

# THE EDGE EFFECT IN THE NORTHEAST NORTH PACIFIC OCEAN

## EL EFECTO DE FRONTERA EN EL NORESTE DEL OCEANO PACÍFICO NORTE

John W. Foerster

Oceanography Department (9d)  
U.S. Naval Academy  
Annapolis, Maryland 21204, USA

*Recibido en agosto de 1995; aceptado en enero de 1996*

### ABSTRACT

During April 1989, an intensive, short-term study of oceanic zooplankton tested the hypothesis that multidimensional distribution (patchiness, diffusion, layering) reflects the water mass interaction in the Northeast North Pacific Ocean (NENPO) during the spring season. The mixing water masses created an edge effect to which the biota responded. A dual frequency sonar array (38 kHz, 200 kHz), towing in tandem with an oceanographic sensor system, recorded zooplankton and environmental changes across various water masses. The tandem sensor system was a method to synoptically map the NENPO at the beginning of the productive period of early spring over an area of  $3.3 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, 125 m in depth. Results from the plankton data showed patchiness and layers conforming to oceanographic physical features. These patterns appeared to define the interactions of the water masses and confirm the hypothesis.

*Key words:* dual frequency sonar, plankton, frontal zone, North Pacific Current, Davidson Current, edge effect.

### RESUMEN

En abril de 1989, un estudio de corto plazo de zooplancton oceánico puso a prueba la hipótesis de que la distribución multidimensional (estratificación, difusión, densidad) refleja la interacción de masas de agua en el noreste del Océano Pacífico Norte (NEOPN) durante la primavera. La mezcla de masas de agua creó un efecto de frontera (*edge effect*) al cual respondió la biota. Se registraron cambios ambientales y en el zooplancton en diversas masas de agua, utilizando un sonar de doble frecuencia (38 kHz, 200 kHz) remolcado en tándem con un sistema sensor oceanográfico. El sistema sensor en tándem se utilizó para trazar sinópticamente el NEOPN al comienzo del periodo productivo a principios de la primavera, cubriendo un área de  $3.3 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, hasta 125 m de profundidad. Los datos de zooplancton resultantes indican capas y concentraciones que siguen las características físicas oceanográficas. Dichos patrones parecieran definir las interacciones de las masas de agua y confirmar la hipótesis.

*Palabras clave:* sonar de doble frecuencia, plancton, zona de frontera, Corriente del Pacífico Norte, Corriente de Davidson, efecto de frontera.

### INTRODUCTION

Physical processes dominate marine environmental systems (Walsh, 1976; Bowman and Esaias, 1978; Nihoul, 1980; Frontier, 1985). In

### INTRODUCCIÓN

Los sistemas ambientales marinos son dominados por procesos físicos (Walsh, 1976; Bowman y Esaias, 1978; Nihoul, 1980;

particular, the environmental area under study in the Northeast North Pacific Ocean (NENPO) is a confluence of planetary scale water masses. Where these water masses mix, there develops a frontal zone. When looking at the biology of the NENPO, it is necessary to consider that each interacting water mass is an ecosystem. As ecosystems, these water masses have a relative internal homogeneity, and a characteristic physical and biological structure with recognizable boundaries (Odum, 1977). Separate ecosystems contacting each other produce an edge effect—an ecotone (Odum, 1971). In an ecotone, the biological production is greater than within each individual ecosystem. Therefore, the hypothesis under test is that multidimensional plankton distribution (patchiness, diffusion, layering) reflects the water mass interaction in the NENPO. Since each water mass has a biomass that is a function of the "...medium (Frontier, 1985)," it is necessary to study them in a comprehensive manner, attempting to integrate area over depth in time. This information will aid in better understanding the environmental impact of mixing, particularly in relation to the physical factors.

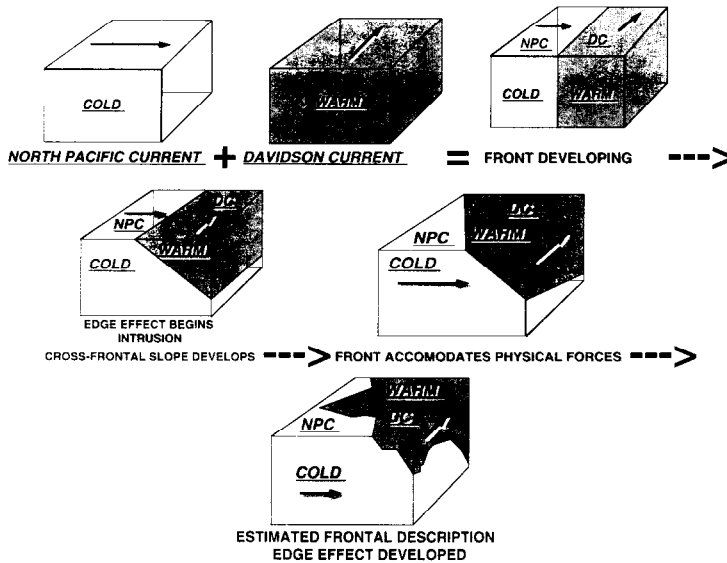
The NENPO study area is off the coast of Washington and Oregon (USA) and includes the planetary scale boundary currents (North Pacific, Davidson) during this study. This study area is oceanic and not coastal. Figure 1 is a conceptual model of how these currents interact to form the proposed edge effect. Studying this interaction requires the synoptic collection of both biological (plankton) and physical measurements.

Often, plankton distribution is a clump of organisms responding to physical processes in the environment (Haury *et al.*, 1978; Harris, 1980; Omori and Hamner, 1982). In particular, zooplankton usually are irregular in their distribution, responding to: a) phytoplankton density (Herman, 1985); b) zones of high temperature gradation (Boyd, 1973); c) a combination of turbulence, phytoplankton density, grazing and vertical movements (Mullins and Brooks, 1976). This distribution is difficult to assess with station sampling and towed nets (Wiebe, 1970).

Frontier, 1985). Específicamente, la zona ambiental estudiada al noreste del Océano Pacífico Norte (NEOPN) representa una confluencia de masas de agua a escala planetaria. Donde se mezclan estas aguas, se produce una zona de frontera. Al estudiar la biología del NEOPN, es necesario reconocer que cada masa de agua interactiva representa un ecosistema. Como ecosistemas, estas aguas tienen una homogeneidad interna relativa y una estructura física y biológica característica con límites reconocibles (Odum, 1977). Los distintos ecosistemas, al entrar en contacto, producen un efecto de frontera (*edge effect*)—un ecotono (Odum, 1971). En un ecotono, la producción biológica es mayor a la que ocurre en cada ecosistema. Por lo tanto, la hipótesis que se estudia es que la distribución multidimensional (estratificación, difusión, densidad) de plancton refleja la interacción de masas de agua en el NEOPN. Ya que cada masa de agua tiene su propia biomasa, en función del "...medio (Frontier, 1985)," es necesario estudiarlas de forma global, intentando integrar superficie sobre profundidad en el tiempo. Dicha información ayudará a entender el impacto ambiental al mezclarse las aguas, particularmente en relación con los factores físicos.

La zona de estudio, NEOPN, se encuentra adyacente a las costas de los estados norteamericanos de Washington y Oregon, e incluye las corrientes de frontera (Pacífico Norte, Davidson) durante este estudio. Dicha zona de estudio es oceánica y no litoral. La fig. 1 presenta un modelo conceptual de como interactúan estas corrientes para formar el propuesto efecto de frontera (*edge effect*). El estudio de dicha interacción requiere la recolección sinóptica de datos biológicos (plancton) y físicos.

