

CARACTERIZACION DE MASAS DE AGUA DEL ATLANTICO  
POR ANALISIS DE REGRESION LINEAL MULTIPLE.

por

CLIFFORD N. DAHM  
School of Oceanography  
Oregon State University  
Corvallis, Oregon 97331\*

SAUL ALVAREZ BORREGO  
Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California.

LOUIS I. GORDON\*

y

KILHO P. PARK\*

(Recibido: junio 2, 1977)

Ciencias Marinas Vol. 3 Núm. 2 1976.

RESUMEN

Se aplicó análisis de regresión lineal múltiple a datos del océano Atlántico del programa GEOSECS para expresar el oxígeno disuelto en función de la temperatura potencial y la concentración de fosfatos, y en función de la temperatura potencial y la concentración de nitratos. Luego, se construyeron diagramas de residuos de oxígeno versus temperatura potencial, y nutrientes preformados versus temperatura potencial, para estudiar las masas de agua. Los diagramas de residuos de oxígeno versus temperatura potencial son consistentes con los de temperatura-salinidad, y muestran claramente las masas de agua Profunda del Atlántico Norte, del Mediterráneo, Intermedia del Antártico y Antártico del Fondo. Los diagramas de residuos de oxígeno versus temperatura potencial muestran muy claramente un tipo de agua subsuperficial, entre los 100 y 350 metros de profundidad, que no se detecta claramente con los diagramas temperatura-salinidad. Este tipo de agua subsuperficial parece coincidir con la profundidad donde cesa la rápida disminución de la concentración de carbono orgánico cerca de la superficie. Posiblemente es el límite inferior de la región de la columna de agua donde ocurre la mayor parte de la oxidación bioquímica.

# CARACTERIZACION DE MASAS DE AGUA POR ANALISIS DE REGRESION

## ABSTRACT

Multiple linear regression analysis is applied to the Atlantic Ocean GEOSECS data, to express oxygen as a function of potential temperature and phosphate, and as a function of potential temperature and nitrate. Oxygen residuals versus potential temperature and preformed nutrients versus potential temperature diagrams are then constructed to study the water masses. The North Atlantic Deep, Mediterranean, Antarctic Intermediate, and Antarctic Bottom waters are very distinctly shown by the oxygen residuals versus potential temperature diagrams, consistent with the temperature-salinity diagrams. For most of the stations, the oxygen residuals versus potential temperature diagrams show clearly a subsurface water type, at about 100-350 meters depth, not distinctly shown by the potential temperature-salinity diagrams. This subsurface water type seems to coincide with the depth where the rapid decrease in organic carbon concentration near the sea surface ceases with depth. It is probably the lower limit of the water column region where the main bulk of the biochemical oxidation takes place.

## INTRODUCCION

Las aguas de los océanos se han clasificado rutinariamente en varias masas de agua. Clásicamente, éstas han sido definidas por medio de sus características de temperatura y salinidad. Alternativamente, también es posible caracterizarlas por la variación de sus constituyentes químicos. Alvarez Borrego (1973) presentó un método para diferenciar masas de agua en base a la concentración de nutrientes. Su técnica se basa en aplicar análisis de regresión lineal múltiple para expresar la concentración de oxígeno disuelto ( $O_2$ ) en función de la temperatura potencial ( $\theta$ ) y concentración de fosfatos ( $PO_4$ ), o concentración de nitratos ( $NO_3$ ). El término de  $\theta$  representará la porción conservadora de  $O_2$  y  $PO_4$  ó  $NO_3$ , mientras que el término de  $PO_4$  o  $NO_3$  representa la porción no conservadora. Cuando los residuos de oxígeno de la regresión se grafican contra  $\theta$ , resulta una magnificación de la variación en los niveles de los nutrientes preformados de las diferentes masas de agua. En el presente trabajo se aplicó esta técnica a datos de una estación hidrográfica en el Atlántico Sur para caracterizar las masas de agua en la columna de agua.

## OBTENCION DE LOS DATOS

Los datos fueron tomados del Programa de Secciones Geoquímicas del Océano (GEOSECS). Para el análisis se escogió la estación 49, de la línea IV, frente a la costa de Brasil, localizada a  $7^{\circ}12.6'S$ ,  $28^{\circ}0.0'W$  (Fig. 1).

