buczynski, 1982) del tamaño del obstáculo, de la distancia que le separa del transductor y de las propiedades de reflexión características del obstáculo, y además de la distribución de la intensidad (o patrón de directividad) del haz del transductor.

Tamaño del pez

Si tenemos dos peces de la misma especie, pero de distinto tamaño, situados aproximadamente a la misma distancia, es obvio que el pez pequeño devolverá un eco de menor intensidad que el grande. El pequeño producirá un ecotrazo más bien fino en el ecograma, mientras que el grande producirá un ecotrazo muy oscuro en el ecograma. En general se puede afirmar que la intensidad del eco devuelto es proporcional al peso del pez, y que el de un conjunto de peces es proporcional a su biomasa.

Distancia al transductor

Por efecto de la dispersión y atenuación de las ondas sonoras, la intensidad del sonido decrece con la distancia. Luego, para un mismo tamaño, un pez devolverá un eco de menor intensidad cuanto mayor sea la profundidad a la que se encuentre, o mejor dicho, cuanto mayor sea la distancia que le separa del transductor. Si estamos interesados en obtener ecosenales que no dependan de la distancia al transductor sino sólo del tamaño y propiedades de reflexión del obstáculo, deberemos trabajar con una ecosonda provista de un amplificador TVG (del inglés «Time Varied Gain» o ganancia cronovariable) que compensa la pérdida de intensidad de la ecosenal, que según las leyes de propagación del sonido es $1/(R^2 \cdot e^{2\beta R})$.

Propiedades de reflexión de los peces

Cuando la onda sonora transmitida por el transductor encuentra un obstáculo de densidad distinta al medio (por ejemplo un pez), parte de la energía acústica es absorbida por el obstáculo y el remanente es reflejado. En el caso de los peces, las propiedades de reflexión están básicamente relacionadas con su densidad corporal (y por tanto con la presencia o no de vejiga natatoria, etc.) y su patrón de directividad (ángulos de reflexión de las diferentes partes de cuerpo), características de cada especie. Estas propiedades reflectivas se expresan en términos de «sección transversal equivalente», es decir, la sección transversal que debería tener un obstáculo ideal, esférico, que reflejara toda la energía incidente, para que diera la misma intensidad de señal.

Patrón de directividad del transductor

Por otra parte, la distribución de la intensidad del haz (usualmente cónico) no es homogénea y se producen efectos análogos a los que presenta el haz lumínico de un reflector, en el que aparecen aros concéntricos de luz de intensidad decreciente a medida que están más alejados del eje central del haz. Por tanto, debido al patrón de directividad de los transductores, no es un asunto simple interpretar los ecos correctamente, ya que un observador no puede decir si un eco de intensidad moderada corresponde a un pez pequeño en el eje del transductor o a un pez grande a la misma distancia pero a un lado del eje.

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA DE PECES POR ECOSONDEO

El tipo de información que se puede obtener de los ecosondeos está en relación con la biomasa de peces (cantidad o densidad de peces). Además, con un diseño adecuado del muestreo se puede obtener información acerca de la distribución espacial de las poblaciones de peces.

Las estimaciones de biomasa se suelen basar en uno de los dos métodos: el recuento de ecotrazos de un ecograma o la integración de las ecoseñales recibidas (ecointegración).

Recuento de ecotrazos

Este método consiste en el recuento de los ecotrazos que aparecen en un ecograma. Un ecograma presenta usualmente el resultado de la ecosondación en un transecto. Evidentemente el recuento de ecotrazos sólo da información en cuanto a número de peces detectados en el volumen cubierto por el ecograma.

Un ecotrazo puede corresponder a una señal individual de un pez, o tratarse de un eco múltiple. Cuando dos o más peces están más próximos entre sí que el poder de resolución de la ecosonda, sus ecos aparecen solapados o juntos, formando un eco múltiple, que aparece como un único ecotrazo más oscuro, de forma variable según la disposición de los individuos y la densidad de la aglomeración. Es evidente que el recuento sólo es factible cuando se dispone de ecotrazos individuales susceptibles de ser contados. Si se dispone de ecos múltiples habrá que recurrir a su análisis por ecointegración.

Las señales individuales de peces son la composición de los sucesivos ecotrazos, correspondientes a sucesivos pulsos que han detectado el mismo pez hasta que éste es sobrepasado por la embarcación. Cada señal individual presenta una característica forma de V invertida (Fig. 2). Esto es debido a que en los sucesivos pulsos que detectan el pez, éste aparece primero en el margen del haz, luego cerca del eje del haz y posteriormente otra vez en el margen hasta que el pez es sobrepasado; aun cuando el pez no ha variado de profundidad, la distancia oblicua al transductor (cuando aparece en el margen) es mayor que la distancia vertical

(cuando aparece cerca del eje), produciendo el falso efecto de eco-trazos a mayor-menor-mayor profundidad, y dando lugar a la mencionada señal en forma de V invertida.