A menudo, la distribución de plancton se manifiesta como una agrupación de organismos cuya actividad responde a procesos ambientales (Haury *et al.*, 1978; Harris, 1980; Omori y Hamner, 1982). En particular, el zooplancton suele tener una distribución irregular, respondiendo a: a) la densidad de fitoplancton (Herman, 1985); b) zonas de alta gradación de temperatura (Boyd, 1973); c) la combinación de turbulencia, densidad de fitoplancton, alimentación y movimientos verticales (Mullins y Brooks, 1976). Dicha distribución es difícil de



**Figure 1.** Conceptual model for the development of the edge effect during the spring in the Northeast North Pacific Ocean (re-drawn from Danzler and Scheerer, 1992).

**Figura 1.** Modelo conceptual del desarrollo del efecto de frontera (*edge effect*) durante la primavera en el noreste del Océano Pacífico Norte (dibujo original de Danzler y Scheerer, 1992).

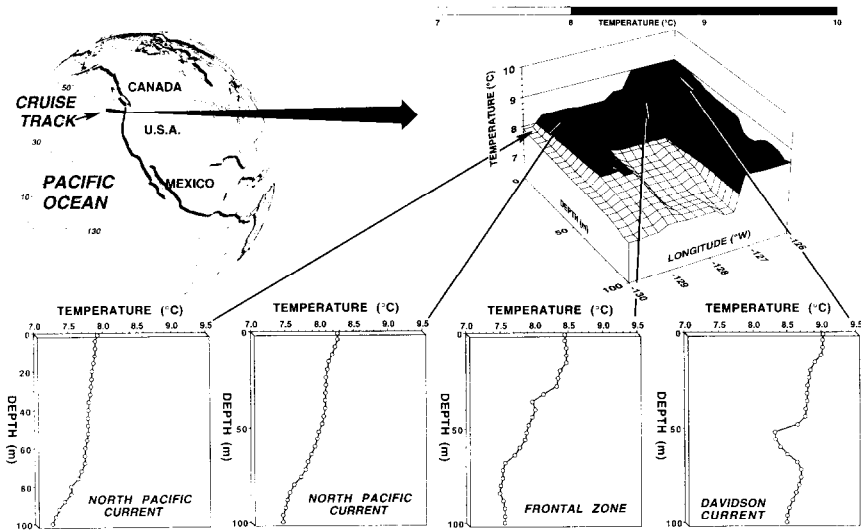
The use of acoustics allows the measurement of large areas of the ocean to develop distributional patterns often not revealed by other methods. Using a dual, narrow beam sonar array towed in tandem with a suite of oceanographic environmental sensors, this study explores the water masses of the NENPO over 700 nautical miles down to 125 m. In particular, this report concentrates on a portion of the data sampled along latitude 46°30'N, from 125°00'W to 131°00'W. The area under study (fig. 1) includes two water masses and a frontal zone (Foerster, 1993). Past studies generally emphasize frontal features in the coastal zone (Richards, 1981). By using tandemly towed sensors in the upper ocean mixed layer, this report relates the plankton biology to the meso-scale oceanic features in the NENPO.

## METHODS

Figure 2 locates the cruise track. Towing begins at the edge of the continental shelf

evaluar con muestreos en las estaciones y redes remolcadas (Wiebe, 1970).

El uso de la acústica permite estudiar extensas zonas del océano para desarrollar patrones de distribución que frecuentemente no se detectan con otros métodos. Utilizando un doble sonar de rayo estrecho, remolcado en tándem con un conjunto de sensores oceanográficos y ambientales, este estudio explora las masas de agua del NEOPN en una superficie de 700 millas marinas hasta una profundidad de 125 m. En particular, este reporte se concentra en una porción de los datos recolectados en la latitud 46°30'N, de 125°00'O a 131°00'O. La zona bajo estudio (fig. 1) comprende dos masas de agua y una zona de frontera (Foerster, 1993). Estudios realizados en el pasado tienden a enfatizar características de frontera en zonas litorales (Richards, 1981). Al utilizar sensores remolcados en tándem en la capa de mezcla superior del océano, este estudio relaciona la biología del plancton con las características a mesoescala en el NEOPN.



**Figure 2.** The mixed layer temperature structure in the Northeast North Pacific Ocean during April 1989. Temperature profiles show a gradient from the North Pacific Current into the Davidson Current. This indicates an edge effect. Cruise track follows latitude 46°30'N, from 125°00'W to 131°00'W.

**Figura 2.** Estructura de la temperatura en la capa de mezcla en abril de 1989. Los perfiles de temperatura indican un gradiente desde la Corriente del Pacífico Norte hacia la Corriente de Davidson. Esto indica el efecto de frontera (*edge effect*). Trayectoria del crucero: 46°30'N, de 125°00'O a 131°00'O.

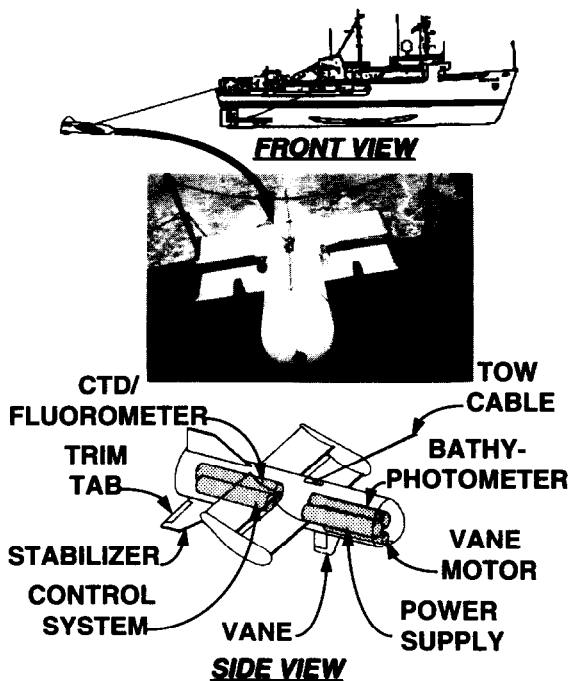
(125°W). It continues along latitude 46°30'N for 10 to 12 h each night until reaching 131°W. The sampling includes the Davidson Current (DC), the North Pacific Current (NPC) and a frontal zone (FZ), with control measurements taken from the Aleutian Current (AC).

Data are from two tandemly towed vehicles. The first (fig. 3) is a paravane system (Ondercin, 1989), containing environmental sensors (conductivity, temperature, depth, chlorophyll *a*, bioluminescence). As the paravane travels through the water, it porpoises every 30 min from near the surface to 150 m and returns. A motion compensating crane keeps the effect of the ship's translational motions to a minimum. Conductivity and temperature provide the environmental parameter sigma-*t* ( $\sigma_t$ ). The  $\sigma_t$  is the environmental parameter used for comparing the water masses and for estimating if water is rising or falling (turbulence). Temperature is the environmental factor defining

## METODOLOGÍA

La fig. 2 muestra la trayectoria del crucero. El remolque comienza al borde de la plataforma continental (125°O). Continúa por la latitud 46°30'N durante 10 a 12 h cada noche hasta alcanzar 131°O. El muestreo incluye la Corriente de Davidson (DC), la Corriente del Pacífico Norte (NPC) y una zona de frontera (FZ), con datos control tomados de la Corriente Aleutiana (AC).

