

LAS MASAS DE AGUA

P. Fraga

El agua de mar no es un todo uniforme sino que hay cuerpos de agua de características bien definidas por su temperatura y salinidad que se llaman "tipo" de agua. Estos tipos están siempre en proceso de mezcla unos con otros. Cuando una de estas mezclas incipientes que conservan su heterogeneidad se mueven como un cuerpo único conservando su estratificación, se les da el nombre de "masas" de agua.

El sistema de estudio de estas mezclas se debe a Helland-Hansen (1916) que representa sobre un sistema de coordenadas de temperatura-salinidad el perfil vertical de la mezcla y se conoce como diagrama T-S.

En la fig. 1 tenemos tres tipos de agua en proceso de mezcla y su representación sobre el diagrama T-S.

Todos los sistemas de mezcla generalmente pueden reducirse a mezclas de tres tipos de agua. Una capa de agua intermedia, ilimitada lateralmente, que se está mezclando simultáneamente con la capa inmediatamente superior e inferior.

El cálculo numérico de la proporción de cada tipo de agua viene dado por el sistema de ecuaciones

$$\left. \begin{aligned} M_1 S_1 + M_2 S_2 + M_3 S_3 &= S \\ M_1 T_1 + M_2 T_2 + M_3 T_3 &= T \\ M_1 + M_2 + M_3 &= 1 \end{aligned} \right\}$$

Si se dispone una calculadora con programa para uso de matrices

$$\begin{vmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ T_1 & T_2 & T_3 \\ 1 & 2 & 3 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} S \\ T \\ 1 \end{vmatrix}$$

O bien por cálculo manual

$$M_2 = T \left(\frac{S_1 - S_3}{A} \right) - S \left(\frac{T_1 - T_3}{A} \right) + \left(\frac{S_3(T_1 - T_3) - T_3(S_1 - S_3)}{A} \right) \quad (I)$$

donde $A = (T_2 - T_3)(S_1 - S_2) - (S_2 - S_3)(T_1 - T_3)$

Todos los términos dentro de los paréntesis en la ecuación I son conocidos, queda reducido por tanto a la ecuación de un plano.

$$M_2 = aT - bS + c$$

Para el cálculo de M_1 , sustituir en (I) T_1, S_1 por T_2, S_2 y viceversa. Lo mismo para M_3 .

En algunos casos se pueden estar mezclando cuatro tipos de agua simultáneamente, por un lado A_1 y A_2 verticalmente y para dar una masa de agua A y por otro los tipos B_1 y B_2 también verticalmente para dar una masa de agua B y a su vez mezclarse ambos lateralmente. Esto es lo que sucede entre el Agua Central Nor-Atlántica (ACNA) y el Agua Central Sur-Atlántica (ACSA) que forman un frente de contacto lateral en Cabo Blanco. Otro caso análogo es el frente formado por el Agua Central del Golfo de Vizcaya (ACGV) que sale pegada al talud cantábrico y se encuentra frente al cabo Finisterre con una rama del ACNA que se mueve hacia el norte a lo largo del talud atlántico de la Península Ibérica.

Para resolver una mezcla de cuatro tipos de agua no basta con la temperatura y salinidad sino que es necesario otra variable

$$\left. \begin{aligned} M_1 C_1 + M_2 C_2 + M_3 C_3 + M_4 C_4 &= C \\ M_1 S_1 + M_2 S_2 + M_3 S_3 + M_4 S_4 &= S \\ M_1 T_1 + M_2 T_2 + M_3 T_3 + M_4 T_4 &= T \\ M_1 + M_2 + M_3 + M_4 &= 1 \end{aligned} \right\}$$

Esta no puede ser ningún ión mayoritario puesto que vimos anteriormente según los análisis de Dittmar que estos son función de la salinidad por lo tanto el determinante de la ecuación será cero.

Las concentraciones de sales nutrientes entre el ACNA y el ACSA son muy diferentes por lo que puede utilizarse alguno de los nutrientes pero su uso queda restringido a los niveles inferiores a 100 m porque en la zona fótica son utilizados por el fitoplancton y dejan de ser una propiedad conservativa. Por otra parte se presenta el inconveniente de que al no existir los tipos de agua "pura" no se pueden obtener experimentalmente sus concentraciones.

Otra forma de resolver el problema es admitir que la mezcla lateral se hace entre cuerpos de agua de la misma densidad (mezcla isopicnica). En la fig. 2 tenemos un esquema del sistema de mezcla para ACNA y ACSA frente a Cabo Blanco. El agua de índices T, S se puede considerar formada por la mezcla de ACNA y ACSA "puras" de su misma densidad de salinidad S_n y S_s respectivamente. A su vez los cuerpos de agua de salinidad S_n y S_s se pueden considerar formadas por la mezcla de los tipos de agua W_1 , W_2 y W_3 , W_4 respectivamente.

En consecuencia la proporción de los cuerpos de ACNA y ACSA serán

$$M_n = \frac{S - S_s}{S_n - S_s} \quad \text{y} \quad M_s = \frac{S_n - S}{S_n - S_s}$$

y la proporción de cada uno de los cuatro tipos de agua será

$$M_1 = M_n \frac{S_n - S_2}{S_1 - S_2} \quad M_2 = M_n \frac{S_1 - S_n}{S_1 - S_2} \quad M_3 = M_s \frac{S_s - S_4}{S_3 - S_4} \quad M_4 = M_s \frac{S_3 - S_s}{S_3 - S_4}$$

El cálculo es sencillo y solo presenta alguna dificultad la determinación S_n y S_s . Si se dispone de medios de cálculo, estos dos puntos son la intersección de las rectas ACNA y ACSA con la recta tangente que pasa por el punto T, S y tiene de pendiente

$$dT/ds = - (\partial\rho/\partial s) / (\partial\rho/\partial T)$$

donde $\rho = f(S, T, p)$ es la densidad "in situ". Para la función de ρ se puede utilizar la ecuación (7) de UNESCO (1981).

Si no se dispone de medios de cálculo se puede hacer fácilmente trazando las rectas ACNA y ACSA sobre una plantilla de curvas σ_t . Se marca el punto T, S cuya proporción de masas se quiere calcular y superponiendo una hoja de papel milimetrado transparente Centrum ref. 3 se hace que una de las rayas horizontales sea tangente a la curva σ_t más próxima al punto T, S y una de las rayas verticales pase por el punto de tangencia y el punto T, S. La raya horizontal que pasa el punto T, S corta a las rectas ACNA y ACSA en los puntos S_n y S_s .

En este sistema de cálculo se utiliza la densidad a presión cero en lugar de la densidad "in situ" pero las diferencias encontradas son muy pequeñas.

La Mezcla de tipos de agua en el tiempo. - Los diagramas T-S no solo sirven para calcular la proporción de cada tipo de agua que hay en una zona de mezcla sino que también pueden definir la evolución de esa mezcla en el tiempo. Esto es de gran ayuda para establecer las líneas de avance de una determinada masa de agua. Estos avances suelen ser muy lentos y por lo tanto no es posible determinarlos con la utilización de correntímetros.

En la figura 1 vemos que la forma del diagrama T-S, en una mezcla de dos tipos de agua, no cambia con el tiempo pero la distribución de puntos sí. Al iniciarse la mezcla todos los puntos están acumulados en los extremos de la recta pero a medida que pasa el tiempo, estos se distribuyen más uniformemente. En consecuencia, en dos estaciones separadas geográficamente pero que presentan un mismo diagrama T-S, el flujo va hacia aquella que tiene la dispersión de puntos más uniforme.

Cuantitativamente, y para un océano de profundidad infinita, la distribución vertical de temperatura viene dada por la ecuación

$$T(z, t) = \frac{1}{2} \left[T_1 + T_2 + (T_1 - T_2) \Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{kt}} \right) \right]$$

donde $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\eta^2} d\eta$

k es el coeficiente de difusión turbulenta y $\Phi(z)$ es la integral de probabilidad que generalmente se encuentra en los programas de calculadoras de bolsillo.

Con fines prácticos es preferible hacer un gráfico poniendo en ordenadas entre los puntos para un mismo intervalo de profundidad

$$D_i = \frac{1}{z_i - z_{i+1}} \sqrt{100(S_i - S_{i+1})^2 + (T_i - T_{i+1})^2}$$

y en abscisas la profundidad $\frac{z_i + z_{i+1}}{2}$

Aquí se usa una escala $\Delta T/\Delta S = 10$ para que la pendiente de la curva T-S sea próximo a 1.

Veronis, aunque con fines -distintos hace la transformación de un sistema de coordenadas T-S en $\sigma_t - \gamma$. Donde γ es el conjunto de rectas ortogonales a las curvas de σ_t - utiliza $\Delta T/\Delta S = 5$ para que la pendiente de las curvas σ_t sea próxima a 1.

La representación para agua de la costa atlántica de la península Ibérica se encuentra en la fig. 3. Este tipo de representación puede ser útil para el estudio de la circulación entre las islas del Archipiélago Canario.

