

Estimación de la biomasa zooplanctónica en zonas costeras usando un perfilador acústico de alta frecuencia

David Alberto Salas de León*, María Adela Monreal Gómez* y Jessica Galarza Macias*

Resumen

Estimación de la biomasa zooplanctónica en zonas costeras usando un perfilador acústico de alta frecuencia. Se presentan resultados del uso de un perfilador acústico de alta frecuencia (5.6 mHz) para estimar la biomasa del zooplancton en una zona costera somera. La biomasa se estimó como una función de la intensidad de las ondas acústicas que se obtiene aplicando el principio de conservación de energía. La intensidad del eco de la onda acústica es proporcional a la energía potencia de la onda. Finalmente la intensidad del eco fue correlacionada con las biomazas de zooplancton estimadas de muestras obtenidas mediante redes. Se efectuó un experimento con seis estaciones en la laguna de la Ría, ubicada en la parte este de la península de Yucatán, en la costa del Caribe mexicano. Se efectuaron mediciones con un perfilador acústico de alta frecuencia (5.6 mHz) y simultáneamente se recolectaron organismos zooplanctónicos mediante muestreos circulares con redes cónicas de 200 y 500 m con un flujómetro acoplado en sus bocas. Los resultados muestran una relación logarítmica entre la intensidad del eco de la señal acústica y la biomasa del zooplancton. El modelo

Abstract

Zooplankton biomass estimation in coastal zones using a high frequency acoustic profiler. Results from the use of a high frequency acoustic current profiler (5.6 mHz) to estimate zooplankton biomass in a shallow coastal zone are presented. The biomass is estimated as a function of the acoustic wave intensity, which is obtained by applying the energy conservation principle. The kinetic energy of the wave is calculated, and by conservation the potential energy is obtained. The intensity of the wave is calculated using this latter energy and correlated to zooplanktonic biomass. One experiment with six sampling stations was performed at the La Ría lagoon, in the eastern Yucatan Peninsula, Mexican Caribbean coast, where the biomass was estimated using an high frequency acoustic profiler (5.6 mHz). Simultaneously, organisms were collected with surface circular tows using 200 and 500 m mesh conical plankton nets coupled provided with a flow meter. The results show a logarithmic relation between the relative backscattered intensity and the zooplankton biomass. The proposed model is useful to estimate zooplanktonic biomass in shallow waters using high frequency profilers,

Résumé

Estimation de la biomasse zooplanctonique en zones côtières en utilisant un profileur acoustique de haute fréquence. Des résultats sont présentés sur l'utilisation d'un profileur acoustique de haute fréquence (5.6 mhz) pour estimer la biomasse de zooplancton en zone côtière de superficie. La biomasse fut estimée comme une fonction de l'intensité des ondes acoustiques qui s'obtient en appliquant le principe de conservation de l'énergie. L'intensité de l'écho de l'onde acoustique est proportionnelle à l'énergie potentielle de l'onde. Finalement l'intensité de l'écho fut reliée aux biomasses de zooplancton estimées d'échantillons obtenus avec des filets. Une expérience fut réalisée en six stations de la lagune de la Ría, localisée dans la partie est de la péninsule de Yucatan, dans la côte Caraïbe mexicaine. Des mesures furent réalisées avec un profileur acoustique de haute fréquence (5.6 mHz) et simultanément des organismes zoo planctoniques furent collectés par échantillonnages circulaires, avec des filets coniques de 200 et 500 mm, équipés d'un débitmètre couplé à leurs encolures. Les résultats montrent une relation logarithmique entre l'intensité de l'écho du signal acoustique et la

*Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, México 04510 D.F.
Tel. (55) 5622-5827, Fax. (55) 5616-0748
Correo electrónico: salas@mar.icmyl.unam.mx

Propuesto es útil para estimar la biomasa del zooplancton con perfiladores acústicos de alta frecuencia, en zonas de aguas poco profundas donde no exista demasiada materia orgánica o sedimento en suspensión.

where not much organic matter and suspended sediment exist.

biomasse du zooplancton. Le modèle proposé est utile pour estimer la biomasse de zooplancton au travers de profileurs acoustiques de haute fréquence, en zones d'eaux peu profondes où il n'existe pas trop de matière organique ou de sédiment en suspension.

Palabras clave: Biomasa, Caribe Mexicano, lagunas costeras, perfiladores acústicos, zooplancton.

Key words: Acoustic profiler, biomass, coastal lagoon, mexican Caribbean, zooplankton.

Mots clefs : Acoustique profileur, biomasse, Caraïbe mexicaine, zones côtières, zoo plancton.

Introducción

Cuando una onda de sonido es reflejada por un objeto en movimiento la frecuencia de la onda sufre una transformación proporcional a la velocidad del objeto en movimiento, esta transformación es conocida como "Efecto Doppler" o "Corrimiento Doppler de Frecuencia". En fechas recientes se han construido equipos que se basan en el principio Doppler de corrimiento de la frecuencia para medir las corrientes oceánicas. El equipo emite una onda acústica a una frecuencia conocida y parte de la onda se refleja en partículas que son transportadas por las corrientes marinas. El eco producido por las partículas modifica la frecuencia de la onda con que son impactados. Conociendo el corrimiento en la frecuencia se puede estimar la velocidad de las partículas y con ello la velocidad de las corrientes. Las partículas que reflejan las ondas acústicas son por lo general organismos del zooplancton, por lo que los perfiladores acústicos de corrientes podrían ser usados para estimar la biomasa zooplanctónica. En la actualidad hay un buen número de trabajos que tratan sobre la distribución y abundancia de la biomasa zooplanctónica estimada mediante perfiladores acústicos de corrientes. Los equipos con los cuales han estimado la biomasa, aparte de medir la velocidad de las corrientes, están diseñados y programados de fábrica de forma tal que podemos medir la intensidad acústica del eco y con eso estimar la biomasa zooplanctónica. La mayoría de los perfiladores acústicos de corrientes no están diseñados para medir la

intensidad del eco de la señal acústica, por lo que hay que hacer algunas transformaciones para obtener esta información.