Los datos se obtuvieron con dos vehículos remolcados en tándem. El primero (fig. 3) es un sistema *paravane* (Ondercin, 1989), con sensores ambientales (conductividad, temperatura, profundidad, clorofila *a*, bioluminiscencia). Al hacer su recorrido, la *paravane* se sumerge cada 30 min desde la superficie hasta una profundidad de 150 m y vuelve a la superficie. Una grúa compensadora mantiene los efectos de



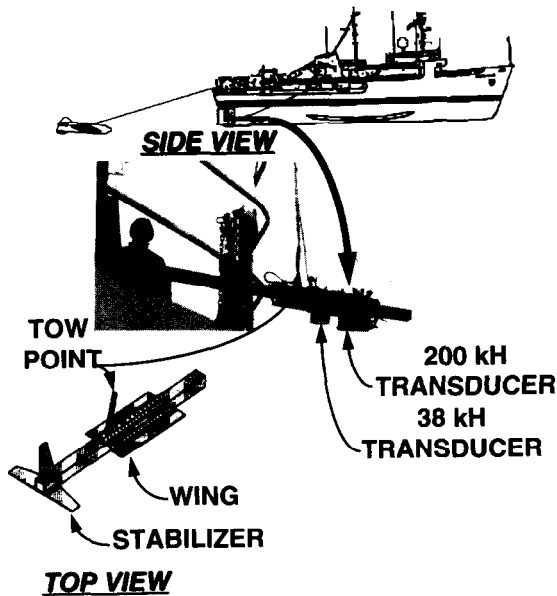
**Figure 3.** Towed oceanographic sensor system (undulating towed vehicle) includes sensors to measure conductivity, temperature and depth (CTD); chlorophyll *a* (fluorometer); bioluminescence (bathypotometer). Data transmit to the ship's computers through the tow cable. All interior spaces filled with buoyant foam to prevent loss if tow cable breaks (vehicle diagram modified from Nelson, 1985).

**Figura 3.** El sistema sensor remolcado (vehículo undulador remolcado) contiene sensores para medir conductividad, temperatura y profundidad (CTD); clorofila *a* (fluorómetro); bioluminiscencia (batifotómetro). Todos los datos se transmiten a la nave vía el cable de remolque. En el supuesto de que se rompa el cable de remolque, el vehículo contiene material flotante en su interior (diagrama modificado de Nelson, 1985).

gradients attractive to zooplankton (Mullins and Brooks, 1976). Chlorophyll *a* and bioluminescence are estimates of the peak in plankton concentrations. These data are important in developing spatial maps and interpreting the data recorded with the sonar array.

The second vehicle (fig. 4) contains the dual frequency, narrow beam sonar array (38 kHz, 6°; 200 kHz, 8°) for estimating the zooplankton biomass (Eherenberg, 1974). This system tows just below the surface and has a resolution good to 95 m. While under tow, both vehicles digitally log data aboard the research vessel. All data simultaneously record

los movimientos del barco a un mínimo. La conductividad y temperatura proveen los parámetros ambientales sigma- $t$  ( $\sigma_t$ ). La  $\sigma_t$  es el parámetro ambiental utilizado para comparar las masas de agua y estimar si el agua está ascendiendo o descendiendo (turbulencia). La temperatura es el factor ambiental que define la gradación atractiva para el zooplankton (Mullins y Brooks, 1976). La clorofila *a* y la bioluminiscencia son estimaciones del máximo de las concentraciones de plancton. Dichos datos son importantes para desarrollar mapas dimensionales e interpretar los datos registrados con el equipo sonar.



**Figure 4.** Towed dual frequency acoustic sensor has two transducers (a 38 kHz, 6° beam width and a 200 kHz, 8° beam width). The armored tow cable transmits the acoustic data to a dual channel video recorder on the ship.

**Figura 4.** El sensor acústico de doble frecuencia remolcado contiene dos transductores (38 kHz, 6°; 200 kHz, 8°). El cable de remolque transmite los datos acústicos a una grabadora de video de doble canal a bordo de la nave.

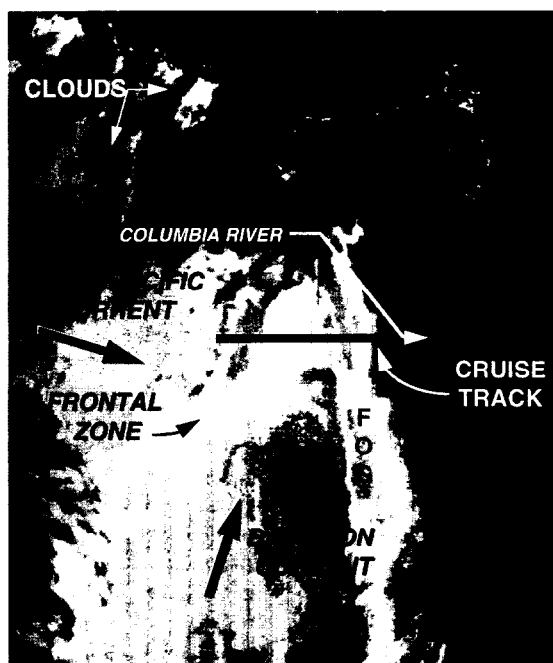
with ship speed, direction and position on 9-track computer tapes (*paravane* data), and a dual channel digital video recorder (*sonar* data). Towing speeds are between 14 and 18 km h<sup>-1</sup> (8-10 knots).

All digitally recorded *sonar* data received processing using the procedures described by Eherenberg (1974) and Greene *et al.* (1989). These procedures derived relative biomass values by echo integrating a combination of zooplankton length and target signal strength. Both towed systems afford a direct measurement of the mixed layer in the NENPO in time and space. This type of information gathering is difficult to procure using vertical station sampling.

In addition to the ship collected data, satellite information from the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration's (U.S. Department of Commerce) polar orbiter satellites

El segundo vehículo (fig. 4) contiene el equipo sonar de frecuencia doble y rayo estrecho (38 kHz, 6°; 200 kHz, 8°) para estimar la biomasa zooplanctónica (Eherenberg, 1974). Dicho equipo se remolca por debajo de la superficie y tiene una resolución hasta los 95 m. Durante el remolque, ambos vehículos graban los datos digitalmente a bordo del barco oceanográfico. Todos los datos grabados simultáneamente contienen información relativa a la velocidad de la nave y su posición en cintas de 9 *tracks* (datos *paravane*), y grabadora video digital de doble canal (*sonar data*). Las velocidades de remolque varían entre 14 y 18 km h<sup>-1</sup> (8-10 nudos).

Todos los datos de sonar grabados digitalmente se procesaron según los procesos descritos por Eherenberg (1974) y Greene *et al.* (1989). Estos procesos derivan valores relativos de biomasa al integrar, mediante eco, una



**Figure 5.** An Advanced Very High Resolution (AVHRR) satellite image of the Northeast North Pacific Ocean on April 12, 1989. A sea surface temperature (SST) front (frontal zone) exists between the North Pacific Current and the Davidson Current. The large black arrows indicate the direction of flow for the two currents (adapted from Foerster, 1993).