Origen de las masas de agua. - Hasta aquí se ha hecho un estudio teórico de las masas de agua. En la realidad para que un agua se diferencie de la circundante tiene que variar su temperatura o su salinidad, o ambas a la vez, pero esto sólo es posible si tiene contacto con el exterior por lo que la formación de tipos y masas de agua solamente se puede realizar en la superficie oceánica, en donde la variación de salinidad se produce por aporte de aguas fluviales, precipitación o evaporación y las variaciones de temperatura por intercambio de calor con la atmósfera. El agua resultante tendrá generalmente una densidad diferente a la del agua de origen. Si esta densidad es inferior el nuevo tipo de agua se extiende por la superficie y avanza hacia zonas climáticas diferentes que le hacen perder su individualidad. Son siempre tipos de agua muy locales y con unos límites geográficos que avanzan y retroceden con los cambios estacionales.

Por el contrario, si el tipo de agua formada en la superficie tiene una densidad superior, a medida que se forma, se hunde hasta que alcanza el nivel que corresponde a su densidad. Aislada así del exterior avanza conservando su individualidad y puede reconocerse a miles de kilómetros del punto de origen.

Cubeta Norte-Africana.- Una idea general de las principales masas de agua, la tenemos en la fig. 4. A continuación describimos individualmente cada una de las masas que se encuentran en el archipiélago canario.

El agua profunda del Atlántico Norte es, con mucho, la mayor masa de agua de las que se encuentran en esta zona: ocupa desde los 1700 m hasta el fondo, y está bien definida por su temperatura de 2° a 3'5 °C y su salinidad comprendida entre 34'8 y 34'95. Se forma al sur de Groenlandia, a una latitud de 60° Norte, donde se hunde y avanza hacia el sur como puede verse en la fig. 4, traspasa la línea ecuatorial y continua avanzando en el hemisferio sur hasta que se mezcla con las masas de agua Antárticas que, en parte, la transportan de nuevo hacia el norte y, en parte, hacia el este, arrastrada por la Corriente Circunpolar Antártica. Esta masa de agua está muy bien identificada en el diagrama T-S (fig. 5) en cuya figura está indicada su situación por una flecha.

Encima de la masa de agua que acabamos de describir, se encuentra el agua Mediterránea. Se forma ésta en el extremo oriental del mar Mediterráneo, donde por intensa evaporación alcanza salinidades hasta 39'1 con el consiguiente incremento de densidad y, en consecuencia, su hundimiento hasta una profundidad de unos 500 m desde donde fluye hacia el oeste hasta el Estrecho de Gibraltar saliendo al Océano Atlántico sobre el umbral de este estrecho, de sólo 320 m de profundidad. Fluye el agua Mediterránea con salinidad de 35'5 y una temperatura de 11'9 °C y des-

ciende en el Atlántico como una cascada hasta alcanzar el nivel que le corresponde por su densidad ($\sigma_t = 27.78$) hacia los 1000 m de profundidad. Desde aquí se extiende por todo el océano y se la puede identificar por el máximo de salinidad, que en la costa de Mauritania está hacia los 1500 m (fig. 6). En el diagrama T-S, fig. 7, de las Islas Canarias todavía se identifica muy bien la vena de agua mediterránea. El Agua Mediterránea que se dirige hacia el sur lo hace junto con el agua Profunda Noratlántica como un cuerpo único. A medida que nos apartamos del lugar de origen el máximo de salinidad se hace menos agudo y llega un momento en que esta agua se la considera como la parte superior de la masa de agua profunda del Atlántico Norte. En el diagrama T-S está representado por un punto el tipo de agua Mediterránea que fluye por el Estrecho y por la línea de puntos la masa que se extiende por el Atlántico.

Siguiendo con las masas de agua procedentes del Norte tenemos el agua Central del Atlántico Norte que es de un volumen mucho menor que la masa profunda y de una extensión más reducida pero que en nuestro caso, tiene una importancia grande porque es una de las que alcanzan la superficie en la zona del afloramiento de la costa africana. Esta masa de agua se forma entre los 30° a 40° de latitud Norte a lo largo de la línea de Convergencia Subtropical, indicada en la fig. 4 con las letras SC, y se dirige hacia el sur por la parte oriental. El agua que se hunde a lo largo de la línea de convergencia procede de ambos lados, por lo tanto, es de características diferentes. Al existir un gradiente horizontal de temperatura y salinidad entre la parte norte y la sur, la masa de agua al hundirse verticalmente y luego girar horizontalmente hacia el sur, conserva este gradiente en sentido vertical durante todo su recorrido y presenta un diagrama T-S (fig. 5) muy característico.

En el hemisferio sur tenemos, en orden decreciente de densidad, el agua de fondo antártica de $-0'9^{\circ}\text{C}$ y $34'62$ de salinidad que se forma en el mar de Weddell pero ésta no nos interesa porque no llega a estas islas.

Más al norte, hacia los 55° de latitud sur tiene su origen el agua Intermedia Antártica que es una masa caracterizada por su baja salinidad. Esta se hunde en la Convergencia Antártica hasta unos 900 m y avanza hacia el ecuador principalmente por la parte oeste del océano e incluso lo sobrepasa, fig. 4.

Todavía más al norte, entre los 40 a 30° de latitud Sur se encuentra la Convergencia Subtropical que está separada de la anterior por la región subantártica. En esa convergencia tiene el origen el agua Central del Atlántico Sur, que se forma de un modo análogo a la Central Norte. Aunque en su origen el agua Intermedia Antártica y agua Central Sur están separadas por el agua Subantártica, al hundirse las dos primeras se ponen en contacto y ambas se desplazan reunidas.

Algunas aplicaciones de los diagramas T-S y masas de agua.-

Las aplicaciones son múltiples y variadas, entre ellas ya hemos visto la determinación de la difusión y penetración de un cuerpo de agua. Aquí vamos a exponer un ejemplo concreto sobre el desplazamiento de cuerpos de agua en el NW de la península Ibérica y otro sobre las consecuencias biológicas de la distribución de masas de agua.

La circulación del agua subsuperficial en el NW de la Península, se admite generalmente que el agua penetra en el Golfo de Vizcaya por el norte y sale hacia el oeste contra la costa cantábrica y después gira hacia el sur bordeando Galicia y sigue a lo largo de la costa atlántica.

Si se observan los diagramas T-S al norte y sur del cabo Finisterre (fig. 5) se tiene que el máximo de salinidad a 70 m en el agua del sur (ACNA) no puede formarse por evolución del agua situada al norte (ACGV) por lo que el sistema de circulación indicado anteriormente no es posible. Por otra parte el mínimo de salinidad situado 300 m en el ACGV tampoco puede proceder del ACNA. Por lo tanto frente a Finisterre hay un frente de dos masas de agua diferentes. El único sistema de circulación compatible con los datos oceanográficos existentes es el indicado en la figura de la derecha. A su vez explica la diferencia biológica entre ambas zonas y el afloramiento intenso en el cabo Finisterre que se extiende hacia mar afuera en lugar de permanecer costero y también la mayor intensidad de afloramiento en las Rias Bajas en comparación con las Altas.

Sobre las consecuencias biológicas de la distribución de masas de agua, tenemos un ejemplo muy sugerente en el frente de contacto entre el ACNA y el ACSA frente a cabo Blanco.

Siguiendo el método indicado anteriormente para mezcla de cuatro tipos de agua se ha calculado la concentración de nutrientes para la parte superior del ACNA y ACSA "puras". Los datos obtenidos están en el cuadro 6.

La relación N/P vemos que en el ACNA es alta pero en el ACSA es baja, inferior a la de utilización por el fitoplancton, en consecuencia cuando el nitrógeno se agota por fotosíntesis todavía quedará un remanente fosfato que unicamente puede ser utilizado por cianofíceas, algas capaces de fijar nitrógeno gas.

Otra diferencia notable es el contenido en silicio. El ACNA tiene silicatos por lo que puede soportar poblaciones fitoplanctónicas de diatomeas y silicoflageladas mientras que el ACSA al no tener silicatos tendrán mayor oportunidad los dinoflagelados

por ser especies que no los necesitan, compensando así su menor tasa de división. También el agua superficial procedente del norte tiene su peculiaridad especial, el pH alto trae como consecuencia una mayor saturación en CO_3Ca y facilita la formación de especies con esqueleto calizo como los corolitoforales. La distribución de especies dadas por Margalef (1973) y la distribución de masas de agua para esa misma campaña son casi idénticas. Figs. 6, 7 y 8.

