



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

APORTE DE NUTRIENTES A LAS CAPAS SUPERFICIALES DE LA CUENCA DE GUAYMAS



TESIS

**que para obtener
el título de**

OCEANOLOGO

presenta

JOSE DE JESUS SALAS PEREZ

Ensenada, B.C., Septiembre de 1992

APORTE DE NUTRIENTES A LAS CAPAS SUPERFICIALES
DE LA CUENCA DE GUAYMAS

T E S I S

QUE PRESENTA:

JOSE DE JESUS SALAS PEREZ

APROBADA POR:



DR. ANTOINE BADAN DANGON



M. C. RUBEN CASTRO VALDEZ



M. C. RENE PINET PLASENCIA

Resumen

Las capas superficiales de la Cuenca de Guaymas, parte central del Golfo de California, mantienen concentraciones considerables de sales nutritivas y tasas medias de productividad primaria comparables a las mayores del mundo. Puesto que los aportes eólicos y fluviales de nutrientes al Golfo son despreciables, la circulación oceánica del Golfo debe inducir un flujo de nutrientes de las profundidades intermedias hacia las capas superiores de la Cuenca de Guaymas. Este flujo de nutrientes es inducido por las surgencias, por el intercambio baroclínico entre cuencas y la doble difusión. La surgencia y el intercambio baroclínico son los que proveen las elevadas concentraciones de nutrientes hacia la superficie de la Cuenca de Guaymas. Los flujos medios por el intercambio baroclínico presentan órdenes de magnitud de $533 \text{ mol PO}_4 \text{ s}^{-1}$, $13378.65 \text{ mol SiO}_3 \text{ s}^{-1}$, y $5969.54 \text{ mol NO}_3 \text{ s}^{-1}$, mientras que los flujos medios en las costas de Sonora hacia la región media del Golfo tienen $1.92 \times 10^{-3} \text{ mol PO}_4 \text{ s}^{-1}$, $5.33 \times 10^{-2} \text{ mol SiO}_3 \text{ s}^{-1}$ y $2.88 \times 10^{-3} \text{ mol NO}_3 \text{ s}^{-1}$. Por otra parte las fluctuaciones por mezcla introducen $8.38 \text{ mol PO}_4 \text{ s}^{-1}$, $268.51 \text{ mol SiO}_3 \text{ s}^{-1}$ y $121.46 \text{ mol NO}_3 \text{ s}^{-1}$. La surgencia aporta $0.392 \text{ mol PO}_4 \text{ s}^{-1}$, $8.64 \text{ mol SiO}_3 \text{ s}^{-1}$ y $4.65 \text{ mol NO}_3 \text{ s}^{-1}$. Los nutrientes introducidos por la circulación media sostienen una producción de carbono orgánico anual de $8.517 \times 10^5 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los fosfatos, $1.703 \times 10^7 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los silicatos y

$6.86 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los nitratos. Por lo tanto los aportes preponderantes son los flujos sobre el umbral y principalmente el debido a la circulación media del Golfo.

AGRADECIMIENTOS

La base de este trabajo es establecida por la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{c}
 \text{mamá} = \text{Clemen} \quad \text{Cda} = \text{Lupita} \quad \text{Hna} = \text{Paty} \\
 \int \quad \quad \quad \int \quad \quad \quad \int \\
 \text{papá} = \text{José Luis} \quad \text{Hno} = \text{Pepo} \quad \text{Cdo} = \text{Rafael} \\
 \\
 \text{Hna} = \text{Gabl} \quad \text{Hna} = \text{Clemen} \quad \text{Hna} = \text{Vero} \\
 \int \quad \quad \quad \int \quad \quad \quad \int \\
 \text{Cdo} = \text{Domingo} \quad \text{Hna} = \text{Luci} \quad \text{Hno} = \text{Quique}
 \end{array}
 \{ \text{Amor Apoyo}(\text{moral} + \text{económico}) \} dt = \text{Nuevooceanólogo}.$$

Nota.- Las unidades amor·apoyo·tiempo se consideran iguales al segundo término de la ecuación.

También agradezco al Dr. Antoine Badan Dagon por sus grandiosas cátedras, por su paciencia para que pudiera entenderlas y por su disposición para guiarme por el fascinante mundo de la oceanología.

Al M.C. Francisco Ley Lou y al Oc. Alejandro Lambert Arista por su gentileza de recomendarme ante el Dr. Badan. Para el M.C. Gilberto Gaxiola Castro quien siempre estuvo dispuesto para facilitarme cualquier información y aclararme dudas acerca de este trabajo.

A los miembros de mi comité M.C. René Pinet Plascencia, M.C. Rubén Castro Valdéz, Dr. Miguel Lavín y Dr. Edgar Pavía, por sus sugerencias para mejorar este trabajo.

A las P.O. Griselda Tablero López e Ignacia Soria que tuvieron que desvelarse para dar los detalles finales a las figuras que se presentan en este trabajo. Al P.O. Manuel López y al Oc. Gilberto Velázquez por su disposición para aclararme cualquier duda acerca de computación. A mis amigos P.O. Miguel Ahumada Sempoal y al P.O. Antonio Gama Campillo por su apoyo. A Delia Hernández que siempre tuvo tiempo para escucharme. A Julieta Castro por su amabilidad.

Y a los pobres de optimismo, porque esta es una prueba de la perseverancia, entrega e ilusión de alcanzar una meta.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCION.	5
Objetivo.	
II. CONFIGURACION Y OCEANOGRAFIA DEL GOLFO DE CALIFORNIA.	
II.1 Configuración.	7
II.2 Batimetría.	
II.3 Masas de agua.	10
II.4 Descripción de propiedades físico-químicas.	11
II.5 Forzamiento de la circulación.	13
II.6 Circulación.	17
III. BALANCE DE NUTRIENTES.	
III.1 Modelo de caja.	19
IV. OBSERVACIONES.	26
V. RESULTADOS.	
V.1 Campos hidrográficos.	29
V.2 Perfiles individuales.	47
V.3 Relación entre la temperatura y los nutrientes.	53
V.4 Aporte de nutrientes a la capa eufótica.	57
VI. DISCUSIONES.	60
VII. CONCLUSIONES.	63
VIII. BIBLIOGRAFIA.	64

Lista de figuras

Figura		Página
1.	Configuración y batimetría del Golfo de California.	8
2.	Localización de las zonas principales donde ocurren fenómenos de surgencias y procesos de mezcla (modificado de Roden y Goves, 1964).	14
3.	Representación del modelo de caja, para la Cuenca de Guaymas.	24
4.	Localización de los transectos longitudinales y transversal. Transecto I...Transecto II...Transecto III... Transecto IV, (modificado de SIO Reference 88-6), y anclajes de los correntómetros.	27
5a.	Distribución vertical de temperatura en el transecto I.	30
5b.	Distribución vertical de fosfatos en el transecto I.	32
5c.	Distribución vertical de silicatos en el transecto I.	33
5d.	Distribución vertical de nitratos en el transecto I.	34
6a.	Distribución vertical de temperatura en el transecto II.	35
6b.	Distribución vertical de fosfatos en el transecto II.	36
6c.	Distribución vertical de silicatos en el transecto II.	37
6d.	Distribución vertical de nitratos en el transecto II.	38
7a.	Distribución vertical de temperatura en el transecto III.	40
8a.	Distribución vertical de temperatura en el transecto IV.	43

Figura	Continuación de la tabla de figuras	Página
8b.	Distribución vertical de fosfatos en el transecto IV.	44
8c.	Distribución vertical de silicatos en el transecto IV.	45
8d.	Distribución vertical de nitratos en el transecto IV.	46
9.	Comportamiento de propiedades conservativas y no conservativas respecto a la profundidad, Transecto I.	48
10.	Comportamiento de propiedades conservativas y no conservativas respecto a la profundidad, Transecto II.	49
11.	Comportamiento de propiedades conservativas y no conservativas respecto a la profundidad, Transecto III.	50
12.	Comportamiento de propiedades conservativas y no conservativas respecto a la profundidad, Transecto IV.	51
13.	Regresión lineal aplicada a datos de temperatura contra fosfatos.	54
14.	Regresión lineal aplicada a datos de temperatura contra silicatos.	55
15.	Regresión lineal aplicada a datos de temperatura contra nitratos.	56

Lista de tablas

Tabla	Página
I.	Valores de las pendientes obtenidas a partir 53 de las regresiones.

I. INTRODUCCION.

Las capas superficiales del Golfo mantienen concentraciones elevadas de nutrientes y sostienen una productividad primaria considerable, particularmente en la Cuenca de Guaymas y en la región de las islas Angel de la Guarda, San Lorenzo y Tiburón. Las concentraciones de sales nutritivas en las aguas del Golfo de California se incrementan desde la boca hacia el norte, con un máximo en la región de los umbrales, en particular en el canal de Ballenas, y disminuyen en el alto Golfo (Alvarez-Borrego et al, 1978). Los valores de productividad integrada hasta 40 m de profundidad van de $0.530 gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ para la zona comprendida entre la Cuenca de Guaymas y el canal de Ballenas, hasta $0.677 gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ para la parte norte (Zietzchiel, 1969). Por otra parte Alvarez-Borrego y Lara-Lara, (1992) reportan valores de productividad primaria integrada hasta 40 m de profundidad para la misma región, que varían de 1 a $4 gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$. Zietzchiel (1969) explica que la tasa media de productividad primaria en el Golfo ($0.382 gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) es comparable con la de otras regiones de productividad elevada, como es la Bahía de Bengala ($0.406 gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), las áreas de surgencia frente a la costa occidental de Baja California ($0.140 gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ - $0.988 gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) y frente al noroeste de Africa ($0.609 gC \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$). Como consecuencia de esa productividad primaria, en la Cuenca de Guaymas se han reportado valores de captura en la pesquería de sardina de 109,442 a 294,095 ton métricas para el período

de 1988-1991 (Hamman et al., 1991).

El aporte de nutrientes al Golfo por ríos y por transporte eólico es despreciable. En el primer caso únicamente se aprecian efectos locales cercanos a la costa, que se acentúan en la época de lluvias (Alvarez-Borrego, 1983). Por lo tanto, debemos suponer que los nutrientes presentes en las capas superiores provienen de las cuencas abisales, encaminados por un flujo vertical de nutrientes que es provocado por la circulación misma del Golfo de California. En ella participan numerosos procesos físico-oceanográficos capaces de provocar aportes de nutrientes a las capas superficiales. El propósito del presente trabajo es determinar cuales de esos procesos participan en forma significativa al aporte de nutrientes a las capas superiores de la Cuenca de Guaymas y evaluar la contribución de cada uno de ellos, para alcanzar un mejor entendimiento de la dinámica de los nutrientes en el Golfo de California. El presente trabajo está ordenado como sigue: en § 2 se describe la configuración y descripción oceanográfica del Golfo de California, en § 3 se presenta el balance de nutrientes, en § 4 las observaciones, en § 5 los resultados, en § 6 las discusiones, y en § 7 se dan las conclusiones.

II. CONFIGURACION Y DESCRIPCION OCEANOGRAFICA DEL GOLFO DE CALIFORNIA.

II.1 Configuración.

El Golfo de California es un mar marginal de forma aproximadamente rectangular, de 1500 km de longitud y cerca de 200 km de ancho. Se localiza entre la península de Baja California y la costa occidental del México continental, orientado en dirección noroeste a sureste. Al sur, en su porción terminal, tiene comunicación abierta con el Océano Pacífico (figura 1).

II.2 Batimetría.

La batimetría del Golfo lo divide en una serie de cuencas y canales, separados por una secuencia de umbrales (Shepard, 1950). Esas cuencas disminuyen progresivamente de profundidad desde los 3500 m cerca de la boca, donde el Golfo se conecta con el Océano Pacífico, hasta los 2000 m en la parte central de la Cuenca de Guaymas y disminuyen aún más en el alto Golfo donde la profundidad excede los 200 m solamente en algunas cuencas pequeñas. La Cuenca de Guaymas tiene un ancho de 160 km, y constituye la región media del Golfo de California (Roden y Groves, 1959), conectada en su parte norte por medio de una secuencia de canales que se localizan entre las islas de San Lorenzo, San Esteban, Tiburón y Angel de la Guarda.

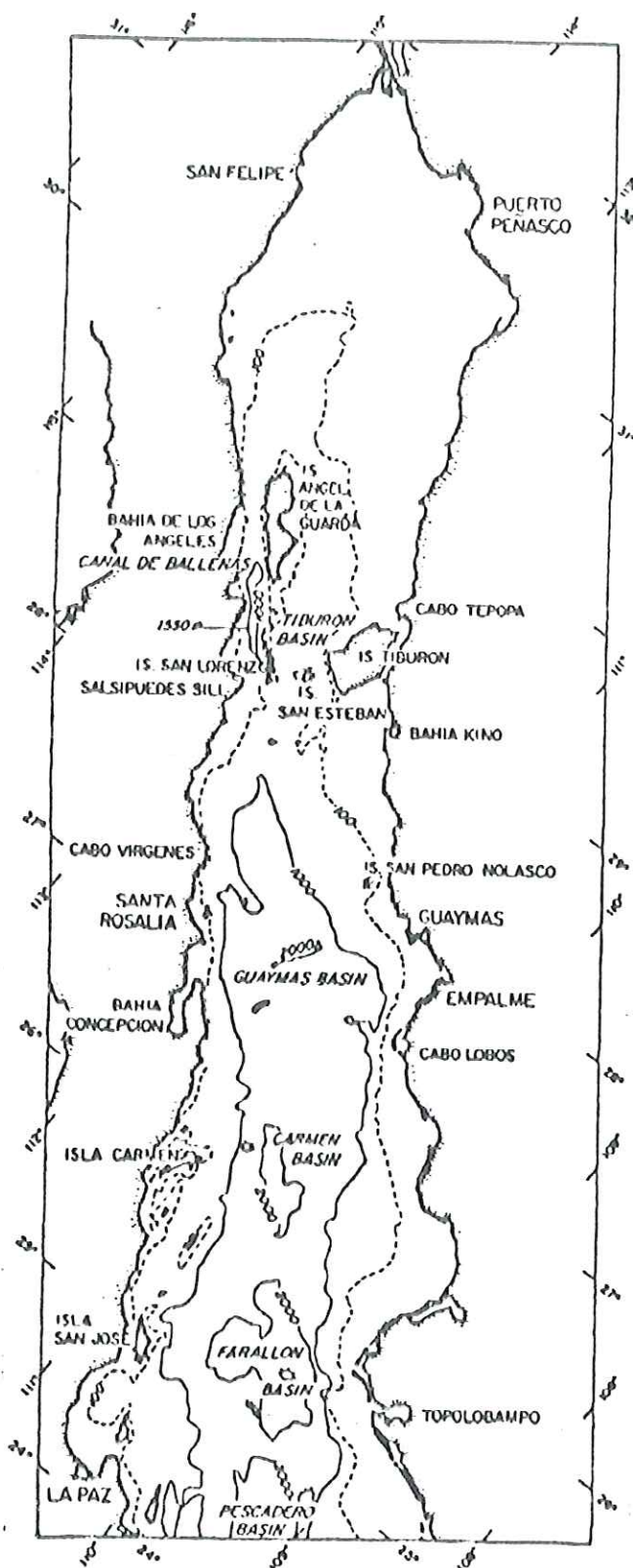


Figura 1.- Configuración y batimetría del Golfo de California.

El más sobresaliente de estos canales es canal de Ballenas, de 130 km de longitud y profundidad máxima cercana a 1600 m. Está constituido por la separación del orden de 25 km que existe entre la península de Baja California y las islas Angel de la Guarda y San Lorenzo. Lo delimita en su parte norte una constricción lateral con una profundidad máxima de 600 m, cerca del extremo norte de la isla Angel de la Guarda, y en su parte sur un umbral de 430 m de profundidad, aproximadamente a 20 Km al sur de la isla San Lorenzo (Rusnak, Fisher y Shepard, 1964). Este último, con otros umbrales similares en los demás canales, originan que el Golfo se divida en dos provincias hidrográficas bien diferenciadas, la porción norte y la porción sur (Sverdrup, 1941; Roden, 1964; Gaxiola-Castro, Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1978).

El canal de San Esteban se localiza entre las islas de San Esteban y San Lorenzo, y su profundidad no excede los 800 m. El tercer canal es angosto, y conecta la plataforma continental de Sonora con la cuenca Tiburón. Algunos estudios previos han demostrado que este canal es importante en el intercambio de agua que se lleva a cabo en la región (Badan-Dangon et al., 1991). El último canal, canal del infiernillo, se situa entre la isla Tiburón y las costas de México, es somero y angosto, y no participa notablemente en la circulación del Golfo.

II.3 Masas de agua.

Los estudios sobre la identificación de las masas de agua en el Golfo de California muestran que éste es invadido principalmente por tres tipos de agua, que se extienden dentro del Golfo hasta donde los procesos de mezcla, evaporación, y convección les permiten conservar sus características.