**Figura 5.** Imagen de satélite de alta resolución (AVHRR) del noreste del Océano Pacífico Norte el 12 de abril de 1989. Existe una zona de frontera de temperatura superficial del mar (SST) entre la Corriente del Pacífico Norte y la Corriente de Davidson. Las flechas negras indican la dirección de las corrientes (adaptado de Foerster, 1993).

recorded sea surface temperature before, during and after the oceanographic cruise. The information was useful as a monitor of circulation changes (Foerster, 1993), and for locating the frontal zone (fig. 5).

Twice daily, the ship stopped for vertical stations. The vertical sensor system recorded environmental parameters (conductivity, temperature, depth, chlorophyll *a*) and collected net plankton. The net plankton provided specimens for species identification and a check on the biomass values developed from the sonar system. In addition, two analyses of species composition provided a check on the similarity between the NPC and the FZ. The first

combinación de la fuerza y duración de la señal del zooplancton. Ambos sistemas de remolque proveen una medición directa de la capa de mezcla en el NEOPN en el tiempo y espacio. Dicha información es muy difícil de derivar con muestreos verticales en las estaciones.

Además de la información recolectada a bordo de la nave, también se utilizó información sobre la temperatura superficial del mar antes, durante y después del crucero oceanográfico. Dicha información se obtuvo por satélite mediante el Polar Orbiter de la National Oceanic and Atmospheric Administration (U.S. Department of Commerce). Esta información fue útil para determinar los cambios en la

analysis was for similarity using the equation  $S = 2C/A + B$ , where  $A$  is the number of species in the FZ,  $B$  the number of species in the NPC,  $C$  the species common to both water masses and  $S$  the similarity (Odum, 1971). The second analysis was the index of biotal dispersity (IBD):  $IBD = (T - S/n - 1/S) \times 100$ , where  $T$  is the arithmetical sum of all species found in each area,  $S$  the actual number of species in all areas and  $n - 1$  the number of stations - 1 (Koch, 1957). In both indices, the closer the result to 1 (similarity) or 100 (dispersity), the more similar the areas are in species composition. An IBD number of 60% or greater indicates plankton homogeneity (Brown, 1969). In addition to these collections and comparisons, the AC at 50°N by 135°W received sampling to assess the seasonality of the data and provide a control.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Physical information

The NENPO off the coast of Washington and Oregon, south of Vancouver Island, British Columbia, is the eastern edge of the North Pacific gyre. During the winter and early weeks of the spring, a north flowing warm, more saline current, the DC, exists between the NPC and the coastal water (Hickey, 1989).

As winter closes and spring advances, the North Pacific High Pressure Center expands. During the winter, the anti-cyclonic circulation around the high pressure center creates a wind flow from the south along the Pacific Northwest coast of Washington and Oregon assisting in the flow of the DC. In spring, with the expansion of the high, the winds shift to the west enhancing the easterly flow of the NPC. With the change of season, the DC weakens and appears to interact better with the strengthening NPC (Foerster, 1993). When the DC finally disappears for the season, the cold, southerly flowing California Current replaces it (Hickey, 1989). It is this transition time between the presence of the DC and its disappearance that this study investigates.

Figure 2 has mixed layer temperature profiles for the study area, showing a gradient from the NPC to the DC. During this study, the

circulación (Foerster, 1993) y para localizar la zona de frontera (fig. 5).

La nave se detuvo dos veces al día para tomar muestreos verticales. El sistema sensor vertical grabó parámetros ambientales (conductividad, temperatura, profundidad, clorofila *a*) y recolectó plancton de red. El plancton de red se utilizó para identificar especies y verificar los valores de biomasa obtenidos con el sistema sonar. Asimismo, se utilizaron dos análisis de la composición de especies para verificar las similitudes entre la NPC y FZ. El primer análisis se utilizó para detectar la similitud mediante la fórmula:  $S = 2C/A + B$ , donde  $A$  es el número de especies en la FZ,  $B$  el número de especies en la NPC,  $C$  las especies comunes a ambas masas de agua y  $S$  la similitud (Odum, 1971). El segundo análisis detecta el índice de dispersión de la biota (IBD):  $IBD = (T - S/n - 1/S) \times 100$ , donde  $T$  es la sumatoria de todas las especies en cada zona,  $S$  el número actual de especies en todas las zonas y  $n - 1$  el número de estaciones - 1 (Koch, 1957). En ambos índices, entre más cercano el resultado a 1 (similitud) o 100 (dispersión), mayor es la similitud en composición de especies entre las zonas. Un resultado de IBD de 60% ó más indica homogeneidad de plancton (Brown, 1969). Además de dichas recolectas y comparaciones, también se estudió el AC (50°N, 135°O) para evaluar la estacionalidad de los datos y establecer un control.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Información física

El NEOPN adyacente a las costas de Washington y Oregon, al sur de la Isla de Vancouver, Colombia Británica, representa el límite este del giro Pacífico Norte. Durante el invierno y las primeras semanas de primavera, existe una corriente cálida y más salina, la DC, entre la NPC y las aguas litorales (Hickey, 1989).

Al terminar el invierno y con el avance de la primavera, el centro de alta presión del Pacífico Norte se extiende. En el invierno, la circulación anticiclónica alrededor del centro de alta presión crea vientos del sur a lo largo de las costas de Oregon y Washington, asistiendo en



bottom of the mixed layer averaged 56 m. The NPC is moving into and under the edge of the DC, producing a FZ (fig. 1) (Foerster, 1993). A verification of this gradient comes from the satellite images. Figure 5 is a multi-channel sea surface temperature image showing the FZ between the North Pacific and Davidson Currents. It is in the FZ that the edge effect develops.

Figure 6 represents the density of the water as  $\sigma_t$ . Where the NPC and the DC come together, a geostrophic upwelling (Yentsch, 1974) appears at 125°30'W. This upwelling is a combination of the NPC displacing the DC as it turns southward and the barrier of the continental shelf to the east. A downwelling feature appears to exist at 130°W. The physical data compared to the phytoplankton data (figs. 7B, 8) appear to outline a rotational cell at the confluence of the two currents. This mixing produces a good environment for the organisms.

### Biological conditions

Zooplankton are the indicators of edge effect. Figure 7 is a biological comparison of the areas adjacent to and in the FZ. Frontal zones have turbulence, a temperature gradient and a food supply (Anon., 1978). These are the factors seemingly important to producing zooplankton patches (Mullins and Brooks, 1976). In the FZ, the zooplankton biomass (fig. 7A) increases by a magnitude of 4 over the NPC. Also, the chlorophyll *a* maximum stretches towards the surface, which indicates an upwelling condition (fig. 7B). The food supply (fig. 7B) is available and the zooplankton are responding (fig. 7A).

