

**PACIFICO COLOMBIANO
CONDICIONES
TERMOHALINAS Y
ESTANDARIZACION DE LA
CURVA T-S**

Por:
CCESP ENRIQUE MILLAN*
CCESP JESUS BEJARANO**

RESUMEN

El estudio oceanográfico de las aguas del Pacífico colombiano, algo más de 400.000 km², se enmarca dentro del Programa Regional para el Estudio del Fenómeno El Niño (ERFEN), en el cual Colombia ha adquirido el compromiso de efectuar el monitoreo de las condiciones oceanográficas y meteorológicas.

El presente estudio analiza las características termohalinas en los periodos de marzo-abril y agosto-septiembre (épocas seca y húmeda) de 1989. Los datos se obtuvieron con un perfilador de temperatura, presión y conductividad (CTD), durante los cruceros Pacífico XIV-ERFEN XI y Pacífico XV-ERFEN XII.

Se hallaron los volúmenes de las diferentes masas de agua presentes desde superficie hasta 1000 metros de profundidad en las dos épocas y se determinaron los coeficientes que señalaron la curva T-S media (estandarización) correspondiente a las estaciones del transecto Buenaventura-malpeo, utilizando el método de minimos cuadrados para una función polinómica $S = S(T)$.

SUMMARY

The oceanographic study of Colombian Pacific waters, around 400.000 km², is framed with in the Regional Program for the Study of the "El Niño" phenomenon (ERFEN), in which Colombia has acquired the commitment of monitoring the oceanographic and meteorological condicions.

This study analyzes the termohaline characteristics in both the March - April and August - September periods of 1984 (dry and humid season respectively).

The data was obtained with a temperature, pressure and conductivity (CTD) tool, during the Pacific XIV - ERFEN XI and Pacific XV - ERFEN XII cruises.

Volumes where the different water masses present from the surface to a depth of 1.000 meters in both seasons. The coefficients wich show the mean standarized T-S curve corresponding to the stations Buenaventura - Malpeo profile, using the minimum squares method for a polynomial function $S = S(T)$.

* Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, A.A. 982 Cartagena - Colombia

INTRODUCCION

Entre los problemas que requieren mayor atención y prioridad, con base en el criterio de los comités constituidos para formular el Plan de Desarrollo de las Ciencias y Tecnologías del Mar (PDCTM), se encuentra el evidente retardo en el conocimiento actual de los mares colombianos.

La Armada Nacional inició estudios en el Pacífico en 1970. Hasta marzo de 1989 había realizado 14 cruceros de investigación, algunos de ellos integrados dentro del Estudio Regional del Fenómeno El Niño (ERFEN).

En 1987 Díaz¹ estudió la circulación superficial del domo termal al norte de Panamá Bight, asociándola con variaciones en la estructura de sus propiedades, especialmente temperatura, salinidad y sigma-t.

Con base en los cruceros Pacífico IV, V, VI, VIII y ERFEN IV, (Andrade² 1986) estudió las condiciones del movimiento geostrofico del Pacífico colombiano. El determinó aquí, el meandro de la Corriente colombiana durante el fenómeno de El Niño, y la alteración de la situación normal del área de estudio.

Aguilera y Castillo³ estudiaron las condiciones del Pacífico durante 1987; Mendoza y Vanegas⁴ concluyen que las masas de agua presentes a nivel superior concuerdan con las descritas por H.U. Sverdrup en 1942.

El objetivo del presente trabajo es describir las condiciones termohalinas del Pacífico colombiano en el período marzo-abril de 1989 y agosto-septiembre de 1989, tomando como base los datos obtenidos en los cruceros oceanográficos Pacífico XIV-ERFEN XI y Pacífico XV-ERFEN XII respectivamente.

Se analizan las características particulares de las propiedades termohalinas y se efectúa por medio del método estadístico volumétrico, el cálculo de los volúmenes de las masas de agua presentes en el área de estudio y originarias de otras regiones, en las diferentes épocas del año, desde la superficie hasta los 1000 metros de profundidad.

¹Díaz G., Circulación Superficial del Domo Termal de la región Norte del Panamá Bight. Tesis, Instituto Oceanográfico de la Universidad de San Pablo, 1978.

²Andrade c., Condiciones del Movimiento Geostrofico del Pacífico Colombiano. Tesis, Escuela Naval Cartagena, 1986.

³Aguilera J. y Vanegas L., VI Seminario Nacional del Mar. 1988.

⁴Mendoza L., Vanegas L., Estudio de las Condiciones Oceanográficas del Pacífico durante 1987. Tesis, Escuela Naval de Cartagena, 1988.

Con el fin de establecer un método rápido para el estudio de los parámetros termohalinos como parte de las condiciones oceanográficas, se efectúa la estandarización de la curva T-S, utilizando el método polinomial de mínimos cuadrados. Esta estandarización genera la posibilidad de inferir en una forma práctica la salinidad a partir de mediciones *in-situ* de temperatura. Como un programa piloto se estandarizó la curva T-S del trayecto Buenaventura-Malpelo.

Se interpretan y analizan así, parte de los datos obtenidos durante el año de 1989 con propósitos científicos, por la Armada Nacional.

MATERIALES Y METODOS

Las investigaciones de campo tuvieron lugar durante los cruceros Pacífico 89 realizados por los buques oceanográficos ARC "Malpelo" y ARC "Providencia" en marzo y agosto respectivamente.

Los datos se obtuvieron con un perfilador de temperatura, presión y conductividad CTD, a lo largo de 39 estaciones en la época seca y 59 en la época húmeda (ver Plano 1).

El área de estudio corresponde a un sector de la llamada Panamá Bight, región del Pacífico sudeste comprendida desde la costa oeste de Panamá, Colombia y Ecuador hasta aproximadamente el meridiano 81°W.

Este estudio se circunscribe a la Región V del PDCTM 1980, comprendida entre el límite exterior de la región costera hasta los límites exteriores de las aguas jurisdiccionales colombianas, con profundidades variables entre 1000 y 2000 brazas (1800 y 3100 metros), siendo de gran interés por la relación que pueda tener con el fenómeno de El Niño.

Forma analítica polinomial de la curva T-S.