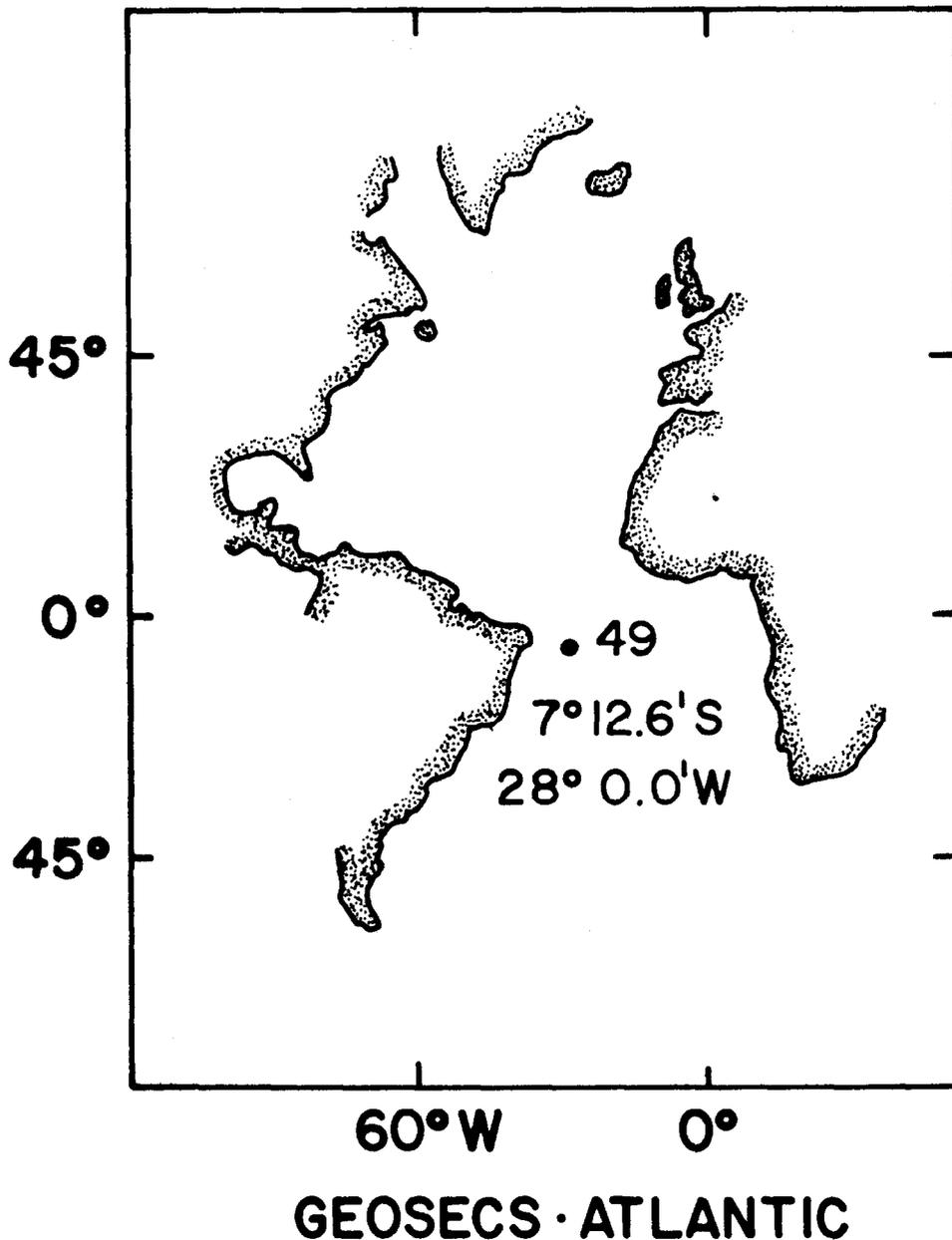


Fig. 1. Localización de la estación 49 de GEOSECS.

Las muestras de nutrientes del programa GEOSECS se analizaron con un Autoanalizador Technicon. Los datos de  $PO_4$  y  $NO_3$  tienen una precisión de  $\pm 1\%$ , o mejor. La temperatura potencial tiene una precisión de  $\pm 0.001^\circ C$ . Los datos de nutrientes y  $O_2$  están expresados en micromoles por kilogramo ( $\mu M/kg$ ). También se midió carbono orgánico total (COT), utilizando el método de Menzel y Vaccaro (1964), expresado en miligramos de carbono por litro (mg C/l) y con una precisión de  $\pm 0.04$  mg C/l.