The phytoplankton curve (fig. 7B) is bimodal, while the zooplankton curve peaks only in the region of the FZ. A phytoplankton peak appears outside the FZ in a downwelling area where the temperature and turbulence factors are less significant than those in the FZ. In addition, the phytoplankton composition changes from predominantly diatoms in the FZ to dinoflagellates in the downwelling area. Figure 8, bioluminescence, reflects this change, indicating that dinoflagellates are major community formers in the downwelling region. Microscopic analysis also reflects the change in phyto-

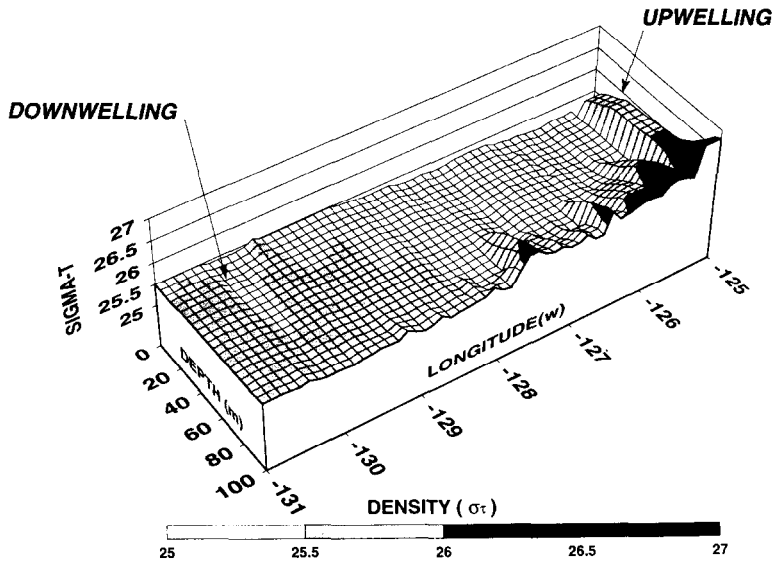
la circulación de la DC. En primavera, con la expansión de la alta presión, el viento gira hacia el oeste, incrementando la circulación este de la NPC. Con el cambio de estación, la DC se debilita y parece relacionarse mejor con la NPC que se intensifica (Foerster, 1993). Cuando finalmente desaparece la DC, es sustituida por las aguas frías de la Corriente de California que fluyen hacia el sur (Hickey, 1989). Esta investigación se llevó a cabo durante este periodo de transición, entre la presencia de la DC y su desaparición.

La fig. 2 muestra perfiles de temperatura de la capa de mezcla en la zona de estudio, indicando un gradiente de la NPC hacia la DC. Durante el curso de este estudio, la parte inferior de esta capa estuvo en promedio a los 56 m. La NPC se mueve hacia y por debajo de la DC, produciendo una FZ (fig. 1) (Foerster, 1993). La verificación de dicho gradiente se encuentra en las imágenes de satélite. La fig. 5 presenta una imagen multicanal de la temperatura superficial, indicando la FZ entre la NPC y la DC. Es en esta FZ donde se produce el efecto de frontera (*edge effect*).

La fig. 6 representa la densidad del agua como  $\sigma_t$ . Donde se juntan la NPC y la DC, se produce una surgencia geostrofica (Yentsch, 1974) a los 125°30'O. Dicha surgencia es una combinación de la NPC desplazando la DC al girar hacia el sur y la barrera de la plataforma continental hacia el este. Un hundimiento convectivo parece establecerse a los 130°O. Los datos físicos comparados con los datos fitoplanctónicos (figs. 7B, 8) parecen perfilar una zona rotacional al confluir las dos corrientes. Dicha mezcla produce un buen ambiente para los organismos.

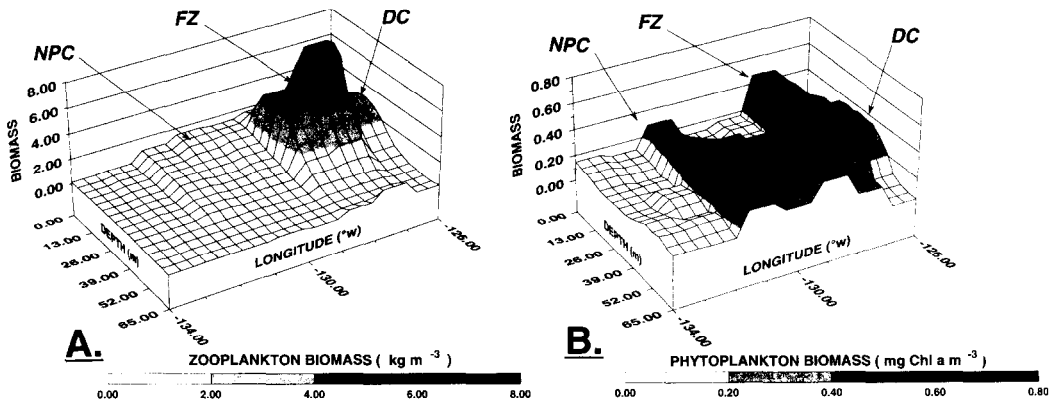
### Condiciones biológicas

El zooplankton es un indicador del efecto de frontera (*edge effect*). La fig. 7 presenta una comparación biológica entre las zonas adyacentes a y en la FZ. Las zonas de frontera son turbulentas, tienen gradación de temperatura y representan una fuente alimenticia (Anon., 1978). Estos son los factores importantes para producir concentraciones (parches) de zooplankton (Mullins y Brooks, 1976). En la FZ, la



**Figure 6.** The mixed layer density structure in the Northeast North Pacific Ocean during April 1989 along latitude 46°30'N. There are both upwelling and downwelling signatures.

**Figura 6.** Estructura de la densidad en la capa de mezcla en el noreste del Océano Pacífico Norte en abril de 1989 (46°30'N). Existen surgencias así como hundimiento convectivo.



**Figure 7.** Comparison of the zooplankton biomass (A) to the phytoplankton biomass (B). Peaks of production center in the frontal zone where the edges of the North Pacific Current and the Davidson Current mix (127-128°W). NPC = North Pacific Current; FZ = frontal zone; DC = Davidson Current.

**Figura 7.** Comparación de la biomasa zooplantónica (A) con la biomasa fitoplanctónica (B). Los máximos de producción se presentan en la zona de frontera, donde se mezclan la Corriente del Pacífico Norte y la Corriente de Davidson (127-128°O). NPC = Corriente del Pacífico Norte; FZ = zona de frontera; DC = Corriente de Davidson.

plankton composition as well as a reduction in zooplankton.

An adjacent water mass to the north, the Aleutian Current, is a further check on plankton production and composition. Aleutian Current (AC) control samplings show low phytoplankton ( $0.35 \text{ mg Chl } a \text{ m}^{-3}$ ) and zooplankton ( $0.9 \text{ kg m}^{-3}$ ) production. Zooplankton are mostly in larval stages or early development. These values indicate that the environment is not as conducive to growth as the FZ region. As a further analysis of the water mass interactions, the biomass of chlorophyll *a* (food source) compared to the biomass of the zooplankton (harvester) has correlation coefficients (*r*) increasing from the less productive water masses to the FZ [AC (0.46) < NPC (0.64) < DC (0.72) < FZ (0.75)]. It appears that the mixing between the edges of the NPC and the DC produces a better environment. Another indicator that the FZ area is productive is the presence of zooplankton predators like salps, arrow worms and comb jellyfish. The zooplankton major peak is right in the midst of the phytoplankton with a small peak near the surface (fig. 7A). This surface peak is from a large salp [*Iasis zonaria* (Pallas)].