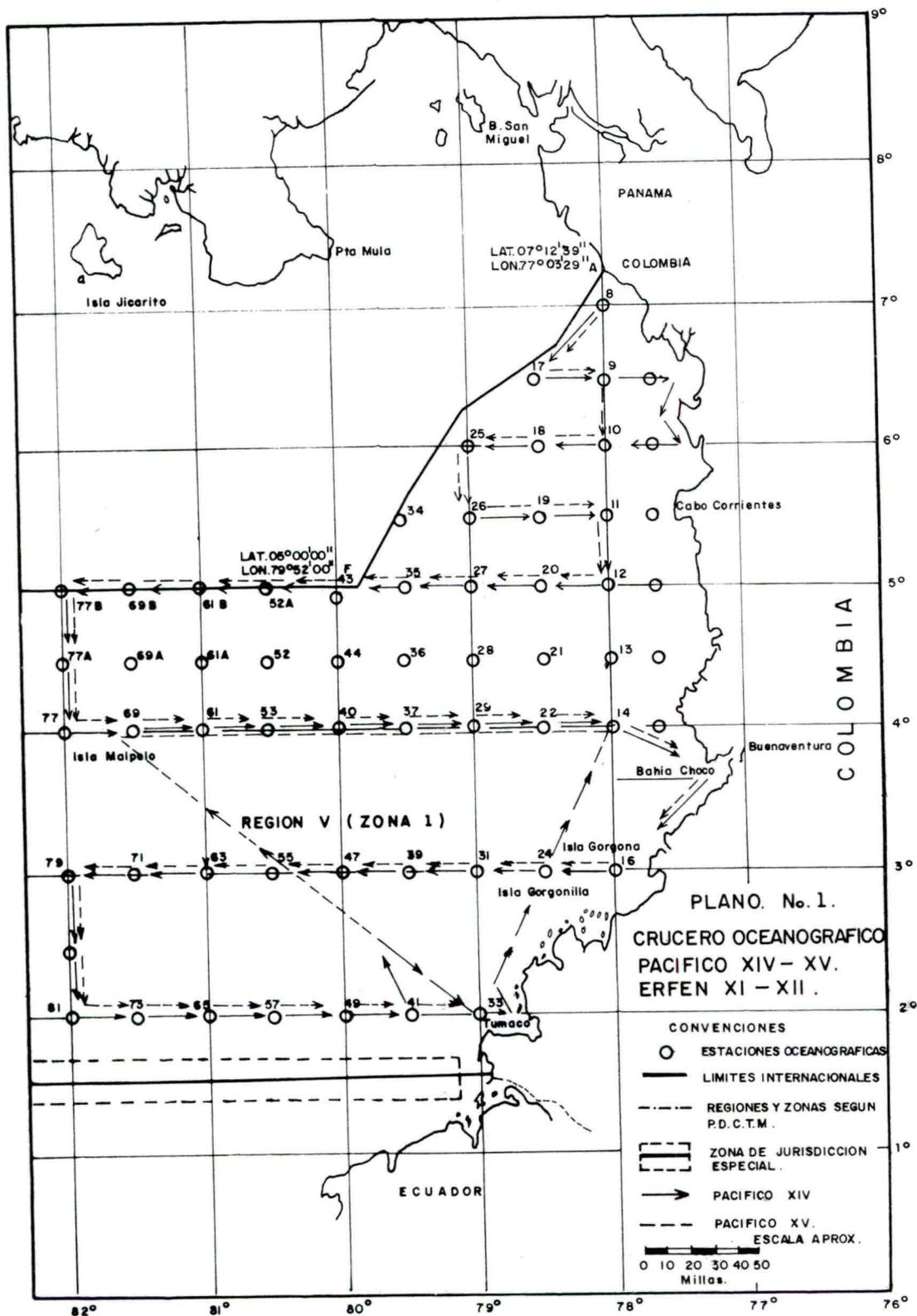
Antecedentes

Diagrama T-S

Una técnica importante para el análisis de masas de agua se basa en el diagrama T-S, fundamentándose en la estratificación vertical de masas de agua envueltas en procesos de circulación y mezcla.

El diagrama T-S, fue introducido a la literatura oceanográfica por Bjorn Halland y Hansen en 1918, quienes señalaron que la temperatura y la salinidad del agua de mar guardan entre sí una cierta relación, demostrando la excepcional capacidad teórica y práctica del diagrama en sus trabajos durante más de tres décadas.

J.P. Jacobsen, en 1927, propuso un método para determinar los coeficientes de conducción de calor y difusión de sal a partir del diagrama T-S.



A. Defant y G. Wust en 1929, identificaron sobre el diagrama T-S las imágenes geométricas de las masas de agua primarias, posteriormente definidas como índices termohalinos.

Finalmente V.B. Shtokman y A.V. Ivanov, establecen los fundamentos teóricos de la teoría analítica de la curva T-S.

El diagrama T-S, gráfica en la que se asientan los valores observados de la temperatura y la salinidad, se construye empleando un sistema coordenado rectangular donde las abscisas corresponden a las salinidades y las ordenadas a las temperaturas. El diagrama es comúnmente denominado Diagrama de Estado de Agua de Mar, ya que es una representación gráfica, del estado de agua de mar con las mismas variables independientes.

Del estudio de la curva T-S y de su posición en el diagrama T-S se puede obtener: las características de un volumen de agua, una idea de la estabilidad de una columna de agua, seguir el traslado de un volumen de agua a otra región, estimar el grado de los procesos de mezcla y descubrir eventualmente errores hechos en las determinaciones de la temperatura y la salinidad.

En el análisis de los procesos de mezcla sobre diagrama T-S son de utilidad las siguientes definiciones:

Índice termohalino: Es la representación de un punto único

Tipo de agua: Representa un volumen de agua con salinidad y temperatura constantes y su imagen sobre el diagrama T-S es un punto.

Masa de agua: Representa una sucesión infinita de masas de agua, o sea, una curva sobre el diagrama T-S.

Índices termohalinos

De los estudios pioneros de Sverdrup et al (1942), sobre la identificación y clasificación de las masas de agua en los océanos del mundo, se puede distinguir para el Océano Pacífico Tropical al Agua del Pacífico Ecuatorial (APE), ubicada entre las Masas de Agua Superficiales y el Agua Intermedia Antártica (AIA), y que está caracterizada por una relación T-S muy lineal entre los puntos (15°C, 34.15‰) y (5°C, 33.9‰).

Más recientemente, Wyrky (1967) utilizando colectados por expediciones realizadas entre 1928 y 1964, estudia el problema de la clasificación y origen de las masas de agua para el Océano Pacífico y Tropical Oriental. De este trabajo podemos distinguir el Agua Superficial Tropical (AST), el Agua Intermedia Antártica (AIA) y la Capa de Mínimo Oxígeno; todas estas masas de agua acuerdo con la terminología de Defant (1961) y Mamayev (1975), se ubican dentro de las Aguas Troposféricas e Intermedias. La Capa de Mínimo Oxígeno es la nueva denominación para el APE de Sverdrup.

La AIA está caracterizada por un mínimo de salinidad para temperaturas cercanas a 5°C. Toda el agua ubicada entre el núcleo de máxima salinidad y el de mínima salinidad, es agua mezclada entre estas dos masas y está caracterizada por una correlación T-S lineal entre los puntos (15°C, 35‰) y (5°C, 34.5‰); Wyrski (1967). Esta linealidad es aparentemente una característica de las masas de agua centrales en todos los tres océanos (Mamayev, 1975).

La Tabla No. 1 muestra los índices termohalinos para las épocas seca y húmeda, utilizados en este trabajo. La Tabla No. 2 muestra los Tipos de Agua.

*Tabla No. 1.
Índices Termohalinos. Epoca Seca - 1989*

Masas de Agua	Profundidad Mts	Temperatura °C	Salinidad ‰
AST	35 m	19.35	32.5
ASS	125 m	15.00	34.0
APE	345 m	9.95	33.9
AIA	850 m	5.40	33.6

Epoca Húmeda - 1989

Masas de Agua	Profundidad Mts	Temperatura °C	Salinidad ‰
AST	40 m	23.7	32.0
ASS	110 m	15.0	34.5
APE	395 m	9.75	33.8
AIA	870 m	5.0	33.6

Determinación analítica de la Curva T-S Media

La relación T-S de las masas de agua a lo largo de la columna de agua, normalmente no presenta variaciones importantes en el tiempo, sino que por el contrario muestra una estrecha correlación que puede ser considerada estable para cada estación. Es decir, si se hacen observaciones de estas propiedades y se grafican en un sistema coordinado, se obtiene una curva que es análoga a las que resultan idénticas mediciones llevadas a cabo en otras localidades próximas. Esta es una de las condiciones más importantes que debe prevalecer en áreas oceánicas donde se desea aplicar el método que sugiere una función polinomial de $S = S(T)$ que describa analíticamente la curva T-S media para una región. Expresiones polinomiales de la curva media T-S, cuyos coeficientes son obtenidos por el método de mínimos cuadrados se utilizan para aplicaciones prácticas.

El Método de Mínimos Cuadrados consiste en calcular la ecuación de una curva para una serie de puntos dispersos sobre una gráfica, curva que se considera el mejor ajuste, entendiéndose por tal, cuando la suma algebraica de las desviaciones de los valores in-

dividuales respecto a la media, es cero; y cuando la suma del cuadrado de las desviaciones de los puntos individuales respecto a la media es mínima.

Con este método se provee una estandarización de la curva T-S, o sea, se ajusta, para la función $S = S(T)$, el mejor polinomio posible, el que de un ajuste más razonable de los datos, cuya expresión genérica está dada en la siguiente ecuación:

$$S = S(T) = \sum_i^k \beta_i T^i \text{ ‰}$$

Entonces, $S = S(T) = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 T^3 \dots$

donde $\beta_i = (i = 1 \dots n)$ son los coeficientes polinomiales.

Esta expresión polinomial $S = S(T)$ puede ser utilizada como una alternativa para calcular la salinidad a partir del conocimiento de la temperatura.

$$T = T(Z), \text{ in situ}$$

Las variables dependientes del agua de mar en una columna de agua, son estimadas a partir de mediciones *in situ* de las variables independientes T y S.

Cuando por alguna razón, los valores de salinidad muestran errores o cuando únicamente es muestreada la estructura térmica, se hace necesario utilizar un método alternativo para estimar la salinidad. Cuando se ha demostrado que la curva T-S posee una configuración casi estacionaria (estable) en un período considerado, entonces la expresión binomial $S = S(T)$, puede ser utilizada en su forma más práctica como una alternativa para calcular la salinidad a partir del conocimiento de la temperatura $T = (Z) \text{ In situ}$. De esta manera todas las variables dependientes del agua de mar podrán ser calculadas en una primera aproximación.

Metodología

En la selección de los pares (T - S) observados en la columna de agua, se analizaron individualmente las estaciones oceanográficas que alcanzaban profundidades superiores a los 950 mts, obteniéndose un total de 8 y 7 estaciones, para marzo y agosto de 1989 respectivamente, las cuales fueron analizadas en su totalidad por el método de mínimos cuadrados.

La variable T (en °C), fue tomada como independiente para obtener una relación funcional más conveniente en las aplicaciones prácticas.