# CARACTERIZACION DE MASAS DE AGUA POR ANALISIS DE REGRESION

## DISCUSIONES

Se puede construir un modelo por regresión lineal múltiple, para expresar  $O_2$  en función de  $\theta$  y uno de los dos nutrientes que aquí se consideran,  $PO_4$  o  $NO_3$ , en base a relaciones naturales que se establecen por procesos biológicos y físicos (Alvarez Borrego, 1973). Por ejemplo, se puede armar un modelo de la relación entre el oxígeno y los fosfatos oxidativo y preformado. Redfield (1942) definió los siguientes conceptos:

$$UAO = O_2^1 - O_2 \quad (1)$$

$$PO_4 = PO_{4OX} + P \cdot PO_4 \quad (2)$$

$$PO_{4OX} = UAO/138 \quad (3)$$

donde  $O_2^1$  es el valor de saturación de oxígeno disuelto para la  $\theta$  y  $S^\circ/oo$  medidas,  $PO_{4OX}$  es el fosfato que se genera por oxidación biológica después que la masa de agua abandona la superficie en su lugar de origen,  $P \cdot PO_4$  es el fosfato preformado, o sea el que ya contenía la masa de agua en su lugar de origen, y UAO es la utilización aparente de oxígeno por oxidación biológica.

De (1), (2) y (3),  $O_2$  se puede expresar como sigue:

$$O_2 = -138 \cdot PO_4 + (O_2^1 + 138 \cdot P \cdot PO_4) \quad (4)$$

Como  $O_2^1$  es una función aproximadamente lineal de  $\theta$ , la cantidad conservadora ( $O_2^1 + 138 \cdot P \cdot PO_4$ ) se puede reemplazar por una función lineal de  $\theta$  si en la porción de la columna de agua de donde provienen los datos se están mezclando solamente dos tipos de agua, y entonces queda:

$$O_2^1 - a_1 \cdot P \cdot PO_4 = a_0 + a_2 \cdot \theta \quad (5)$$

y sustituyendo (5) en (4) resulta un modelo de regresión lineal:

$$O_2 = a_0 + a_1 \cdot PO_4 + a_2 \cdot \theta + O_{2res} \quad (6)$$

donde el término  $O_{2res}$  es el residuo del oxígeno después de hacer la regresión de  $O_2$  en función de  $PO_4$  y  $\theta$ . Los símbolos  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  son coeficientes constantes de la regresión. Se puede usar un razonamiento similar para construir un modelo con  $NO_3$  en lugar de  $PO_4$ . Las regresiones con los datos de la estación 49 se realizaron utilizando el programa de computadora SIPS (Statistics Instruction Programming System) de la biblioteca del Centro de Computación de la Universidad del Estado de Oregon.

Cuando en la columna de agua que se ha muestreado se están mezclando más de dos tipos de agua, no se puede representar apropiadamente a los nutrientes preformados ( $P.PO_4$  y  $P.NO_3$ ) por funciones lineales de  $\theta$ , o sea, la ecuación (6) no representa adecuadamente los datos, y una gráfica de  $O_{2res}$  contra  $\theta$  no muestra una distribución al azar sino un patrón característico de acuerdo con las masas de agua presentes. Es decir, las diferencias en nutrientes preformados de las diferentes masas de agua se magnifican en las gráficas  $O_{2res}$  vs  $\theta$ .

Los resultados de las regresiones para la estación 49 son:

$$O_2 = 452.97 - 9.84 \cdot \theta - 120.51 \cdot (PO_4) \quad (7)$$

$$O_2 = 449.79 - 10.22 \cdot \theta - 7.56 \cdot (NO_3) \quad (8)$$

donde  $O_2$  indica el valor de predicción del modelo.  $O_{2res}$ , definidos como los valores reales de  $O_2$  menos los valores del modelo, tienen un rango de  $-50$  a  $+30 \mu M/kg$ .

Las gráficas de  $O_{2res}$  vs  $\theta$  se presentan en las figuras 2 y 3. Es evidente una clara dependencia de los residuos en función de  $\theta$ . Estadísticamente esto indica que los modelos (7) y (8) no están describiendo adecuadamente los datos. El patrón que siguen los residuos es producido por la presencia de más de dos masas de agua con diferente contenido de nutrientes preformados. Se puede observar la presencia de siete masas de agua en la columna de agua, marcadas con las letras A, B, C, D, E, F y G.