En el caso de los peces de fondo, se plantean algunos problemas adicionales que hay que tener en cuenta. En primer lugar la dificultad de distinguirlos del perfil del fondo. El perfil del fondo aparece como una traza relativamente oscura y de una cierta anchura. El tono y la anchura varían con la naturaleza del fondo. Interesa discriminar si un promontorio en el perfil del fondo corresponde a peces o a una roca del mismo fondo. Esto es factible si nuestra ecosonda está provista de la función «línea blanca» («white-line») que hace aparecer en el ecograma una banda blanca inmediatamente por debajo del perfil del fondo (Fig. 2). Si el promontorio es bordeado por la banda blanca es que se trata del mismo fondo. Si por el contrario el promontorio aparece como un engrosamiento del perfil, mientras la banda blanca sigue más rectilíneamente, es que se trata de peces cerca del fondo. No obstante, si los peces están muy pegados al fondo, la línea blanca no los detectará, puesto que el eco del fondo es más fuerte.

Otra dificultad es la existencia de zonas muertas. Cuando hay peces cerca del fondo sólo se detectan los que están en el centro del haz del transductor, pero no los que están en los bordes del mismo (Fig. 3). El eco procedente de los peces que están en el centro del haz llega antes que el eco del fondo y marca una traza de los peces por encima de la línea blanca en el ecograma. Los peces que están en los bordes del haz no aparecen porque su eco llega al mismo tiempo (o ligeramente más tarde) que el del fondo del centro del haz. El eco del fondo es más fuerte que el del pez y enmascara u oculta el eco del pez que está en los bordes. De hecho,

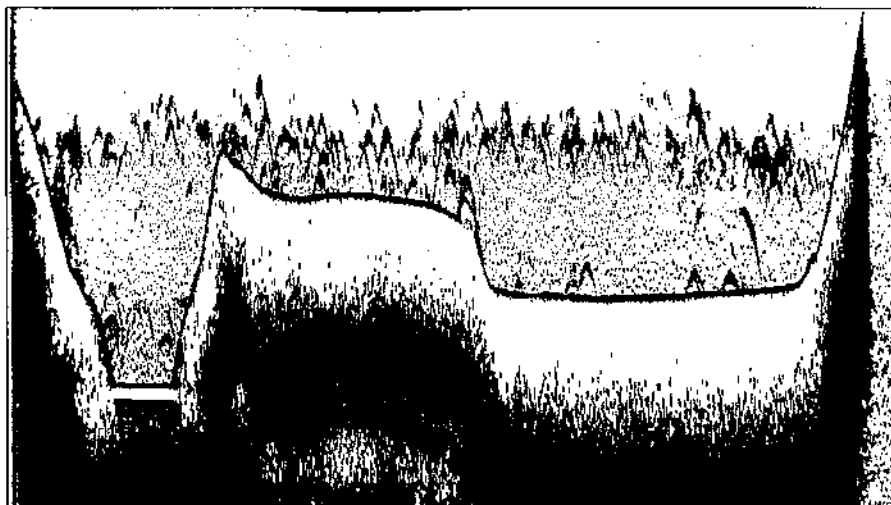


Figura 2. Ecograma realizado en el lago de Banyoles.

la existencia de zonas muertas no tiene más trascendencia que la de delimitar claramente el volumen que en realidad se ha muestreado.

Puesto que la biomasa se expresará como número de peces en el volumen muestreado, en el método de recuento de ecotrazos es fundamental el cálculo del volumen muestreado. Los diversos métodos se explican en Forbes & Nakken (1972). Pero una forma sencilla y práctica, especialmente si se dispone de una ecosonda equipada con TVG (en que el ángulo del haz se puede considerar constante), es integrar los volúmenes de la sucesión de segmentos (de longitud L_i) dentro de los cuales R_i sea constante. Cada volumen se obtiene del producto del área o sección del haz (de ángulo completo ϕ en radianes) por la longitud del segmento:

$$V = \Sigma (\phi/2 \cdot R_i^2 \cdot L_i)$$

Ecointegración

La ecointegración se basa en el análisis de la intensidad de la ecoseñal. Para ello es necesario disponer de un ecointegrador y de una ecosonda con TVG. La función TVG es imprescindible para que la ecoseñal sólo dependa del tamaño y características de los peces ecosondados; el cuadrado del voltaje así obtenido es proporcional a la densidad de biomasa de peces situados a una distancia R , en una capa de amplitud vertical igual a la longitud del pulso. Para toda la columna cubierta por un pulso se debe sumar las cantidades correspondientes de todas las capas. Posteriormente se promedian las lecturas de los sucesivos pulsos durante el transecto, para obtener una cantidad proporcional a la densidad media en el volu-