Los coeficientes polinomiales (β_1), fueron determinados para cada una de las estaciones de la transversal Buenaventura - malpelo en las dos épocas, lo mismo que para el total del transecto.

En la Tabla No. 3 son presentados estos coeficientes, siendo válidos para temperaturas entre 4°C y 31°C. Los polinomios correspondientes representan analíticamente las curvas T-S medias para las estaciones observadas en cada período, en un rango de profundidad comprendido entre la superficie y los 1000 mts.

Análisis T-S Estadístico Volumétrico

Antecedentes

Son muchos los estudios realizados para determinar las variaciones de temperatura y de salinidad, aplicando el diagrama T-S estadístico volumétrico. De acuerdo a Mamayev (1975, p. 298), las bases fundamentales de este método fueron introducidas simultáneamente por Cocharne (1958), Montgomery (1958) y Pollak (1958), quienes analizaron las características termohalinas de los océanos Pacífico, Atlántico e Indico, respectivamente.

Para el océano Atlántico, fue demostrado que más del 75% del volumen total de agua tiene sus características termohalinas variando entre -1°C a 3°C (temperatura potencial) y 34‰ a 35‰ (salinidad).

El método ha sido descrito también en la literatura oceanográfica soviética. Algunos investigadores como Dubrovin (1965), Glazkov V. (1970), Miranda y Castro (1977) entre otros, han realizado trabajos con este análisis, sólo aplicándolo a áreas específicas.

El objetivo del análisis T-S estadístico volumétrico⁵ es la determinación de la frecuencia de ocurrencia de observaciones de pares (S-T), sobre una forma bivariada de clases características. Estas clases, definidas por intervalos de variación de temperatura y de salinidad ($\Delta T - \Delta S$), son previamente determinadas sobre el diagrama T-S para los índices termohalinos, y no representa otra cosa, que el rango de valores pares T-S de una masa de agua definida.

Este tipo de análisis puede ser realizado sobre superficies y volúmenes del espacio oceánico dependiendo de la naturaleza de los datos experimentales.

Metodología

El análisis estadístico volumétrico consiste en lo siguiente:

A. seleccionar una región oceánica donde exista una distribución uniforme de estaciones oceanográficas, con mediciones hasta el fondo o 1000 metros de profundidad.

⁵Miranda L. y De Castro B. Aplicación del Diagrama T-S Estadístico Volumétrico a Análisis de Masas de Agua de la Plataforma Continental de Rio Grande Do Soul. Instituto Oceanográfico de la Universidad de Sao Paolo, 28(1): 185-200. 1979.

Tabla No. 2.
Tipos de Agua presentes en el Pacífico - Año 1989

Masas de Agua	Temperatura °C	Salinidad ‰	Profundidad Mts
AST	16 - 29	29.5 - 34.6	0 - 150
ASS	14 - 15.9	33.5 - 34.6	10 - 200
APE	5.5 - 13.9	33.5 - 34.6	10 - 995
AIA	< 5.5	33.5 - 34.6	500 - 995

AST : Agua Superficial Tropical
 ASS : Agua Subsuperficial
 APE : Agua Pacífico Ecuatorial
 AIA : Agua Intermedia Antártica

Tabla No. 3.
Coeficientes de la Curva T - S correspondientes a la forma polinomial

$$S = S(T) = \sum_{i=1}^k \beta_i T^i \text{‰}$$

Crucero Pac. XIV	$\beta(0)$	$\beta(1)$	$\beta(2)$	$\beta(3)$	$\beta(4)$	$\beta(5)$
Estación 69	-1708643236600	35.709161617500	-14.792025040100	3.294670819000	-0.432462269300	0.034332908800
Estación 61	88.922999129900	-43.521889018800	14.510095445900	-2.688621463600	0.305745063200	-0.022186779800
Estación 53	31.896941605100	1.586849501000	-0.547057189700	-0.547057189700	0.097495236000	-0.010061070700
Estación 45	-1.648531350900	30.412039304000	-11.114925963400	2.265501642600	-0.284342937800	0.022849749200
Estación 37	35.200751624100	-0.633972737000	0.088512605600	-0.004616202400	0.000079229300	
Estación 29	7.327805511200	15.852957950700	-4.178940598100	0.623414993700	-0.058021012900	0.0034063341600
Estación 22	33.113259177300	0.126113600700	-0.004514284300			
TRANSCEPTO	22.384757163100	6.420981679200	-1.461613388200	0.17245364900	0.011324176500	0.000415840400
Crucero Pac. XV						
Estación 77	37.346787450500	-2.084012792800	0.552442057600	-0.077341858600	0.006256939200	-0.000290417600
Estación 61	35.217492699500	-0.356271004400	0.03604214700	-0.001015343900		
Estación 45	21.186797175400	7.597030310100	-1.704714322700	0.188770809900	-0.010923969600	0.000316118400
Estación 37	23.969860026900	5.876917767400	-1.300365111400	0.142222403400	-0.008127123500	0.000232258700
Estación 29	44.854152926800	-7.259539024200	1.992624107500	-0.286943598300	0.023521617200	-0.001097594200
Estación 22	39.101711737400	-2.505324364800	0.456673227300	-0.037565928000	0.001435282700	-0.000020621300
Estación 14	27.080982325100	4.417400704200	-1.070879400900	0.129350207200	-0.008185491700	0.000258804200

Continuación

Tabla No. 3.

Coefficientes de la Curva T - S correspondientes a la forma polinomial

$$S = S(T) = \sum_i^k \beta_i T^i \text{ ‰}$$

Crucero Pac. XIV	$\beta(6)$	$\beta(7)$	$\beta(8)$	$\beta(9)$
Estación 69	-0.001613046200	0.000041072500	-0.000000434500	0.000000003400
Estación 61	0.001031252000	-0.000029735800	-0.000000484800	0.000000005400
Estación 53	0.000640190100	-0.000025127500	0.000000559100	0.000000005200
Estación 45	-0.001177840800	0.000037609900	-0.000000676100	
Estación 37				
Estación 29	-0.0001289300	0.000002710600	-0.000000024400	
Estación 22				
TRANSCETTO	-0.000007936100	0.000000061400		
Crucero Pac. XV				
Estación 77	0.000007133500	-0.000000071800		
Estación 61				
Estación 45	-0.000003609300			
Estación 37	-0.000002623100			
Estación 29	0.000027030200	-0.000000272000		
Estación 22				
Estación 14	-0.000003209400			

Sea A_t el área total de esa superficie; si n indica el número total de estaciones a ser utilizadas en el análisis, $A_t/n = A$ (promedio) será el área media representativa de cada estación oceanográfica. La unidad más conveniente para A (promedio) es km^2 .

B. Establecer los límites de variación de temperatura y salinidad ($\Delta T - \Delta S$) para los índices termohalinos presentes en cada estación, utilizando su diagrama T-S. Es decir, establecer los límites de las clases o rangos.

C. Por medio de una escala de profundidad, se determina el intervalo de profundidad ΔZ para cada clase, a lo largo de la columna de agua.

Para determinar $\sum \Delta Z = H$ donde ΔZ está expresado en kilómetros y H es la profundidad local, se utiliza el siguiente criterio:

1. Para un par en la superficie (S_0, T_0) el intervalo de profundidad (ΔZ) es igual a la mitad de la profundidad siguiente (par siguiente).
2. Para un par próximo al fondo (S_n, T_n) ΔZ es igual a la suma de la distancia que la separa del fondo, con el valor medio de intervalo de profundidad que la separa del par anterior (S_{n-1}, T_{n-1})
3. Para los demás pares (S_i, T_i) ΔZ es igual al valor medio de la profundidad que separa los dos pares anteriores (S_{i-1}, T_{i-1}) y el siguiente (S_{i+1}, T_{i+1})

Asimismo, una vez determinados los intervalos ΔZ representativos para todos los pares (S, T) a lo largo de la columna de agua, el volumen de un par genérico es determinado por:

$V_{i,j} = \Delta Z * A$ (promedio), este valor, que representa un volumen parcial, debe ser colocado sobre una clase característica correspondiente a ese par genérico. Este procedimiento, realizado para todos los pares (S, T) muestreados en la región de estudio y localizados sobre un diagrama T-S, formarán la distribución bivariada de esos volúmenes parciales.

Las variables independientes temperatura (T) y salinidad (S), fueron obtenidas directamente de las lecturas *in situ* de las estaciones oceanográficas muestreadas, correspondientes a los cruceros Pacífico XIV y XV. El Plano No. 1 muestra la red de estaciones fijas del Pacífico colombiano que se cubren en cruceros de investigación científica. Además la Tabla No. 4 muestra el cálculo del área total cubierta para el presente estudio.