En la entrada del Golfo de California se han identificado tres masas de agua superficiales, el Agua de la Corriente de California (ACC), el Agua Superficial del Pacífico Tropical Oriental (ASPTO), y el Agua del Golfo de California (AGC). Por debajo de ellas, se encuentran masas de agua subsuperficiales y profundas. El Agua Subtropical Subsuperficial (ASS), el Agua Intermedia del Antártico (AIA), y el Agua del Fondo del Pacífico (AFP) (Roden y Groves, 1959; Griffiths, 1968; Stevenson, 1970; Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979).

Por otra parte Alvarez-Borrego y Schwartzlose (1979) y Robles y Marinone (1987) identifican tres masas de agua en la porción sur de las islas y en la región central de la Cuenca de Guaymas. Estas masas de agua son: el Agua Subtropical Subsuperficial (ASS), y el Agua de la Corriente de California (ACC).

En el extremo norte del Golfo se forma una masa de agua durante el invierno (Agua del Norte del Golfo de California, (ANC) debido a que la

densidad del agua superficial se incrementa como consecuencia de la evaporación y enfriamiento, induciendo un movimiento convectivo que produce un desplazamiento de agua profunda hacia la región sur (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979).

II.4 Descripción de propiedades físico-químicas.

La distribución vertical de las propiedades conservativas y no conservativas en el Golfo de California muestran la tendencia de aumentar su concentración de la boca hacia el norte. En la parte sur del Golfo se observa a profundidades intermedias un comportamiento similar al que se encuentra en el Océano Pacífico adyacente, caracterizado por un mínimo de salinidad de 34.5‰, una temperatura de 5°C y cantidades mínimas de oxígeno. En la entrada del Golfo la concentración de fosfatos ($2.3 - 2.5 \mu M$), silicatos ($30 \mu M$) y nitratos ($25 \mu M$) se incrementan rápidamente en los primeros 100 m de profundidad (Warsh et al, 1973; Alvarez-Borrego, et al, 1978). Los fosfatos presentan un máximo de $3.5 \mu M$ a 3000 m, mientras que los nitratos tienen un máximo débil de $43 - 44 \mu M$ entre los 1000 m y 1300 m, y disminuyen hasta $39 \mu M$ entre los 2500 m y 3000 m (Alvarez-Borrego et al, 1978).

En el canal de Ballenas, los valores superficiales extremos de temperatura, salinidad y oxígeno, y la ausencia de los mínimos de salinidad y oxígeno a profundidades intermedias, indican procesos de mezcla muy intensos que son inducidos principalmente por las corrientes de marea

(Gaxiola-Castro, Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1978). Debido a la presencia del umbral, este canal exhibe condiciones hidrográficas que difieren marcadamente de las del sur. Estas diferencias son muy notables entre los 500 m y 1000 m de profundidad, con temperaturas de 11° a 12°C , salinidades que varían entre 34.7‰ y 34.9‰ , con concentraciones de oxígeno de 1 a $2\text{ ml}\cdot\text{l}^{-1}$. La concentración de las propiedades no conservativas se incrementan monotónicamente con la profundidad encontrándose a 1500 m concentraciones de $3.0\mu\text{M}$ de fosfato, $70\mu\text{M}$ de silicato y $30\mu\text{M}$ de nitrato. A los 1000 m las concentraciones de nutrientes son mucho menor que las encontradas para la porción central y sur, con diferencias de $0.6\mu\text{M}$ para los fosfatos, $60\mu\text{M}$ para los silicatos, y $12\mu\text{M}$ para nitratos. En la porción central del alto Golfo, entre 185 m y 200 m de profundidad se encuentran máximos débiles de fosfato con concentraciones de $2.3 - 2.5\mu\text{M}$, $53 - 67\mu\text{M}$ para los silicatos y $21 - 23\mu\text{M}$ para nitratos. La presencia de estos máximos débiles es causada por agua que proviene de la cabeza del Golfo, caracterizada por ser fría, muy salina y rica en nutrientes, y que se desplaza hacia el sur por el fondo (Alvarez-Borrego y Lara, 1991).

II.5 Forzamiento de la circulación.

La circulación del Golfo de California es inducida por el régimen de vientos, y por las mareas.

El régimen de vientos en el Golfo de California presenta fuertes variaciones estacionales (Badan-Dangon et al., 1991). Durante la mayor parte del año soplan del noroeste, pero durante los meses de verano soplan del sureste. Estos inducen la formación de surgencias (figura 2), y giros sobre la Cuenca de Guaymas (Roden, 1958; Roden y Groves, 1959; Badan-Dangon et al, 1985). Los vientos suelen ser uniformes y coherentes en todo el Golfo de California (Badan-Dangon et al., 1991).

Las diferencias de temperaturas durante el día y la noche entre la costa y el mar, provocan la formación de un sistema de brisas de mar a tierra y de tierra a mar, respectivamente, a lo largo del Golfo, donde la brisa marina alcanza velocidades máximas de $5-7 m \cdot s^{-1}$ durante la tarde, y durante las primeras horas del día es reemplazada por la brisa de tierra a mar, con velocidades del orden de $1 m \cdot s^{-1}$ (Roden, 1964).

El Golfo de California es una región con una fuerte evaporación ($1.3 m \cdot año^{-1}$), valor muy cercano al reportado para el Mar Mediterráneo ($1.4 m \cdot año^{-1}$) (Roden, 1964). No obstante, Organista y Lavín (1987) y Lavín y Organista, (1988) han verificado los flujos de calor en la porción norte y encuentran una ganancia media de $69-85 W m^{-2}$. Estas corroboran las mediciones de corrientes sobre el umbral de Salsipuedes hechas por

II.6 Circulación.

Tres fenómenos físicos predominan en el Golfo que pudieran inducir un flujo vertical de nutrientes: La surgencia costera generada por el viento, el intercambio baroclínico entre cuencas, y el flujo vertical asociado a procesos difusivos a través de la base de la zona fótica.

Las surgencias costeras consisten de movimientos ascendentes de aguas subsuperficiales, frías (11°C), de baja salinidad ($34.75' / \dots$) y ricas en sales nutritivas, que son introducidas hasta la superficie por la espiral de Ekman. Posteriormente el calentamiento solar y la evaporación excesiva las vuelven tibias, de alta salinidad, y la concentración de nutrientes disueltos disminuye por el consumo del fitoplancton.

En la parte central y región de las islas, la configuración hidrográfica que resulta de la circulación media, con un flujo de salida superficial de agua cálida y salina y un flujo de entrada profundo con agua fría y de menor salinidad, constituye el intercambio baroclínico entre cuencas. La perturbación introducida por el flujo barotrópico sobre la interface del sistema de dos capas origina la formación de saltos hidráulicos internos y ondas internas sobre los umbrales. Cuando estas ondas tienen una velocidad menor a la que presentan la capa superior e inferior, se produce una inestabilidad local en forma de ondulaciones, que inducen mezcla turbulenta vigorosa en toda la columna de agua. Como consecuencia de

esta mezcla turbulenta, la concentración de nutrientes en la superficie del canal de Ballenas aumenta; el intercambio baroclínico entre las cuencas le introduce esos nutrientes a las capas superficiales de la Cuenca de Guaymas.

El tercer proceso que puede generar flujo vertical son los procesos difusivos en la base de la pycnoclina. Uno de ellos es la doble difusión que posiblemente existe en esta región como consecuencia de la configuración hidrográfica. Esta es inicialmente estable, pero se destruye paulatinamente debido a que el calor se difunde hacia abajo a una razón de dos ordenes de magnitud mayor que la sal (comunicación personal de Badan-Dangon, 1992). La capa superior se vuelve más densa que la capa inferior, por lo que se origina una inestabilidad, con movimientos convectivos, que resultan en transporte de calor y sal en direcciones opuestas.

III. BALANCE DE NUTRIENTES

III.1 Modelo de caja

La región objeto de este estudio comprende la zona eufótica, algunas decenas de metros de la Cuenca de Guaymas, delimitada a lo ancho por las fronteras de Baja California y Sonora, y a lo largo por la región de Cabo Lobos hasta los umbrales (figura 1). El balance general de una sal nutritiva es expresado por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = p. \quad (1)$$

t es tiempo, con coordenadas positivas en x hacia la costa de Sonora, y apuntando hacia la cabeza del Golfo y z hacia arriba, con componentes de velocidad en u, v, w, en esas direcciones; c es la concentración del nutriente, p es el consumo del mismo por el fitoplancton. El balance existe entre los cambios locales, la advección por el campo de velocidades, y el consumo por el fitoplancton.

Se estima que el consumo es constante en toda la zona eufótica. Que existe una concentración de fitoplancton homogéneo que asimila los nutrientes a la misma velocidad, sin importar su abundancia ni su localización en la capa eufótica. Por otra parte se considera que no hay regeneración

de nutrientes. Todo el nutriente incorporado proviene de la capa profunda, y el nutriente que se podría remineralizar es mínimo. La tasa de incorporación ó consumo del nutriente por el fitoplancton es la misma que la tasa de aporte por procesos de advección.

Aplicando el principio de continuidad de masa, el balance se expresa en términos de la divergencia del flujo del nutriente,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) + \frac{\partial}{\partial z}(wc) = p. \quad (2)$$

Establecemos una descomposición de Reynolds, en la que cualquier cantidad ϕ puede descomponerse en una parte constante, media, o que cambia en escalas temporales muy largas τ , y en una parte fluctuante.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi', \quad (3)$$

donde

$$\bar{\phi}(\tau) = \frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t \phi dt \quad (4)$$

y por definición

$$(\bar{\phi}') \equiv 0. \quad (5)$$

$t - t_0 = \tau$ representa el intervalo de observación de la serie de datos usados.

Aplicando las expresiones anteriores en (2) y tomando el promedio en el tiempo se obtiene la ecuación media de conservación del nutriente,

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{c})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{c})}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{w}\bar{c})}{\partial z} + \frac{\partial (\overline{u'c'})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{v'c'})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{w'c'})}{\partial z} = \bar{p}, \quad (6)$$

donde τ es la componente de tiempo a larga escala (por ejemplo, las estaciones del año), $(\bar{u}\bar{c})$, $(\bar{v}\bar{c})$, $(\bar{w}\bar{c})$, son el flujo medio del nutriente, inducido por la circulación media, y $(\overline{u'c'})$, $(\overline{v'c'})$, $(\overline{w'c'})$ son los transportes turbulentos del nutriente, que resultan de la coherencia de las fluctuaciones turbulentas de velocidad con las fluctuaciones de concentración de las sales nutritivas; este último es el llamado flujo turbulento de nutrientes.

Integrando la ecuación (6) desde la superficie (0 m) hasta la base de la termoclina (-h), se tiene que:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-h}^0 \bar{c} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^0 \bar{u}\bar{c} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^0 (\overline{u'c'}) dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^0 \bar{v}\bar{c} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^0 (\overline{v'c'}) dz + \\ \bar{w}\bar{c} \Big|_{-h}^0 + (\overline{w'c'}) \Big|_{-h}^0 = \int_{-h}^0 \bar{p} dz, \end{aligned} \quad (7)$$

En la superficie los flujos de entrada son cero porque se considera que el aporte eólico y fluvial son despreciables. En la base de la termoclina el flujo vertical medio puede ser localmente importante, pero es improbable que contribuya en forma significativa al aporte total de la zona eufótica. El flujo turbulento en $z = -h$ parametriza los efectos difusivos en la base de la termoclina. Su evaluación requiere del conocimiento detallado de la

microestructura en la Cuenca de Guaymas, para poder formular un coeficiente de difusión vertical, estamento del cual se carece por el momento. Aunque algunos procesos difusivos, como los de doble difusión podrían ser importantes, despreciaremos este término también, para efectos de este estudio. Entonces, la ecuación (7) se reescribe de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-h}^0 \bar{c} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^0 \bar{u} \bar{c} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^0 (\overline{u'c'}) dz + \\ \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^0 \bar{v} \bar{c} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^0 (\overline{v'c'}) dz = \int_{-h}^0 \bar{p} dz, \end{aligned} \quad (8)$$

y se integra desde las costas de Baja California x_1 , hasta las costas de Sonora x_2 y de la región de Cabo lobos y_1 a la región de los umbrales y_2 , se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{-h}^0 \bar{c} dx dy dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{-h}^0 \bar{u} \bar{c} dx dy dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{-h}^0 (\overline{u'c'}) dx dy dz + \\ \frac{\partial}{\partial y} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{-h}^0 \bar{v} \bar{c} dx dy dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{-h}^0 (\overline{v'c'}) dx dy dz = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{-h}^0 \bar{p} dx dy dz, \end{aligned} \quad (9)$$

Como queremos estudiar los aportes que sostienen a la productividad en la Cuenca de Guaymas a largo plazo, hacemos las siguientes suposiciones:

La cantidad total de nutrientes en las capas superficiales se mantiene aproximadamente constante, por lo que el término $\partial \frac{\bar{c}}{\partial t} = 0$. Despreciaremos también el aporte por surgencias en la costa de Baja California, pues estas dependen de los vientos que soplan del sureste. Estos son menos frecuentes, menos intensos y soplan solamente en los meses de verano (Badan-Dangon, 1991). Los aportes de los canales entre las islas San Lorenzo y Tiburón, son probablemente significativos, pero las imágenes de satélite (Badan-Dangon et al, 1985) sugieren que son seguramente inferiores a los que ocurren desde canal de Ballenas. Como además la mayor parte de las observaciones han sido tomadas sobre el umbral de San Lorenzo, tomaremos el intercambio baroclínico con canal de Ballenas como representativo de la fertilización de las capas superficiales de la Cuenca de Guaymas. El intercambio a través de la frontera abierta al sur de la Cuenca de Guaymas se desprecia, por la extensión mínima del transporte medio vertical, lo que indica que existe un flujo neto igual a cero.

Los aportes probables son los flujos medio y fluctuante asociados al intercambio baroclínico con canal de Ballenas e intercambios medio y fluctuante debido a procesos de surgencia en la costa Sonora (figura 3). Estos se expresan por:

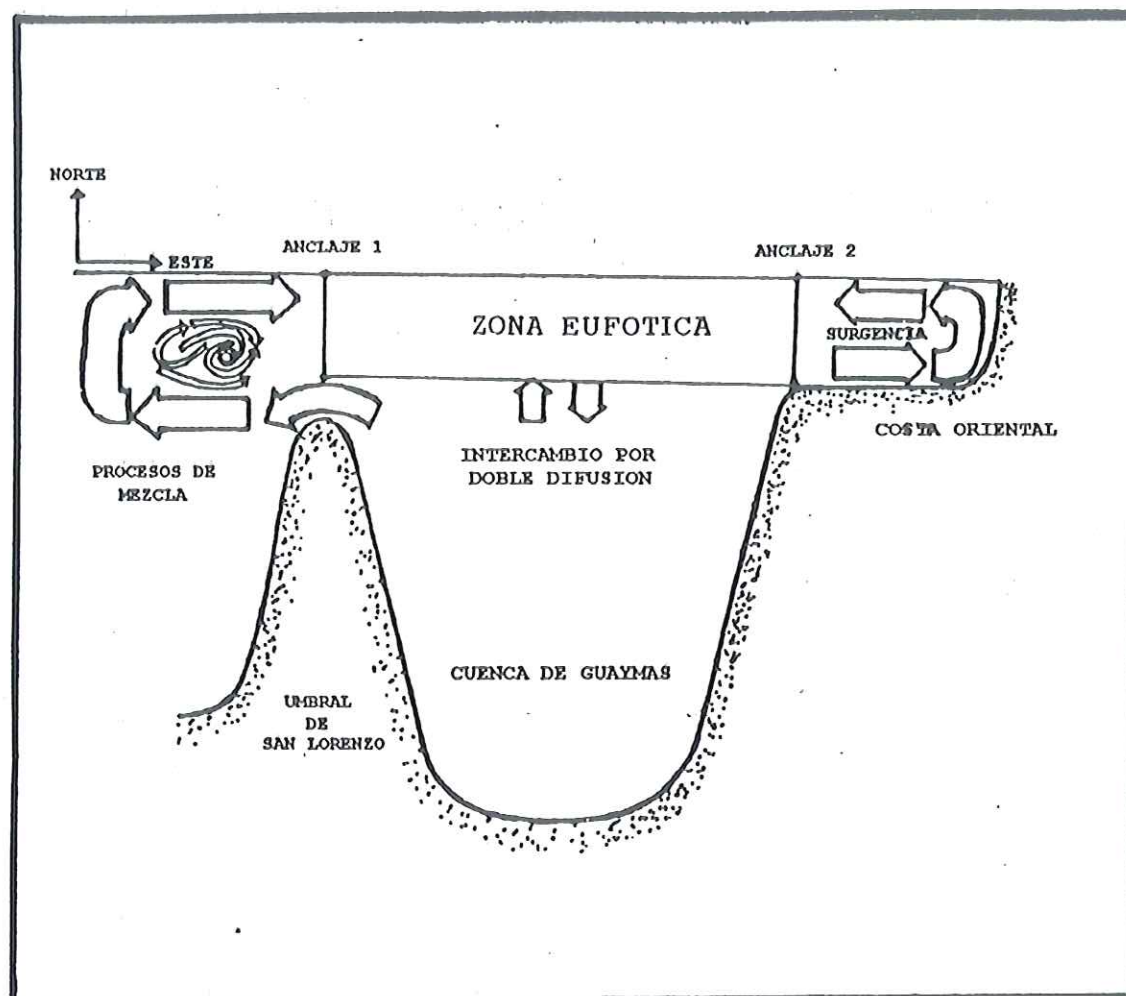


Figura 3.- Representación del modelo de caja para la cuenca de Guaymas.

$$\begin{aligned}
& \int_{-h}^0 \int_{y_1}^{y_2} \overline{uc} \Big|_{x_2} dz dy + \int_{-h}^0 \int_{y_1}^{y_2} (\overline{u'c'}) \Big|_{x_2} dz dy + \\
& \int_{-h}^0 \int_{x_1}^{x_2} \overline{vc} \Big|_{y_2} dz dx + \int_{-h}^0 \int_{x_1}^{x_2} (\overline{v'c'}) \Big|_{y_2} dz dx = P.
\end{aligned} \tag{10}$$

Los términos de la ecuación (10) pueden ser evaluados por medio de observaciones oceanográficas existentes, formulando una ecuación idéntica a (10) para el balance de calor, en la que la temperatura ocupa el lugar de la concentración de nutrientes. Los términos de esa ecuación son evaluables directamente, pues se cuenta con observaciones de correntómetros tanto en los umbrales como en la costa de Sonora, que registran el campo de velocidad y la temperatura en forma simultánea. Los términos de aporte de calor pueden entonces traducirse a los aportes de cada sal nutritiva multiplicando cada término por un coeficiente que relaciona al campo térmico con el de nutrientes en cada lugar. Estos últimos se pueden obtener de las descripciones hidrográficas que existen, de las cuales una por lo menos cuenta con observaciones de concentración de nutrientes. La temperatura actuará como variable de sustitución y deberá considerarse con cuidado la alinealidad de esos coeficientes para su aplicación.