El diagrama  $\theta$ -S se muestra en la figura 4 para comparación. En la figura 5 se muestra una expansión de la parte cercana al fondo del diagrama  $\theta$ -S, con valores menores de  $5^\circ C$  y entre  $34.5$  y  $35.0 \text{ } \text{‰}$ , para mostrar más claramente las masas D, E y F. Los diagramas  $\theta$ -S son consistentes con los  $O_{2res}$  vs  $\theta$  en cuanto a mostrar las diferentes masas de agua, excepto el caso de la masa de agua B que no es aparente en el diagrama  $\theta$ -S. Esta masa de agua se discute más adelante.

Se pueden utilizar diagramas de nutrientes preformados versus  $\theta$  como una herramienta adicional para estudiar las masas de agua (Fig. 6 y 7), y de nuevo se distingue la presencia de siete masas de agua, aunque no tan claramente como en los diagramas  $O_{2res}$  vs  $\theta$ .

Utilizando tres métodos diferentes se obtuvieron resultados consistentes, con excepción de la masa de agua B que no se detecta en el diagrama  $\theta$ -S. Las masas de agua detectadas en la estación 49 pueden ser identificadas por las relaciones  $\theta$ -S como lo hicieron Sverdrup, Johnson y Fleming (1942) y Neumann y Pierson (1966). Además, se pueden describir en función de su contenido de nutrientes preformados.

CARACTERIZACION DE MASAS DE AGUA POR ANALISIS DE REGRESION

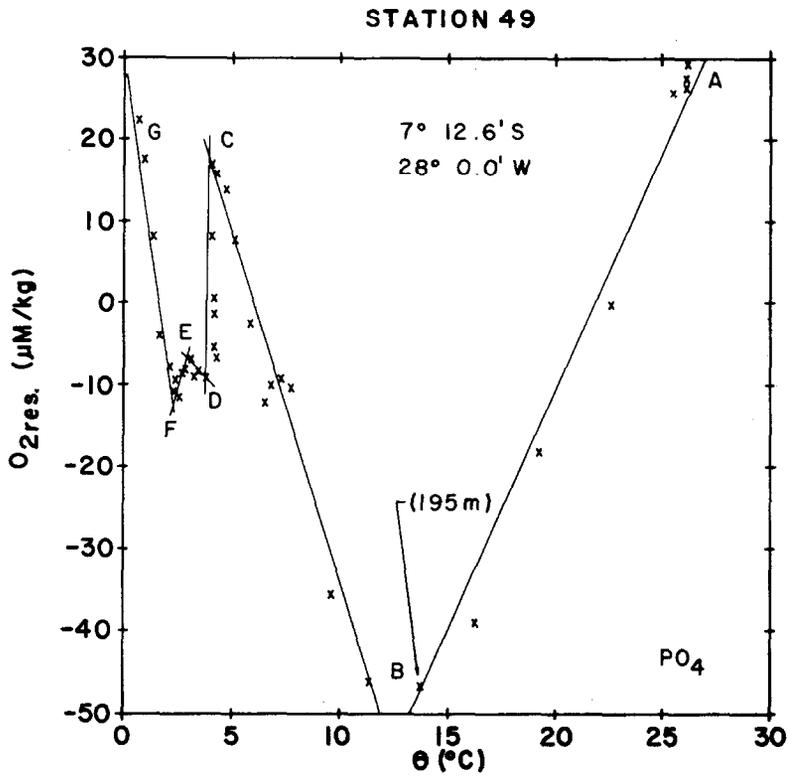


Fig. 2.  $O_{2res}$  (en función de  $\text{PO}_4$ ) versus  $\theta$ .