Tabla No. 4
Cálculo del Área Total de la Red de Estaciones

Estaciones de Área Cuadrada:

02,	03,	04		
05,	06,	07,	08,	Subtotal Número de Estaciones = 53
09,	11,	12,	13,	Área de cada una de las Estaciones = 3.086,9 km ²
14,	15,	16,	17,	Subtotal Área de las Estaciones = 163.605,7 km ²
19,	20,	22,	23,	
23,	25,	26,	28,	
29,	30,	31,	32,	
33,	34,	36,	37,	
38,	39,	40,	41,	
43,	44,	45,	46,	
47,	48,	50,	51,	
52,	53,	54,	55,	
57,	58,	59,	60,	
	61,	62,		

Estaciones de Area Rectangular:				Subtotal Número de Estaciones	=	10
				Area de cada una de las Estaciones	=	1.543,5 km ²
35,	42,	49,	56	Subtotal Area de las Estaciones	=	15.435 km ²
64,	65,	66,	67			
68,	69.					

Estaciones Areas Irregulares:

Area	63	=	771.7 km ²
Area	1	=	771.7 km ²
Area	10	=	2315.2 km ²
Area	18	=	2855.62 km ²
Area	27	=	1697.92 km ²
Area	21	=	2855.55 km ²

Area total de las Estaciones:

At	=	A1 + A2... + A69
At	=	190.308,39 km ²

El promedio de profundidades para todas las estaciones, (39 en época seca y 59 en época húmeda) fue de 995 metros. Para cada estación se tomaron los valores de los parámetros oceanográficos T-S a profundidades estándares, abarcando un total de 17 niveles desde la superficie hasta el fondo.

Siguiendo un proceso matemático con el objeto de definir la distribución total de las masas de agua, se realizó un análisis interpolando verticalmente los datos de las estaciones por el método cúbico SPLINE, para obtener la resolución estadística deseada de 200 datos (valores termohalinos cada 5 metros a lo largo de la columna de agua) en cada estación muestreada y determinar en qué lugar de la columna de aguas, están los índices termohalinos que diferencian las clases o masas de aguas presentes.

El programa utilizado para efectuar la interpolación cúbica SPLINE, método que posee un conjunto de ecuaciones no solamente lineales sino tridiagonales (tienen elementos diferentes de cero solamente diagonal + - una columna), ha sido desarrollado y compilado en CLIPPER y ha sido bautizado como "INTERPOL".

Para cada estación muestreada se elaboró la curva T-S; con todas ellas se trazó un diagrama dispersivo sobre el cual se localizaron los índices termohalinos que definen cada masa de agua presente en la región.

Fueron determinados los intervalos ΔZ_k representativos para cada uno de los pares T-S considerados. Este intervalo fue calculado con la altura de la columna de agua comprendidas entre las distancias medias que separan los índices termohalinos adyacentes.

La amplitud de la variación de la temperatura y salinidad de las aguas de la región de estudio fue dividida en clases de intervalos de variación cada 01°C de temperatura y cada 0.5 partes por mil de salinidad. Estas clases, convenientemente identificadas, hacen parte del diagrama T-S, con T en el eje de ordenadas y S en el de abscisas. El intervalo ΔZ_k de cada dos pares de índices termohalinos que determinan un tipo de agua, fue identificado y transcrito directamente en una clase correspondiente del Diagrama T-S. El volumen parcial de cada una de las clases correspondientes fue calculado con el producto entre la altura del intervalo (o espesor) de esa clase y el área media (A).

RESULTADOS

Características regionales de la correlación T-S

En primer lugar se enfoca la atención de este trabajo hacia las características termohalinas de la masa de agua de la capa superficial o mezcla.

En la región del presente estudio, la capa de mezcla es poco profunda, variando entre 5 y 25 mts, con valores de temperatura de 25°C en promedio; la masa de agua que se localiza en esta capa es el AST.

La comparación de los diagramas T-S dispersivos hasta los 100 mts de profundidad (Figuras 1 y 2), los cuales representan la correlación de esas variables para los correspondientes periodos de observación, indican como es natural, que esa masa de agua es sensible a los procesos meteorológicos y oceanográficos. La mayor homogeneidad es observada para la época seca (marzo/89); en la época húmeda (agosto) se puede observar un desvío perteneciente a las dos estaciones más cercanas de la costa a lo largo del transecto estudiado en el Pacífico colombiano, debido posiblemente al alto gradiente del frente salino presente en el área.

En condiciones normales las temperaturas superficiales no exceden los 29°C. Los valores de salinidad y temperatura en la base de la capa de mezcla, varían entre los 33.4 y 33.8 partes por mil, y 25°C respectivamente.

Los diagramas T-S dispersivos elaborados desde la superficie hasta 1000 metros de profundidad, presentan la correlación de las variables para marzo (Figura 3) y agosto de 1989 (Figura 4), en donde se puede detectar una gran linealidad en la época de marzo y un desvío claramente identificable para la época de agosto en las dos estaciones más cercanas a la costa, caracterizando una mejor estratificación en las masas de agua para la época seca. En las masas de agua más lejanas a la costa y para los valores de temperatura inferiores a 21°C, los pares T-S se distribuyen con una pequeña dispersión y la configuración de la curva T-S es poco sensible a la variación estacional entre las dos épocas, distinguiéndose en ambos casos, el máximo de salinidad del ASS entre los 12°C y 15°C y el mínimo de salinidad del AIA cercano a los 5°C.

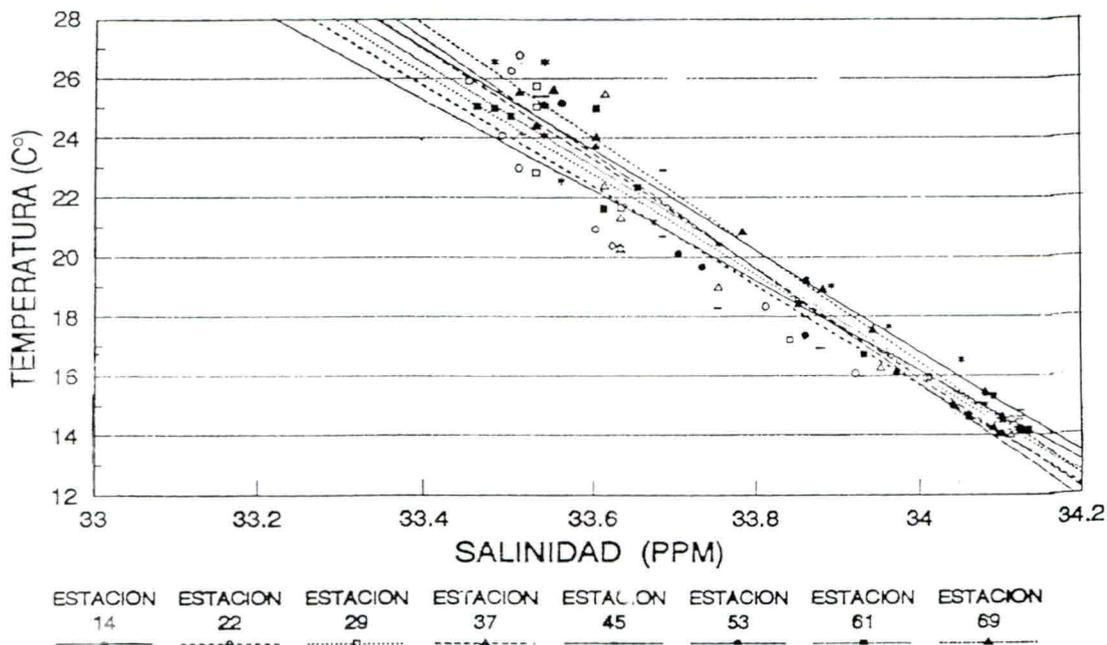


Figura 1.
 Transversal Malpelo - Buenaventura
 Estandarización Curva T-S entre la superficie y 100 mts.
 Diagrama Dispersivo - Marzo/Abril 1989