IV. OBSERVACIONES

Los datos utilizados en este estudio fueron tomados en el año de 1974 durante dos campañas de mediciones llevadas a cabo en los meses de abril (primavera) y octubre (otoño), a bordo del buque oceanográfico RV ALEXANDER AGASSIZ, entonces perteneciente a la Institución Scripps de Oceanografía. Se reportan los datos de octubre que representan las condiciones de otoño, mediante secciones y perfiles de distribución vertical de cada una de las propiedades conservativas y no conservativas, para el área comprendida en la región central y norte del Golfo. La localización del área de estudio se encuentra entre los 27° y 30° de latitud norte, en la cual se seleccionaron tres transectos longitudinales y uno transversal, representativos de las condiciones imperantes en esta región.

El primero, es un transecto transversal a lo ancho de la Cuenca de Guaymas, desde Guaymas hasta Santa Rosalía. El segundo transecto abarca de la estación 76 en la parte oeste de la Cuenca de Guaymas, pasando por el canal de Ballenas hasta la estación 42, en la porción noroeste del alto Golfo (figura 4). El tercer transecto se localiza más hacia el este, comienza en la parte central de la Cuenca de Guaymas en la estación 77 y se extiende hacia el norte por entre las islas de San Estéban y San Lorenzo, hasta la estación 41 al este de la isla Angel de la Guarda. El transecto IV comprende desde la estación 78 en la parte este de la Cuenca de Guaymas (estación 78), pasando entre las islas de San Esteban y Tiburón por la

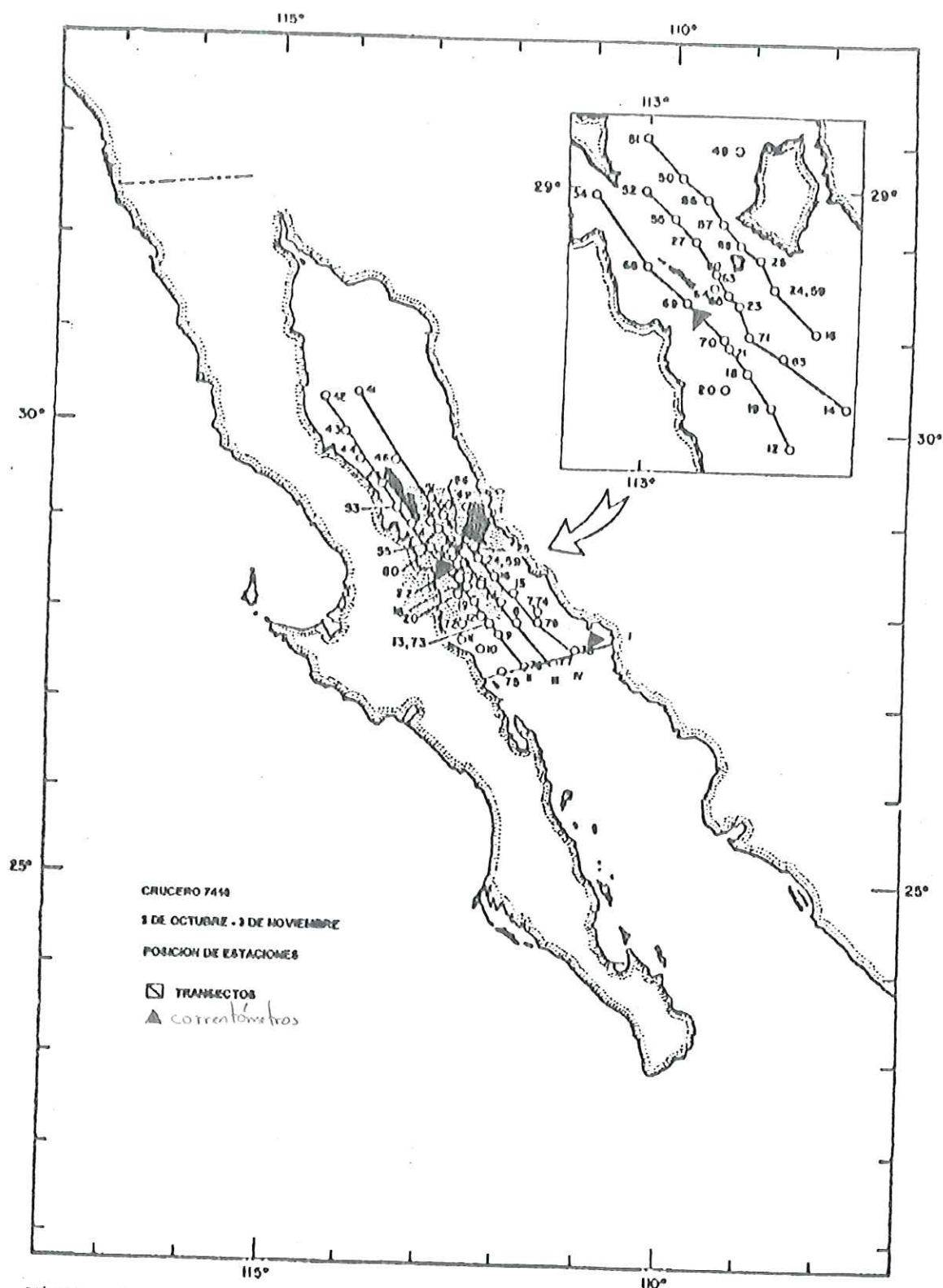


Figura 4.- Localización de los transectos longitudinales y transversales y anclajes de los correntómetros.

estación 46 del transecto II, hasta la estación 41 en el alto Golfo. Con esta configuración, se obtiene una descripción de la distribución de propiedades, de un lado a otro de la Cuenca de Guaymas y la variación longitudinal a lo largo del Golfo por los tres canales principales que unen el alto Golfo con la Cuenca de Guaymas.

En el transecto III no se reportaron valores de concentración de nutrientes en el 70 % de las estaciones, por lo que se carece de la distribución vertical de sales nutritivas para ese transecto.

V. RESULTADOS

V.1 Campos hidrográficos

Los transectos trazados ilustran el comportamiento de la hidrografía en la parte media y alta del Golfo de California. Se aprecian las condiciones generales del Golfo, en la que la temperatura, la salinidad y el oxígeno disuelto disminuyen con la profundidad. Las sales nutritivas, a la inversa de las propiedades conservativas y el oxígeno, se incrementan con la profundidad. [Sverdrup, 1941; Roden, 1964; Alvarez-Borrego et al., 1978; Gaxiola-Castro et al., 1978; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991]. Es notable la presencia de frentes en cada una de las secciones, principalmente sobre la región de los umbrales. A partir de los 300 m los gradientes verticales presentes respecto a la profundidad, en cada una de las propiedades conservativas y no conservativas, son menos intensos.

El primer transecto, entre Guaymas y Santa Rosalía, es representativo de las condiciones hidrográficas del Golfo medio. Con la temperatura disminuyendo con la profundidad y las concentraciones de las sales nutritivas aumentando en forma aproximadamente monotonica con la profundidad, con una estratificación considerable en los 400 a 500 m superiores (figura 5a). En los primeros 30 m se presenta un frente, sin una buena definición en su forma, posiblemente la extensión de una surgencia que tomó lugar en las costas de Sonora.

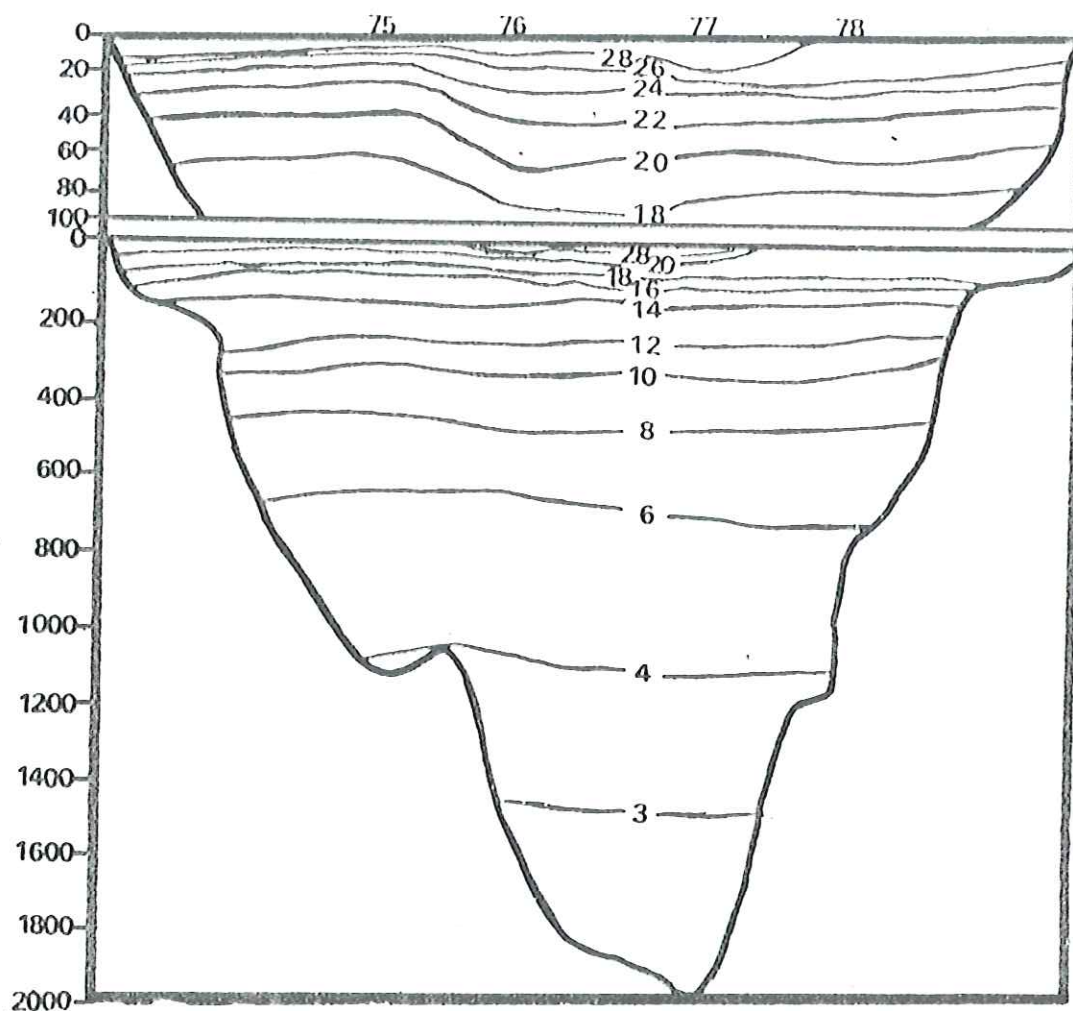


Figura 5a.- Distribución vertical de temperatura en el transecto I.

Las concentraciones superficiales de nutrientes de esta sección son bajos, con valores entre $0.5\mu M$ a $0.7\mu M$ de fosfato y nitrato, y para el silicato las concentraciones son menores a $50\mu M$, mientras que las concentraciones cerca del fondo son de $3-3.5\mu M$ para los fosfatos, $70-130\mu M$ para los silicatos y de $30-40\mu M$ para los nitratos (figuras 5b, 5c y 5d).

La distribución de temperatura a lo largo del transecto II presenta un marcado contraste entre las regiones sur (E21-E76), canal de Ballenas (E45-E21) y parte norte (E42-E45) (Figura 6a). Este gradiente es ocasionado por la presencia de frentes que se localizan en la cuenca de Guaymas, sobre el umbral de San Lorenzo y el alto Golfo, que originan que las temperaturas superficiales en la región sur ($25^{\circ}-28^{\circ}C$), sean mayores que las temperaturas para el canal de Ballenas ($23^{\circ}-26^{\circ}C$) y para la región norte $24^{\circ}-27.5^{\circ}$. Pero por debajo de los 300 m el canal de Ballenas muestra temperaturas entre 11° y $12^{\circ}C$, mayores a las que exhiben las otras dos regiones.

Este gradiente superficial y vertical es extensivo a las propiedades no conservativas. En canal de Ballenas las concentraciones superficiales de fosfatos ($1\mu M-2.5\mu M$), de silicatos ($10\mu M-18\mu M$) y nitratos ($3\mu M-6\mu M$) son mayores que las concentraciones de fosfato ($1\mu M$), de silicatos ($4\mu M$) y nitrato ($0.5\mu M$) de la región sur, y que las concentraciones de fosfatos, silicatos y nitratos de la región norte, con ($0.9\mu M-1\mu M$), ($7\mu M-9\mu M$), ($1\mu M-2\mu M$) respectivamente (figuras 6b, 6c y 6d).

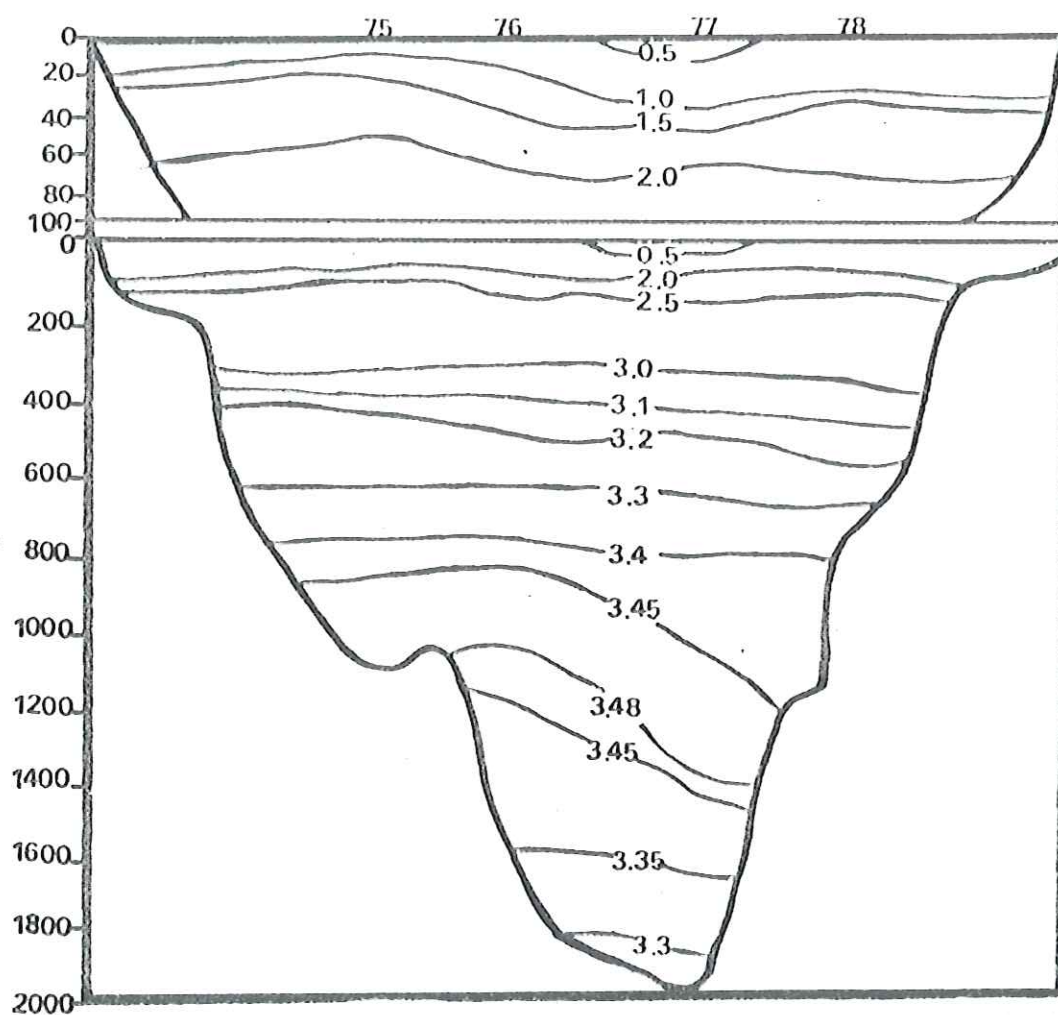


Figura 5b.- Distribución vertical de fosfatos en el transecto I.