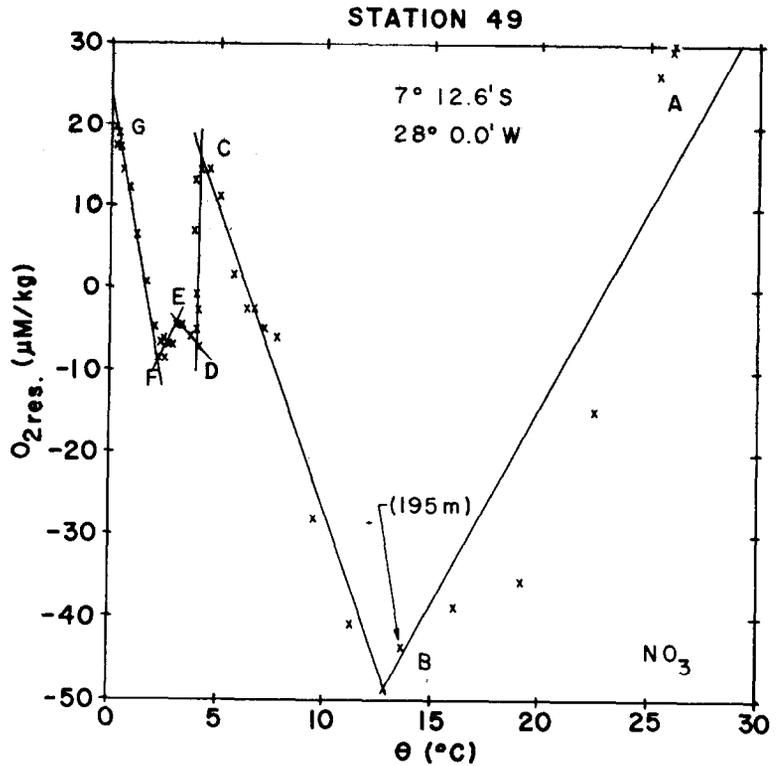


Fig. 3.  $O_{2res}$  (en función de  $\text{NO}_3$ ) versus  $\theta$ .

STATION 49

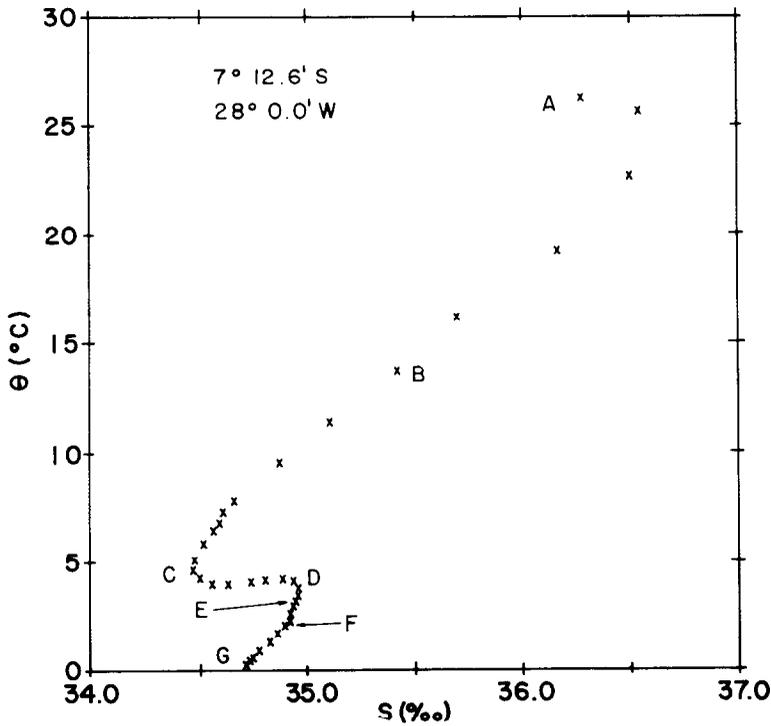


Fig. 4. Diagrama  $\theta$ -S para toda la columna de agua.