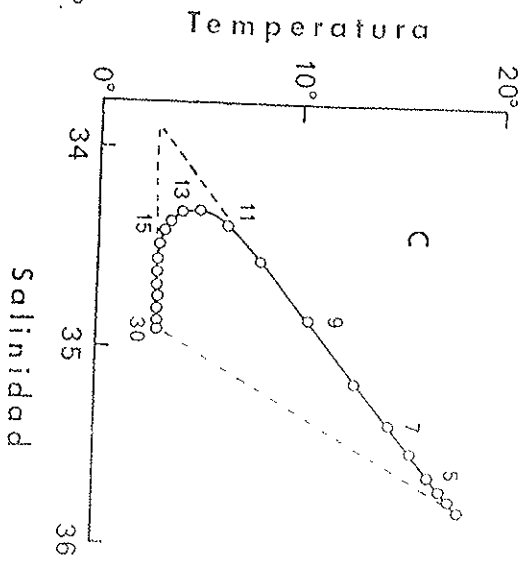
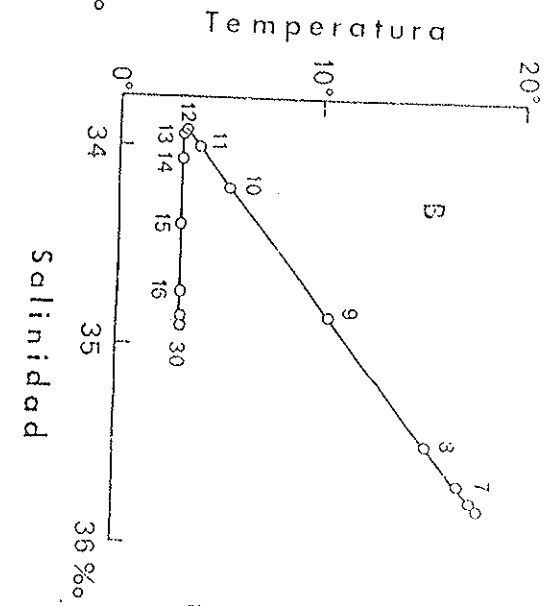
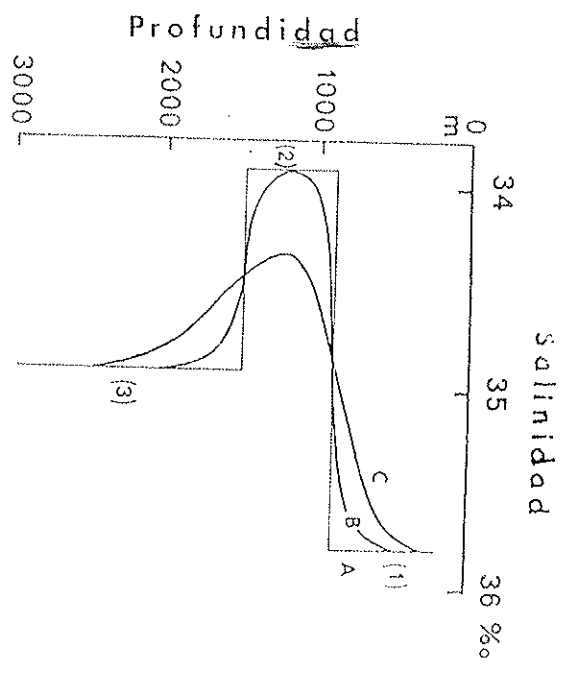
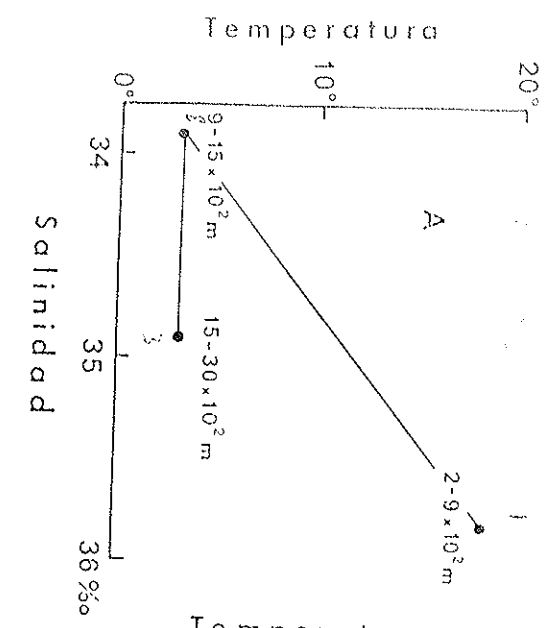
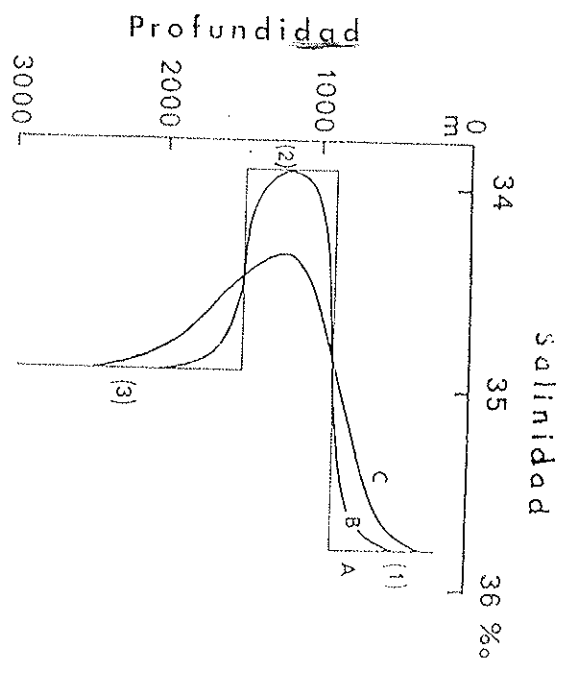
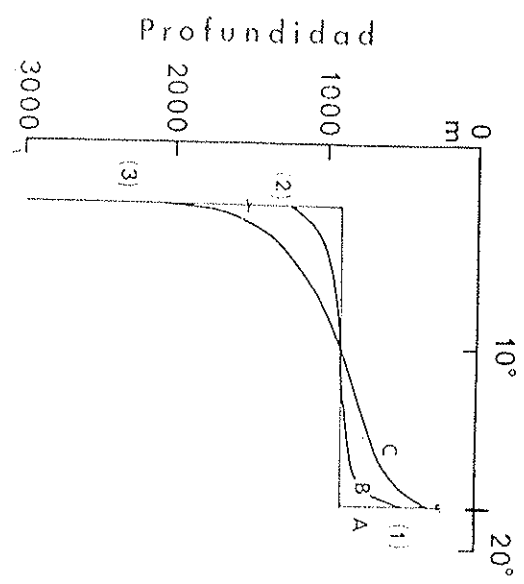