El uso de los perfiladores acústicos de corriente para estimar la biomasa zooplanctónica es cada día más frecuente. Varios autores han descrito la relación existente entre el eco de la señal acústica y el tamaño y abundancia de los organismos zooplanctónicos (Pieper 1979, Flagg & Smith 1989, Smith *et al.* 1989, Heywood *et al.* 1991, Lyons *et al.* 1994, Stanton *et al.* 1994, Brodeur *et al.* 1996, Benfield *et al.* 1998, Morrison *et al.* 1999, Zimmerman & Biggs 1999, Stanton & Chu 2000). Así como, las propiedades de diferentes organismos del zooplancton para producir ecos. Sobre todo la capacidad reflectiva del organismo, esto es, la diferencia de la densidad corporal con la densidad del medio que atraviesa la onda sonora (Chu & Stanton 1998, Stanton *et al.* 1998a-b). Por otro lado, se han usado registros de ecos obtenidos con perfiladores acústicos de corrientes para caracterizar las migraciones diarias y la distribución de enjambres (parches) del zooplancton (Zhou *et al.* 1994, Bucholz *et al.* 1995, Rippeth & Simpson 1998, Tarling *et al.* 1999, Luo *et al.* 2000, Pershing *et al.* 2001, Trasviña-Castro *et al.* 2003).

El objetivo general de este estudio es mostrar la utilidad de un perfilador acústico de corrientes, pequeño y relativamente barato, de alta frecuencia (5.6 mHz) para estimar la biomasa de zooplancton en zonas costeras y estuarinas poco profundas. Los objetivos específicos son el obtener la intensidad del eco de la señal acústica a partir de los cambios en la velocidad de

transporte del zooplancton, el cual al ser nadador pasivo, posee poca movilidad horizontal; y, estimar la biomasa del zooplancton a partir de un modelo de correlación entre la intensidad del eco y datos de biomasa calculadas de muestras obtenidas con redes.

Material y métodos

Consideraciones teóricas

El método consiste básicamente en calcular la intensidad relativa del eco de una señal acústica, emitida por un perfilador acústico de corrientes y correlacionar la intensidad relativa de los ecos con la biomasa de zooplancton calculadas de muestras capturadas con redes.

Los perfiladores acústicos de corrientes poseen una capacidad de resolución de detectar objetos de un cuarto del tamaño (20%) de la longitud de la onda emitida (Emery & Thompson 2001). Por lo que, la longitud de onda máxima a usar debe de ser cuatro veces mayor al tamaño del objeto que se pretende muestrear. Por ejemplo, si consideramos uno de los perfiladores acústico de mayor uso en la actualidad que emite con una frecuencia de 153 kHz y una longitud de onda de 2.5 mm se detectarán organismos de tamaño mayor o igual a 0.5 mm, que son en su mayoría micronecton, eufausidos y copépodos (Tait 1987, Lyons & Smith 1995). Los peces y sifonóforos reflejan frecuencias bajas mientras que el zooplancton refleja frecuencias mayores a 30 kHz (Pieper & Holliday 1984). Los copépodos reflejan ondas con frecuencias entre 150 y 200 kHz (Pieper & Holliday 1984, Buchholz *et al.* 1995).

Hay dos tipos de perfiladores acústicos de corrientes, los coherentes y los incoherentes. Los primeros transmiten pulsos que son capaces de impactar objetos a una profundidad dada y miden las corrientes a diferentes profundidades, en celdas preestablecidas. Los perfiladores incoherentes registran todas las señales que son reflejadas en el cono de sonido de emisión, por lo que miden la corriente promedio en toda la capa. El zooplancton muestra una distribución en enjambres o parches y una señal incoherente es mejor para detectar zooplancton en regiones someras ya que abarca un

área de dispersión mayor en la columna de agua que una señal coherente.

El perfilador de corrientes acústico usado en este trabajo fue un perfilador incoherente basado en el principio Doppler, modelo STARFLOW de la compañía UNIDATA (tamaño: 29 cm largo, 7 cm ancho, 2.5 cm de alto), que emite una señal acústica a una frecuencia fija por medio de un transductor de 16 mm de diámetro y mide la velocidad de la corriente en un intervalo entre 2.1 cm s^{-1} y 450 cm s^{-1} , con una resolución de 0.1 cm s^{-1} y una precisión de 4% de la velocidad medida. El transductor o emisor de sonido, se encuentra construido de forma tal que las ondas son emitidas en un cono que apunta a 30° sobre la horizontal, con un alcance hasta 5 m en la vertical. La frecuencia de emisión es de 5.6 mHz, por lo que puede detectar organismos de tamaño mayor o igual a 220 m (UNIDATA 1996).

El equipo transmite en forma continua y los ecos de las señales ultrasónicas son recibidos y procesados por los circuitos electrónicos del equipo de forma tal que, transforman el corrimiento en frecuencia en la velocidad promedio de la capa de 5 m. El ruido debido a ecos de ecos o reverberación en las mediciones, es tratado de forma especial ya que puede ser interpretado como corrimientos adicionales en la frecuencia y resultar en velocidades diferentes. En el caso que nos interesa podrían contabilizarse como organismos adicionales que sería una fuente potencial de sesgo en la estimación de resultados. En una distribución estadística de frecuencias, los casos antes mencionados se ubican en los extremos de la curva característica de distribución por lo que son irrelevantes y pueden ser fácilmente eliminados (UNIDATA 1996).