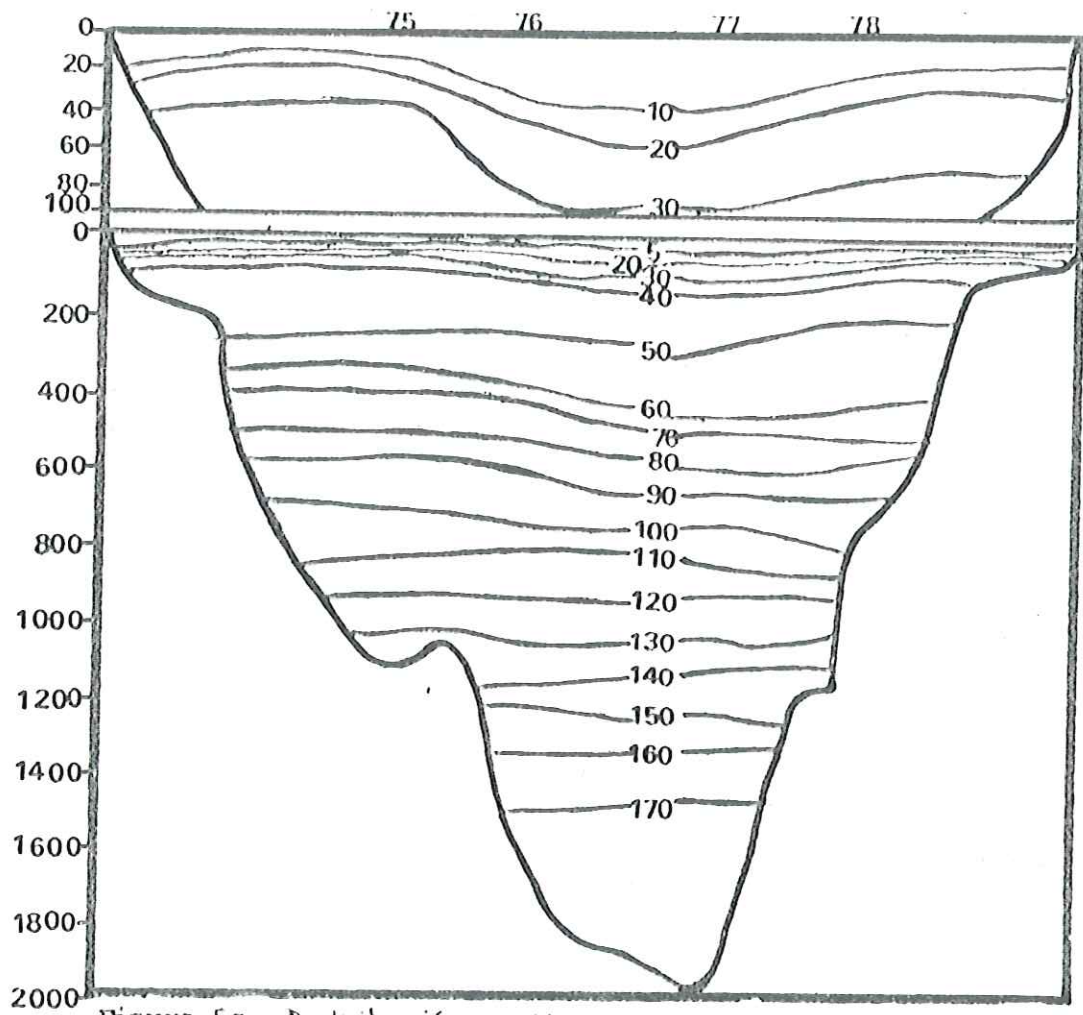


Figura 5c.- Distribución vertical de silicatos en el transecto I.

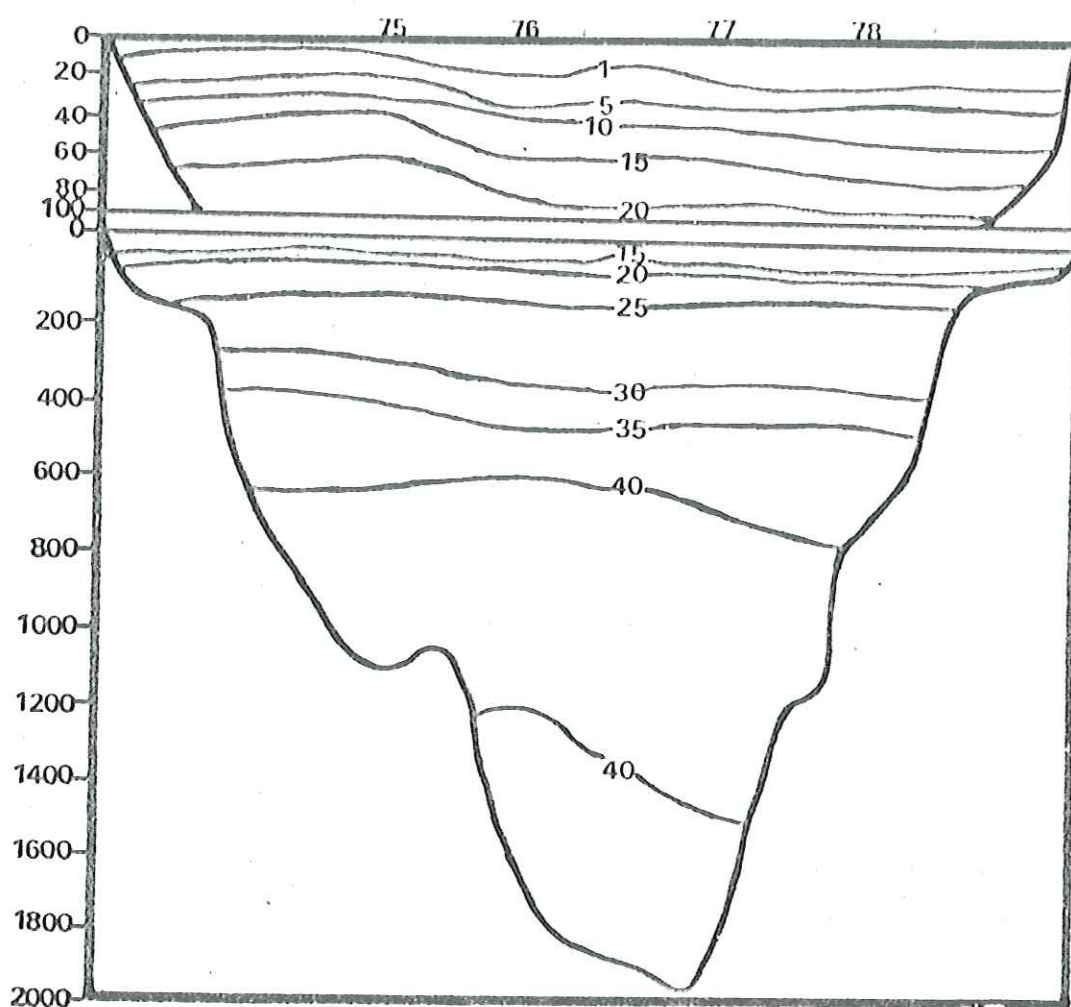


Figura 5d.- Distribución vertical de nitratos en el transecto I.

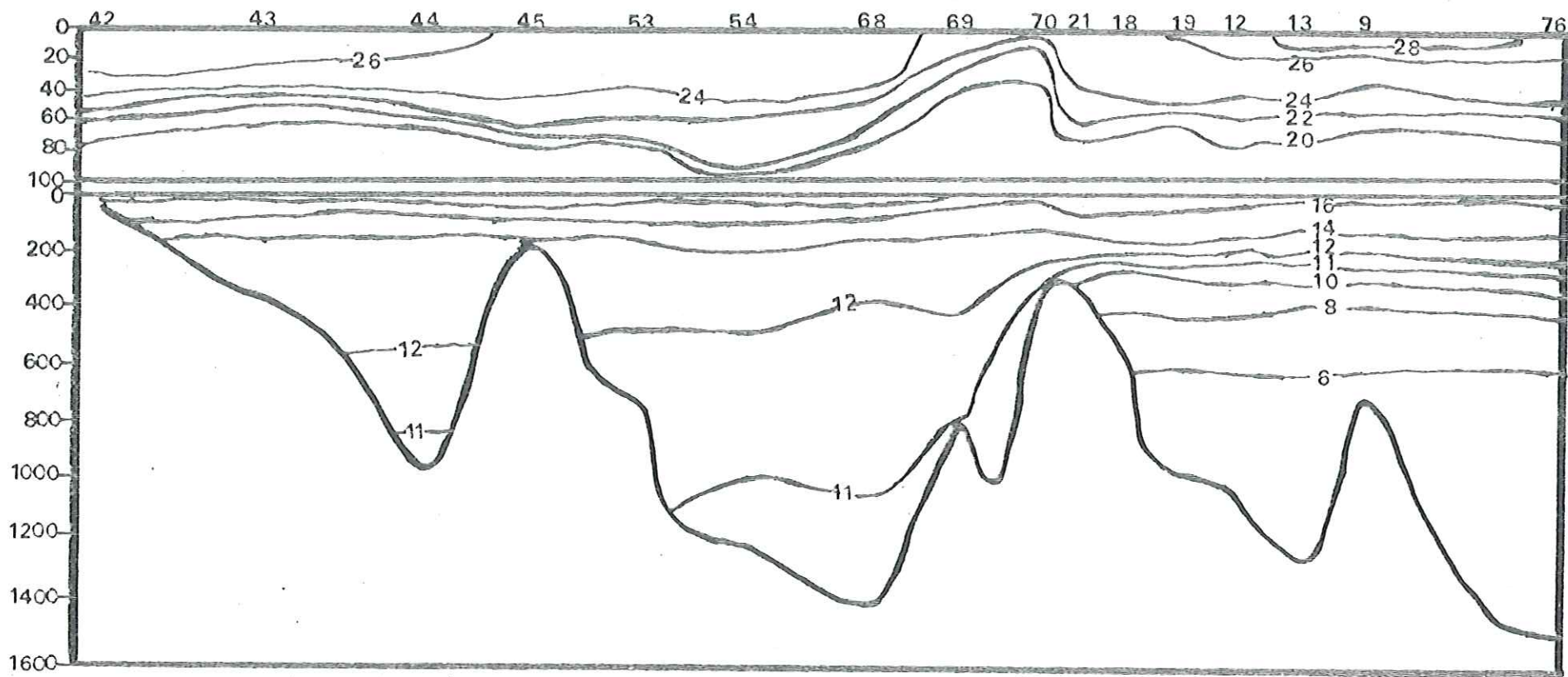


Figura 6a.- Distribución vertical de temperatura en el transecto II.

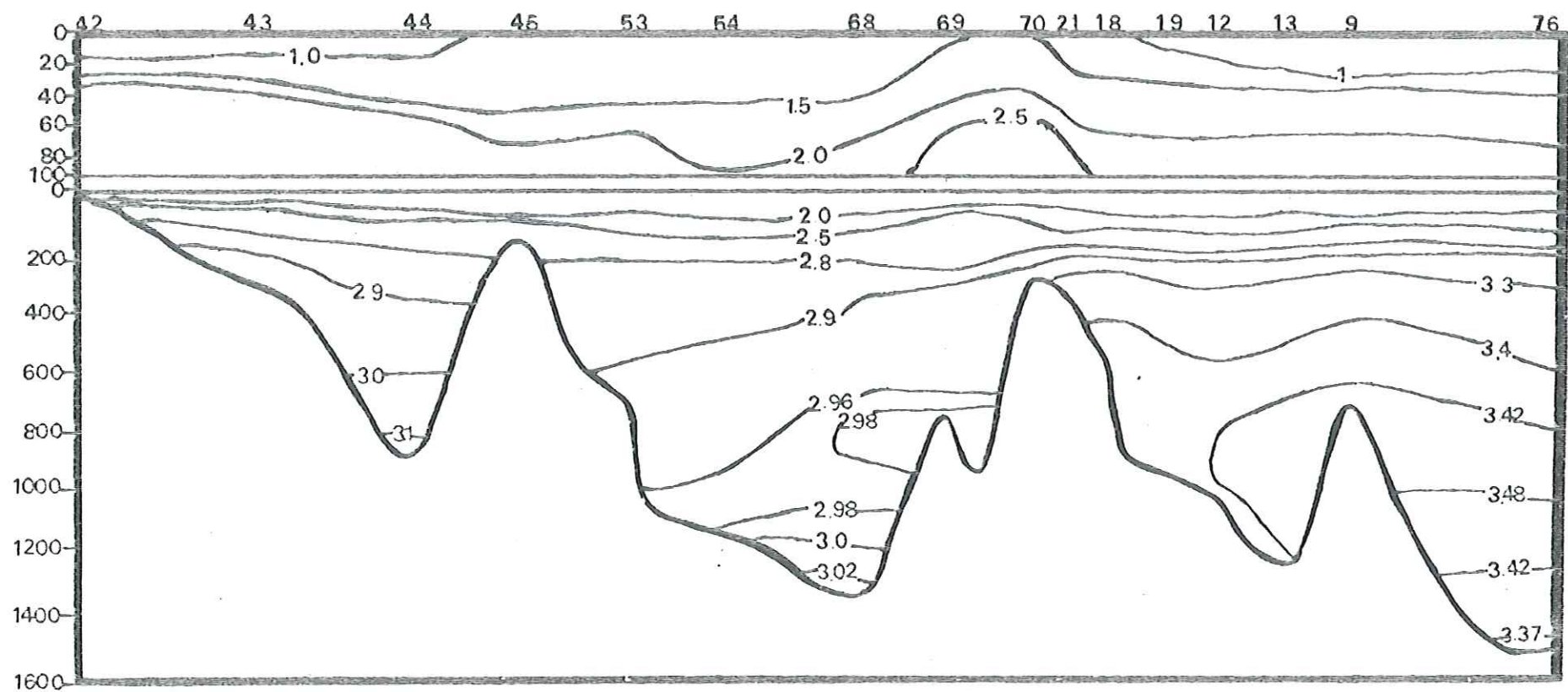


Figura 6b.- Distribución vertical de fosfatos en el transecto II.

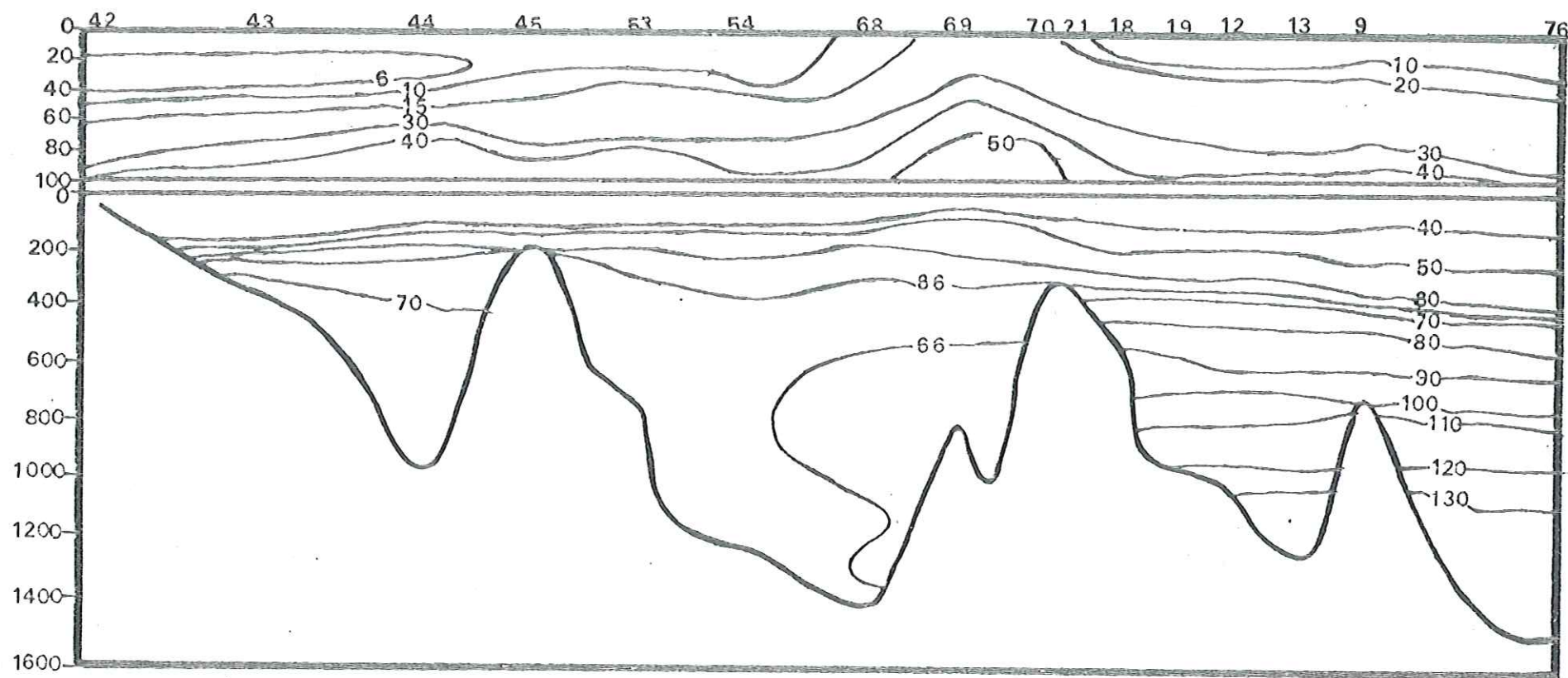


Figura 6c.- Distribución vertical de silicatos en el transecto II.