Fig. 4

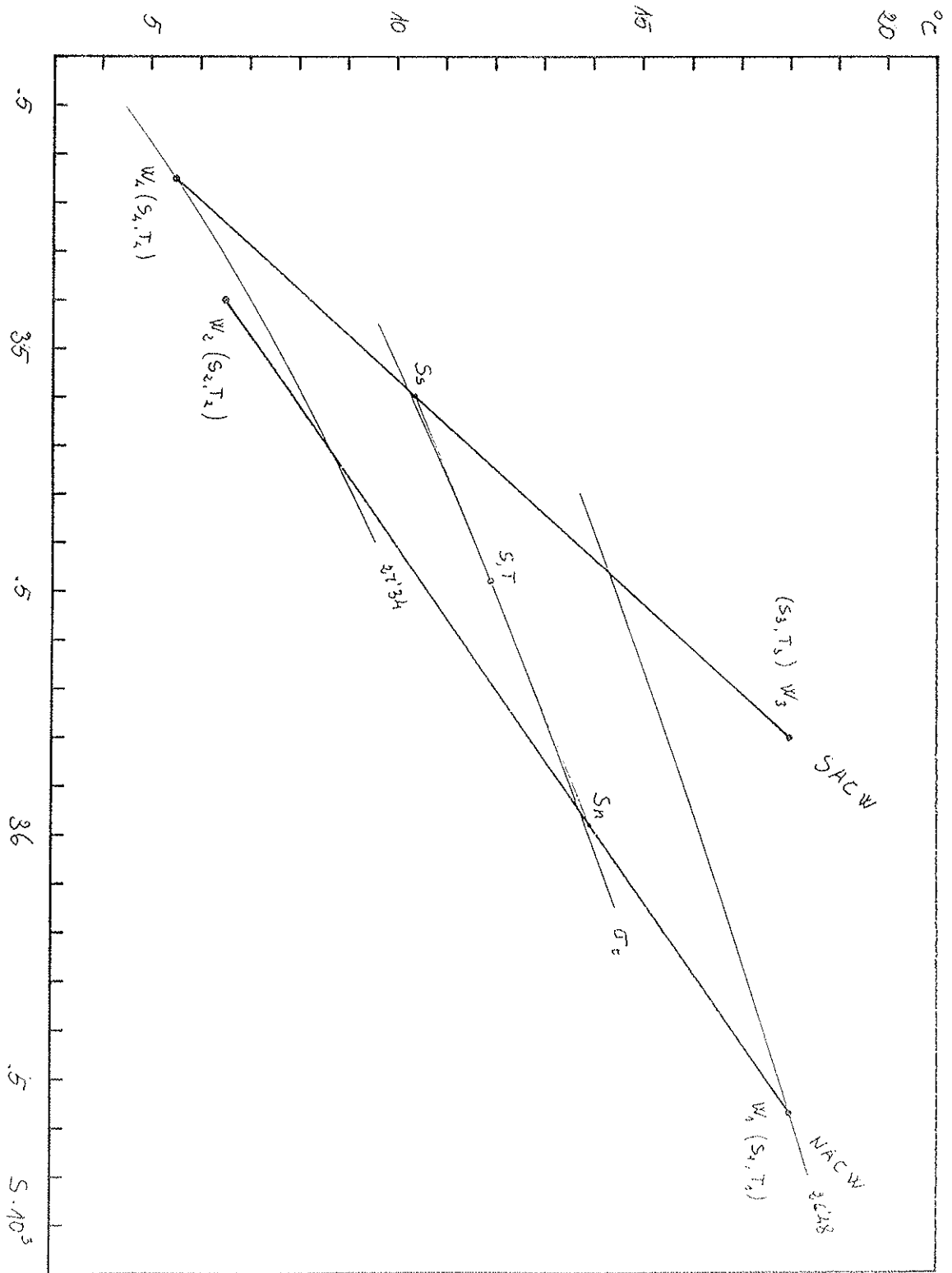
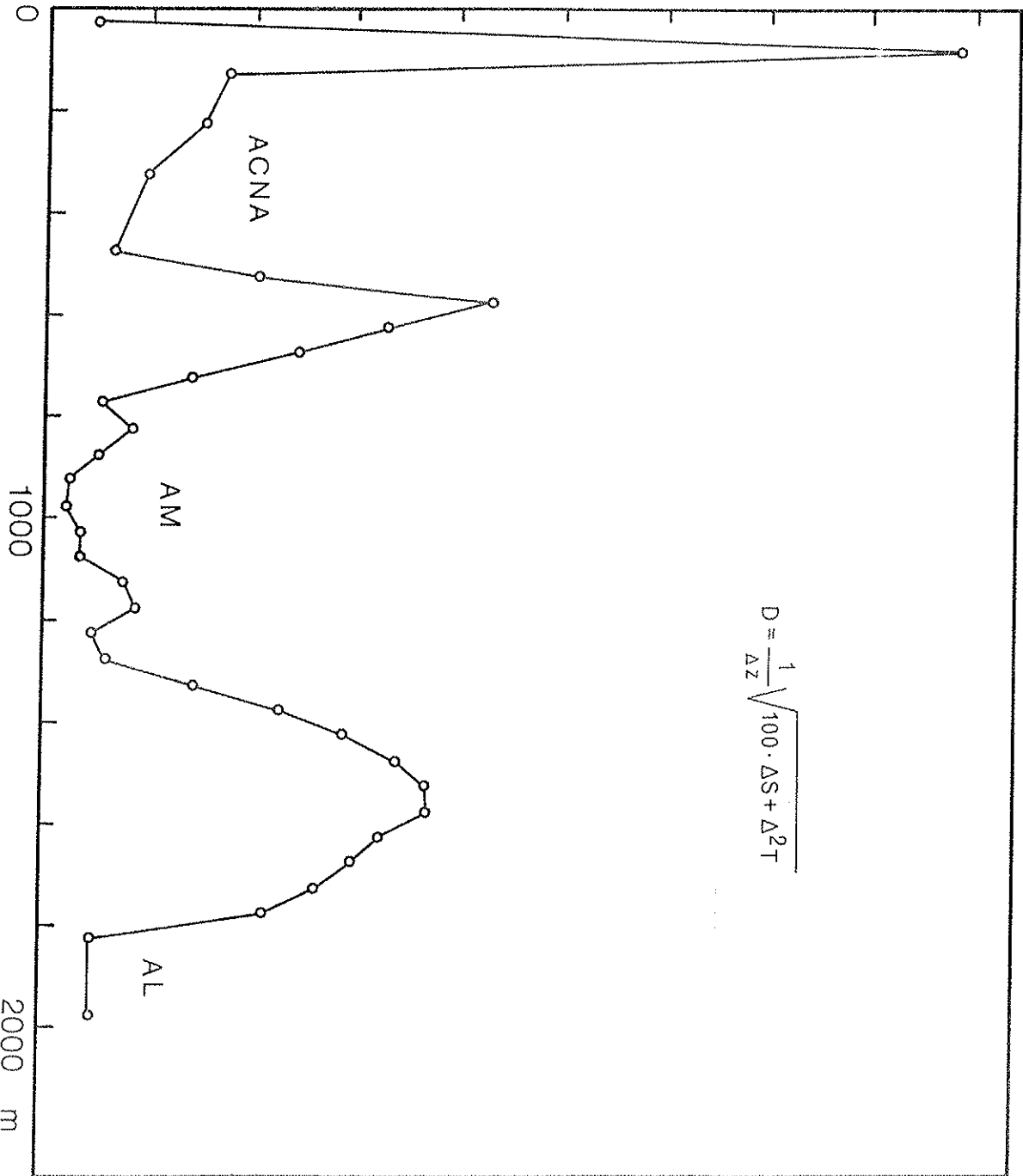