Cada corrimiento en frecuencia registrado entre el emisor y el reflector esta directamente relacionado con la velocidad de los organismos y con los organismos en si. Si conocemos las características de emisión y las de la velocidad de la onda acústica en el agua y las características del eco, entonces podemos calcular la velocidad del reflector. La velocidad del sonido en el agua de mar depende de la densidad, por lo que se calculó la densidad y la velocidad del sonido en la zona

de estudio como función de la temperatura, la salinidad, la turbidez y la profundidad, usando los programas de la UNESCO (Fofonoff & Millard 1983). La temperatura, salinidad, turbidez y profundidad fueron medidos usando una sonda marca YSI modelo 3800 Water Quality.

En este estudio estamos interesados en el eco de la señal acústica y lo que nos proporciona el equipo es la velocidad de la corriente, por lo que requerimos encontrar una relación entre la velocidad de las partículas y la intensidad del eco de la señal. Suponiendo que la energía en nuestro sistema se conserva, entonces es posible establecer una relación entre la velocidad de la señal y el eco usando el corrimiento en la frecuencia y la amplitud de la señal emitida. La primera consideración es que las variaciones en la energía cinética (E_k) son aproximadamente iguales a las variaciones en la energía potencial (E_p). Usando las expresiones para la energía cinética y potencial de una onda acústica tenemos:

$$E_k = \frac{Vv^2}{4} \quad (1)$$

$$E_p = \frac{p^2V}{4c^2} \quad (2)$$

donde V es el volumen desplazado por la onda, ρ la densidad del medio, v la velocidad del objeto, c la velocidad del sonido y p la potencia de la onda. La intensidad de la onda acústica puede ser escrita como:

$$I = \frac{\bar{P}}{A} \quad (3)$$

donde A es el área transversal en la cual impacta la onda en el objeto y \bar{P} la potencia promedio de la onda esférica. La potencia promedio de la onda esférica esta dada por (Medwin & Clay 1997, Galarza-Macias 1998):

$$\bar{P} = \frac{Ap^2}{2c} \quad (4)$$

Como la onda de sonido es una onda de presión, p será el cambio máximo en esta variable, por lo que usando las ecuaciones (1) a (4) podremos

encontrar una expresión para p^2 . Con lo que la intensidad del eco de la señal (I_r) estará dada por:

$$I_r = \frac{v^2c}{2} \quad (5)$$

El intervalo de distribución de las intensidades acústicas es muy amplio, por lo que comúnmente se usa una escala logarítmica. La intensidad del eco va a depender de la intensidad que tenga la onda inicialmente, por lo que usamos una intensidad relativa. La intensidad relativa del eco estará en decibeles (dB) y esta definido como el logaritmo base 10 de la intensidad del eco (I_r) entre la intensidad de la onda antes de impactar el objeto (I_i) (e.g. Seto 1973):

$$I_{dB} = \log \frac{I_r}{I_i} \quad (6)$$

Para obtener la intensidad relativa del eco (I_{dB}) es necesario conocer la intensidad inicial de la onda acústica. Sabemos que el equipo emite con una capacidad acústica de 250 mW y considerando que la potencia de una onda esférica esta dada por (Seto 1973):

$$P = 4\pi r^2 I \quad (7)$$

Encontramos que $I_i = 19.894 \cdot 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}$. Usando las ecuaciones (5) y (7) en (6) finalmente llegamos a:

$$I_{dB} = \log \frac{v^2c}{2I_i} \quad (8)$$

Considerando que los ecos son generados mediante el rebote de la señal acústica en organismos del zooplancton, entonces usando (8) y las biomásas obtenidas de las muestras capturadas con redes, podemos tener una ecuación que nos permita conocer la biomasa conociendo la velocidad medida por el perfilador acústico de corrientes.

Observaciones de campo

Se efectuaron seis estaciones de muestreo en la laguna de La Ría, localizada en la Reserva de la Biósfera Sian Ka'an, en la costa este de la península de Yucatán, México (Fig. 1). La Ría es