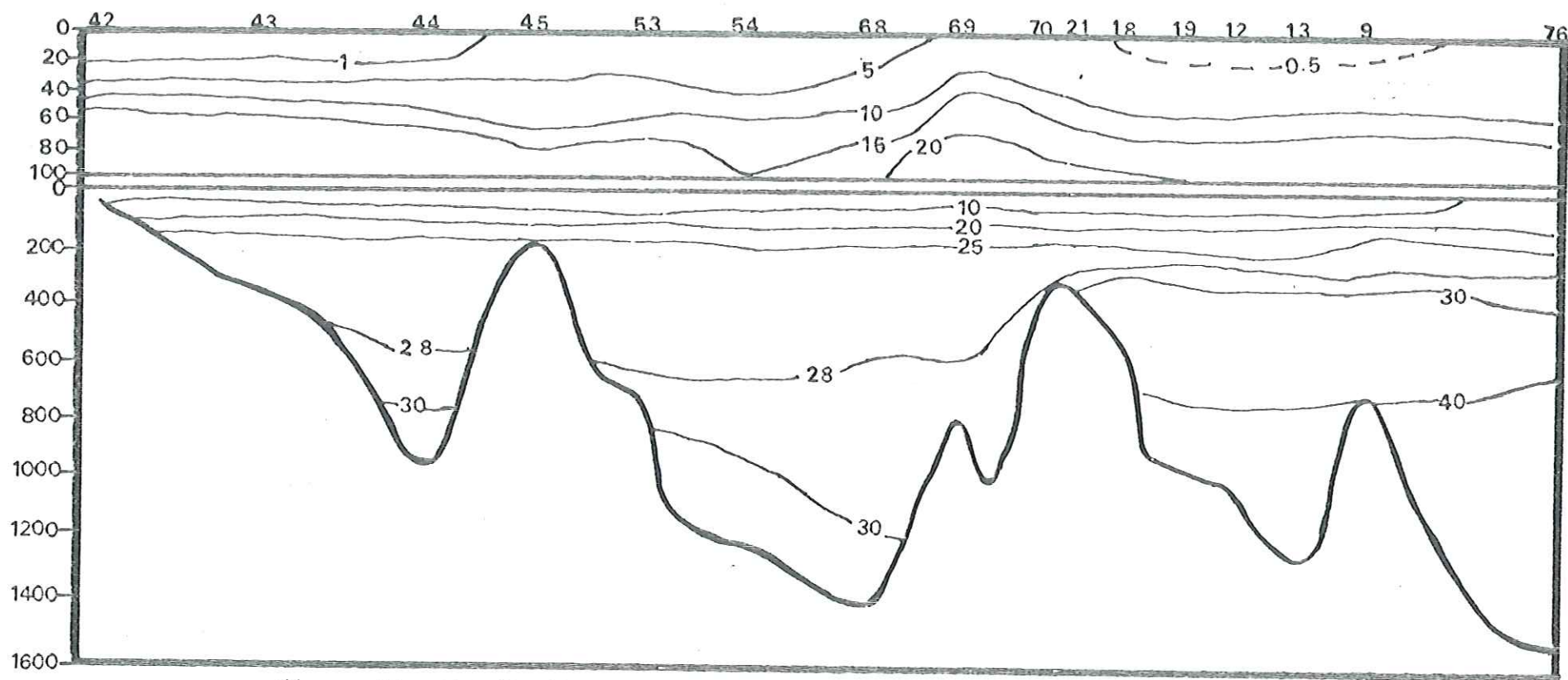


Figura 6d.- Distribución vertical de nitratos en el transecto II.

En la profundidades superiores de 300 m hay una diferencia entre las concentraciones de las propiedades no conservativas de las regiones sur, canal de Ballenas y norte, siendo la primer región la que muestra concentraciones elevadas en los fosfatos ($3\mu M - 3.5\mu M$), silicatos ($70\mu M - 130\mu M$) y nitratos ($30\mu M - 41.5\mu M$) en comparación a las concentraciones encontradas en la región del Canal de Ballenas ($2.9\mu M - 3\mu M$) de fosfatos, ($66\mu M - 67\mu M$) de silicatos, ($27\mu M - 30\mu M$) de nitratos, y en la región norte con ($2.9\mu M - 3.1\mu M$) ($70\mu M - 75\mu M$), ($27\mu M - 30\mu M$) de fosfatos, silicatos y nitratos, respectivamente. En la región sur a los 1000 m de profundidad existe un máximo de fosfato del orden de $3.48\mu M$, y para los nitratos, a esa misma profundidad existe un máximo de $39.5\mu M$, (figura 6b, 6c, 6d).

Para la línea que se distribuye desde la porción media de la cuenca de Guaymas, que pasa entre las islas San Lorenzo y San Estéban, hasta la porción noreste de la isla Angel de la Guarda, transecto III, es evidente el gradiente de temperatura que se forma de sur a norte (figura 7a). Este gradiente en la superficie muestra que las temperaturas de la porción sur ($25^{\circ} - 28.5^{\circ}C$) son mayores que las de la porción norte ($24^{\circ} - 27^{\circ}C$). Por otra parte se presenta una estratificación bien definida en los 100 m superiores, que se ve disminuida conforme la profundidad aumenta. Se puede observar que estos gradientes son inducidos por procesos intensos

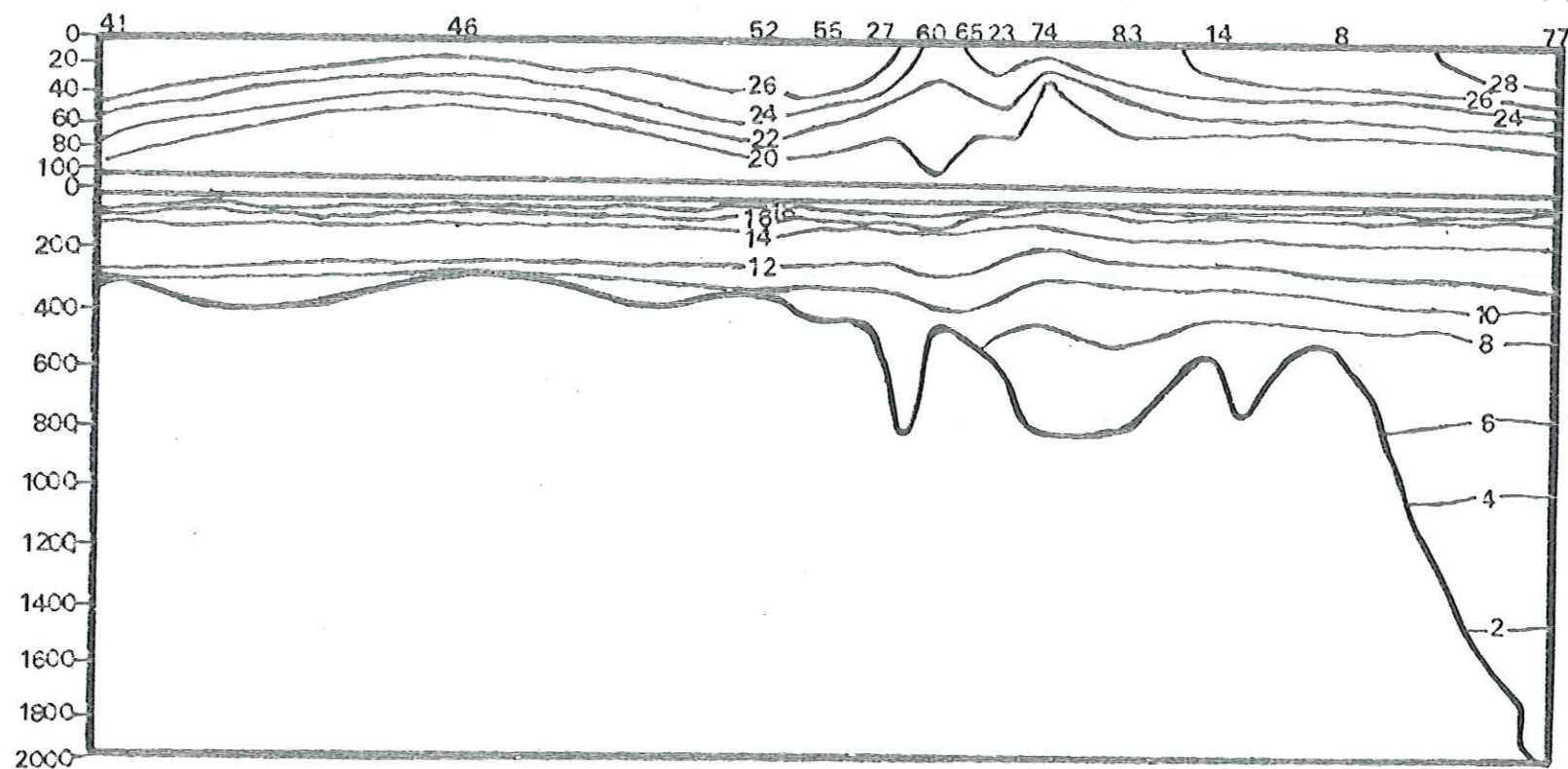


Figura 7a.- Distribución vertical de temperatura en el transecto III.

de mezcla que se observan entre las estaciones 23 y 27, aunados al frente cercano a esas estaciones. Este frente posiblemente sea el mismo que se presenta en los otros transectos.

El último transecto, que va de la parte este de la cuenca de Guaymas, pasando por entre la isla Tiburón y San Esteban, hasta la porción noreste de la isla Angel de la Guarda, presenta dos frentes en los primeros 100 m de profundidad. El primero se localiza entre las estaciones 16 y 79, y el segundo se distribuye desde la estación 25 a la estación 56. Al igual que en los otros transectos, su presencia tiene influencia en la distribución superficial y vertical de las propiedades físico-químicas, encontrándose que las temperaturas superficiales ($26^{\circ} - 28^{\circ}\text{C}$) de la región sur son mayores a las que exhibe la región norte ($25^{\circ} - 27^{\circ}\text{C}$) (figura 8a). Por otra parte la concentración superficial de los nutrientes en la región sur son menores a las presentes en la región norte. La región sur tiene concentraciones del orden ($0.5\mu\text{M} - 1\mu\text{M}$), ($3\mu\text{M} - 13\mu\text{M}$), ($3.5\mu\text{M}$), para fosfatos, silicatos y nitratos, respectivamente. La región norte presenta concentraciones del orden de ($0.9\mu\text{M} - 1\mu\text{M}$) de fosfatos, ($2\mu\text{M} - 13\mu\text{M}$) de silicatos, ($0.1\mu\text{M} - 0.3\mu\text{M}$) de nitrato (figura 8b, 8c, 8d).

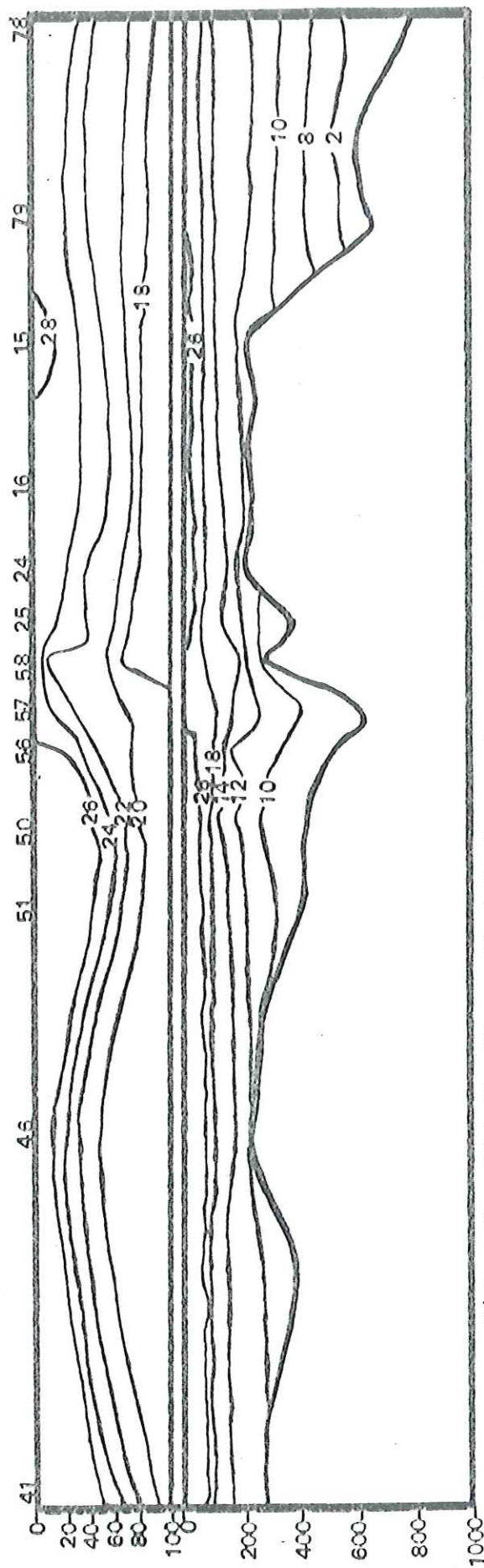


Figura 8a.- Distribución vertical de temperatura en el transecto IV.

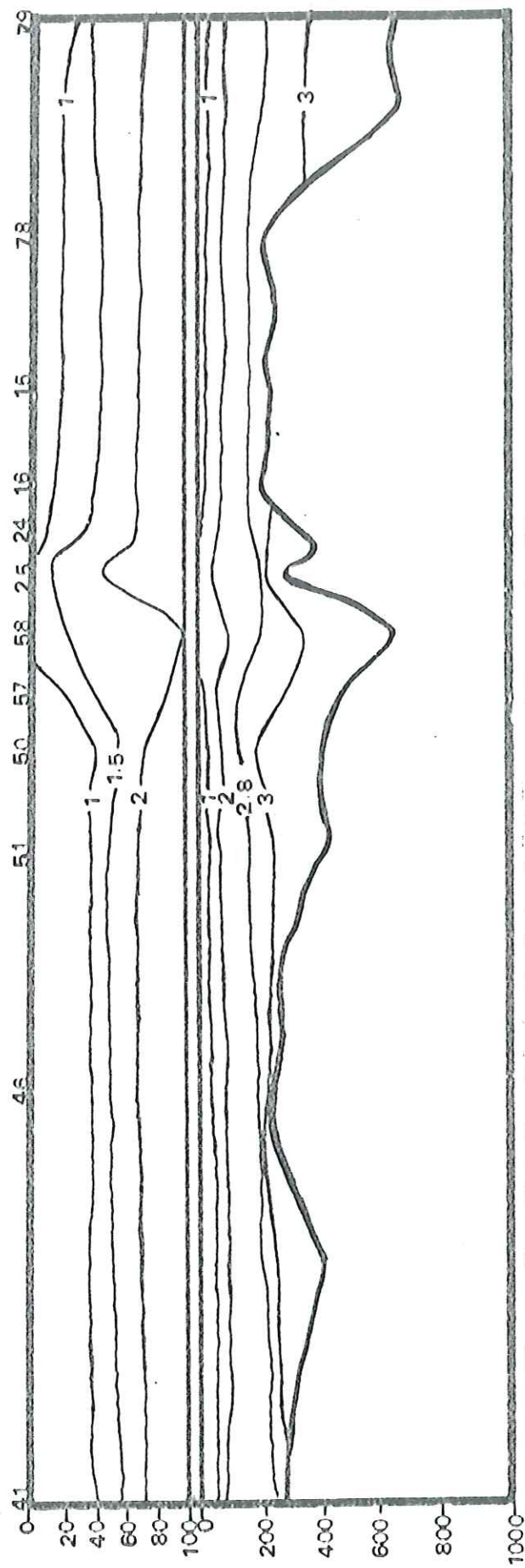


Figura 8b.- Distribución vertical de fosfatos en el transecto IV.