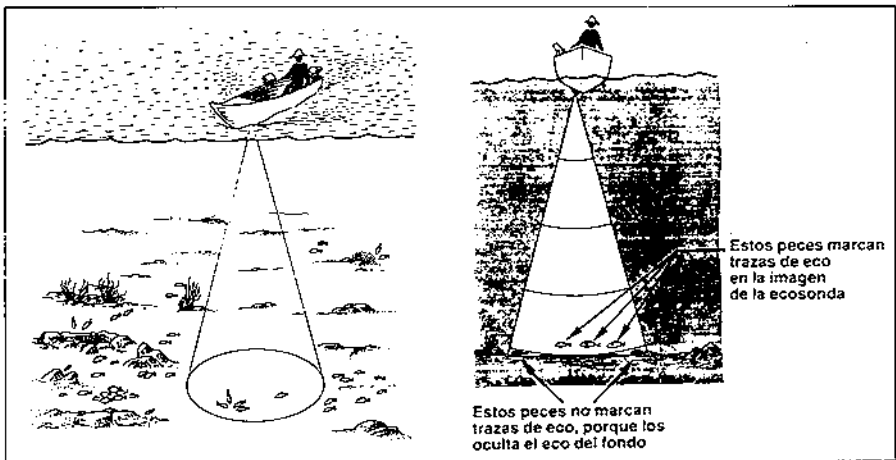


Figura 3. Zonas muertas en la detección de peces de fondo (de Burczynski, J. & M. Ben-Yami, 1985).

men muestreado. Éste es, pues, el principio básico del funcionamiento del ecointegrador.

Evidentemente hace falta determinar el coeficiente de proporcionalidad entre el cuadrado del voltaje y la biomasa de peces correspondiente. Uno de los métodos más fiables para la determinación de esta constante es la calibración directa sobre peces vivos de la misma especie (Johannesson & Losse, 1977). Otro método corrientemente en uso es el «método de Bergen» que consiste en simultanear el recuento de ecotrazos individuales de peces registrados, y la medición, en un osciloscopio, de las amplitudes de las ecoseñales devueltas, conjuntamente con los valores del ecointegrador. Conociendo el peso por pez, obtenido a partir de muestras de peces capturados de la misma población, es posible calcular dicho coeficiente de proporcionalidad (Forbes & Nakken, 1972).

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA ECOSONDACIÓN

Aunque, de hecho, la ecosondación está firmemente establecida como técnica en trabajos de pesquerías, esto no implica que sea la mejor técnica de evaluación de poblaciones ni que sea aplicable en todos los casos. Según Thorne (1983), las ventajas y limitaciones específicas de la ecosondación respecto de otras técnicas de evaluación de poblaciones pueden resumirse en las que se citan a continuación:

Ventajas

- Independencia de las estadísticas de pesca, que permite su aplicación en stocks no explotados o poco explotados.
- Capacidad para la estimación absoluta del tamaño de una población, al tratarse de un muestreo no selectivo.
- Como consecuencia del alto poder de muestreo y eficiencia de la ecosondación, el costo operacional es bajo. El mayor costo está asociado a la compra del equipo.
- Baja varianza metodológica, resultado de la alta capacidad de muestreo. El poder de muestreo es como mínimo de un grado de magnitud mayor que en la pesca exploratoria.

Limitaciones

- Incapacidad para detectar peces en superficie debido a la distancia mínima de detección (por efecto de la duración del pulso) y por el efecto ahuyentador que el paso y ruido de la embarcación provocan sobre los peces cercanos. Esta incapacidad suele afectar al primer metro de la columna muestreada. Por esta misma razón, los peces litorales o de aguas someras, no pueden ser estudiados por ecosondeo debido a la poca profundidad y a la dificultad de maniobra de la embarcación entre la vegetación acuática del litoral. Por tanto, el ecosondeo sólo sirve para aguas libres, y sólo abarca peces pelágicos o de profundidad.

- Dificultad en la detección de peces de fondo, especialmente en aquellas especies que están en contacto con él (a pesar de la función «línea blanca»).
- La partición en varias especies de la biomasa total estimada por ecosondación requiere información auxiliar (índices de abundancia relativa), que suele obtenerse por submuestreo con redes.
- Las estimaciones de biomasa de peces a través de ecointegración requieren conocimientos previos sobre las poblaciones que se muestrean: composición de especies, tallas y pesos.

