

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS DE LA BAHÍA DE TUMACO Y SU RELACIÓN CON EVENTOS DE ESCALA GLOBAL

Andrea Devis Morales *

División de Oceanografía, Centro Control Contaminación del Pacífico – CCCP
Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia
Tél. (57-2) – 727 26 37, Fax: (57-2) – 727 11 80. e-mail: cccpaci@col2.telecom.com.co
*e-mail: adevis@cccp.org.co

Recibido en marzo de 2003; aceptado en junio de 2003

RESUMEN

La variabilidad estacional e interanual de la bahía de Tumaco ha sido estudiada a partir de mediciones oceanográficas y meteorológicas, acopiadas desde 1999 y 1992, respectivamente. Durante el periodo estudiado se pudo establecer una estacionalidad con dos condiciones definidas dentro de un ciclo anual: la primera de febrero a principios de abril, caracterizada por el enfriamiento de la columna de agua, con valores entre 13.6 y 26° C, la elevación de la termoclina y haloclina (0 a 20 m) y aumento en la concentración de nutrientes; la segunda comprende el resto del año, con temperaturas más altas, entre 14 y 27.8° C, y una termoclina y haloclina más profundas (30 a 50 m). Este ciclo anual ocurre debido a la presencia de la Zona de Convergencia Intertropical, ZCIT, en la región Pacífico Ecuatorial Este, consistente con la intensidad de los vientos Alisios del Noreste y Sureste y las consecuentes corrientes superficiales. Esta estacionalidad se vio afectada por eventos globales como: las ondas Kelvin ecuatoriales del primer modo baroclínico, durante abril-mayo, que aumentaron la temperatura superficial del mar, TSM, la temperatura ambiente, TA, y las precipitaciones; el evento La Niña 1999-2000, que causó valores bajos de TSM (26.5° C), anomalías negativas del nivel medio del mar, NMM, y un incremento en la concentración de nutrientes con los máximos valores del período estudiado; nitritos (0.2 μM), fosfatos (2 μM), silicatos (50 μM) y amonio (4 μM); y desde septiembre de 2002 por el inicio de un evento El Niño de débil a moderada intensidad, identificado por las anomalías positivas del NMM de más de 10 cm, aumentos en las precipitaciones y TA, así como en la profundización de la isoterma de 15° C.

Palabras claves: Termoclina, Haloclina, Eventos ENOS, Ondas Kelvin Ecuatoriales, ZCIT, Bahía de Tumaco.

ABSTRACT

The interannual and seasonal variability of the bahía de Tumaco (Tumaco Bay) has been studied by oceanographic and meteorological measurements, from 1999 and 1992. During this period of time, it could be determined a cycle with two well defined conditions; the first one, from February to mid- April, as a cold phase, with seawater column (0 to 100 m) temperatures between 13.6 and 26° C, the rising of the thermocline and halocline (0 to 20 m) to the surface and a higher nutrient concentration; and the other phase, the rest of the year, with warmer waters, between 14 and 27.8° C and a deeper thermocline and halocline (30 to 50 m). This annual cycle is due the presence of the Intertropical Convergence Zone, ITCZ, at the Eastern Equatorial Pacific region, consistently with the stress of the Northeastern and Southeastern Trade Winds and its surface currents. This cycle was affected by global events, like the equatorial Kelvin waves of first baroclinique mode, during April-May, that rose the sea surface temperature, SST, the air temperature and rains; La Niña 1999-2000 event, that caused lower SST values (26.5° C), negative sea level anomalies and

the highest nutrients concentration of the observed time, nitrites ($0.2 \mu M$), phosphates ($2 \mu M$), silica ($50 \mu M$) and amonia ($4 \mu M$); and from September 2002 by El Niño event, identified by the positive sea level anomalies (more than 10 cm), higher than normal rains and air temperature and the deepening of the $15^\circ C$ isotherm.

Key words: Thermocline, Halocline, ENSO Events, Equatorial Kelvin Waves, ITCZ, Bahía de Tumaco.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda por entender el ciclo anual de la temperatura del mar en el Pacífico Ecuatorial Este ha llevado a realizar numerosas investigaciones. Se cree que la marcada amplitud de TSM encontrada en esta región, tiene una influencia en la climatología estacional del continente americano. Además, el hecho de que el ciclo El Niño aparezca, frecuentemente, en una época característica del año sugiere la importancia de una definición clara de los factores que influyen el ciclo anual de la temperatura (Kessler *et al.*, 1998).