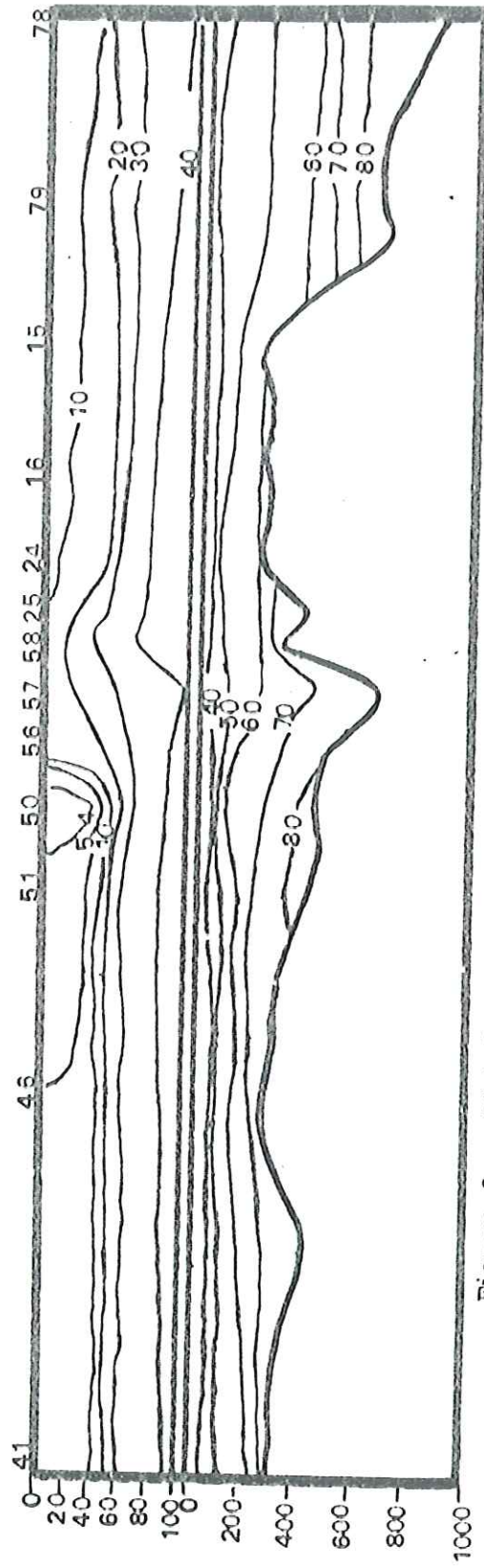


Figura 8c.- Distribución vertical de silicatos en el transecto IV.

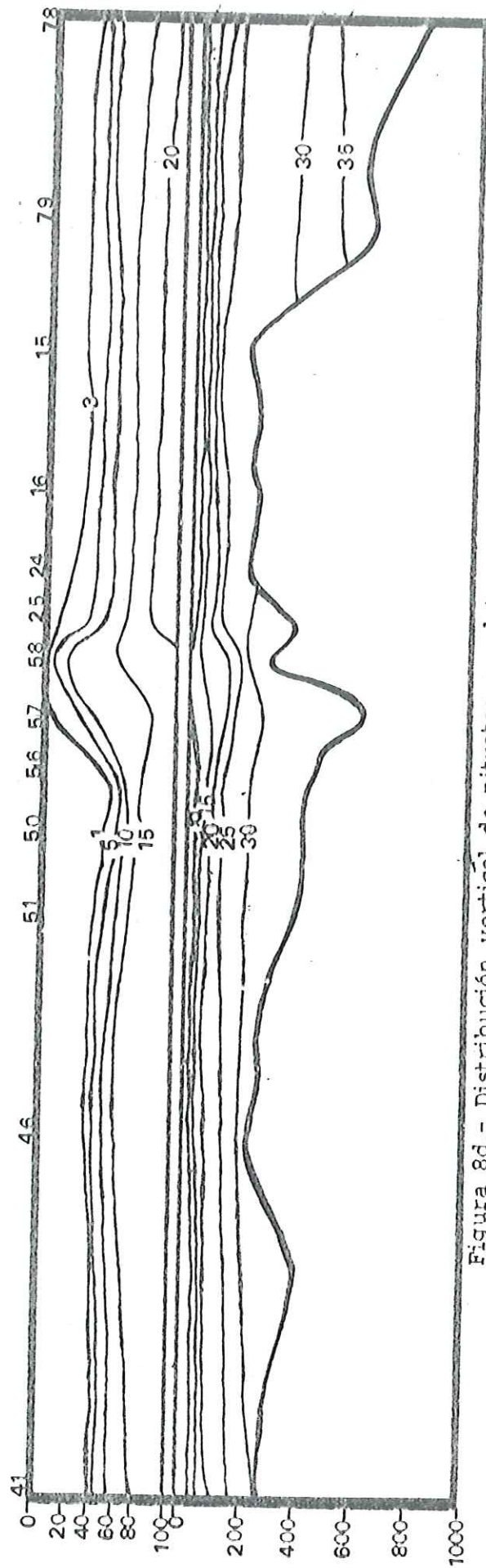


Figura 8d.- Distribución vertical de nitratos en el transecto IV.

V.2 Descripción de perfiles

Los datos hidrográficos de las secciones descritas arriba pueden agruparse en perfiles verticales correspondientes a cada sección para ilustrar su distribución con la profundidad (figura 9, 10, 11, 12). En general se observa un comportamiento similar en los primeros 300 m de profundidad en todos los perfiles. Con la temperatura, salinidad, y oxígeno disuelto disminuyendo, y los nutrientes aumentando, con la profundidad.

El perfil correspondiente a canal de Ballenas se distingue porque existe una notable bifurcación de las propiedades hidrográficas (figura 10), que se forma por la presencia del umbral de San Lorenzo, y que tiene consecuencias directas sobre la distribución de las propiedades conservativas y no conservativas. La rama terminal que se localiza al lado izquierdo de la bifurcación representa las condiciones de la región que esta hacia el sur del umbral, mientras que la rama terminal del lado opuesto, representa las condiciones de la región hacia el norte del umbral, dentro del canal de Ballenas. El umbral opera como un selector de características de las aguas de la cuenca de Guaymas.

La presencia del umbral de San Esteban (figura 11) no permite una buena definición de la distribución bimodal de propiedades en las capas más profundas debido a lo somero y lo ancho del canal.

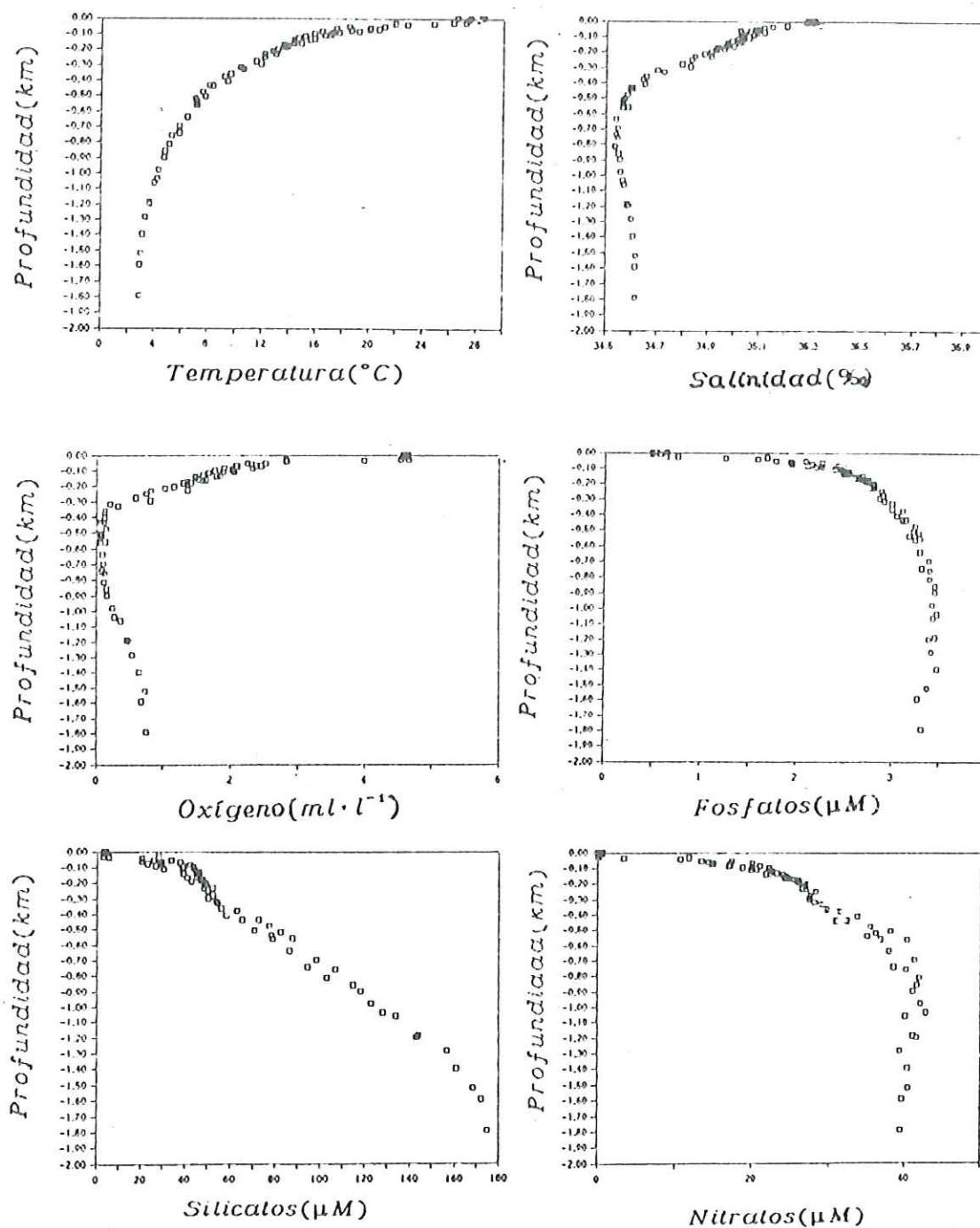


Figura 9.- Comportamiento de propiedades conservativas y no conservativas respecto a la profundidad, Transecto I.

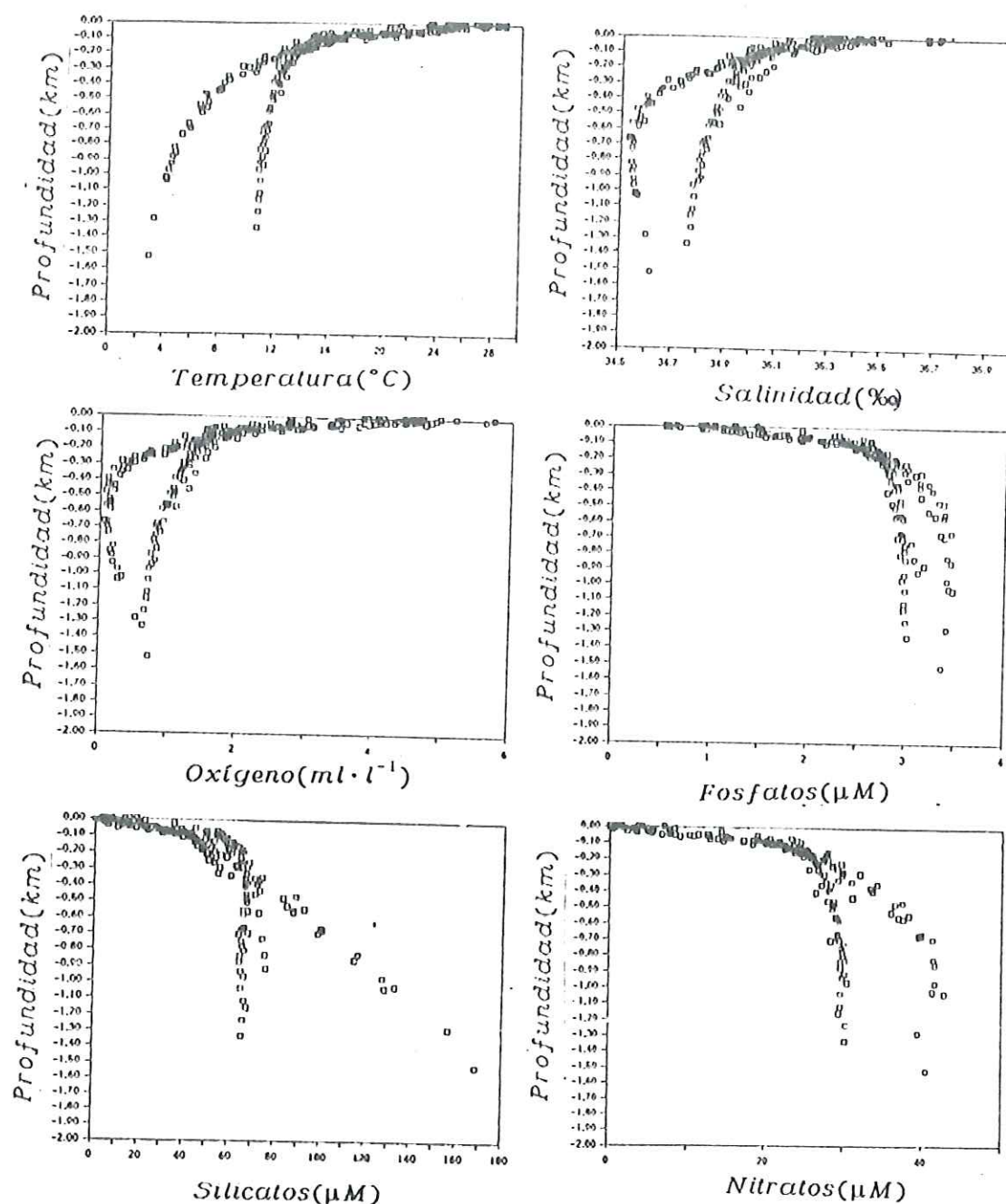


Figura 10.- Comportamiento de propiedades conservativas y no conservativas respecto a la profundidad, Transecto II.

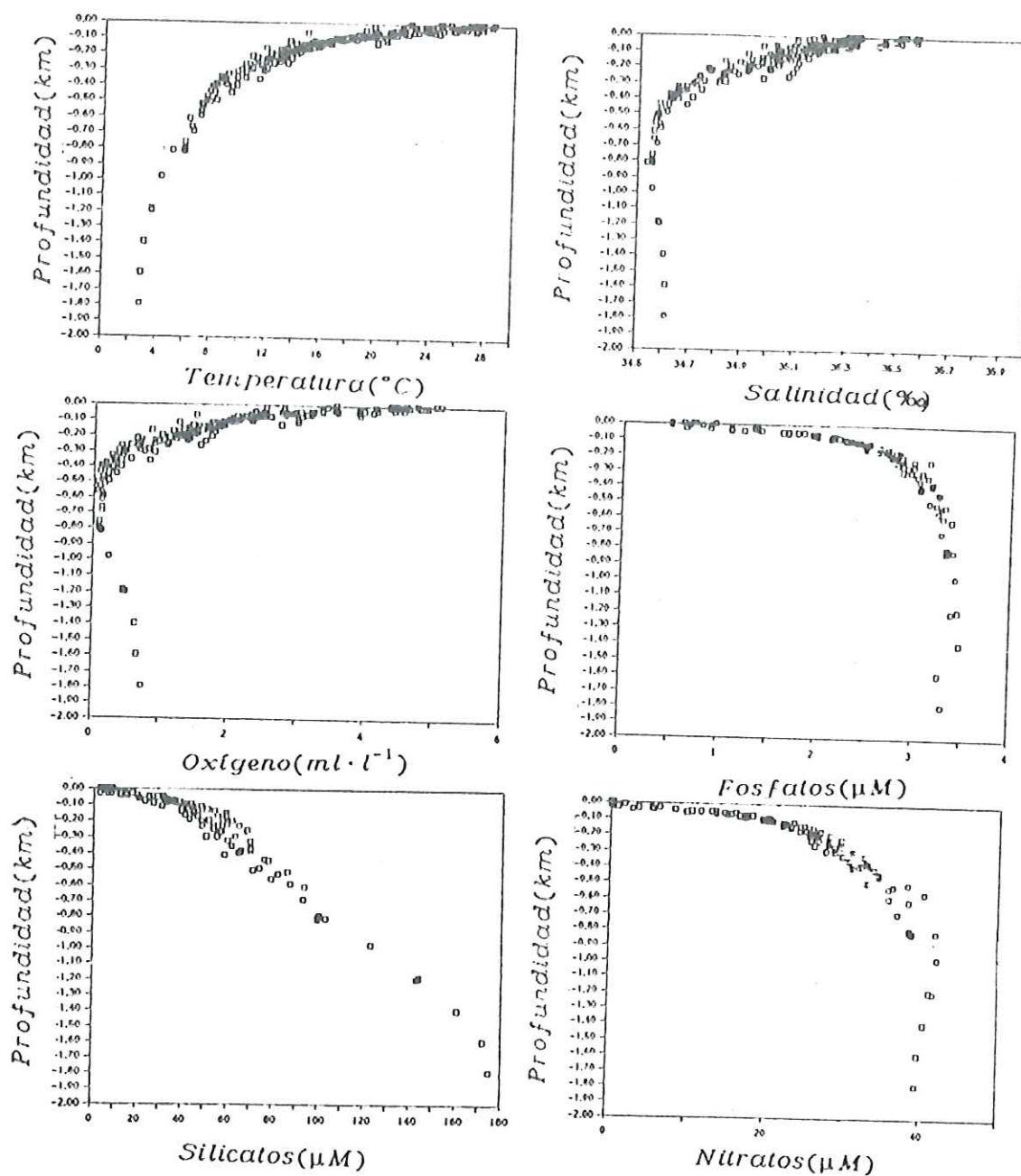


Figura 11.- Comportamiento de propiedades conservativas y no conservativas respecto a la profundidad, Transecto III.