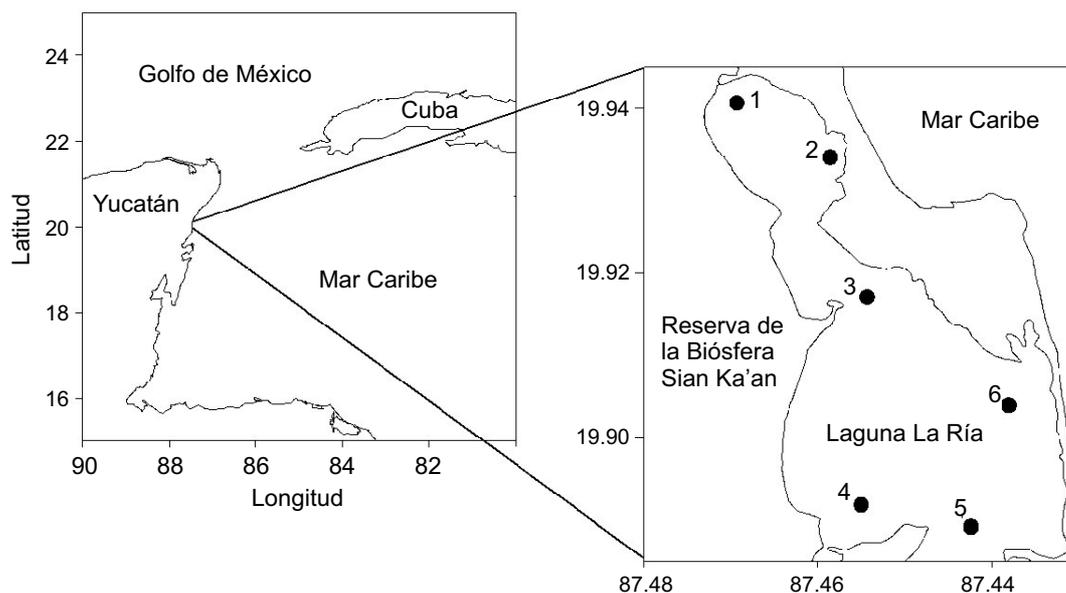


Figura 1. Zona de estudio y estaciones de muestreo en la laguna de La Ría.

una laguna costera con una profundidad máxima de 1.72 m. El perfilador acústico de corriente fue colocado sobre una placa de plomo a 10 cm sobre el fondo para evitar que la acumulación de material pudiera cubrir el transductor del equipo. Simultáneamente se capturaron organismos zooplanctónicos mediante arrastres circulares de 10 minutos usando dos redes cónicas una de 200 μm y otra de 500 μm , con diámetros de 20 cm y flujómetros calibrados en sus bocas. Los registros de velocidad y los arrastres se efectuaron en forma simultánea, la velocidad de la embarcación (1 m s^{-1} o 2 nudos) se mantuvo constante durante los arrastres. El perfilador de corrientes fue programado para que efectuara una medición

cada 10 s, obteniendo un total de 60 mediciones en cada estación, las cuales se promediaron para obtener una medición representativa correspondiente al tiempo de captura de los organismos de acuerdo al teorema del muestreo de Godin (1972). Los organismos capturados fueron preservados en una solución de formaldehído al 4%. La biomasa del zooplancton fue estimada en peso húmedo, eliminando el agua intersticial, para esto se colocaron las muestras sobre papel filtro y mediante vacío se sacó el agua. La biomasa estandarizada por metro cúbico fue transformada a biomasa en peso seco mediante las ecuaciones de Wiebe *et al.* (1975) y Wiebe (1988). Finalmente la biomasa fue normalizada sobre 4π para evitar una sobre

Tabla 1. Biomasa zooplanctónica obtenida con redes de 200 y 500 m e intensidad acústica de los ecos.

Estación de muestreo	Intensidad acústica del Eco (dB)	Biomasa		zooplanctónica	
		Peso total húmedo (g m^{-3}) red de 200 m	Peso total seco (g m^{-3}) red de 200 m	Peso total húmedo (g m^{-3}) red de 500 m	Peso total seco (g m^{-3}) red de 500 m
1	-47.654	7.792	0.070	8.497	0.076
2	-51.203	1.431	0.014	0.282	0.003
3	-48.368	27.009	0.228	6.045	0.055
4	-56.518	34.917	0.291	0.690	0.007
5	-52.017	17.381	0.150	2.525	0.024
6	-59.638	1.756	0.017	0.184	0.002