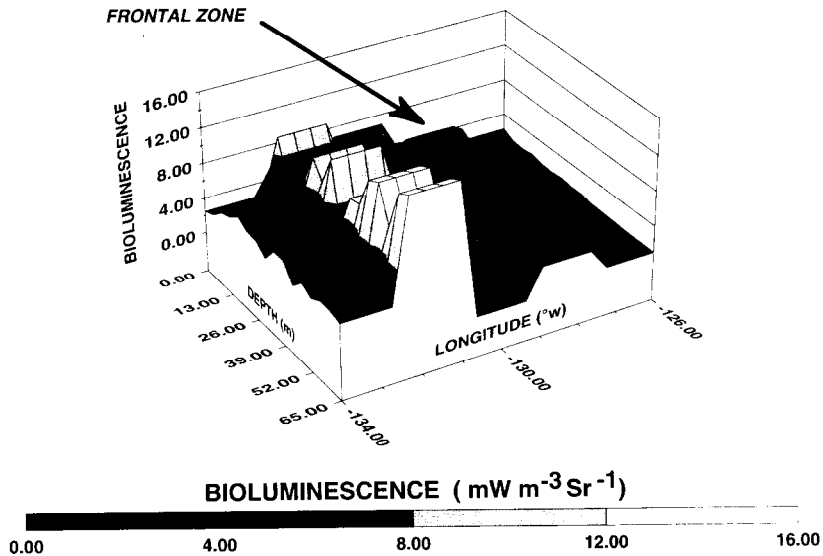
Figure 9 is a series of vertical zooplankton plots. These plots follow the zooplankton concentration from the DC, through the FZ and into the NPC, with a peak of biomass production in the FZ. Zooplankton species distribution shows a good similarity among the species in the NPC and the FZ (mixed layer water column:  $S = 0.67$ , IBD = 50%; at 40-60 m in zooplankton peak:  $S = 0.64$ , IBD = 47%). This means that the species composition has some similarity between the two water masses, but the biotal dispersity is not homogeneous. Figure 10 is a set of vertical zooplankton plots within the FZ. These plots demonstrate the rise and fall of the zooplankton biomass across the FZ. Zooplankton productivity is a magnitude of 4 greater in the FZ than the NPC. In addition, the zooplankton have the largest concentration between 40 and 60 m in the FZ, while they have a more uniform distribution in the NPC.

Phytoplankton have a similarity index of 0.8 and a dispersity of 68%. This means that the species composition is similar in the NPC and the FZ. A dispersity of 68% indicates a more

biomasa de zooplancton (fig. 7A) incrementa por una magnitud de 4 sobre la NPC. Asimismo, el máximo de clorofila *a* se desplaza hacia la superficie, lo cual indica una condición de surgencia (fig. 7B). La fuente alimenticia (fig. 7B) está disponible y el zooplancton responde hacia ella (fig. 7A).

La curva fitoplanctónica (fig. 7B) es bimodal, mientras que la curva zooplanctónica tiene un pico sólo en la región de la FZ. Aparece un máximo de fitoplancton fuera de la FZ en una zona de hundimiento convectivo, donde los factores de temperatura y turbulencia tienen menor efecto que en la FZ. Además, la composición fitoplanctónica cambia de diatomeas en la FZ a dinoflagelados en la zona de hundimiento convectivo. La fig. 8 (bioluminiscencia) refleja dicho cambio, indicando que los dinoflagelados son los principales creadores de comunidades en la zona de hundimiento. Un análisis microscópico también indica el cambio en la composición fitoplanctónica así como una disminución de zooplancton.

La Corriente Aleutiana (AC), una masa de agua adyacente al norte, representa otro punto de verificación en la producción y composición de zooplancton. Los ejemplares control de la AC muestran bajos niveles en la producción de fitoplancton ( $0.35 \text{ mg Cl } a \text{ m}^{-3}$ ) y zooplancton ( $0.9 \text{ kg m}^{-3}$ ). El zooplancton se encuentra principalmente en estadios larvarios o en pleno desarrollo primario. Estos valores indican que dicho ambiente no promueve el crecimiento de la biota como la FZ. Como análisis adicional de la interacción entre las masas de agua, la biomasa de clorofila *a* (fuente alimenticia) comparada con la biomasa de zooplancton (consumidor) tiene un coeficiente de correlación (*r*) que incrementa desde aguas menos productivas hacia la FZ [AC (0.46) < NPC (0.64) < DC (0.72) < FZ (0.75)]. Parece ser que la interacción entre los límites de la NPC y la DC crea un ambiente más positivo. Otro indicador de que la región de la FZ es más productiva es la presencia de depredadores de zooplancton, como las salpas, lombrices flecha y aguaviva de peineta. El máximo de zooplancton se presenta justo en el medio del fitoplancton, con un pequeño pico cerca de la superficie (fig. 7A). Dicho pico se debe a una gran salpa [*Iasis zonaria* (Pallas)].



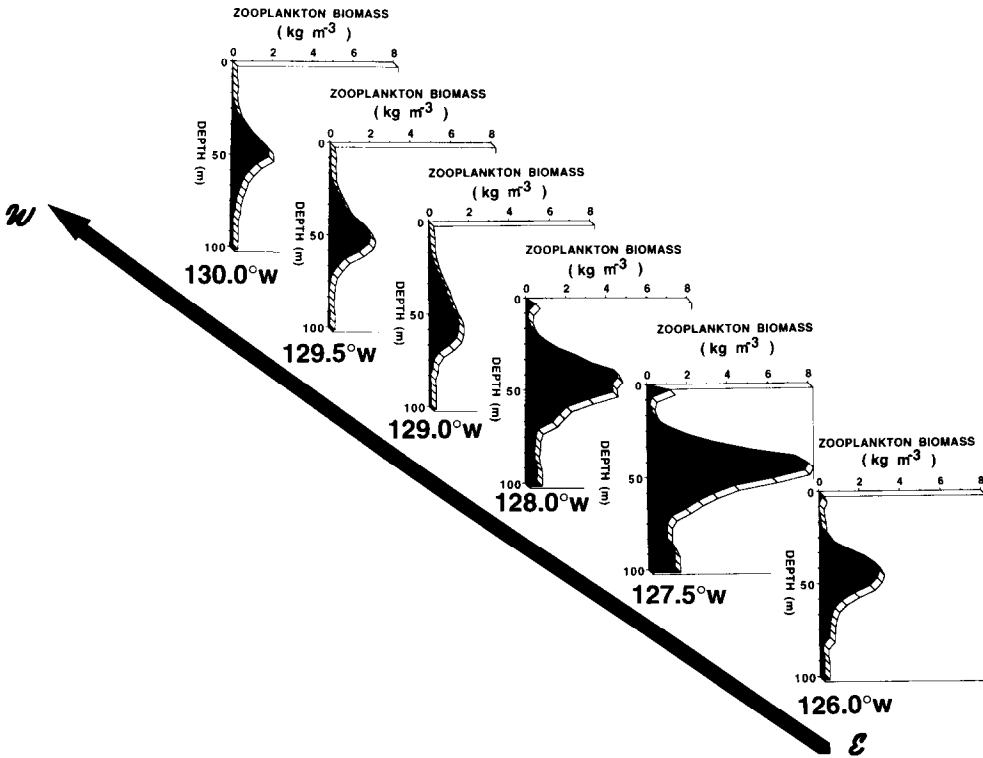
**Figure 8.** Distribution of the bioluminescence pattern indicates a downwelling feature to the west of the frontal zone. It also indicates a shift in phytoplankton species composition when compared to fig. 5B.

**Figura 8.** La distribución del patrón de bioluminiscencia indica un hundimiento convectivo al oeste de la zona de frontera. También indica un cambio en la composición de especies fitoplanctónicas al compararse con la fig. 5B.

homogeneous distribution than the zooplankton (Brown, 1969). The phytoplankton biomass production in the FZ is a magnitude of 3 greater than the NPC. In the FZ, diatoms have a concentration of species at 40-60 m and the dinoflagellates are more uniform in distribution. Dinoflagellate species have a peak of concentration at 60-80 m in the NPC, while the diatoms are more uniform in distribution.