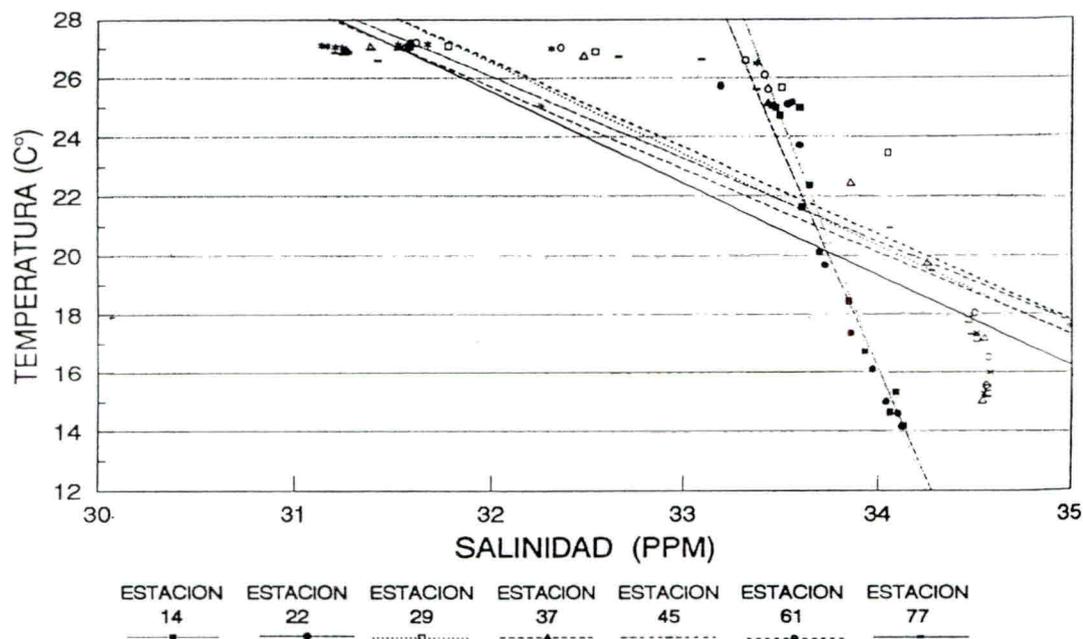


Figura 2.
 Transversal Malpelo - Buenaventura
 Estandarización Curva T-S entre la superficie y 100 mts.
 Diagrama Dispersivo de la Capa de Mezcla - Agosto 1989

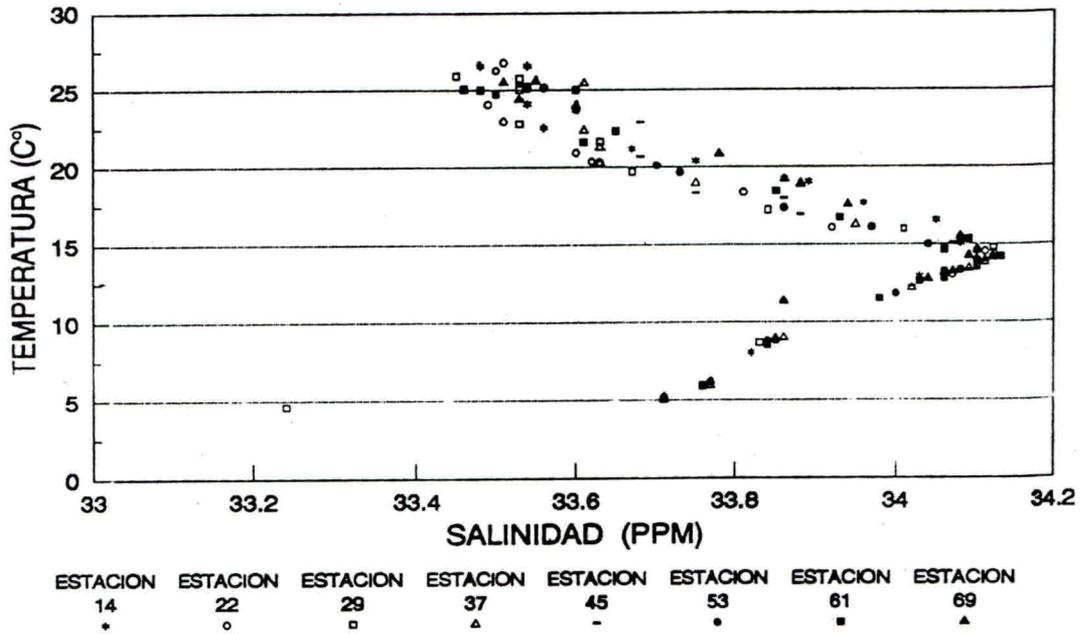


Figura 3.
 Transversal Malpelo - Buenaventura
 Estandarización Curva T-S

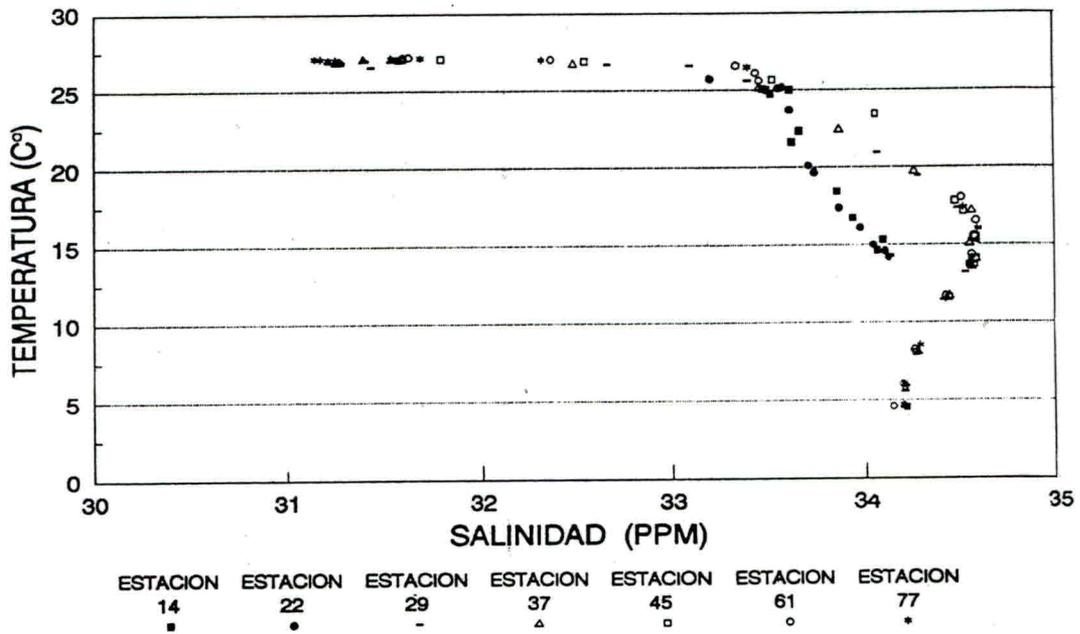


Figura 4.
 Estandarización Curva T-S
 Diagrama Dispersivo - Agosto 1989

Análisis estadístico volumétrico

Determinando sobre el diagrama T-S (ver Figuras 5 y 6), los índices termohalinos generales de las diferentes masas de agua presentes en la plataforma continental, más allá de la isla Malpelo 82°C longitud oeste entre 1.5°C y 7.50 de latitud norte, dando como resultado:

Epoca Seca	Epoca Húmeda
AST 6.3%	AST 8.5%
ASS 6.6%	ASS 7.8%
APE 71.9%	APE 64.4%
AIA 15.3%	AIA 19.3%

Se encuentra una disminución del porcentaje el Agua Superficial Tropical para la época seca, debido al evidente afloramiento de aguas profundas que se presenta. El cálculo de los volúmenes de cada una de las masas de agua presentes, se determinó dando como resultado los siguientes valores:

Epoca Seca	Epoca Húmeda
AST 11.796,03 km ³	AST 15.721,27 km ³
APE 134.978,63 km ³	APE 119.701,78 km ³
ASS 12.326,92 km ³	ASS 14.534,64 km ³
AIA 28.730,29 km ³	AIA 35.878,80 km ³

Estos volúmenes parciales de las diferentes masas de agua presentes fueron los calculados en la totalidad del área de la red de estaciones fijas muestreadas y hasta una profundidad promedio de 995

La Figura 8 compara de manera ponderada el número de datos de T y S que se tuvieron en cuenta para los cálculos; en términos generales se observa un océano más cálido en la época seca, pero relativamente más salino en la época húmeda.

La Tabla No. 5, a manera de ejemplo, nos muestra las clases definidas por intervalo de variación de temperatura y salinidad (ΔT y ΔS) para una estación en las dos épocas, las cuales fueron previamente determinadas sobre el Diagrama T-S, con base en los intervalos de variación de esas propiedades.

Para el cálculo del área total (AT), Tabla No. 4, se contabilizaron parcialmente las áreas de cada una de las estaciones de modo que la sumatoria de todos los volúmenes parciales coincidiera con el volumen total.

Para la época seca el valor total del volumen, se vio afectado por la estación 12, la que registró una profundidad para computar de 500 mts.

Para la época húmeda el valor total del volumen, se vió afectado por las estaciones 12 y 20 las que registraron profundidades para computar de 750 m y 100 m respectivamente.

La Tabla No. 7, muestra los resultados del área y los volúmenes de cada masa de agua en la zona muestreada durante los cruceros Pacifico XIV y XV.