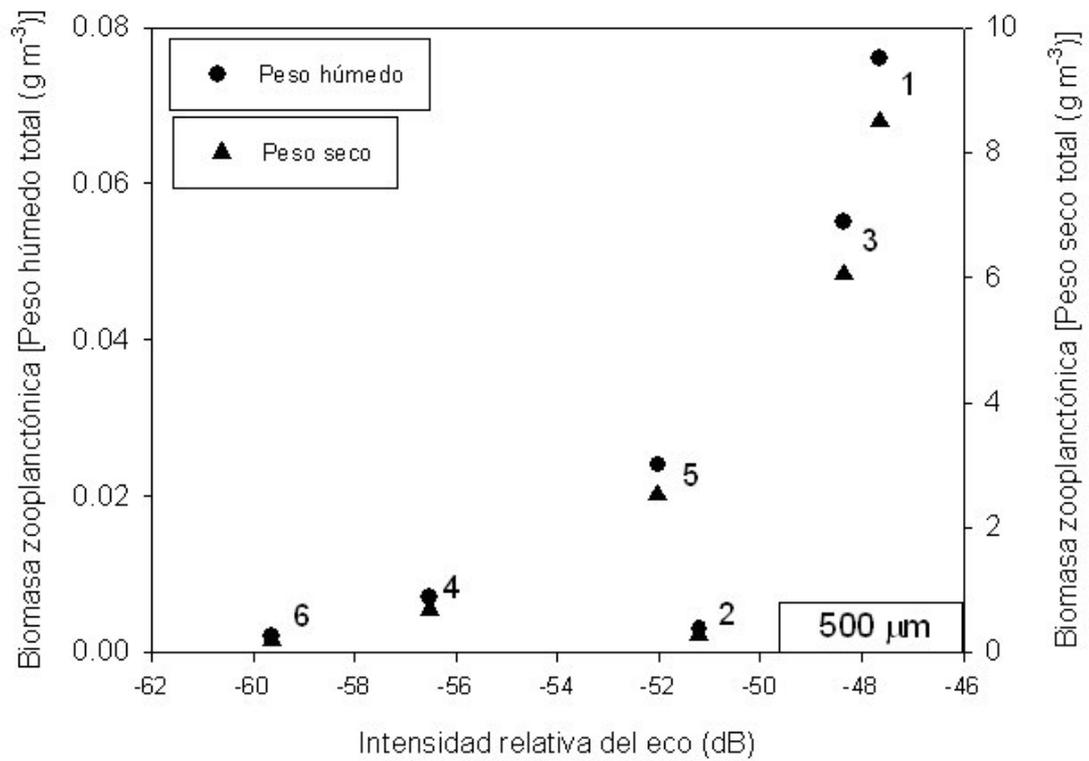
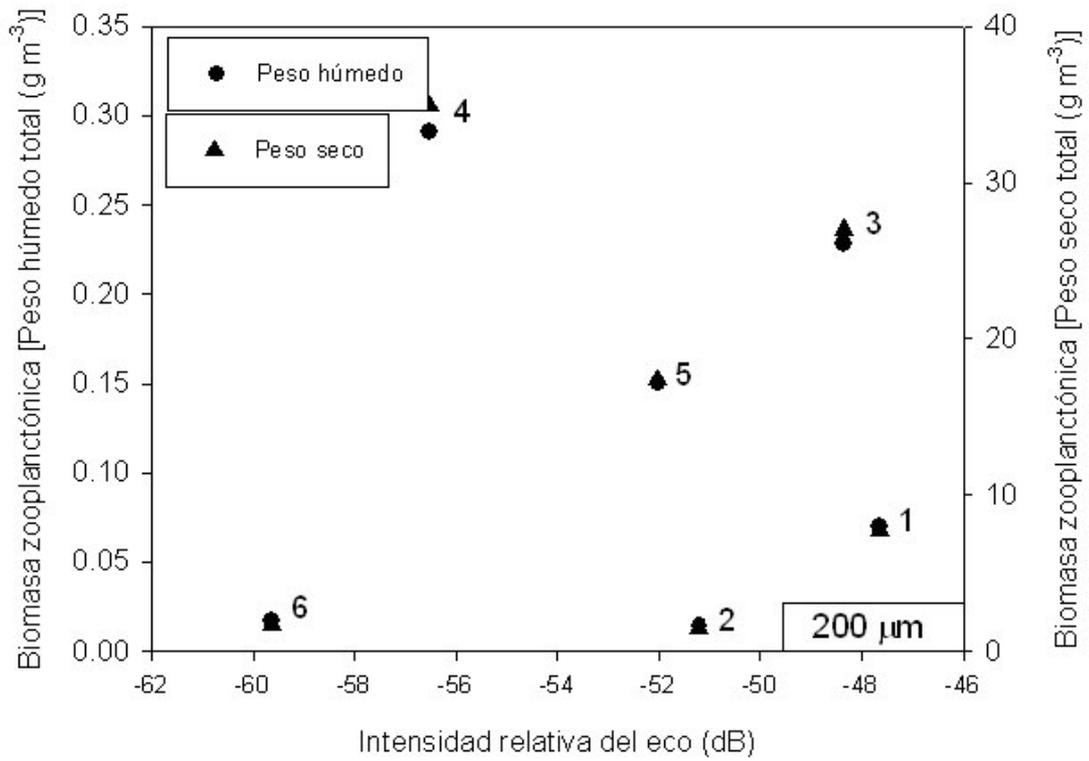


Figura 2. Diagrama de dispersión de biomasa zoopláctónica vs. intensidad relativa del eco. Los números representan las estaciones muestreadas.