La interacción entre el océano y la atmósfera en el Pacífico Tropical ha sido de gran interés en los últimos años, debido a la influencia de fenómenos como El Niño / La Niña Oscilación Sur (ENOS), los cuales han causado cambios climáticos que afectan a millones de personas en todo el mundo (Yu & McPhaden, 1999). Estas anomalías afectan la dinámica estacional del Pacífico Tropical Este, tal es el caso de la Cuenca del Pacífico Colombiano, CPC, y su región litoral.

La variabilidad en la dinámica estacional en la parte superior del océano es dirigida por la excitación y propagación de ondas Kelvin y Rossby (Kindle 1979; Meyers 1979a,b; Busalacchi and O'Brien 1980; Kessler 1990; Kessler and McCreary 1993; Minobe and Takeuchi 1995; Yang, *et al.*, 1997).

Yu y McPhaden (1998) encontraron que esta variabilidad en el Pacífico Ecuatorial es dominada por las ondas ecuatoriales de Kelvin, dirigidas por el viento, y las ondas Rossby del primer modo meridional, de primer y segundo modo baroclínico. La suma de las ondas Kelvin y Rossby resulta en una propagación hacia el oeste de las corrientes zonales ecuatoriales y hacia el este, en la profundidad de la termocline y la altura dinámica en el Pacífico Ecuatorial Central y Este.

Asimismo, el análisis de Kutsuwada y McPhaden (2002) demostró que la respuesta oceánica al forzamiento intraestacional del viento al este de la línea de cambio de fecha ($180^\circ W$) es controlada por ondas ecuatoriales de Kelvin del primer modo baroclínico, las cuales se propagan al este a una velocidad de fase de 2.4 a 2.7 ms^{-1} . También observó la presencia de algunas ondas de modos baroclínicos más altos (segundo modo), relacionados con el inicio de eventos El Niño.

Además de la variabilidad estacional, en el Pacífico Ecuatorial Este ocurre un ciclo anual por el encuentro de los vientos Alisios del Noreste y del Sureste que forma la denominada ZCIT. No es un cinturón continuo alrededor de la Tierra, pero se

encuentra sobre un surco continuo de bajas presiones (surco intertropical) (Hastenrath, 1996).

La ZCIT migra acompañando la posición zenital del sol, variando su posición según la estación del año y la distribución de los continentes y los océanos (Fig. 1). En el verano boreal (junio) avanza hacia el norte, mientras que en el invierno (diciembre) se desdobra en dos ramas en dirección sur. Esta convergencia

superficial va acompañada de un movimiento ascendente del aire (convección), que produce la formación de nubes densas y la presencia de fuertes lluvias en la región por donde pasa (Sánchez-Reus & Zabaleta-Vidales, 1972).

En la región Pacífico Este, al Norte del Ecuador, se encuentra CPC. Una región de calma ecuatorial, donde reinan las bajas presiones y se producen grandes corrientes de aire ascendente, alimentadas por los vientos Alisios de ambos hemisferios, que intensifican la temperatura ambiente, la humedad y las precipitaciones (Sánchez-Reus & Zabaleta-Vidales, 1972). A esta región se le conoce también como la Baja Anclada de Panamá (Panama Bight), que incluye a Panamá, Colombia y Ecuador.

Rodríguez-Rubio y Schneider (2003) describen que en esta región se presenta una circulación anticiclónica en verano, con una corriente costera hacia el sur, mientras que en invierno la circulación se invierte y se hace ciclónica, causando una corriente costera hacia el norte y una surgencia oceánica en su centro. El cambio estacional del campo de los vientos, causado por la migración meridional de la ZCIT desde los 8-10° N en verano a los 2° N aproximadamente en invierno, controla la circulación en la CPC. En verano los vientos Alisios del Sureste dominan la región, pero en invierno los Alisios del Noreste, provenientes del Atlántico Norte, ingresan al área por el istmo de Panamá (Fig. 1).

El sistema de circulación oceánica que se tiene identificado en la región Pacífico Ecuatorial Este es, en forma general, de componente oeste, exceptuando a la Contracorriente Ecuatorial, CCE, que fluye en sentido opuesto.

La CPC recibe por el este, entre los 4° y los 11° N, la influencia de la CCE, proveniente del Pacífico Oeste y Central. Su velocidad, posición y ancho varían con la estación (Zuta y Guillén, 1970). Por medio de esta corriente marina de aguas superficiales se manifiesta, periódicamente, el fenómeno de interacción oceánica y atmosférica conocido como El Niño (Sánchez-Reus & Zabaleta-Vidales, 1972).