Fig 2



$$D = \frac{1}{\Delta z} \sqrt{100 \cdot \Delta S + \Delta^2 T}$$

Figs

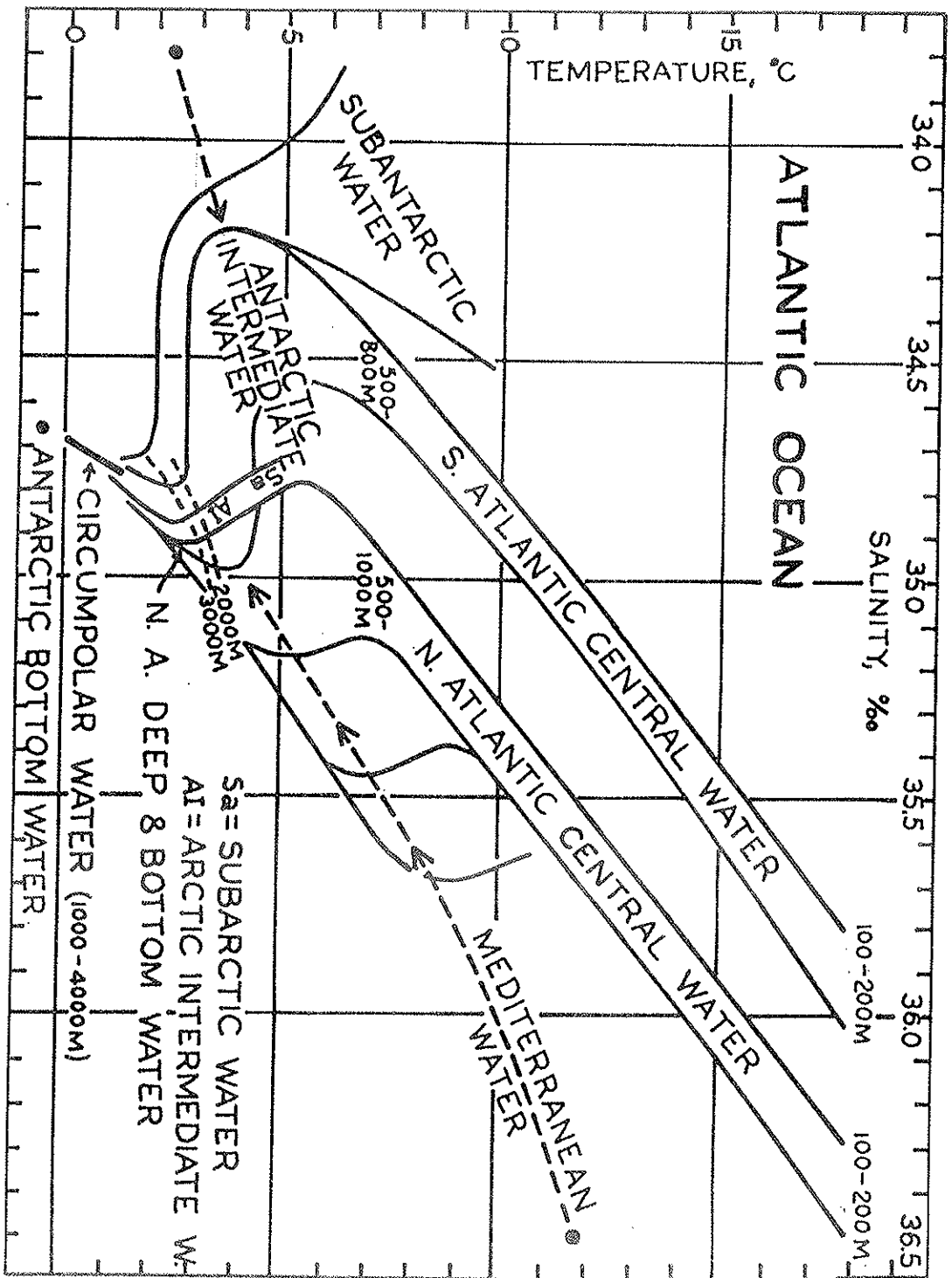


Fig 5