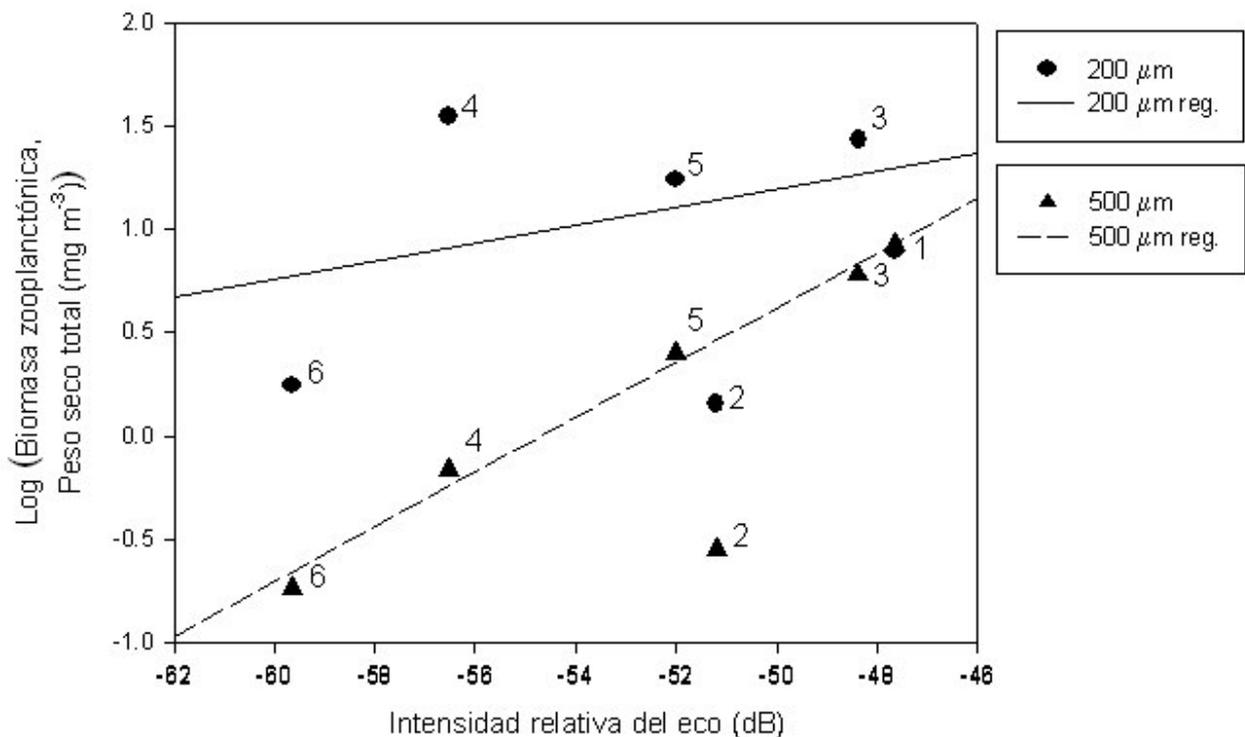


Figura 3. Regresión entre las biomásas estimadas de las muestras de las redes [Log (peso seco/4)] vs. intensidad relativa del eco.

estimación por la esfericidad de la onda acústica (Zimmerman & Biggs 1999).

Resultados

La composición y abundancia ictioplanctónica en la laguna obtenida de las muestras usadas en este trabajo, fue registrada por Sanvicente-Añorve *et al.* (1997, 1999). Se identificaron cuarenta taxa ictioplanctónicas incluyendo 25 grupos y 21 especies. Las más abundantes fueron las familias Gobiidae, Haemiramphidae, Ateriinidae, Clupeiidae y Engraulidae con un 90% del total de las abundancias.

Los resultados obtenidos en la estación dos fueron insatisfactorios por un lado las mediciones del perfilador de corrientes tuvieron demasiado ruido (variaciones erráticas cuyo promedio tiende a cero) y por otro, las redes se saturaron rápidamente con detritus, arena, materia orgánica haciendo que los flujómetros rotaran en sentido inverso. La estación cuatro de las muestras capturadas con la red de 200 μm muestra una desviación de la tendencia.

La tabla 1 y la figura 2 muestran los valores de biomasa en peso seco y peso húmedo para ambos tipos de malla e intensidad acústica relativa del eco y la figura 3 muestra el resultado de la regresión entre el logaritmo base 10 de la biomasa zooplanctónica en peso seco (mg m⁻³) y la intensidad relativa del eco (dB), la tendencia usando peso húmedo es similar que en el caso en que se uso peso seco, por lo que solo se presentan los resultados con peso seco. Se puede observar una relación logarítmica entre la biomasa en peso seco y la intensidad relativa del eco (Fig. 4).

Los resultados muestran una correlación alta y significativa ($r^2 = 0.90$, $p < 0.05$) entre la regresión efectuada con las muestras capturadas con la red de 500 μm y menor en la regresión efectuada con las muestras capturadas con la red de 200 μm ($r^2 = 0.18$) aunque también esta fue significativa ($p < 0.05$).

Los modelos obtenidos para las biomásas zooplanctónicas (BZ en mg m⁻³) como función de la intensidad relativa del eco (IRE en dB) para las redes de 500 m y 200 m respectivamente, son:

$$\text{Log BZ mg m}^{-3} = 3.385 + 0.043 \text{ IRE dB} \quad (9)$$

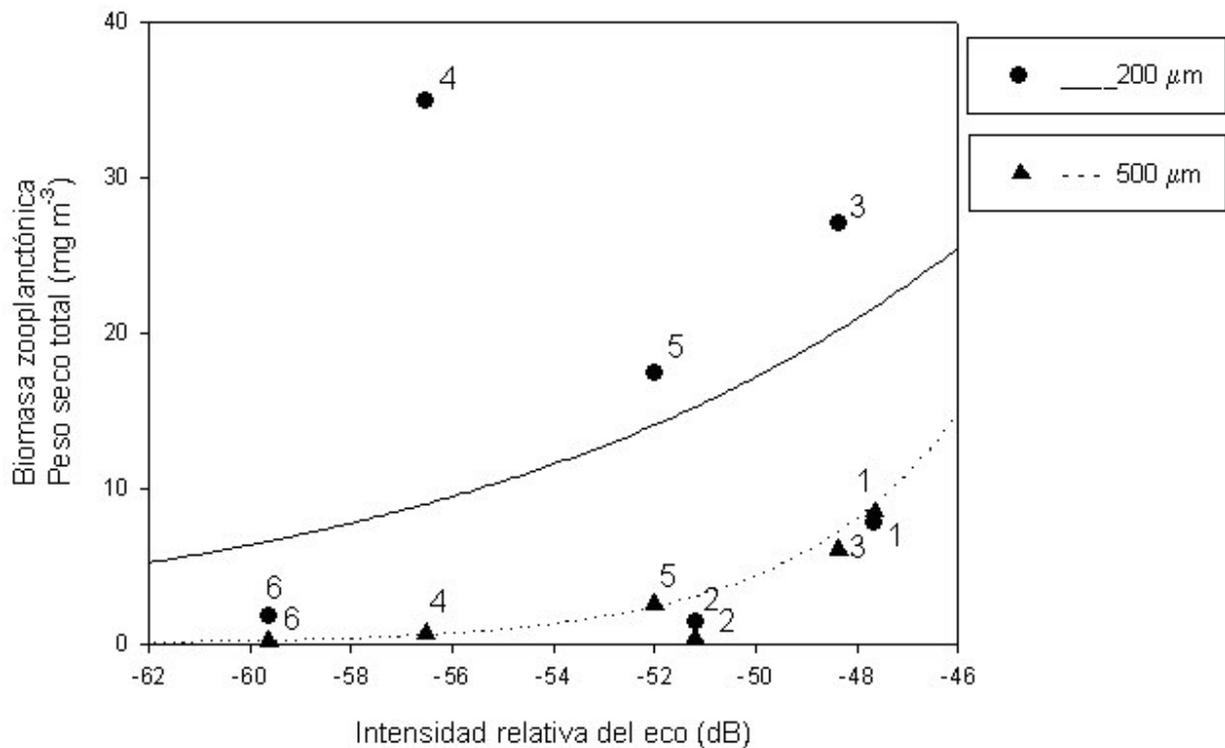


Figura 4. Curva teórica logarítmica entre la biomasa zooplanctónica en peso seco y la intensidad relativa del eco.