Comparison of the recorded biological information from the environmental sensors and the sonar system shows good agreement for peaks of biological production (fig. 11). In all instances, the zooplankton agrees with the peaks formed by chlorophyll *a* biomass (phytoplankton) and bioluminescence (dinoflagellates, immature krill and salps). Based on the physical features, the zooplankton concentrations appear as a function of turbulence (mixing in the FZ), temperature gradient (mixing between the NPC and the DC) and phytoplankton production. The

La fig. 9 presenta una serie de gráficas de zooplankton, las cuales siguen las concentraciones de zooplankton desde la DC, por la FZ, hasta la NPC, con un máximo en la producción de biomasa en la FZ. La distribución de especies zooplanctónicas muestra similitud entre las especies en la NPC y la FZ (columna de agua en la capa de mezcla:  $S = 0.67$ ,  $IBD = 50\%$ ; de 40 a 60 m en el pico de zooplankton:  $S = 0.64$ ,  $IBD = 47\%$ ). Esto indica que la composición de especies es similar en las dos masas de agua, pero que la dispersión de la biota no es homogénea. La fig. 10 presenta una serie de gráficas de zooplankton en la FZ, que demuestran el incremento y decremento de la biomasa zooplanctónica en ésta. La producción de zooplankton en la FZ es cuatro veces mayor que en la NPC. Además, el zooplankton tiene la concentración más alta entre 40 y 60 m en la FZ, mientras que tiene una distribución más uniforme en la NPC.



**Figure 9.** Profiles of zooplankton production derived by acoustic measurement. The North Pacific Current covers longitudes 130-129°W. At 128°W, the mixing of the North Pacific Current and Davidson Current begins, reaching a peak in the frontal zone at 127.5°W. The Davidson Current profile is 126°W.

**Figura 9.** Perfiles de producción zooplanctónica derivados de mediciones acústicas. La Corriente del Pacífico Norte cubre las longitudes 130-129°O. A los 128°O comienza la mezcla de la Corriente del Pacífico Norte y la Corriente de Davidson, alcanzando un máximo en la zona de frontera a los 127.5°O. El perfil de la Corriente de Davidson es 126°O.

sonar system, as deployed, gives an accurate profile of the zooplankton concentrations in these water masses and reveals the edge effect created when the two currents mix.

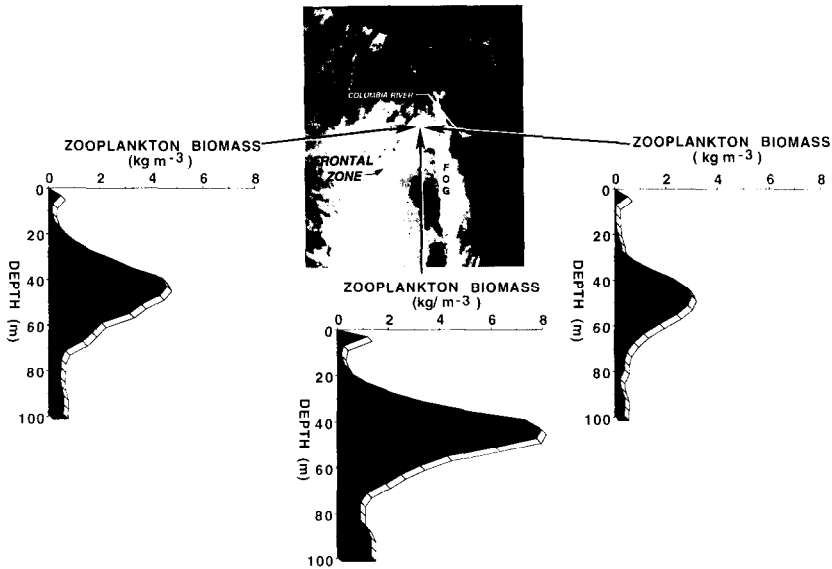
## CONCLUSIONS

Using the information derived from the two tandemly towed sensor systems, the conclusions are:

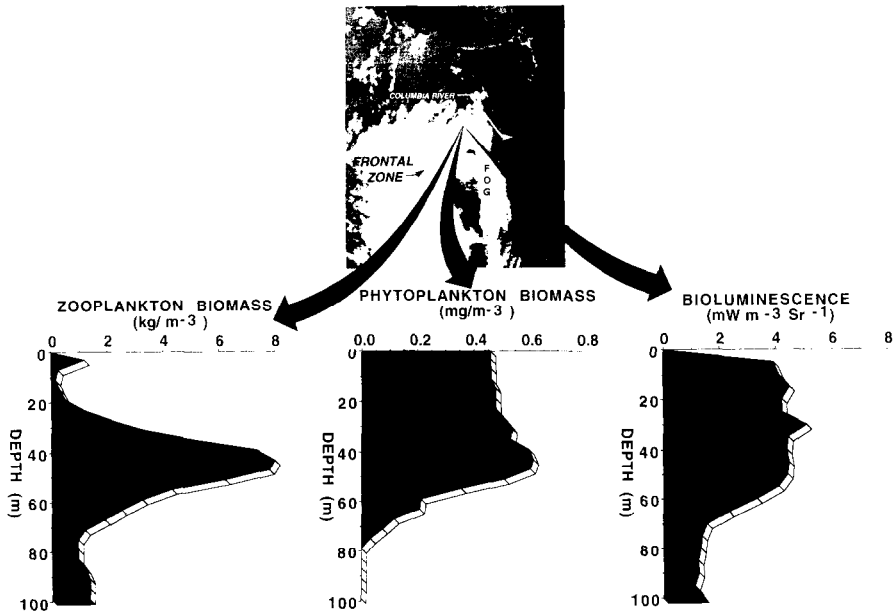
Simultaneous sampling of chlorophyll *a* and zooplankton yielded vertical zones of matching production.

The highest zooplankton relative biomass measurements occurred in the frontal zone

El fitoplancton tiene un índice de similitud de 0.8 y una dispersión de 68%. Esto indica que la composición de especies es similar en la NPC y la FZ. Una dispersión de 68% indica una distribución más homogénea que la del zooplancton (Brown, 1969). La producción de biomasa fitoplanctónica en la FZ es tres veces mayor que en la NPC. En la FZ, las diatomeas tienen una concentración de especies a los 40-60 m y los dinoflagelados tienen una distribución más uniforme. Los dinoflagelados tienen un máximo de concentración a los 60-80 m en la NPC, mientras que las diatomeas tienen una distribución más uniforme.



**Figure 10.** Zooplankton biomass across the frontal zone (FZ). Although the FZ is generally higher in biomass than the two interacting water masses, there is a peak of production within the feature.  
**Figura 10.** Biomasa zooplancónica en la zona de frontera (FZ). Aunque la biomasa en la FZ suele ser mayor que en las dos masas de agua, existe un máximo de producción en ésta.



**Figure 11.** Biological production in the frontal zone. In all three curves, there is a peak centered on 50 m. This is the area of maximum production created when the edges of the North Pacific Current and the Davidson Current mix.  
**Figura 11.** Producción biológica en la zona de frontera. En las tres curvas hay un máximo a los 50 m. Ésta es la zona de máxima producción cuando se mezclan los límites de la Corriente del Pacífico Norte y la Corriente de Davidson.

where turbulence, temperature gradient and phytoplankton production were highest.