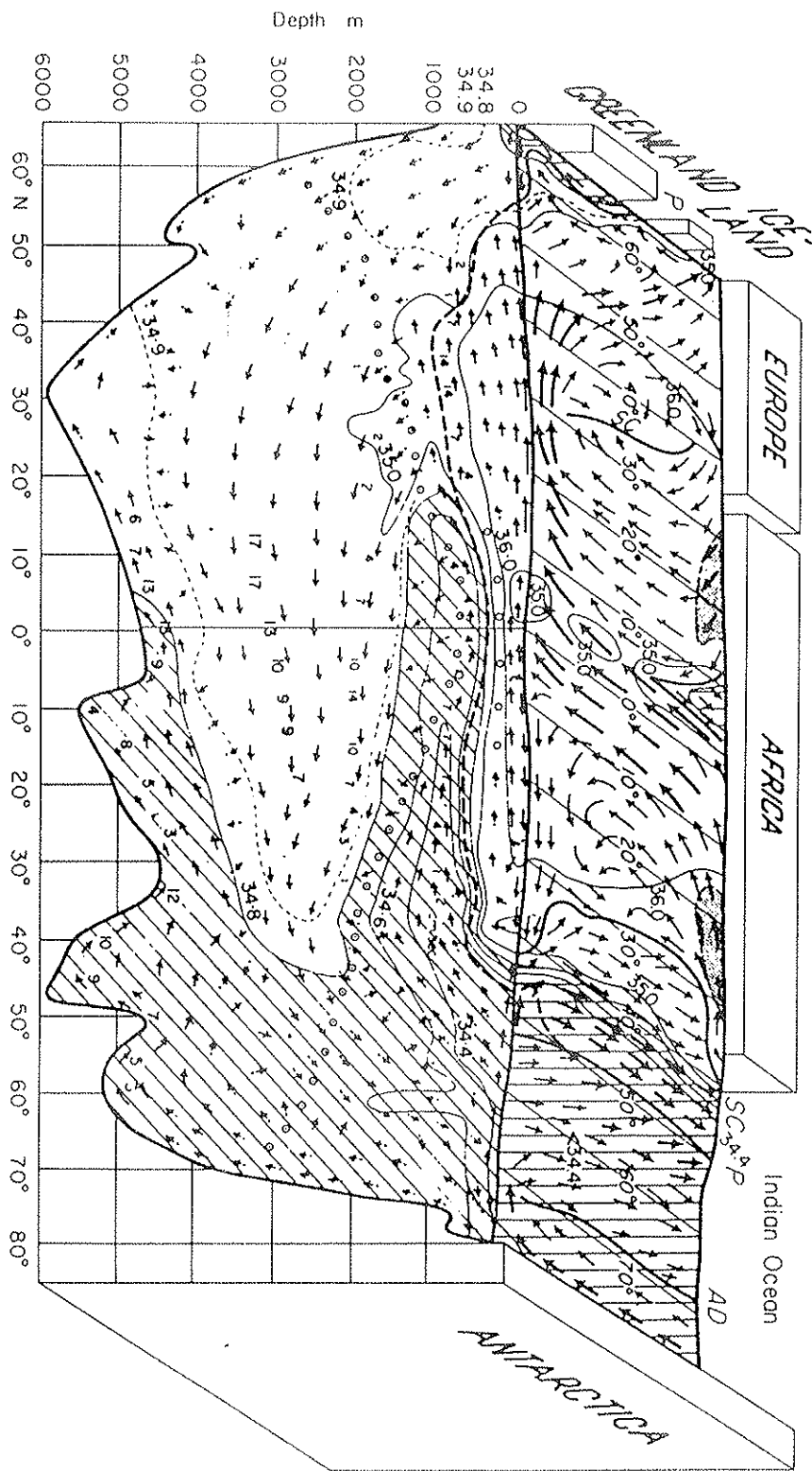


Fig 6

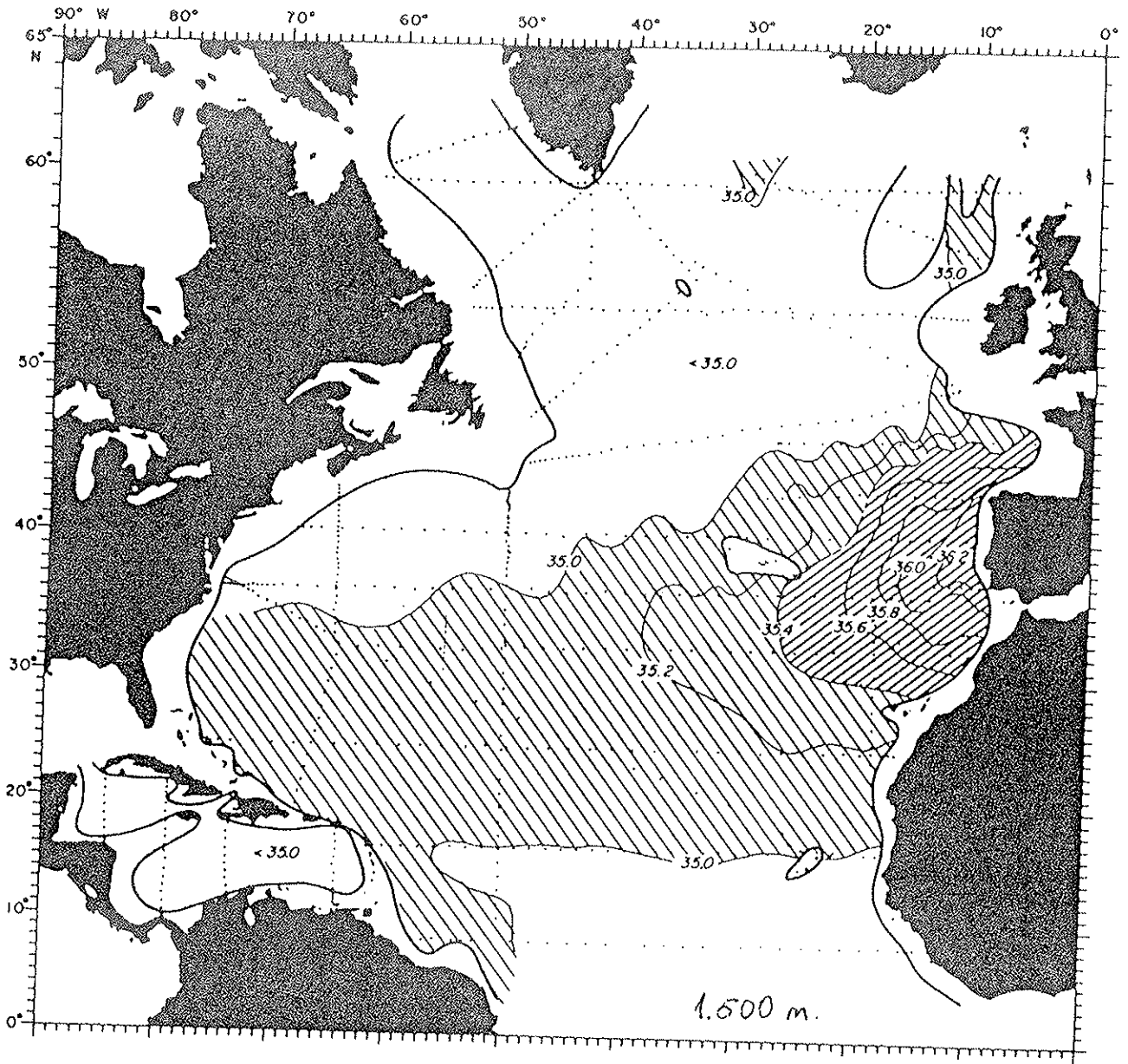
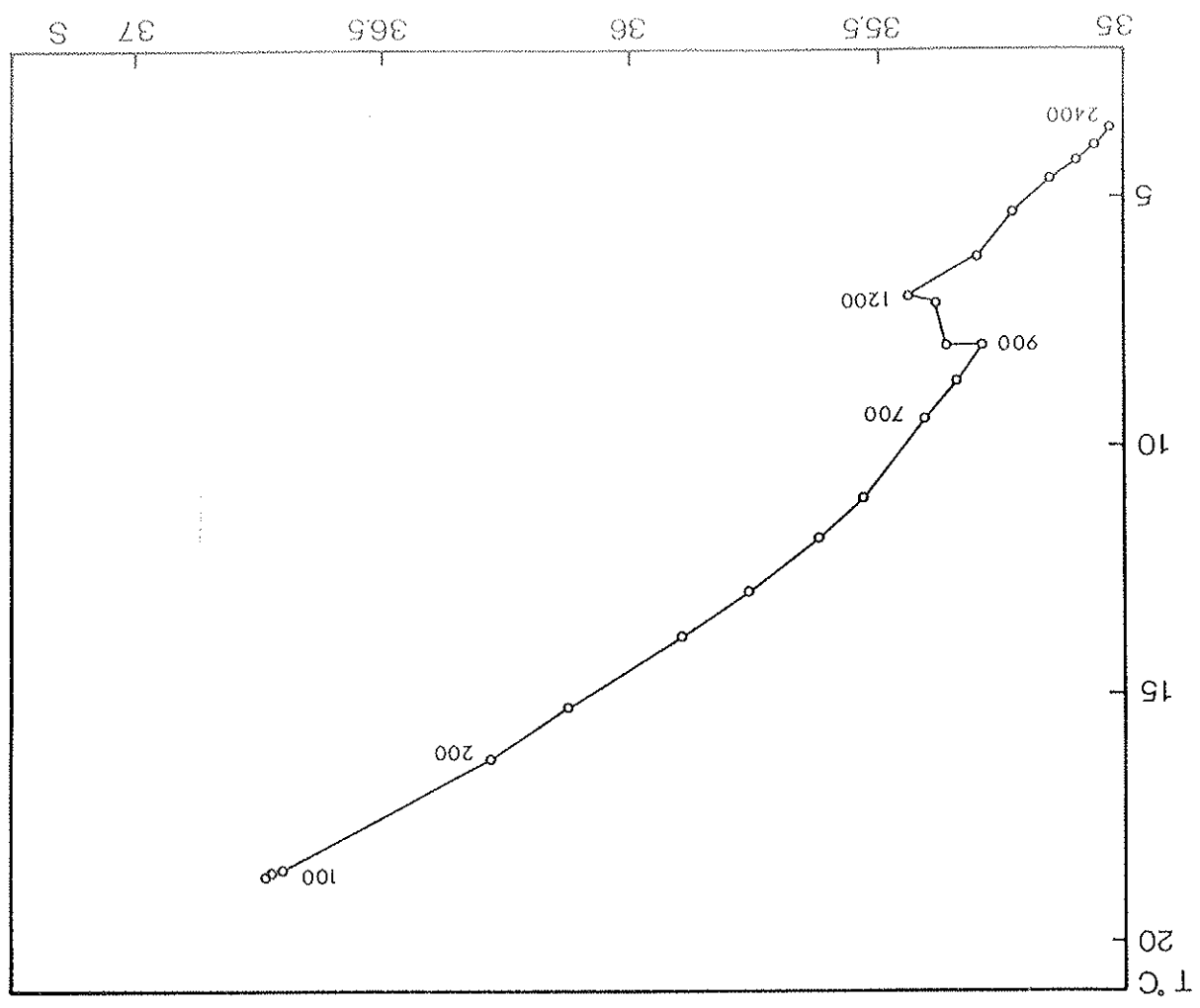