STATION 49

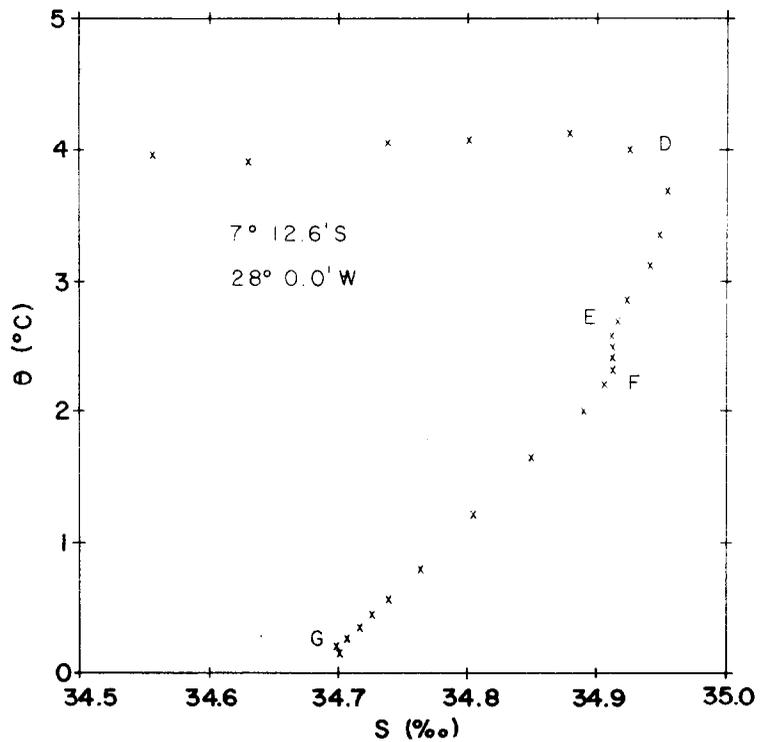


Fig. 5. Diagrama  $\theta$ -S para la porción en que  $\theta$  varía de 0°C a 5°C.

CARACTERIZACION DE MASAS DE AGUA POR ANALISIS DE REGRESION

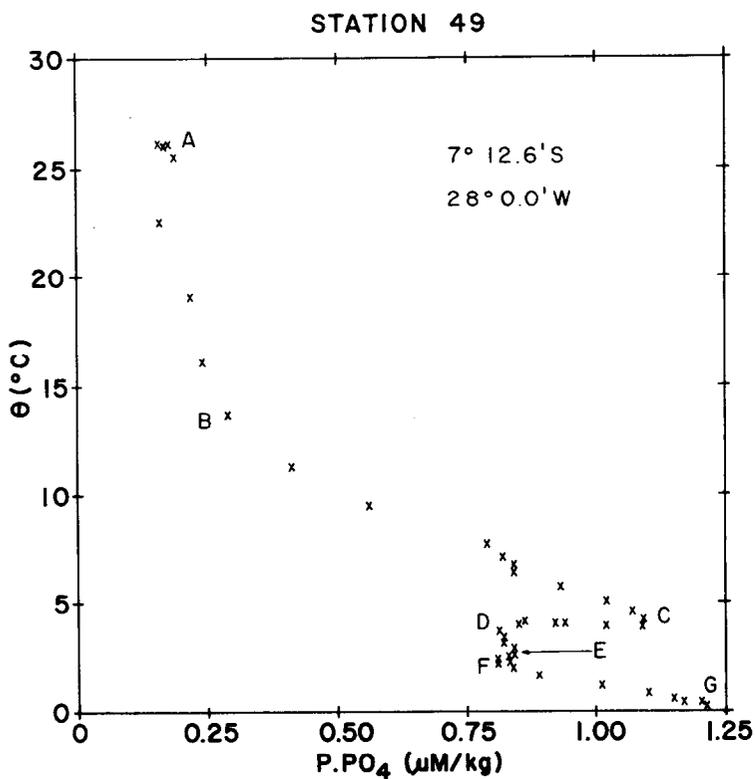


Fig. 6. Diagrama  $\theta$  versus P.PO<sub>4</sub>.