Estandarización de la curva T-S

Forma analítica polinomial de la curva T - S

Los polinomios correspondientes a cada una de las estaciones de la transversal Buenaventura/Malpelo para las dos épocas, representan analíticamente las curvas T-S medias de los periodos de las estaciones observadas, para un rango de profundidad comprendido entre 0 y 1000 mts.

La representación geométrica de estas curvas, indica que el alimento de éstas es casi independiente a la época de observación, excepto para temperaturas superiores a 25°C y salinidades inferiores a 33.6% (la mayor diferencia se presenta en la capa de mezcla).

Como se ha demostrado que la curva T-S posee una configuración casi estacionaria (estable) en el período considerado, entonces la expresión polinomial $S = S(T)$, puede ser utilizada como una alternativa para calcular la salinidad a partir del conocimiento de la temperatura $T = T(Z)$ *in situ*. De esta manera, todas las variables dependientes del agua de mar podrán ser calculadas en una primera aproximación.

Debido a que los cruceros pacífico XIV y XV presentaron condiciones normales; se sugiere que el polinomio correspondiente a este transcepto, sea tomado como representativo de la correlación T-S existente en la zona de Buenaventura - Malpelo. La forma de dicho polinomio para cada estación está dada de forma semejante al de la estación 69 para el período de marzo, la cual se toma a manera de ejemplo:

$$S = S(T) = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 T^3 \dots$$

$$S = S(T) = -1.708643236600 + 35.70916161750^1 \\ -14.792025040100T^2 + 3.294670819000T^3 \\ -0.432462269300T^4 + 0.034332908800T^5 \\ -0.001613046200T^6 + 0.000041072500T^7 \\ -0.000000434500T^8$$

Calculando para una T de 25.500°C

Obtenemos una $S(T) = 33.499999835$

El procedimiento es estándar para todas las estaciones de los cruceros.

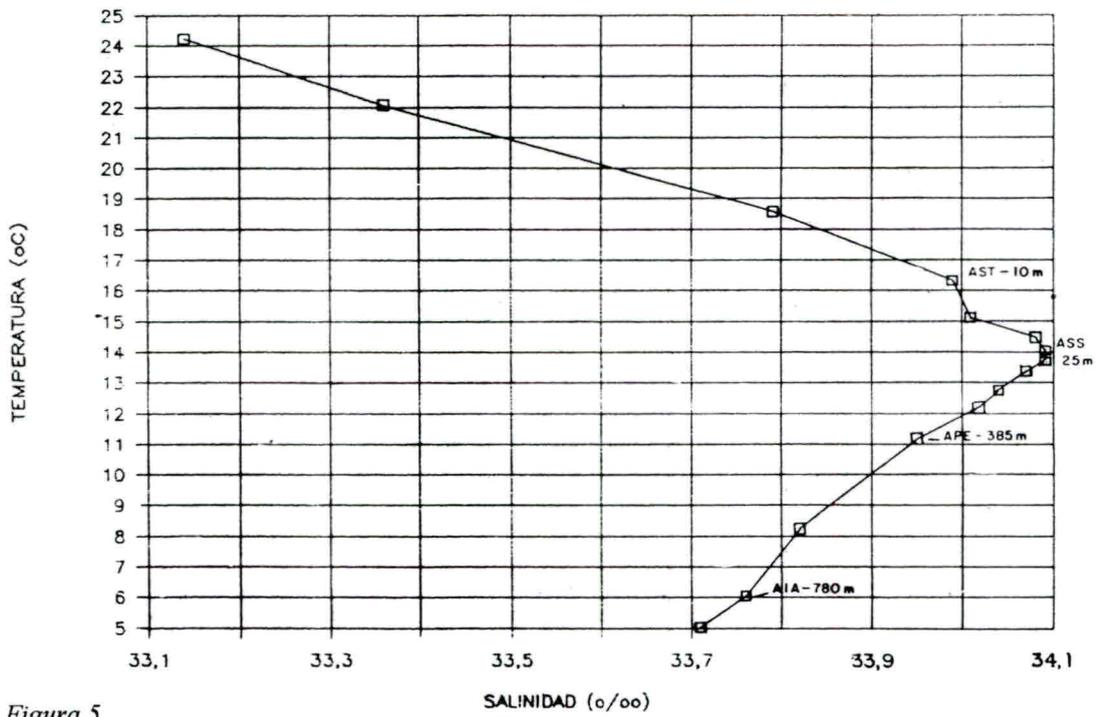


Figura 5.
Pacífico XIV - ERFEN XI (T vs. S)
Mar. 30/89 - Est. No. 25 - 00:22R

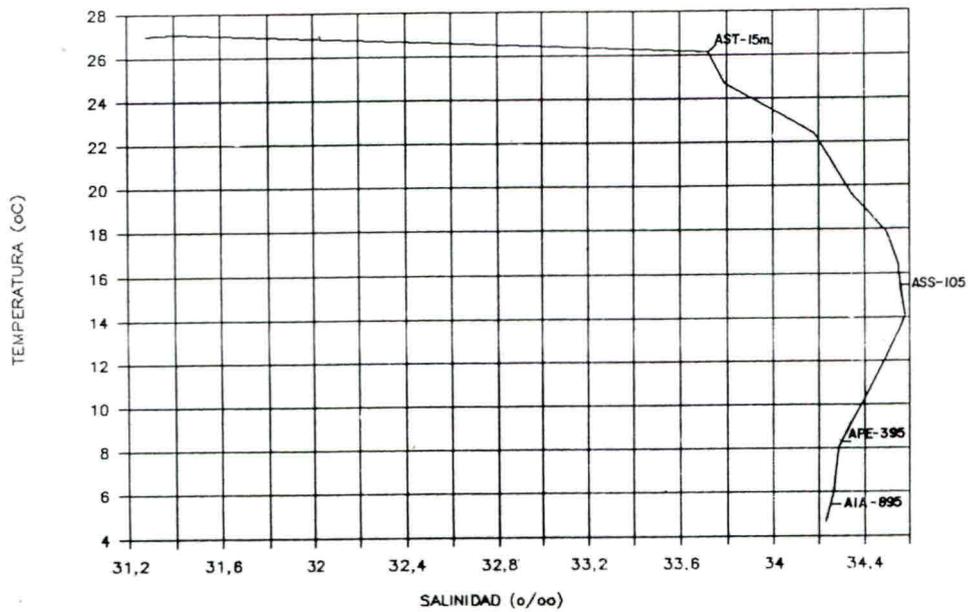


Figura 6.
Pacífico XV - ERFEN XII (T vs. S)
Ago. 11/89 - Est No. 25 - 06:30R

Tabla No. 5
 Epoca Seca - Pacífico XIV

Estación	Masas de Agua	Rango de Profundidad	Porcentaje %
08	AST	0 - 50	5.0
	ASS	50 - 150	10.0
	APE	150 - 115	66.5
	AIA	115 - 995	18.0
09	AST	0 - 45	4.5
	ASS	45 - 120	7.5
	APE	120 - 785	66.5
	AIA	785 - 995	21.0
10	AST	0 - 40	4.0
	ASS	40 - 135	9.5
	APE	135 - 865	73.0
	AIA	865 - 995	13.0
11	AST	0 - 70	7.0
	ASS	70 - 115	4.5
	APE	115 - 860	74.5
	AIA	860 - 995	13.5
12	AST	0 - 55	5.5
	ASS	55 - 105	5.0
	APE	105 - 765	67.0
	AIA	765 - 995	22.0
14	AST	0 - 80	8.0
	ASS	80 - 170	9.0
	APE	170 - 820	65.0
	AIA	820 - 995	17.5
17	AST	0 - 20	2.0
	ASS	20 - 50	3.0
	APE	50 - 825	77.5
	AIA	825 - 995	17.0
18	AST	0 - 15	1.5
	ASS	15 - 50	3.5
	APE	50 - 830	78.0
	AIA	830 - 995	16.5
19	AST	0 - 40	4.0
	ASS	40 - 65	2.5
	APE	65 - 825	76.0
	AIA	825 - 995	17.0

Tabla No. 5
Epoca Húmeda - Pacífico XIV

Estación	Masas de Agua	Rango de Profundidad	Porcentaje %
08	AST	0 - 85	8.5
	ASS	85 - 160	7.5
	APE	160 - 765	60.5
	AIA	765 - 995	23.0
09	AST	0 - 85	8.5
	ASS	85 - 175	9.0
	APE	175 - 780	60.5
	AIA	780 - 995	21.5
10	AST	0 - 80	8.0
	ASS	80 - 185	10.5
	APE	185 - 780	59.5
	AIA	780 - 995	21.5
11	AST	0 - 70	7.0
	ASS	70 - 170	10.0
	APE	170 - 780	61.0
	AIA	780 - 995	21.5
12	AST	0 - 80	8.0
	ASS	80 - 165	8.5
	APE	165 - 750	58.5
14	AST	0 - 90	9.0
	ASS	90 - 170	8.0
	APE	170 - 825	65.5
	AIA	825 - 995	17.0
17	AST	0 - 100	10.0
	ASS	100 - 175	7.5
	APE	175 - 820	64.5
	AIA	820 - 995	17.5
18	AST	0 - 95	9.5
	ASS	95 - 160	6.5
	APE	160 - 820	66.0
	AIA	820 - 995	17.5
19	AST	0 - 80	8.0
	ASS	80 - 150	7.0
	APE	150 - 810	66.0
	AIA	810 - 995	18.5