Fig 6

107



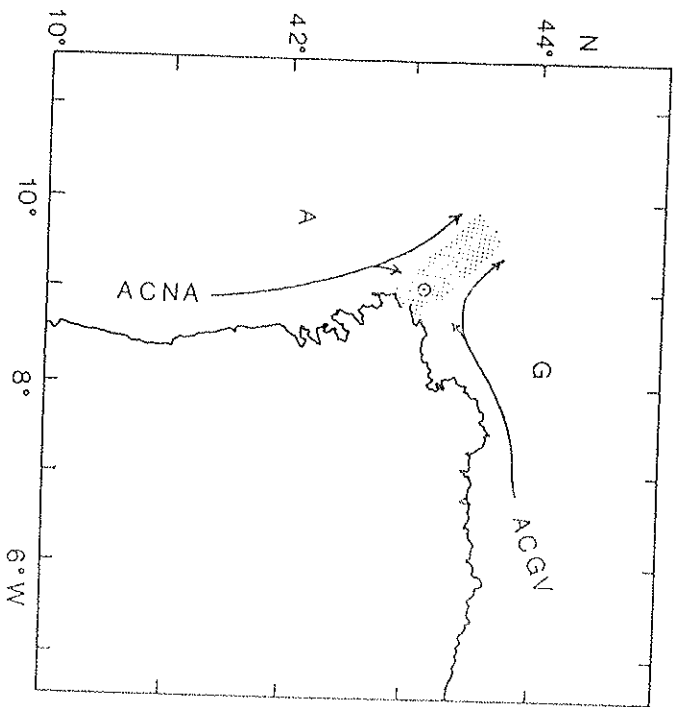
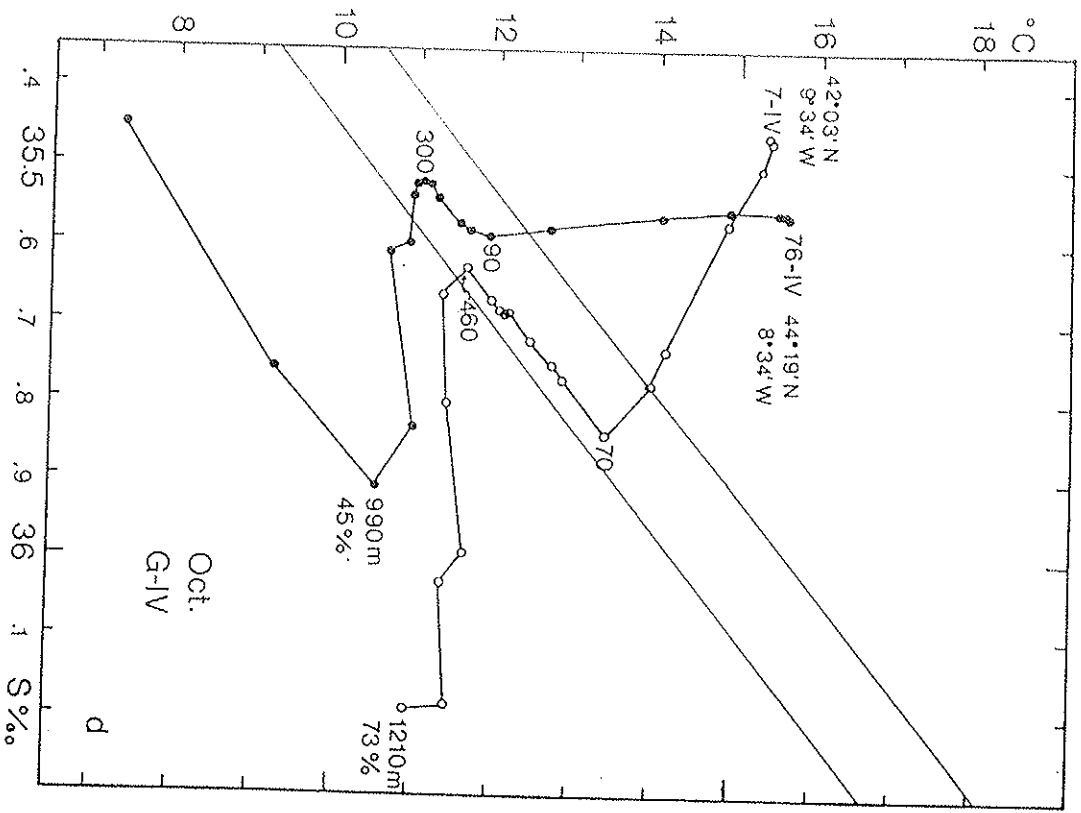
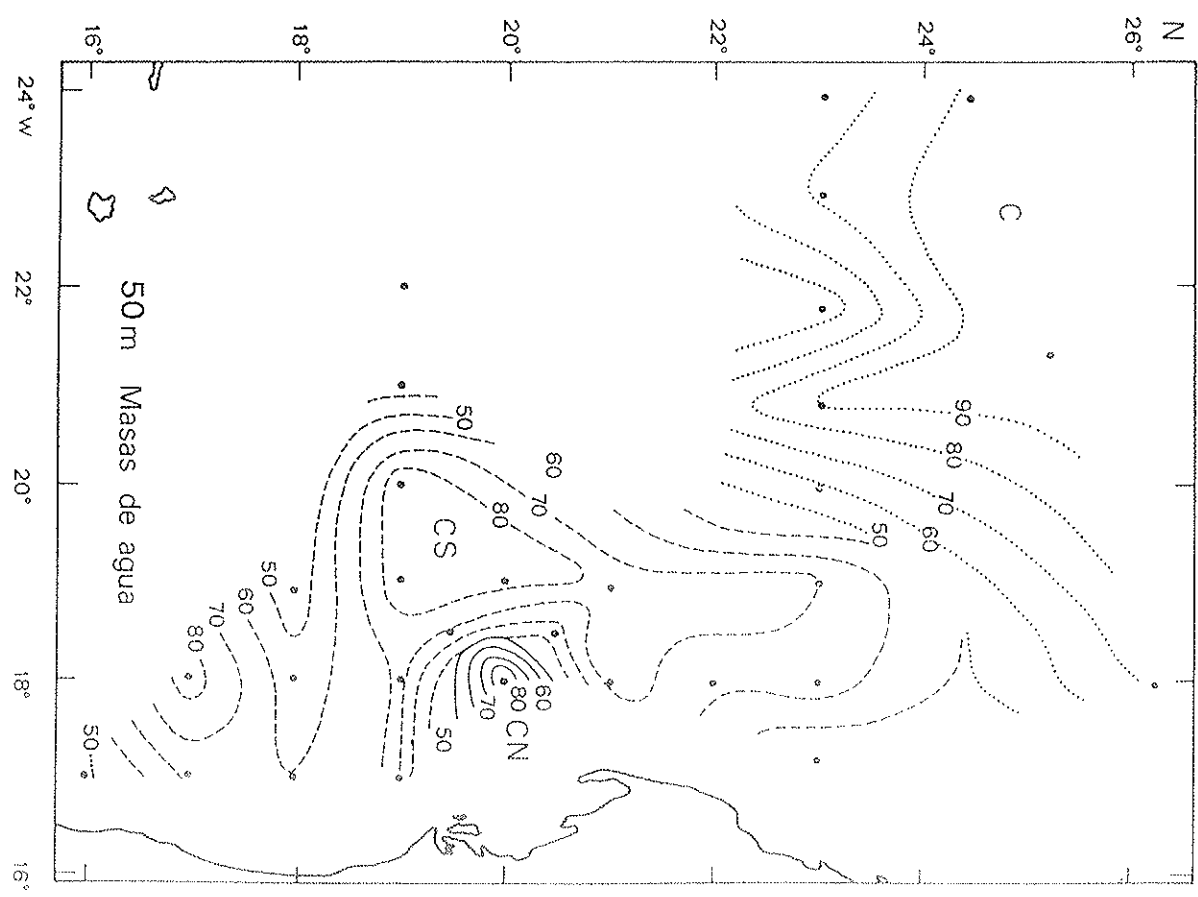
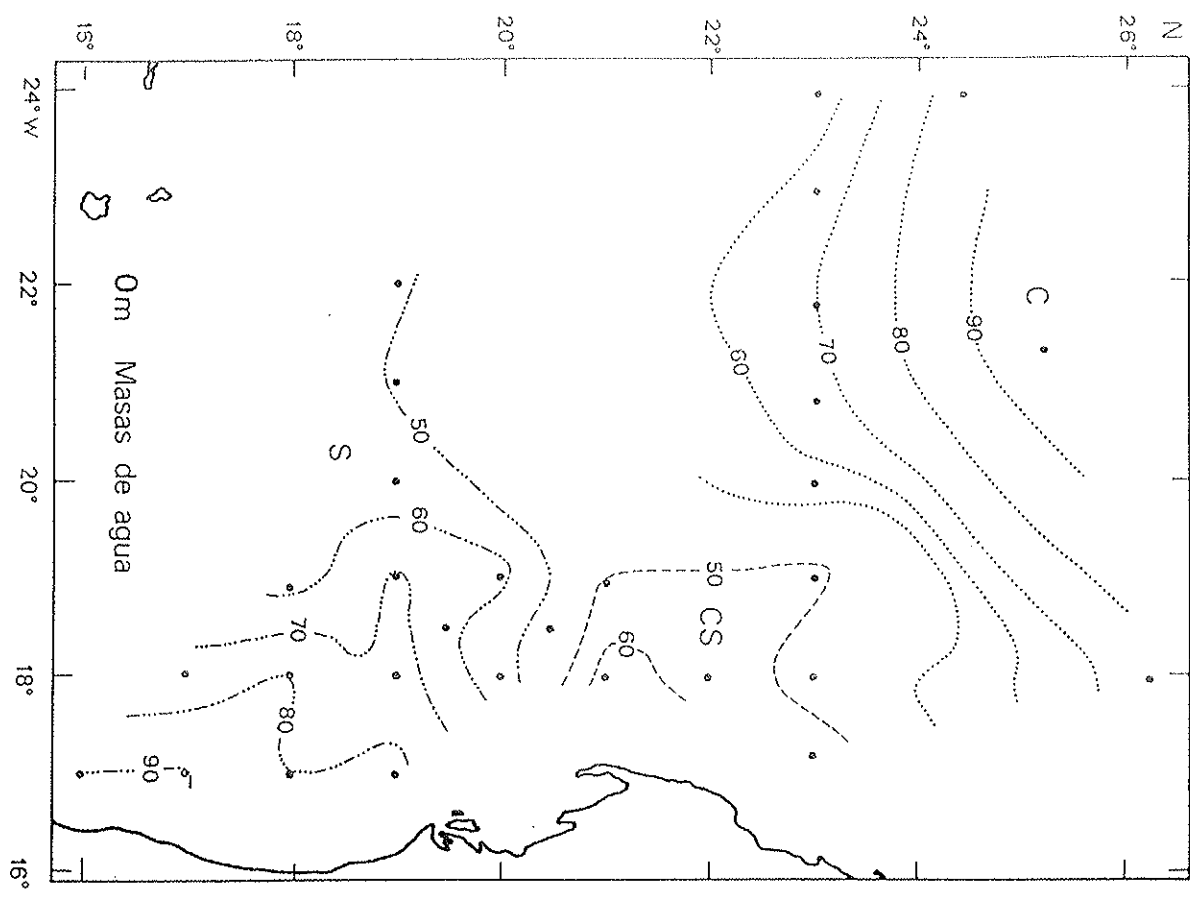
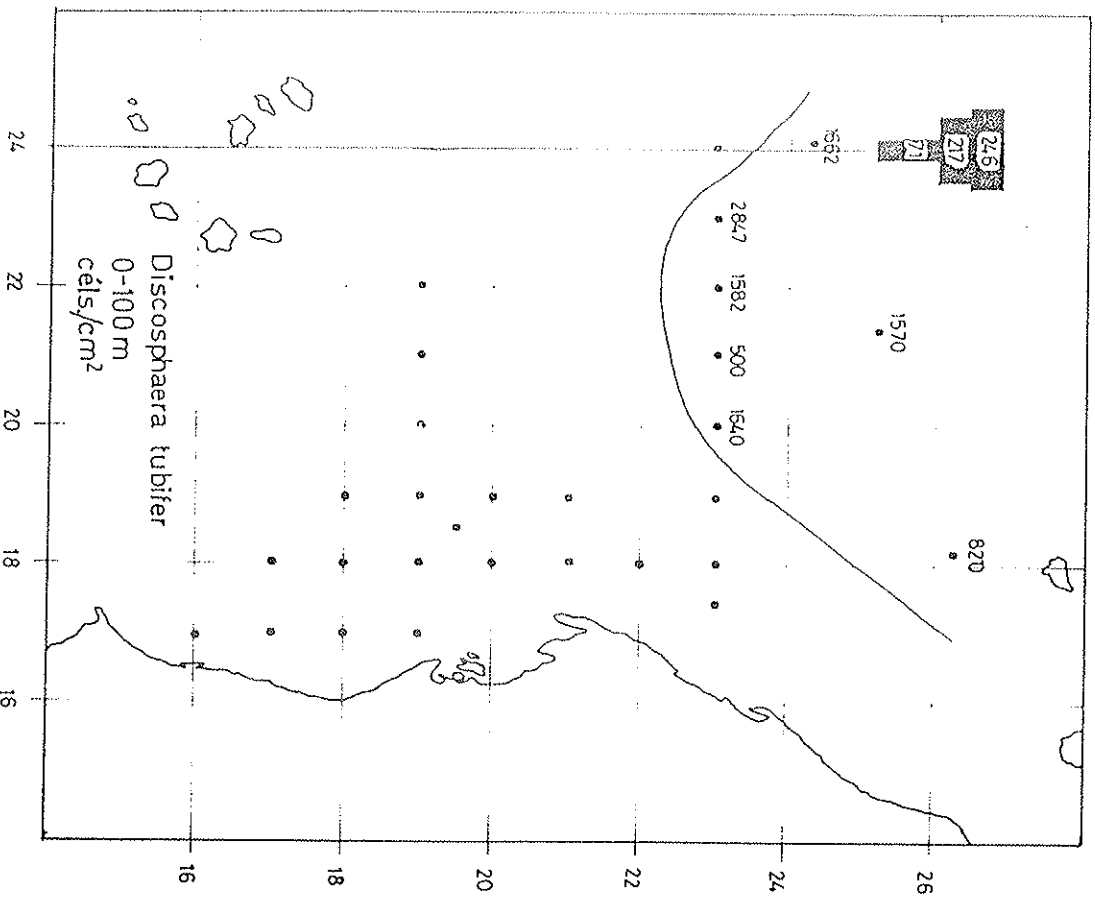