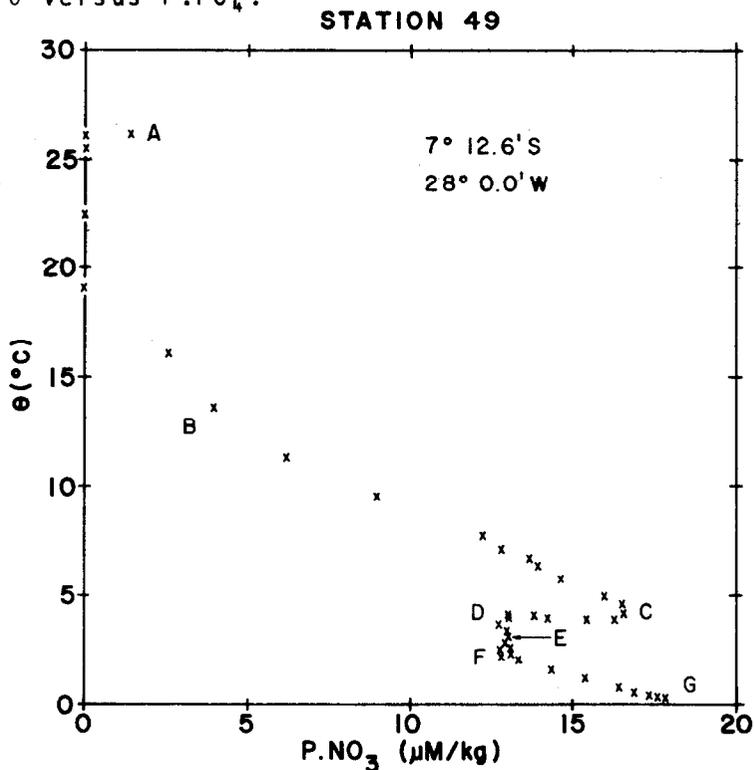


Fig. 7. Diagrama  $\theta$  versus P.NO<sub>3</sub>.

La masa de agua A es el Agua de Superficie con temperaturas y salinidades altas y variables. Hay intercambio de gases entre la atmósfera y esta masa de agua. Los valores de  $P.PO_4$  y  $P.NO_3$  son muy bajos debido a la alta actividad fotosintética. El  $P.PO_4$  es aproximadamente  $0.20 \mu M/kg$ , mientras que el  $P.NO_3$  se acerca a cero.

La masa de agua C es el Agua Intermedia del Antártico, localizada a una profundidad de cerca de 800 metros. Usualmente se identifica por su mínimo de salinidad. Tiene un máximo en el contenido de nutrientes preformados. Los valores de  $P.PO_4$  y  $P.NO_3$  son  $1.10$  y  $16.5 \mu M/kg$  respectivamente.

Abajo del Agua Intermedia del Antártico se encuentra el Agua Profunda del Atlántico Norte, dividida en tres masas: Agua Profunda Superior (D), Profunda Media (E) y Profunda Inferior (F), de acuerdo como fueron descritas por Neumann y Pierson (1966). La masa de agua D tiene influencia de la del Mediterráneo, como se puede notar por las más altas salinidades y temperaturas, y más bajas concentraciones de oxígeno y nutrientes preformados. La masa de agua E se origina en la región subártica cerca de Groenlandia y tiene valores un poco mayores de nutrientes preformados que la D y la F (Fig. 6 y 7). La masa de agua Profunda Inferior no está tan claramente separada de la Media como esta la Superior, pero sus valores un poco más alto de  $O_2$  y un poco más bajos de nutrientes preformados la diferencian en los diagramas de  $O_{2res}$  vs  $\theta$ , y nutrientes preformados vs  $\theta$ .

Bajo el Agua Profunda del Atlántico Norte se encuentra el Agua del Fondo del Antártico (G). Sus valores de  $S\text{‰}$  son cercanos a  $34.70\text{‰}$ , y los de  $\theta$  son cercanos a  $0^\circ C$ . Esta masa de agua también es fácilmente identificable por tener los valores más altos de nutrientes preformados de toda la columna de agua. El  $P.PO_4$  es mayor de  $1.20 \mu M/kg$  y el  $P.NO_3$  es mayor de  $17.0 \mu M/kg$ .

Además de estas masas de agua, los diagramas de  $O_{2res}$  vs  $\theta$  distinguen claramente una masa de agua B subsuperficial, que no es aparente en los diagramas  $\theta$ -S. Esta masa de agua se distingue por un valor grande de residuo de oxígeno. Esto significa que el valor de predicción de  $O_2$  de los modelos (7) y (8) es considerablemente mayor que el valor real observado. Es decir, esta masa de agua muestra un consumo de  $O_2$  mayor que lo que predice el modelo de regresión.

La distribución de carbono orgánico total (COT) en la columna de agua está dividida básicamente en dos segmentos (Fig. 8). La primera porción muestra un rápido decrecimiento con la profundidad, con altos valores en la superficie. La segunda porción, más profunda y que comprende la mayor parte de la columna de agua, mantiene valores prácticamente constantes de COT ( $0.43$  a  $0.50 \text{ mg C/l}$ ) con la profundidad. Barber (1968) ha

## CARACTERIZACION DE MASAS DE AGUA POR ANALISIS DE REGRESION

demostrado que el carbono orgánico presente en las aguas profundas de los océanos está formando compuestos refractarios que se oxidan muy lentamente. La temperatura del punto de unión de los dos segmentos,  $11.5^{\circ}\text{C}$ , es muy cercana a la que corresponde a la masa de agua B (Figs. 2, 3 y 8).