CONSIDERACIONES SOBRE EL MUESTREO

El objetivo de los estudios de evaluación de poblaciones es, generalmente, obtener una estimación del número total de peces en un área o estudiar las diferencias entre años. En general, puesto que el tamaño de la población (N) se puede obtener como:

$$N = I.V$$

(I : densidad media; V : área o volumen total), el problema se centra en la estimación de I .

El volumen de agua muestreado con una ecosonda es usualmente una pequeña proporción del volumen total de interés para el estudio. Y puesto que macroscópicamente la distribución espacial de los peces es contagiosa, la estimación de I está sujeta a la variabilidad asociada a la distribución no uniforme de los peces y de sus densidades, y la estima debe basarse sobre un número (n) de muestras dentro del área de estudio.

Normalmente, cada muestra consiste en un transecto (plasmado, p.e. en un ecograma) a partir del que se estima la densidad de peces en el área o volumen muestreado. Las densidades (I_i) obtenidas en las muestra son consideradas como n estimas independientes de la densidad de peces en el área de estudio. Desde el punto de vista estadístico, la mejor estima de I es \hat{I} (la media de las n densidades, I_i , de las muestras), por lo que la estima del tamaño de la población (N) se calcula entonces como: $N = \hat{I}.V$.

El error de nuestra estimación puede presentarse en forma de intervalo de confianza (usualmente para una confianza del 95%):

$$I(N,95\%) = N \pm t_{0,025,n-1}.V.s(\hat{I})$$

donde $s(\hat{I})$ es el error estándar de la media de las densidades.

A efectos de comparaciones entre dos años sólo se considerará que las diferencias son significativas si no existe solapamiento entre los intervalos de confianza correspondientes.

Si es posible identificar subáreas dentro de las que la densidad sea más homogénea, lo indicado es un muestreo estratificado. En tal caso, se delimitan m subáreas y en cada subárea se realizan n_j muestras, se calcula la densidad media (\hat{I}_j) y se obtiene el número de peces como: $N_j = V_j . \hat{I}_j$. El tamaño de la población (N) se

calcula entonces por adición del número de peces de las subáreas ($N = \sum N_j$). En este caso el intervalo de confianza se calcula como:

$$I(N, 95\%) = N \pm t_{0,025,n} \cdot s(N)$$

donde $s(N) = \sqrt{(\sum V^2 \cdot s^2(\hat{y}_j))}$ es el error estándar de la estimación, y donde $v = \sum (n_j - 1)$ son los grados de libertad.

Otra forma análoga consiste en cuadrricular el área de estudio y realizar transectos que en conjunto recorran todas las cuadrículas. Una vez identificada la parte correspondiente a cada cuadrícula se procede como si se tratase de transectos independientes. Luego, a partir de la densidad observada y del volumen de la cuadrícula, se calcula el número de peces correspondiente a cada cuadrícula. El número total no es más que la suma del de todas las cuadrículas. El cálculo del error presupone, sin embargo, la realización de al menos una réplica adicional. Este procedimiento requiere un sistema automatizado y sólo se justifica en los casos en que, además, se pretenda cartografiar las densidades para el estudio de la distribución horizontal en un área determinada.

Por efecto del aumento de la sección del haz con la profundidad, el volumen muestreado aumenta también. Si nuestra área de estudio presenta variaciones considerables de profundidad será conveniente realizar los cálculos para los diferentes estratos, y obtener el total por adición (o integración) de dichos resultados. Dicho procedimiento permite, además, el estudio de la distribución vertical.

Bibliografía

- BURCZYNSKI, J. (1982). Introducción al uso de sistemas sonar para la estimación de la biomasa de peces. *FAO, Doc. Tec. Pesca*, 191: rev.1: 79.
- BURCZYNSKI, J. & M. BEN-YAMI. (1985). Búsqueda de peces con ecosonda. *FAO, capacitación*, 7: 100.
- FORBES, S.T. & O. NAKKEN. (1972). Manual of methods for fisheries resource survey and appraisal. Part 2. The use of acoustic instruments for fish detection and abundance estimation. *FAO, Man. Fish. Sci.*, 5: 144.
- JOHANNESSON, K.A. & G.P. LOSSE. (1977). Methodology of acoustic estimations of fish abundance in some UNDP/FAO resource survey projects. *Rapp. P.-V. Reun. CIEM*, 170: 296-318.
- THORNE, R.E. (1983). Assessment of population abundance by hydroacoustics. *Biol. Ocean.*, 2: 253-262.