Fig 8



Coccolitoforales



Cianofíceas

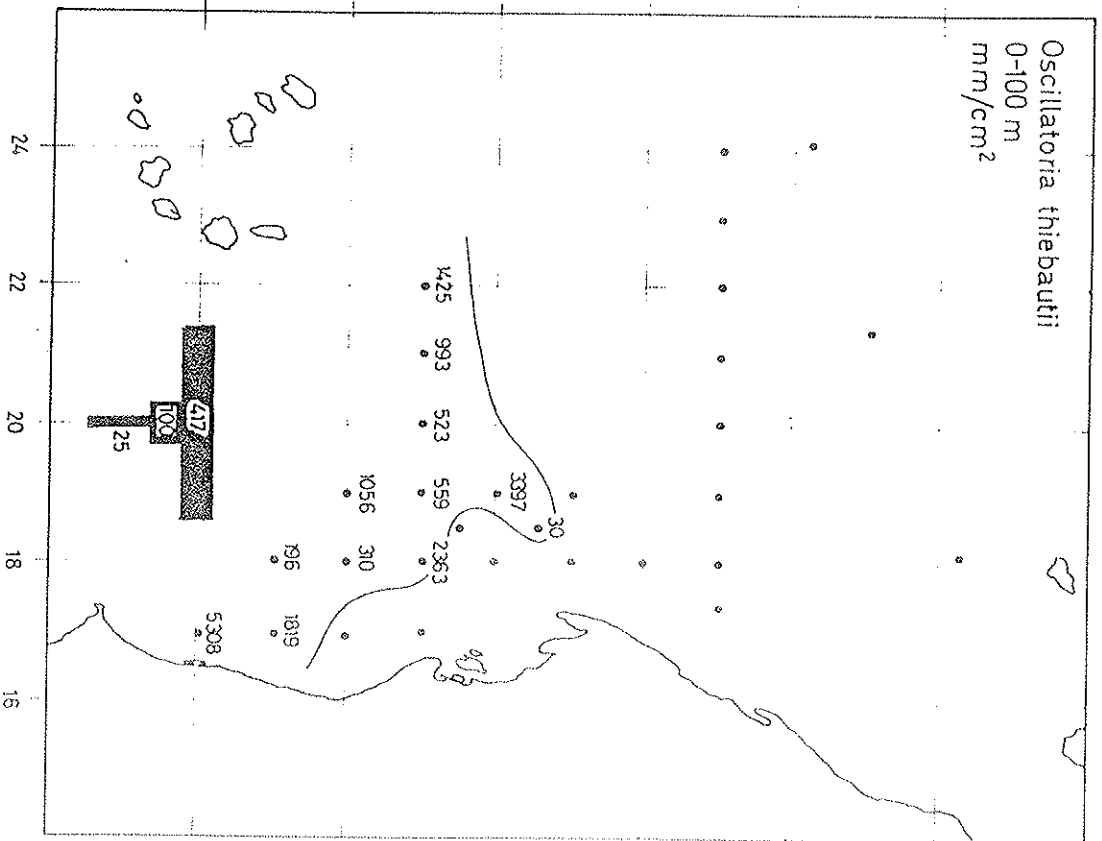
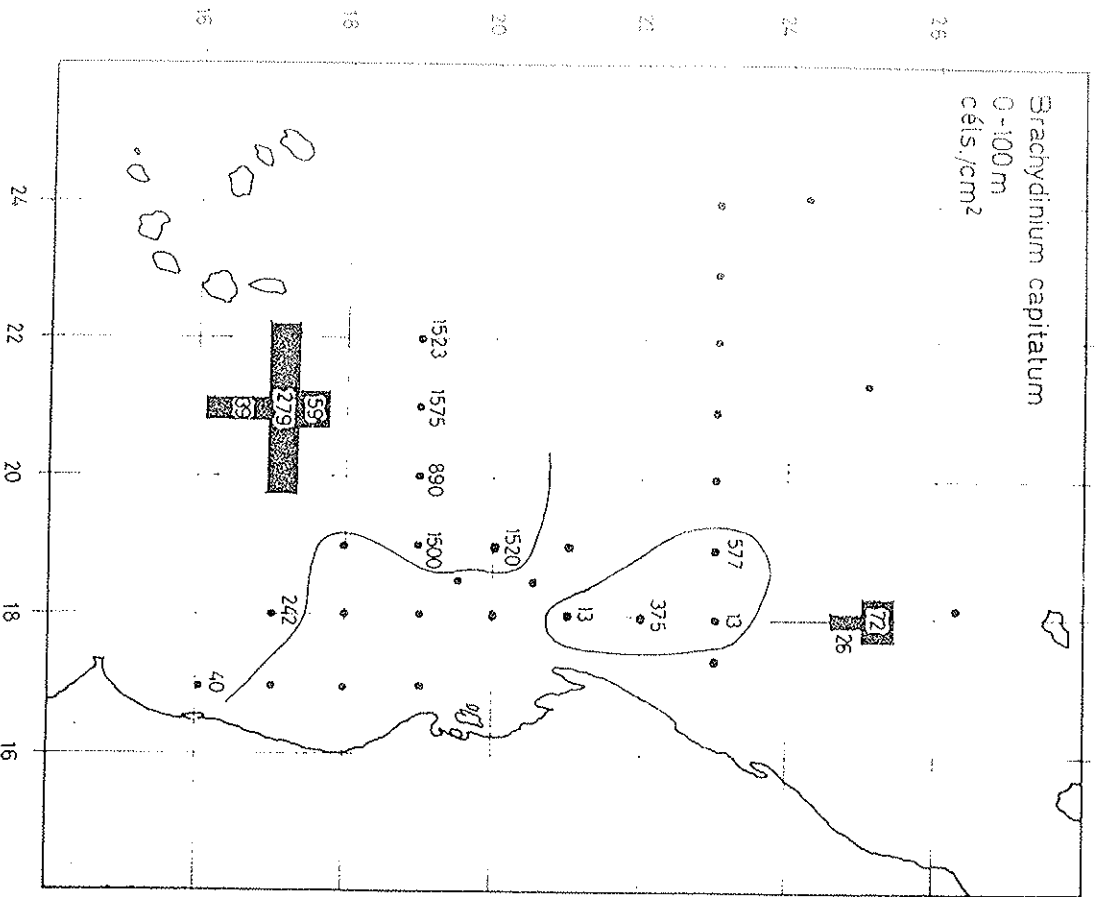
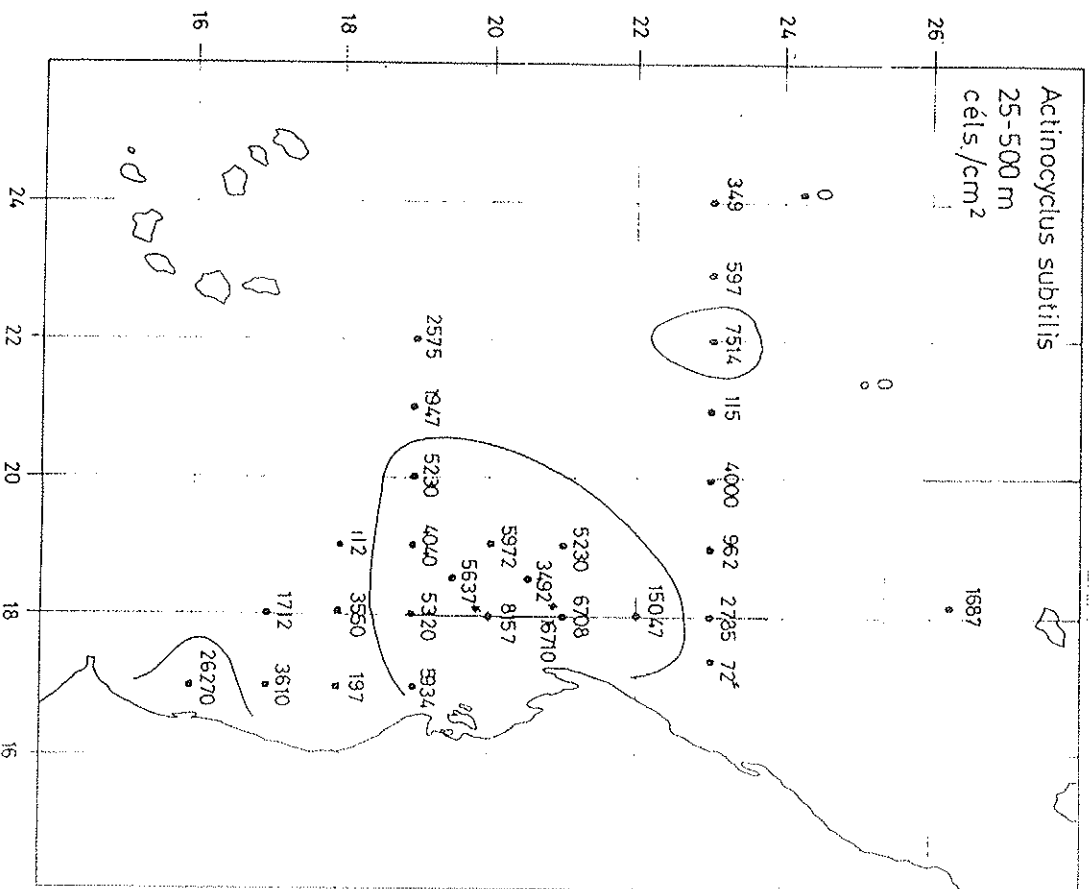


Fig. 10

Dinoflagelados



Diatomeas



	<u>S</u>	<u>t</u>	<u>NO₃⁻</u>	<u>PO₄H⁼</u>	<u>Si(OH)₄</u>	<u>N/P</u>
ACNA sup.	36'6	18	8'3	0'41	2'3	20'2
ACSA sup.	35'8	18	23'1	1'55	0'0	14'9

FITOPLANCTON

16