Menzel y Ryther (1966) indicaron que la mayor parte de la descomposición de la materia orgánica ocurre a profundidades no mayores que 400 metros. El agua subsuperficial B está centrada aproximadamente a 200 metros. Además, los datos de COT sugieren que entre la superficie y los 200 metros se está descomponiendo la porción de materia orgánica más fácil de oxidar. La masa de agua B es probablemente el límite inferior de la región de la columna de agua donde la mayor parte de la oxidación bioquímica ocurre. Esto resulta en un tipo de agua con valores relativamente altos de  $\text{PO}_4$  y  $\theta$ , pero bajos en  $\text{P.PO}_4$ , lo cual da valores negativos grandes de residuos de  $\text{O}_2$  en el modelo de regresión.

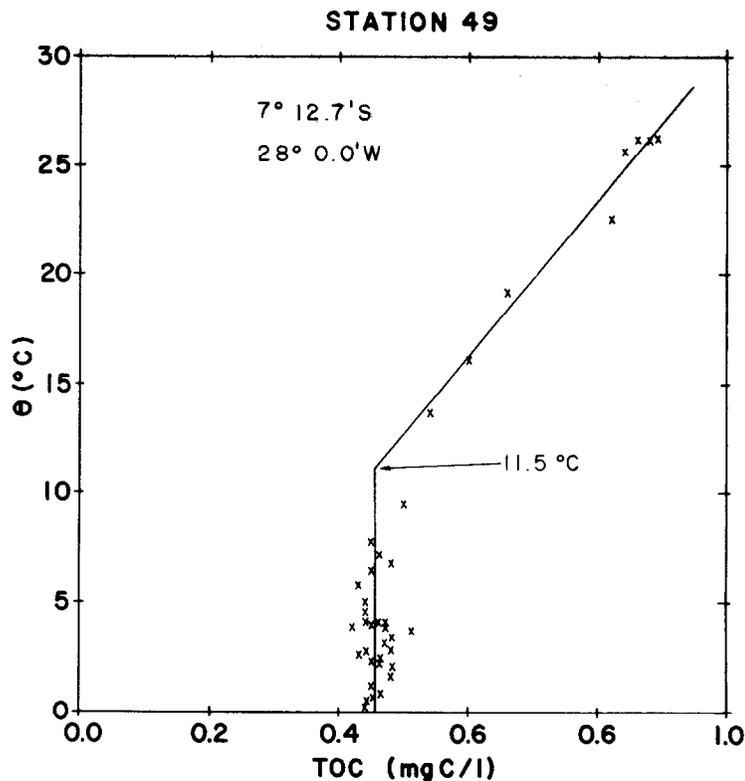


Fig. 8. Diagrama  $\theta$  versus COT.

**BIBLIOGRAFIA**

- Alvarez Borrego, S. 1973. Oxygen-carbon dioxide-nutrients relationships in the northeastern Pacific Ocean and Southeastern Bearing Sea. Ph. D. Thesis. Corvallis, Oregon State University. 171 pags.**
- Barber, R.T. 1968. Dissolved organic carbon from deep water resists microbial oxidation. Nature 220(5164) :274-275.**
- Menzel, D. W. y J. H. Ryther. 1968. Organic carbon and the oxygen minimum in the South Atlantic Ocean. Deep-Sea Res. 15 : 327-337.**
- Menzel, D. W. y R. F. Vaccaro. 1964. The measurement of dissolved organic and particulate carbon in seawater. Limnol. Oceanog. 9 : 138-142.**
- Neumann, G. y W. J. Pierson, Jr. 1966. Principles of physical oceanography. Prentice-Hall. 545 p.**
- Redfield, A. C. 1942. The processes determining the concentration of oxygen, phosphate, and other organic derivatives within the depths of the Atlantic Ocean. Papers in Physical Oceanography and Meteorology 9. 22 p.**
- Sverdrup, H. U., M. W. Johnson y R. H. Fleming. 1942. The oceans, Their physics, chemistry, and general biology. N. W. Prent-Hall. 1087 pags.**