$$\text{Log BZ mg m}^{-3} = 7.246 + 0.132 \text{ IRE dB} \quad (10)$$

Discusión y conclusiones

No obstante que el número de estaciones usado no es grande se obtuvieron resultados que permiten establecer una relación funcional entre la velocidad de la corriente, la intensidad acústica relativa del eco y las biomazas de zooplancton de las muestras capturadas con redes, tal que nos permiten usar la información del perfilador acústico de corriente para estimar la biomasa zooplanctónica. Un resultado interesante es que al graficar los datos de la biomasa obtenida a partir de muestras capturadas con redes vs. la intensidad acústica relativa, se puede detectar datos anómalos, como lo fue el caso de la estación dos y cuatro. En el caso del análisis efectuado con muestras obtenidas con la red de 200 μm, el error asociado al muestreo, producto de una mayor dispersión de los datos, que dio una baja correlación, se puede disminuir tomando muestras con menos basura, lo cual se puede lograr disminuyendo el tiempo del arrastre.

Zhou *et al.* (1994) muestran que el volumen muestreado en el cono acústico de la señal de los perfiladores acústicos siempre es mayor que lo que se pueda barrer con las redes, por lo que al efectuar una correlación entre los datos de la intensidad acústica relativa del eco y la biomasa estimada de las muestras obtenidas con redes, se estaría forzando los resultados obtenidos mediante el perfilador acústico a una estimación muy por debajo de la real.

Una de las ventajas del uso de perfiladores acústicos de corrientes para estimar la biomasa zooplanctónica es que es una técnica no invasiva, de alta resolución, en tiempo real y que permite la obtención de series de tiempo largas. Una de las desventajas es que el equipo usado, por ser unifrecuencial solo nos permite estimar la biomasa de organismos de un intervalo fijo de tamaño, sin decirnos nada de las características biológicas de cada organismo en particular. Por lo que este método no sustituye el método tradicional de las redes, es en todo caso complementario.

El modelo propuesto es útil para estimar la biomasa del zooplancton con perfiladores

acústicos de alta frecuencia, en zonas de aguas someras dónde no exista demasiada materia orgánica o sedimento en suspensión.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por PAPIIT IN115903 y por el ICML, ambos de la UNAM, durante el desarrollo de este trabajo, así como las sugerencias efectuadas por dos árbitros anónimos y la traducción del resumen al francés por Aitor Aizpuru.