The biological production appeared related to the water mass and demonstrated an edge effect.

The biological patterns appeared to mark regions influenced by upwelling and downwelling.

The simultaneously towed systems were excellent tools in mapping a large area of ocean and detailing the biological characteristics relative to the physical structure.

From the information gathered, the hypothesis is acceptable. The plankton are responding to environmental conditions in the water masses difficult to detect without using towed vehicles.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

Funding is from the Remote Sensing Group, The Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, Alan Bjerkass sponsor. I acknowledge the manuscript critical review of Patricia Thompson (JHU-APL), Douglas Edsall and Caitlin Mullen (USNA), Harold E. Schlichting (BioControl), Francis R. Trainor (University of Connecticut), and the editor of *Ciencias Marinas*. Translation into Spanish by Miguel A. Ferrer-Roig.

#### REFERENCES

- Anon. (1978). Proceedings of the Workshop. In: M.J. Bowman and E. Esaias (eds.), *Oceanic Fronts in Coastal Processes*. Springer-Verlag, New York, pp. 6-13.
- Boyd, C.M. (1973). Small scale spatial patterns of marine zooplankton examined by an electronic *in situ* zooplankton detecting device. *Neth. J. Sea Res.*, 7: 103-111.
- Bowman, M.J. and Esaias, E. (1978). *Oceanic Fronts in Coastal Processes*. Springer-Verlag, New York, 113 pp.
- Brown, S.D. (1969). Grouping plankton samples by numerical analyses. *Hydrobiologia*, 33: 289-301.
- Dantzer, H.L. and Scheerer, D.J. (1992). An Oceanographic Expert System for Tactical Oceanography. The Johns Hopkins Univ., Applied Physics Lab., STC-92-152, 38 pp.

La comparación de los datos biológicos grabados por los sensores ambientales y el sistema sonar indica una conformidad en la producción biológica (fig. 11). En todos los casos, el zooplancton concuerda con los picos desarrollados por la biomasa de clorofila *a* (fitoplancton) y los bioluminescentes (dinoflagelados, kril inmaduro y salpas). Con base en los datos físicos, las concentraciones de zooplancton están en función de la turbulencia (mezcla en la FZ), gradiente de temperatura (mezcla entre la NPC y la DC) y la producción de fitoplancton. El sistema sonar, de la forma en que se utilizó, proporciona un buen perfil de las concentraciones de zooplancton en estas masas de agua y demuestra el efecto de frontera (*edge effect*) cuando se mezclan las dos corrientes de agua.

#### CONCLUSIONES

Utilizando los datos obtenidos con los dos sistemas de sensor remolcados en tándem, se concluye lo siguiente:

Los muestreos simultáneos de clorofila *a* y zooplancton indican zonas verticales de producción similar.

Las mediciones más altas de biomasa relativa de zooplancton se presentaron en la zona de frontera, donde la turbulencia, gradación de temperatura y la producción de fitoplancton fueron mayores.

La producción biológica parece estar relacionada con la masa de agua y demuestra un efecto de frontera (*edge effect*).

Los ritmos biológicos parecen marcar zonas influenciadas por surgencias y hundimiento convectivo.

Los sistemas de remolque simultáneo resultaron ser excelentes para trazar un gran área del océano y detallar las características biológicas relacionadas con las estructuras físicas.

De la información obtenida, la hipótesis es aceptable. El plancton responde a condiciones ambientales en masas de agua difíciles de detectar sin vehículos remolcados.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Remote Sensing Group de la Johns Hopkins University,

- Eherenberg, J.E. (1974). Two applications for a dual beam transducer in hydroacoustic fish assessment systems. *IEEE International Conference on Engineering, Ocean and Environment*, 1: 152-155.
- Foerster, J.W. (1993). Northeast North Pacific Ocean: Surface current pattern shifts during the spring. *Remote Sensing of Environment*, 43: 149-159.
- Frontier, S. (1985). Diversity and structure in aquatic ecosystems. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 23: 253-312.
- Greene, C.H., Wiebe, P.H. and Burczynski, J. (1989). Analyzing zooplankton size distribution using high frequency sound. *Limnol. Oceanogr.*, 34: 129-139.
- Harris, G.P. (1980). Spatial and temporal scales in phytoplankton ecology. Mechanisms, methods, models, and management. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37: 877-900.
- Hauray, L.R., McGowan, J.A. and Wiebe, P.H. (1978). Patterns and processes in the time-space scales of plankton distributions. In: J.H. Steele (ed.), *Spatial Pattern in Plankton Communities*. Plenum, New York, pp. 277-327.
- Herman, A. (1985). Biological profiling in the upper oceanic layers with a Batfish vehicle: A review of applications. In: A. Zirino (ed.), *Mapping Strategies in Chemical Oceanography*. Am. Chem. Soc., Washington, DC, pp. 293-314.
- Hickey, B.M. (1989). Patterns and processes of circulation over the Washington Continental Shelf and Slope. In: M.R. Landry and B.M. Hickey (eds.), *Coastal Oceanography of Washington and Oregon*. Elsevier, New York, pp. 41-115.
- Koch, L.F. (1957). Index of biotal dispersity. *Ecology*, 38: 145-148.
- Mullins, M.M. and Brooks, E.R. (1976). Some consequences of distributional heterogeneity of phytoplankton and zooplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 21: 784-796.
- Applied Physics Laboratory, patrocinado por Alan Bjerkass. Se agradece la revisión crítica del manuscrito a Patricia Thompson (JHU-APL), Douglas Edsall y Caitlin Mullen (USNA), Harold E. Schlichting (BioControl), Francis R. Trainor (University of Connecticut) y la editora de *Ciencias Marinas*.
- Traducido al español por Miguel A. Ferrer Roig.
- 
- Nelson, C.V. (1985). Bio-optical Measurement Platforms and Sensors. The Johns Hopkins Univ., Applied Physics Lab., STD-R-1160, 59 pp.
- Nihoul, J.C.J. (1980). The turbulent ocean. In: J.C.J. Nihoul (ed.), *Marine Turbulence*. Elsevier, Amsterdam, pp. 1-19.
- Odum, E.P. (1971). *Fundamentals of Ecology*. W.B. Saunders Co., Philadelphia, 574 pp.
- Odum, E.P. (1977). The emergence of ecology as a new integrative discipline. *Science*, 195: 1289-1293.
- Omori, M. and Hamner, W.M. (1982). Patchy distribution of zooplankton: behavior, population and sampling problems. *Mar. Biol.*, 72: 193-200.
- Ondercin, D.L. (1989). Spatial characterization of bio-optics in the Sargasso Sea. Johns Hopkins Univ., Applied Physics Lab. Technical Digest, 10: 45-55.
- Richards, F.A. (1981). *Coastal Upwelling*. American Geophysical Union, Washington, DC, 529 pp.
- Wiebe, P.H. (1970). Small scale spatial distribution in oceanic zooplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 15: 205-217.
- Walsh, J.J. (1976). Models of the sea. In: D. Cushing and J. Walsh (eds.), *The Ecology of the Seas*. W.B. Saunders Co., Philadelphia, pp. 388-407.
- Yentsch, C.S. (1974). Influence of geostrophy on primary production. *Tethys*, 6: 111-118.