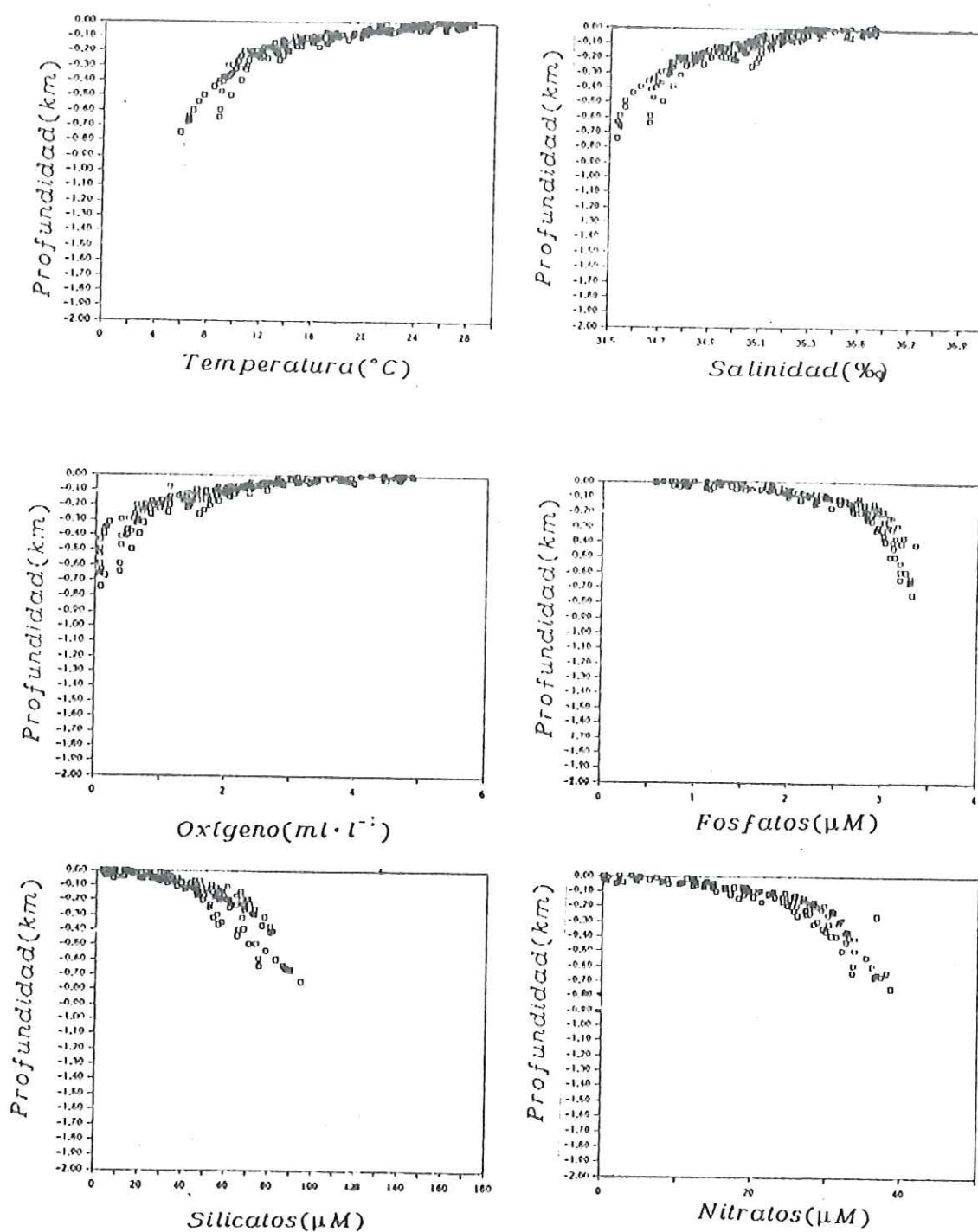


Figura 12.- Comportamiento de propiedades conservativas y no conservativas respecto a la profundidad, Transecto IV.

La región sur muestra una persistente estratificación, que se observa en la forma curva que toma la rama terminal de la distribución vertical de cada uno de los perfiles (figura 10, 11 y 12). En cambio en el canal de Ballenas, la forma casi recta de la rama terminal, denota procesos de mezcla intensos, que se suponen causados por las corrientes de marea.

Los valores superficiales de fosfato ($1 - 2\mu M$), silicatos ($8 - 24\mu M$), y nitratos ($1 - 7\mu M$) en el canal de Ballenas, muestran concentraciones mayores a las encontradas en la región sur ($0.6 - 1.2\mu M$), ($4 - 18\mu M$), ($1 - 5\mu M$), de fosfatos, silicatos, y nitratos, respectivamente.

La región sur muestra a los 1000 m de profundidad concentraciones de fosfatos, silicatos, y nitratos, ($3.5\mu M$), ($140\mu M$), y ($43\mu M$), respectivamente, mayores a las concentraciones encontradas a la misma profundidad en el canal de Ballenas, ($3\mu M$) de fosfato, ($70\mu M$) de silicato, y ($30\mu M$) de nitrato.

En la región sur son notables los mínimos de salinidad, oxígeno, y altas concentraciones de silicatos, a profundidades intermedias, que desaparecen en la región del canal de Ballenas. La presencia de estos mínimos sugieren la entrada de agua del Pacífico hasta esta región.

V.3 Relación entre temperatura y nutrientes

Los datos de temperatura graficados contra nutrientes de cada transecto, muestran una relación lineal (figura 13, 14, 15). A estos datos de temperatura y nutrientes se les aplicó una regresión lineal por mínimos cuadrados. El valor de la pendiente obtenida a partir de la regresión permite transformar el flujo de calor a flujo del nutriente.

Tabla I.- Valores de las pendientes obtenidas a partir de la regresión lineal. Sus unidades son ($\mu M \cdot l^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$).

Pendientes de nutrientes.	Transecto			
	I	II	III	IV
C_{PO_4}	-0.113	-0.121	-0.117	-0.121
C_{SiO_2}	-3.133	-3.873	-3.365	-3.644
C_{NO_3}	-1.696	-1.752	-1.738	-1.750

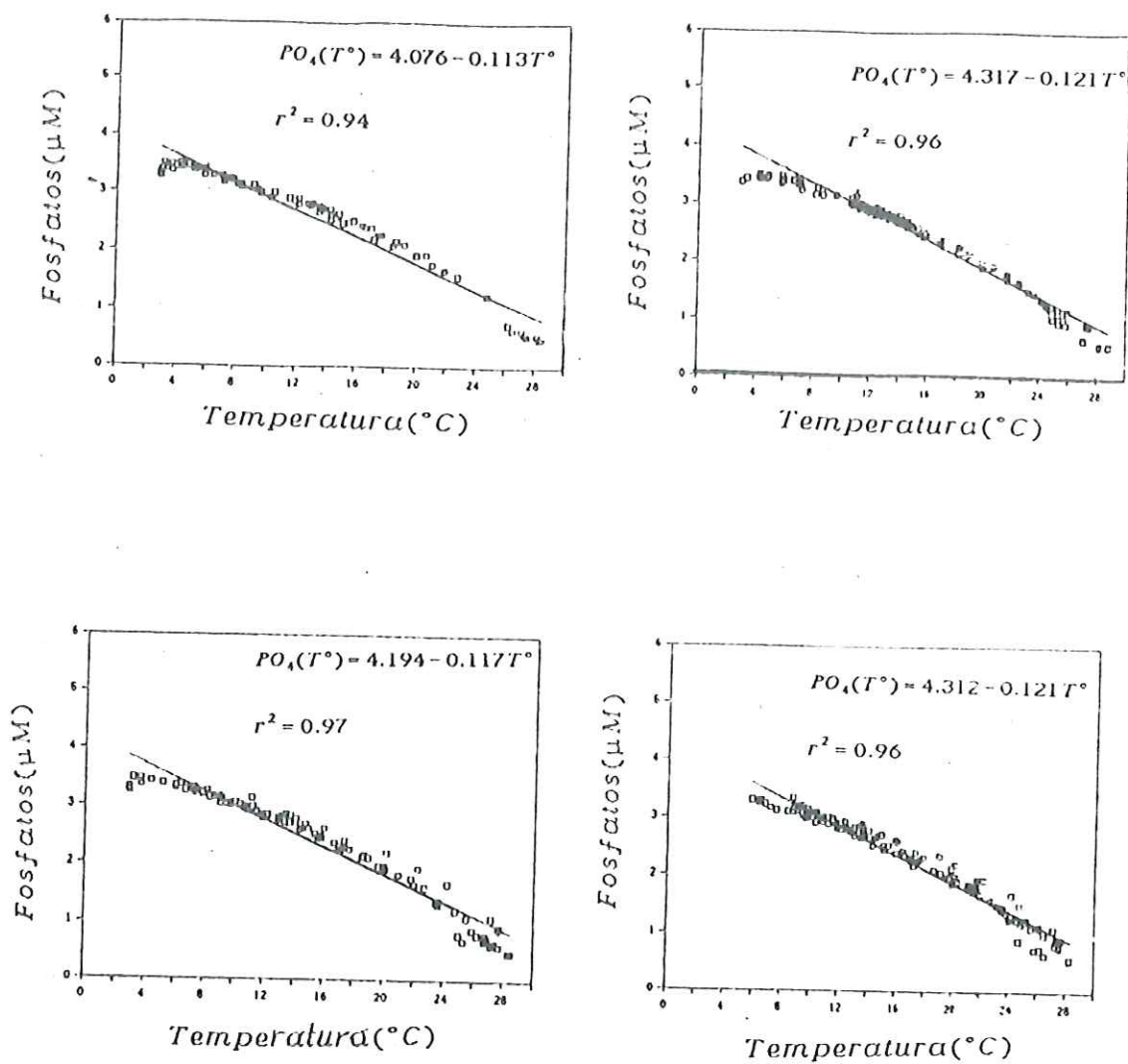


Figura 13.- Regresión lineal aplicada a datos de temperatura contra fosfatos.

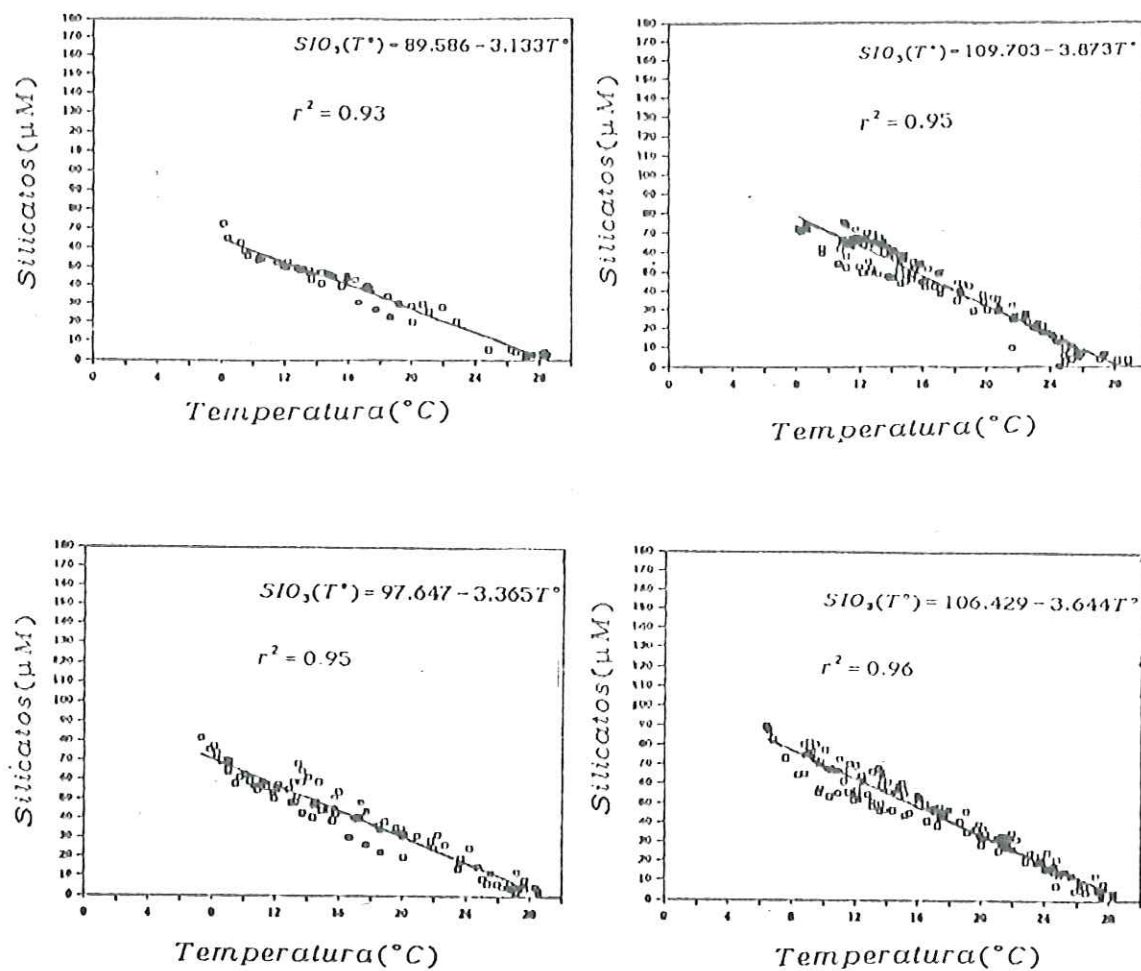


Figura 14.- Regresión lineal aplicada a datos de temperatura contra silicatos.

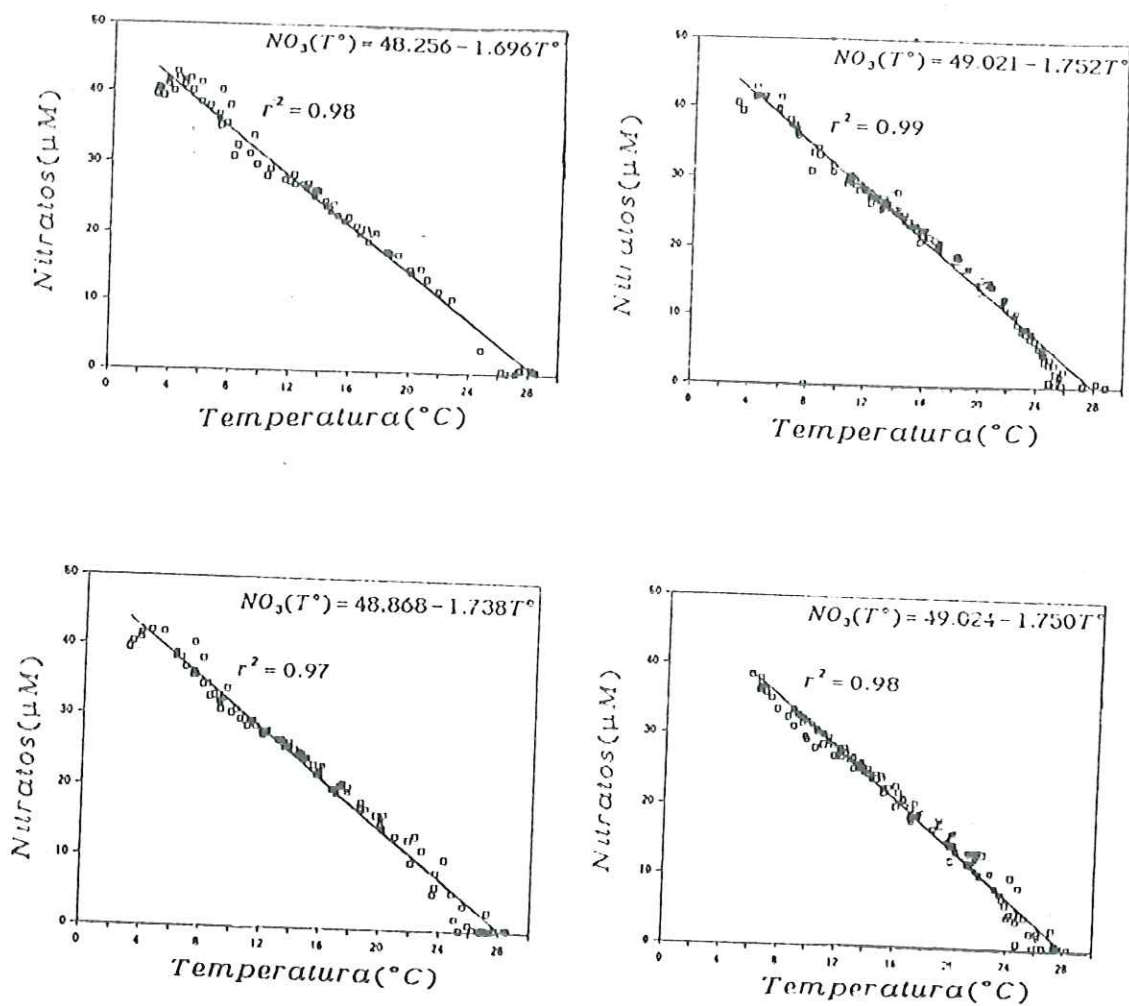


Figura 15.- Regresión lineal aplicada a datos de temperatura contra nitratos.