Referencias

- Benfield, M.C., P.H. Wiebe, T.K. Stanton, C.S. Davis, S.M. Gallager & C.H. Greene. 1998. Estimating the spatial distribution of zooplankton biomass by combining video plankton recorder and single-frequency acoustic data. *Deep Sea Res.* 45(7): 1175-1199.
- Brodeur, R.D., J.M. Napp, M.T. Wilson, S.J. Bogard, E.D. Cokelet, & J.D. Schumacher. 1996. Acoustic detection of mesoscale biophysical features in the Shelikof valley, and their relevance to Pollock larvae in the Gulf of Alaska. *Fisheries Oceanography* 5(1): 71-80.
- Buchholz, F., C. Buchholz, J. Reppin & J. Fischer. 1995. Diel vertical migrations of *Meganyctiphanes norvegica* in the Kattegat: Comparison of net catches and measurements with acoustic Doppler current profilers. *Helgolander Meeresuntersuchungen*, 49(1-4): 849-866.
- Chu, D. & T.K. Stanton. 1998. Application of pulse compression techniques to broadband acoustic scattering by live individual zooplankton. *J. Acoustic Soc. Amer.* 104(1): 39-55.
- Emery, W.J. & R.E. Thompson. 2001. *Data analysis methods in physical oceanography*. Pergamon Press, Nueva York, 658 pp.
- Flagg, N.Ch & S.L. Smith. 1989. On the use of the acoustic Doppler current Profiler to measure zooplankton abundance. *Deep Sea Res.* 36(3A): 455-474.
- Fofonoff, N.P. & R.C. Millard, Jr. 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO Tech. Pap. Mar. Sci. (44): 53 pp.
- Galarza-Macias, J. 1998. Estimación de la biomasa zooplanctónica en zonas costeras con ayuda de un perfilador acústico Doppler. Tesis de licenciatura, Ingeniería Biomédica, Universidad Iberoamericana, México, D.F., 70 pp.
- Godin, G. 1972. *The analysis of tides*. University of Toronto Press, Toronto, 264 pp.
- Heywood, K.J., S. Scrope-Howe & E.D. Barton. 1991. Estimation of zooplankton abundance from shipborne ADCP backscatter. *Deep Sea Res.* 38(6A): 677-691.
- Luo, J., P.B. Ortner, D. Forcucci & S.R. Cummings. 2000. Diel vertical migration of zooplankton and mesopelagic fish in the Arabian Sea. *Deep Sea Res.* 47(7-8): 1451-1473.
- Lyons, M.L.G. & P.E. Smith. 1995. Zooplankton patchiness as estimated by oblique plankton net tows and acoustic Doppler current profiler (ADCP) backscattered return. ICES International Symposium on Fisheries and Plankton Acoustics, Aberdeen, Scotland, 12-16 de junio, 1995.
- Lyons, M.L.G., P.E. Smith & H.G. Moser. 1994. Comparison of cross shelf trends in acoustic Doppler current profiler amplitude and zooplankton displacement volume in southern California. *Reports CalCoFi* 35: 240-245.
- Medwin, H. & C.S. Clay. 1997. *Fundamentals of acoustical oceanography*. Academic Press, Nueva York, 712 pp.
- Morrison, J.M., L.A. Codispoti, S.L. Smith, K. Wishner, C. Flagg, W.D. Gardner, S. Gaurin, S.W.A. Naqvi, V. Manghnani, L. Prosperie & J.S. Gundersen. 1999. The oxygen minimum zone in the Arabian Sea during 1995. *Deep Sea Res.* 46: 1903-1931.
- Pershing, A.J., P.H. Wiebe, J.P. Manning & N.J. Copley. 2001. Evidence for vertical circulation cells in the well-mixed area of Georges Bank and their biological implications. *Deep Sea Res.* 48(1-3): 283-310.
- Pieper, R.E. 1979. Euphausiid distribution and biomass determined acoustically at 102 kHz. *Deep Sea Res.* 26: 687-702.
- Pieper, R.E. & D.V. Holliday. 1984. Acoustic measurements of zooplankton distributions in the sea. *J. Conseil, Conseil International Exploration de la Mer* 42, 83-97. 41: 88-103.
- Rippeth, T.P. & J.H. Simpson. 1998. Diurnal signals in vertical motions on the Hebridean Shelf. *Limnology and Oceanography* 43(7): 1690-1696.
- Sanvicente-Añorve, L., X. Chiapa-Carrara & A. Ocaña-Luna. 1999. Distribución espacial y estacional del ictioplancton en dos sistemas lagunares de la Reserva de la biosfera de Sian Ka'an. *Rev. Biol. Trop.* 47: 179-190.
- Sanvicente-Añorve, L., X. Chiapa-Carrara, M. Sánchez-Ramírez & A. Ocaña-Luna. 1997. Seasonal variability of the ichthyoplankton community in two lagoonal systems of the Mexican Caribbean Sea. *Resumos Expandidos Vol. II., VII COLACMAR, IOUSP-ALICMAR-FIESP, Sao Paulo*, pp. 413-415.
- Seto, W. 1973. *Acústica*. McGraw Hill, You USE, Nueva York, 195 pp.
- Smith, P.E., M.D. Ohman & L.E. Eber. 1989. Analysis of the patterns of distribution of zooplankton aggregations from an acoustic Doppler current profiler. *Reports CalCoFi*. 30: 88-103.
- Stanton, T.K. & D. Chu. 2000. Review and recommendations for the modeling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods. *ICES J. Mar. Sci.* 57(4): 793-807.
- Stanton, T.K., D. Chu & P.H. Wiebe. 1998a. Sound scattering by several zooplankton groups. II. Scattering models. *J. Acoustical Soc. Amer.* 103(1): 236-253.
- Stanton, T.K., D. Chu, P.H. Wiebe, L.V. Martin & R.L. Eastwood. 1998b. Sound scattering by several zooplankton groups. I. Experimental determination of dominant scattering mechanisms. *J. Acoustical Soc. Amer.* 103(1): 225-235.

- Stanton, T.K., P.H. Wiebe, D. Chu, M.C. Benfield, L. Scanlon, L. Martin & R.L. Eastwood. 1994. On acoustic estimates of zooplankton biomass. *ICES J. Mar. Sci.* 51(4): 505-512.
- Tait, R.V. 1987. *Elementos de Ecología Marina*. Editorial Acribia, S.A., Madrid, 446 pp.
- Tarling, G.A., F. Buchholz & J.B.L. Matthews. 1999. The effect of lunar eclipse on the vertical migration behaviour of *Meganyctiphanes norvegica* (Crustacea: Euphausiacea) in the Ligurian Sea. *J. Plankton Res.* 21(8): 1475-1488.
- Trasviña-Castro A., de Velasco G.G., Valle-Levinso A., González-Armas R., Muhlia A. & M.A. Cosío. 2003. Hydrographic observations of the floor in the vicinity of a shallow seamount top in the Gulf of California. *Est. Coast. Shelf Sci.* 57(1-2): 149-162.
- UNIDATA. 1996. *Starflow ultrasonic Doppler Instrument user's manual, version 3*. 101, Magill, Australia.
- Wiebe, P.H. 1988. Functional regression equations for zooplankton displacement volume, wet weight, dry weight, and carbon: A correction. *Fishery Bulletin* 86: 833-835.
- Wiebe, P.H., S.H. Boyd & J.L. Cox. 1975. Relationships between zooplankton displacement volume, wet weight, and carbon. *Fishery Bulletin* 73: 777-786.
- Zhou, M., W. Nordhausen & M. Huntley. 1994. ADCP measurements of the distribution and abundance of euphausiids near the Antarctic Peninsula in winter. *Deep Sea Res.* 41(9): 1425-1445.
- Zimmerman, R.A. & D.C. Biggs. 1999. Patterns of distribution of sound-scattering zooplankton in warm and cold-core eddies in the Gulf of Mexico, from a narrowband acoustic Doppler current profiler survey. *J. Geophys. Res.* 104: 5251-5262.

Recibido: 10 de mayo de 2005.
Aceptado: 17 de junio de 2005.