Tabla No. 6

Calculo del Volumen de la Red de Estaciones Muestreadas

$$V_t = a \text{ (km}^2\text{)} * Z \text{ (km)}$$

Epoca Húmeda

$$V_t = 190.308,39 * 0.995 = 189.356,85 - [756.29 + 2762.76]$$

$$= 185.837,8 \text{ km}^3$$

Epoca Húmeda

$$V E \text{ (sumatoria) Estaciones.} = 185.837,04 \text{ km}^3$$

Epoca Seca

$$V_t = 190308.39 - 0.995 = 189356.85 - [1528.03] = 187828.82 \text{ km}^3$$

Epoca Seca

$$V E \text{ (sumatoria) Estaciones} = 187.828.87 \text{ km}^3$$

Tabla No. 7

Datos de Area y Volumen de la Zona Muestreada Durante los Cruceros Pacifico Xv y XIV en 1990

Masas de Agua	Area Total Muestreada (km ²)	Epoca Húmeda Volumen (km ³)	Epoca Seca Volumen (km ³)
AST		15721.57	11796.03
ASS		14534.64	12323.92
APE	190308.39	119701.78	134978.63
AIA		35878.80	28730.29
Volumen t Masas de Agua		185836.79	187828.87
Volumen hallado por el Area		185837.80	187828.82
Volumen hallado por t en cada Estación		185839.04	187828.87

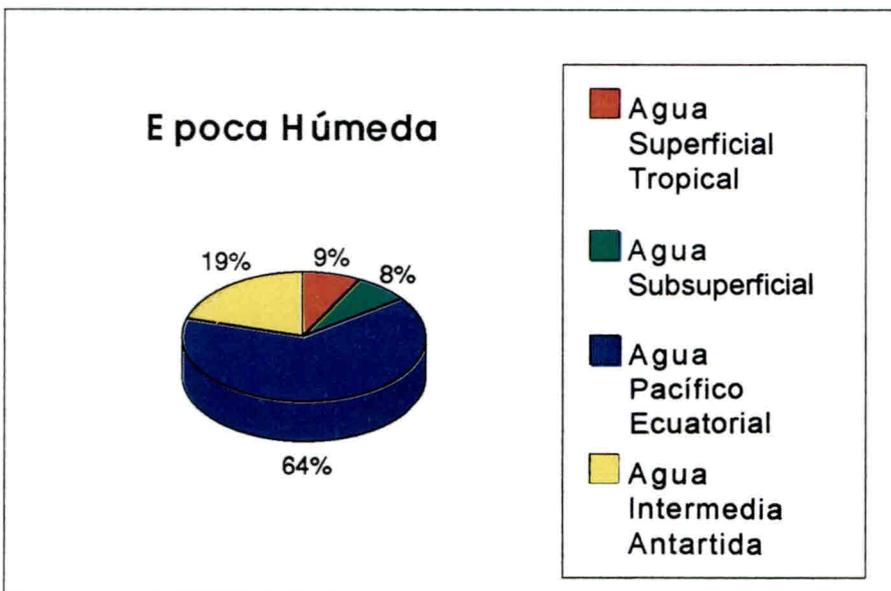
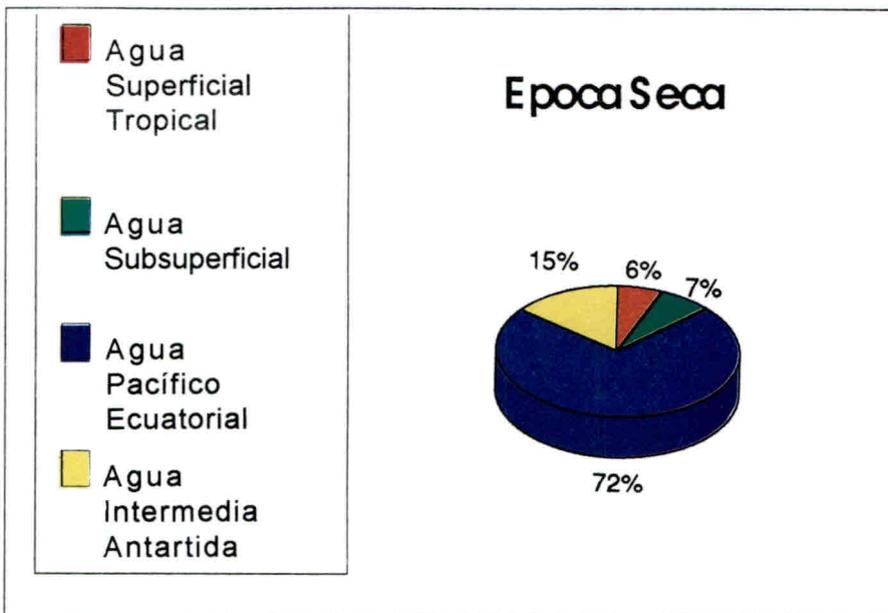


Figura No. 7
Estudio de las Condiciones Oceanográficas del Pacífico colombiano - 1989

ANÁLISIS T-S ESTADÍSTICO

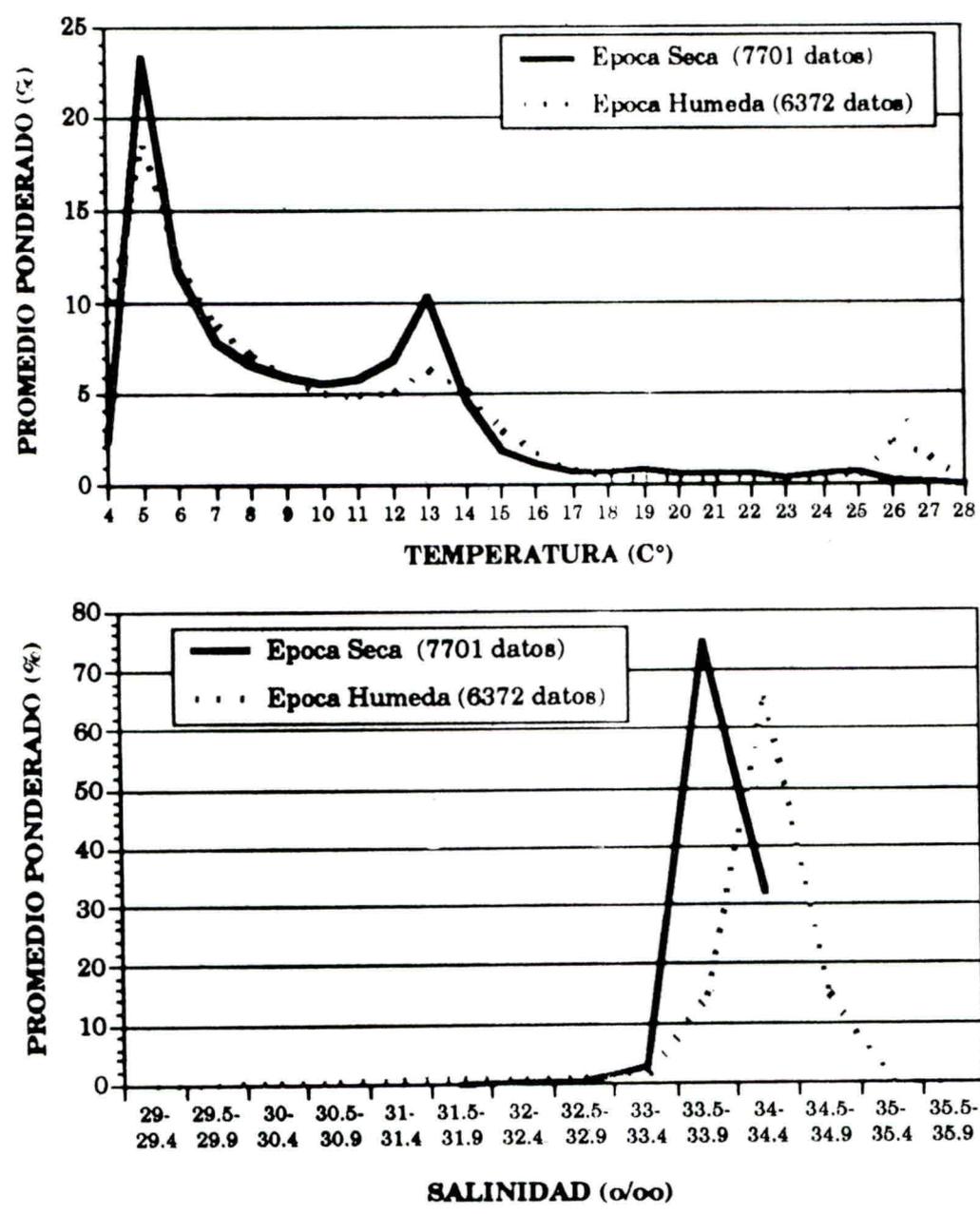


Figura No. 8.
Estudio de las Condiciones Oceanográficas del Pacífico colombiano - 1989

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Análisis estadístico volumétrico

Volúmenes de agua de origen Tropical Superficial, se encuentran presentes en los dos periodos observados. Porcentualmente ellos representan el 11.7% en la época seca y el 15.9% en época húmeda de todo el volumen.