V.4 Aporte de nutrientes a la capa fótica

La circulación media del Golfo incluye un intercambio de agua entre la cuenca de Guaymas y los canales que la conectan con el alto Golfo. Este intercambio consiste de un flujo que entra al canal de Ballenas por el fondo y otro flujo compensador que sale por las capas superficiales. El flujo medio que entra a canal de Ballenas fue observado en noviembre y diciembre de 1984 por medio de cuatro correntómetros colocados, de los 175 m a el fondo del canal (Badan-Dangon y Hendershott, 1985). El transporte registrado fué del orden de $1.36 \times 10^5 m^3 \cdot s^{-1}$, confinados a la mitad inferior de la columna de agua. El flujo medio superficial de entrada se estima equivalente al que entra al canal, basados en los principios dinámicos que rigen el intercambio entre cuencas con mezcla intensa (v.gr. Bryden y Stommel, 1984). En términos de intercambio de calor y considerando una diferencia típica de $3^\circ C$ entre las dos capas, esto implica una ganancia neta de la cuenca de Guaymas, por flujo medio de $5.95 \times 10^{11} W$. El calor introducido por el transporte turbulento contribuye con $2.76 \times 10^{11} W$ adicionales (Badan-Dangon, 1989). El otro mecanismo que consideramos puede inducir nutrientes a la cuenca de Guaymas es la surgencia costera frente a la costa de Sonora. Dos correntómetros fueron colocados en 1983 a 10 m y 70 m de profundidad sobre la plataforma, en 100 m de agua frente a Guaymas. Las observaciones permiten calcular un flujo medio transversal de la plataforma de $-6.87 \times 10^3 W \cdot m^{-1}$ y otro turbulento de

$-3.4 \times 10^4 W \cdot m^{-1}$ de la línea de costa. En 10 km de longitud el aporte es de $-6.87 \times 10^7 W$ y el calor adicional que se introduce por turbulencia es del orden de $-3.4 \times 10^8 W$. Si consideramos una longitud de 100 km, los transportes medio y turbulento aumentan en un orden de magnitud, pero aún menores que el aporte por el intercambio sobre el umbral.

En igual forma estos flujos tienen asociados cierta concentración de nutrientes, que se pueden estimar multiplicando los transportes de calor por la pendiente obtenida de las regresiones lineales, divididos entre la cantidad ρC_p . Esta estimación puede obtenerse de manera directa dada la correspondencia lineal que existe entre la temperatura y las sales nutritivas. Los ordenes de magnitud de los nutrientes que son confinados al canal de Ballenas por el flujo medio son de $533 mol \cdot PO_4 \cdot s^{-1}$, $13378.65 mol \cdot SiO_3 \cdot s^{-1}$ y $5969.54 mol \cdot NO_3 \cdot s^{-1}$. Por otra parte el flujo medio transversal a la costa de Sonora aporta nutrientes a la capa eufótica de la cuenca de Guaymas a razón de $1.92 \times 10^{-3} mol \cdot PO_4 \cdot s^{-1}$, $5.33 \times 10^{-2} mol \cdot SiO_3 \cdot s^{-1}$, $2.88 \times 10^{-2} mol \cdot NO_3 \cdot s^{-1}$. Los aportes de nutrientes que son introducidos por procesos de mezcla al canal de Ballenas son del orden de $8.38 mol \cdot PO_4 \cdot s^{-1}$, $268.51 mol \cdot SiO_3 \cdot s^{-1}$ y $121.46 mol \cdot NO_3 \cdot s^{-1}$. La surgencia introduce concentraciones de sales nutritivas del orden de $9.65 \times 10^{-3} mol \cdot PO_4 \cdot s^{-1}$, de $2.67 \times 10^{-1} mol \cdot SiO_3 \cdot s^{-1}$ y de $1.51 \times 10^{-1} mol \cdot NO_3 \cdot s^{-1}$.

La superficie del canal de Ballenas, los 100 m superiores, mantiene concentraciones de sales nutritivas de $1\mu M - 2.5\mu M$ para fosfatos, $7\mu M - 50\mu M$ para silicatos y $1\mu M - 15\mu M$ para nitratos. Para la cuenca de Guaymas, los rangos típicos de concentración a 100 m de profundidad, muestran valores del orden de $1\mu M - 2.0\mu M$ para los fosfatos, $5\mu M - 30\mu M$ para los silicatos y de $1\mu M - 20\mu M$ para los nitratos. Si todos los nutrientes introducidos fueran utilizados por el fitoplancton en la producción de carbono orgánico, da una contribución del canal de Ballenas hacia la cuenca de Guaymas de $8.517 \times 10^5 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los fosfatos, $1.703 \times 10^7 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los silicatos y $6.86 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los nitratos. Y de las costas de Sonora hacia la cuenca de Guaymas los valores de productividad de carbono orgánico anual son del orden de $9.158 \times 10^3 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los fosfatos, $1.427 \times 10^5 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los silicatos y $9.519 \times 10^4 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los nitratos.

VI. DISCUSIONES

Los campos de distribución vertical presentan condiciones descritas en estudios anteriores, donde la temperatura, la salinidad y el oxígeno disminuyen y los nutrientes aumentan, respecto a la profundidad (Alvarez-Borrego et al., 1978; Gaxiola Castro et al., 1978).

Las temperaturas superficiales de la región sur, fueron mayores que las temperatura de la región norte, presentando un gradiente de 1°C . Esta distribución es concordante con la distribución de temperatura superficial encontrada por Robinson (1983), para los meses de octubre y junio. La parte sur muestra valores de temperatura superficial mayores, a los que se presentan en la región norte. La presencia de frentes en la región de los canales, y principalmente sobre los umbrales, es consecuencia de la mezcla provocada por la disipación de ondas internas y saltos hidráulicos (Badan-Dangon et al., 1991). Estos frentes encontrados en los 300 m superiores provoca que las temperaturas superficiales de esas localidades sean muy bajas en comparación a las de las regiones sur y norte (Paden, 1990). Por otra parte cerca de las costas de Sonora, la presencia de frentes es debida a las aguas surgentes que se desprenden en forma de filamentos (Badan-Dangon et al., 1985). Los frentes de temperatura y los frentes que se presentan en las secciones verticales de las propiedades no conservativas, son similares, excepto para el canal de Ballenas, donde los frentes de las

sales nutritivas no presentan similitud con los frentes de temperatura, debido a que no se reportan valores de concentración de nutrientes en las estaciones 21 y 70 de este transecto.

El umbral sur del canal de Ballenas, separa las aguas profundas de este canal y de la cuenca de Guaymas. Hacia la parte sur de este umbral, las propiedades del agua tienen la distribución del Pacífico Tropical Oriental. Las propiedades del agua del canal de Ballenas tienden a tener los mismos valores que los de la profundidad del umbral, y en su superficie se observan concentraciones de nutrientes mayores a las encontradas en la región sur y norte (Alvarez-Borrego et al., 1978).

La relación temperatura-nutrientes para cada transecto es lineal, presentando un intervalo de confianza entre 0.9 y 1. En los extremos de la pendiente de cada transecto se aprecian ligeras curvaturas que son causadas por la mezcla con agua profunda y por la actividad biológica de la superficie (comunicación personal de Gaxiola-Castro, 1992). Estos procesos pueden dar como resultado que la relación temperatura-nutrientes sea no lineal.

Los aportes de nutrientes a las capas superficiales de la cuenca de Guaymas son llevados a cabo por los flujos medio y fluctuante asociados al intercambio baroclínico con canal de Ballenas e intercambios medio y turbulento debido a procesos de surgencia en las costas de Sonora. Los flujos medios que son confinados al Canal de Ballenas , $533 \text{ mol} \cdot \text{PO}_4 \cdot \text{s}^{-1}$,

$13378.65 \text{ mol} \cdot \text{SiO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$ y $5969.54 \text{ mol} \cdot \text{NO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$, estos son mayores en algunos ordenes de magnitud a los flujos medios transversales a la costa de Sonora, $1.92 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{PO}_4 \cdot \text{s}^{-1}$, $5.33 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{SiO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$, $2.88 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{NO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$. Los aportes de nutrientes introducidos por procesos de mezcla al canal de Ballenas, $8.38 \text{ mol} \cdot \text{PO}_4 \cdot \text{s}^{-1}$, $268.51 \text{ mol} \cdot \text{SiO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$ y $121.46 \text{ mol} \cdot \text{NO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$, resultan ser mayores que los flujos que introduce la surgencia, $9.65 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{PO}_4 \cdot \text{s}^{-1}$, $2.67 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{SiO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$ y $1.51 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{NO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$; pero los flujos fluctuantes transversales a las costas de Sonora comparados con los flujos medios tienen mayor contribución en la fertilización de las capas superficiales de la cuenca de Guaymas.

La gran cantidad de nutrientes que introduce el intercambio baroclínico entre cuencas, sostiene una productividad de carbono orgánico anual de $8.517 \times 10^5 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los fosfatos, $1.703 \times 10^7 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los silicatos y $6.86 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los nitratos. En cambio la productividad de carbono orgánico anual sostenida por el flujo de la surgencia es menor, presentando órdenes de magnitud de $9.158 \times 10^3 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los fosfatos, $1.427 \times 10^5 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los silicatos y $9.519 \times 10^4 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los nitratos.

VII. CONCLUSIONES

Los flujos medios de calor y de las sales nutritivas para el canal de Ballenas son más importantes en el aporte de nutrientes a la capa superficial de la cuenca de Guaymas, que los flujos fluctuantes causados por la mezcla. En cambio para las costas de Sonora, los flujos fluctuantes ocasionados por la surgencia son los que aportan la mayor cantidad de nutrientes a la superficie del Golfo medio. Los aportes preponderantes son entonces los flujos sobre el umbral y principalmente el debido a la circulación media, que trasporta $533 \text{ mol} \cdot \text{PO}_4 \cdot \text{s}^{-1}$, $13378.65 \text{ mol} \cdot \text{SiO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$ y $5969.54 \text{ mol} \cdot \text{NO}_3 \cdot \text{s}^{-1}$. Estos nutrientes introducidos por la circulación media sostienen una producción de carbono orgánico anual, de $8.517 \times 10^5 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los fosfatos, $1.703 \times 10^7 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los nitratos y $6.86 \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{C} \cdot \text{año}^{-1}$ para los nitratos.

VIII. BIBLIOGRAFIA

Alvarez, L.G., A. Badan-Dangon, and J.M. Robles, 1984, Lagrangian observations of near-surface currents in Ballenas chanel; California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (CalCOFI) Report 25, 8p.

Alvarez-Borrego, S., 1983, Gulf of California, in B.H. Ketchum, ed., Estuaries and enclosed seas: Amsterdan, Elsevier, p. 427-449.

Alvarez-Borrego, S., and R.A. Schwartzlose, 1979, Water masses of the Gulf of California: Ciencias Marinas, v. 6, no.1, p. 43-63.

Alvarez-Borrego, S., J.A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M.J. Acosta-Ruiz, and R.A. Schwartzlose, 1978, Nutrientes en el Golfo de California: Ciencias Marinas, v.5:53-71 p.

Alvarez-Borrego, S., and J.R. Lara-Lara, 1991, The Physical Environment and Primary Productivity of the Gulf of California in: The Gulf and Peninsular Province of the Californias Memoir of the Association of Petroleum Geologist.

Badan-Dangon, A., C.J. Koblinsky, and T. Baumgartner, 1985, Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns: Oceanologica Acta, v.8:13-22.

Badan-Dangon, A., 1989, The exchange over San Lorenzo sill, WHOI Summer Geophys. Fluid Dynam., 164.

- Badan-Dangon, A., and M.C. Hendershott, 1985, On the flow into Ballenas channel, IAMAP/IAPSO Joint Assembly, Honolulu.
- Badan-Dangon, A., Hendershott M.C. and Lavin M.F., 1991, Underway Doppler Current profiles into the Gulf of California, EOS 72(19), 209-218.
- Bray, N.A., 1988a, Termohaline circulation in the Gulf of California, J. Geophys. Res., 93, 4493.
- Bray, N.A. and J.M. Robles, 1989, Physical Oceanography of the Gulf of California in: The Gulf and Peninsular Province of the Californias Memoir of the Association of Petroleum Geologist.
- Filloux, J.H., 1973, Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California, Nature, 243, 217.
- Gaxiola Castro, G., and S. Alvarez-Borrego and R.A. Schwartzlose, 1978, Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California: Ciencias Marinas, v.5, p. 25-40.
- Griffiths, R.C. 1968, Physical, chemical and biological oceanography of the entrance to the Gulf of California, spring of 1960. U.S. Fish and Wildlife Serv. Sp. Sci. Rp. Fisheries No. 573-47 p.
- Hendershott, M.C. and Speranza A., 1971, Co-oscillating tides in long, narrow bays; the Taylor problem revisited, Deep-Sea Res., 18, 959-980.

Hamman, M.G., M.O. Nevarez-Martínez and J.A. Rosales-Casián, 1991, Pacific sardine and northern anchovy in the Gulf of California, México: Currents results of sarp-México. Comunicaciones Académicas, CICESE, Serie Ecología, CIECT9103.

Lavín, M.F. and S. Organista, 1988, Surface heat flux in the northern Gulf of California, J. Geophys. Res., 93, 14, 033.

Merrifield, M.A., C.D. Winant, J.M. Robles, R.T. Guza, N.A. Bray, J. García, A. Badan-Dangon, N. Christensen, Jr., 1986, Observations of currents, temperature, pressure, and sea level in the Gulf of California 1982-1986. A data report: Scripps Institution of Oceanography, Reference Series 86-11, 153 p.

Organista S., and M.F. Lavín, 1987, Estimaciones del flujo superficial de calor en el alto Golfo de California, Resúmenes del VII Congreso de Nacional de Oceanografía, México.

Paden, C.A., Tidal and atmospheric forcing on the upper ocean in the Gulf of California, Ph.D. Thesis. Scripps Inst. of Ocean. Univ. of California. San Diego. La Jolla, Calif. 82pp.

Paden, C.A., and Robles, J.M. and G. Marinone, 1987, Seasonal and Interannual thermoaline variability on the Guaymas Basin in the Gulf of California, Continental Shelf Res., 7, 715-733, 1987.

Paden, C.A., M. R. ABBOTT, and Clinton D. Winant¹⁹⁹¹, Tidal and Atmospheric Forcing of the Upper Ocean in the Gulf of California, J. Surface Temperature Variability, J. Geophys. Res., 96, 18, 337.

- Robinson M.K., 1973, Atlas of monthly mean surface and subsurface temperatures in the Gulf of California, Mexico, San Diego Society of Natural History, Memoir 5, 19 p.
- Roden, G.I., 1964, Oceanographic aspects of the Gulf of California. Marine Geology of the Gulf of California: a symposium. van Andel, Tj. H. and G. G. Shor Jr. (editors). Amer. Assoc. Petroleum Geologists. Memoir 3:30-58.
- Roden, G.I., and I. Emilsson, 1979, Physical oceanography of the Gulf of California: Paper presented at the Gulf of California Symposium, UNAM, Mazatlán, Sinaloa, México, unpublished.
- Roden, G.I. and G.W. Groves, 1959, Recent oceanographic investigations in the Gulf of California, Jour. Marine. Res. v 18, num. 1:10-35.
- Rusnak, G.A., R.L. Fisher and F.P. Shepard, 1964, Bathymetry and faults of the Gulf of California: a symposium. van Andel, Tj. H. and G.G. Shor Jr. (editors). Amer. Assoc. Petroleum Geologists. Memoir 3:59-75.
- SIO, Data Report, Physical and Chemical Data. Gulf Cruises 7404 and 7410. SIO Reference 88-6. 55p., 1989.
- Stevenson, M.R., 1970, On the physical and biological oceanography near the entrance to the Gulf of California, October 1966- August 1967. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. 4, num 3:389-504.