Las aguas de origen Pacífico Ecuatorial, representan el mayor porcentaje de las masas presentes en la región, con un 71.9% para la época húmeda, demostrando la gran influencia que esta masa de agua tiene en la región.

Las aguas de origen Antártico (AIA), se encuentran presentes en profundidades mayores a los 500 mts; el muestreo se analizó hasta profundidades cercanas a los 1000 mts., y por lo tanto el cálculo parcial de esta masa de agua fue de 15.3% para la época seca y de 19.3% para la época húmeda.

Estandarización de la curva T - S

la comparación de los diagramas T-S dispersivos hasta los 100 mts. de profundidad, los cuales representan la correlación de esas variables para los correspondientes periodos de observación, indican como es natural, que esa masa de agua es sensible a los procesos meteorológicos y oceanográficos.

Basados en la correlación T-S característica de las aguas de la capa de mezcla y considerando las dos épocas de toma de datos, es posible afirmar que la mayor homogeneidad es observada para la época seca (marzo/89); en la época húmeda (agosto) existe un desvío perteneciente a las dos estaciones más cercanas de la costa a lo largo del transecto estudiado en el Pacífico colombiano, debido posiblemente al alto gradiente del frente salino presente en el área para la época de marzo.

las curvas T-S medias presentadas analíticamente por polinomios que varían entre los 4°C y 31°C, muestran un pequeño desvío estacional para la época de agosto en aguas profundas en las estaciones más cercanas a la costa (61 y 67), presentando salinidades inferiores a 34 partes por mil, a lo largo de los primeros 150 metros.

El resto de estaciones, para las dos épocas, presentan una configuración de la masa de agua subsuperficial e intermedia en el plano T-S bastante estable.

CONCLUSIONES GENERALES

Los valores medios mínimos de temperatura superficial se presentaron en la época seca debido a las surgencias de masas de agua profundas, las cuales renuevan las masas de agua superficiales.

En la cuantificación de las masas de agua de distinto origen (AST, ASS, APE, AIA) presentes en el Pacífico colombiano, se comprobó que el mayor porcentaje (71.9% época seca - 63.4% época húmeda) corresponde al Agua del Pacífico Ecuatorial (APE) aportada por las contracorrientes de dirección oeste-este y que son de gran influencia en las características oceanográficas de la región. La masa de agua Intermedia Antártica, se localizó y cuantificó a partir de los 700 metros de profundidad.

La utilización de la función polinomial de $S = S(T)$, es un método alternativo que en una primera aproximación permite obtener la salinidad a partir de la temperatura en el transecto Buenaventura - Malpelo. (uso práctico en el proyecto TOGA-MALPELO-ERFEN).

Aplicando este mismo método a diferentes parcelas oceánicas discriminadas por sus características particulares y en diferentes épocas climáticas, se pueden obtener ecuaciones polinomiales para todo el Pacífico y Atlántico colombianos.

BIBLIOGRAFIA

- AGUILERA, J. Y CASTILLO, F., Informe ERFEN IX. Memorias del VI Seminario Nacional de Ciencias del Mar. Comisión Colombiana de Oceanografía. Bogotá, 1989
- ANDRADE, C., Condiciones del Movimiento Geostrofico del Pacífico Colombiano; basado en datos obtenidos por la Armada Nacional. Tesis de Oceanógrafo Físico, Cartagena, Escuela Naval de Cadetes, 1986.
- CASTRO - FILHO, b.m. Análisis Termohalino de las Masas de Agua de la Región Oeste del Atlántico Sur Tropical. Fase de Muestreo. Instituto Oceanográfico de la U.S.P., Sao Paulo, 1977.
- COMISION COLOMBIANA DE OCEANOGRAFIA - COLCIENCIAS. Plan de Desarrollo de las Ciencias y Tecnologías del Mar en Colombia, 1980.
- COCHARNE, I.D., The Frequency Distribution of Surface Water Characteristic in the Pacific Ocean. Deep Sea Res., 5:111 - 127. Division of Oceanography, U.S. Navy Hydrographic Office, 1958.
- DIAZ, G., Circulación Superficial y el Domo Termal en el Norte del Panamá Bight (lat 05°C N - 07° N). Tesis de Maestría en Oceanografía Física, Instituto Oceanográfico de la Universidad de San Pablo, Brasil, 1975.

- DUBROVIN, B.I., Volumetric Statistical T-S Analysis of Arabian and Red Water Masses. Lomonosov State University, Moscow, Faculty of Geography, 1964.
- FORSBERGH, E.D., Estudio Sobre la Climatología, Oceanografía y Pesquerías del Panamá Bight. Comisión Interamericana del Atún Tropical, Boletín Vol. 14, No. 2 La Jolla, California. 1969.
- GLAZKOV, V.V., Three-Dimensional Statistical T-S. Analysis of the Water Masses of the Black Sea. *Oceanology*, 10:6, Pp. 771-776. 1970.
- IVANOV, A.V., Determinación del Porcentaje, Composición y Mezcla de las Masas de Agua en el Mar. *Inst. Okeanol. Akad. Nauk. S.S.S.R.*, 4. 1979. Agua Intermedia Atlántica en el Océano Atlántico. Cuadernos de Oceanografía, Venezuela.
- MAMAYEV, O.I., 1962. T-S Análisis de Movimiento de Masas Oceánicas de Profundidades Finitas. *Okeanologiya*, 2 (2) ----, 1969, Generalized T-S Diagrams of the Waters Masses of the World Ocean. *Okeanologiya*, 9 (1).
- MANZO, H. Termoclina y Capa de Mezcla de una Zona del Pacífico Tropical Este. Tesis de Maestría CICESE, 1980. ENSENADA, Baja California, 62 p.
- MENDOZA, L.A. y VANEGAS, L.G., Estudio de las Condiciones Oceanográficas del Pacífico Colombiano durante 1987. Escuela Naval de Cadetes, Facultad de Oceanografía Física. 1988.
- MIRANDA, L.B., DE CASTRO, B.M. DE., Aplicación del Diagrama T-S Estadístico-Volumétrico y Análisis de las Masas de Agua de la Plataforma Continental de Rio Grande do Sul. Instituto Oceanográfico de la Universidad de Sao Paolo - Brasil, 1977.
- MIRANDA, L.B., Análisis de Masas de Agua, Notas de Aula, Facultad de Oceanografía, Escuela Naval de Cadetes, Cartagena Colombia.
- MIRANDA, L.B., Forma de Correlacao T-S de Masas de Agua das Regioes Costeira e Oceanica entre Cabo Santome e Ilha de Sao Sebastiao, Brasil, 1985. Boletín Instituto da Oceanografía, Sao Paolo.
- MIRANDA, L.B., Análisis de Masas de Agua. Escuela Naval de Cadetes. Cartagena, 1983.
- POLLAK, M.J., Frequency Distribution of Potential Temperatures and Salinities in the Indian Ocean. *deep Sea Res.*, 5:128-133. 1958.
- STEPANOV, V.N., Contribución al Estudio de las Características Básicas de la Estructura del Agua de Mar y Océanos, *Okeanol. Issled N 13* 1965.

SVERDRUP, H.U., JOHNSON, M.W. & FLEMING, R.H., *The Oceans. their Physis, Chemistry and General Biology.* New York. Prentice Hall. 1942.

WOOSTER, W.S. 1959. Oceanographic Observations in the Panamá Bight, "Askoy Expedition" 1941. *Amer. Mus. Nat. Hist., Bull.* 118(3).

WYRTKY, K. 1965. Surface Currents of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *IATT., Bull* 9 (5)

WYRTKY K., Circulation and Water Masses in the Estearn Equatorial Pacific Ocean, *Int. J. Ocean and Limmol.* 1(2): 117-146