Por el sur, la Corriente de Humboldt aporta a la CPC aguas frías, de mayor salinidad y concentración de nutrientes, la cual se intensifica entre julio y septiembre, época en que la ZCIT migra hacia el norte (Andrade, 1992). Una corriente cálida de dirección sur, llamada Corriente del Niño (de Panamá), que suele manifestarse en pleno invierno boreal (hacia Navidad, de donde deriva su

nombre), entra por el norte descendiendo hasta los 12° S ([Sánchez-Reus & Zabaleta-Vidales, 1972](#)).

Así, la CPC está siendo influenciada por la migración de la ZCIT, la Baja Anclada, los sistemas de corrientes oceánicas ecuatoriales que ingresan a la región y por anomalías climáticas como los eventos ENOS. Esta variabilidad climática y oceánica afecta la región costera de Colombia, influyendo sobre el tiempo y el clima ([Eslava-Ramírez, 1994](#)); especialmente en la temperatura del aire y la precipitación, ocasionando diferentes zonas tipificadas o influenciadas cada una

por sus factores de latitud, configuración del relieve y demás características fisiográficas y de la distribución de los otros elementos meteorológicos.

La bahía de Tumaco (Fig. 2) se encuentra en la zona sur del litoral Pacífico colombiano. Hasta ahora se le ha definido una estacionalidad termohalina con una época de aguas superficiales frías, de febrero a abril, y aguas más cálidas el resto del año. Esta estacionalidad ha sido relacionada con la migración de la ZCIT ([CCCP, 2001a](#)).

El propósito del presente estudio es describir las variaciones climáticas y oceanográficas que se dan en esta bahía y relacionarlas con eventos de escala global, como las ondas ecuatoriales, la migración de la ZCIT, las corrientes oceánicas, la variación estacional de la Baja Anclada y los eventos océano-atmosféricos ENOS. Para lograr este objetivo desde 1999 se han realizado mediciones quincenales de temperatura, salinidad y nutrientes del mar, en una estación ubicada a 10 MN de la costa de Tumaco; y, desde 1992, se adelantan monitoreos diarios de los parámetros meteorológicos, la TSM y el NMM del litoral.

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Tumaco, ubicada en el extremo sur del litoral Pacífico colombiano, entre las latitudes 1° 45' N y 2° 00' N y las longitudes 78° 30' y 78° 45' W, comprende un área aproximada de 350 km² y profundidades entre 2 y 35 m ([Tejada, 2002](#)). Presenta un régimen mareal semidiurno con una amplitud máxima de 4 m ([Peña-Gómez, 1995](#)). Esta bahía se localiza en la planicie deltáica de Nariño, enmarcada, en primer lugar, dentro de un ambiente litoral relacionado con la dinámica marina; en segundo lugar, por un ambiente fluvial caracterizado por el desarrollo de los deltas de los ríos Mira y Patía, con un ambiente morfoestructural de colinas en constante interacción ([Tovar, 2002](#)).

Una de las características sobresalientes del área de estudio es la presencia de una gran cantidad de ríos cortos pero muy caudalosos, debido a la alta precipitación. De ellos se identifican cinco grandes cuencas importantes; la zona de manejo de esteros; la desembocadura del brazo norte del río Mira, localizada en su parte sur; la cuenca suroriental, formada por los ríos Rosario, Mejicano, Caunapí, Gualajo e Imbilpí; la cuenca oriental, conformada por los ríos Chagüí,

Tablones, Colorado y Curay, y la cuenca norte que corresponde al sector de bocas de Curay y la desembocadura del río Patía (Tejada, 2002). De los ríos antes mencionados se destacan el Mira, el Rosario y el Patía.

Durante el año se presenta deficiencia de agua únicamente en los meses de octubre y noviembre, con niveles relativamente bajos, y un exceso en los niveles de agua el resto del año (Tovar, 2002). Un estudio preliminar realizado para el río Mira, entre 1981 y 1995, mostró la variabilidad del caudal con los máximos en abril y mayo, lo cual coincide con las épocas de máximas lluvias en la región (Piñeros, 2002).

La bahía de Tumaco se caracteriza por tener un clima tropical húmedo, presentando durante el año un sistema de comportamiento definido en dos semestres; el primero regulado por parámetros meteorológicos y un segundo que presenta mayores variaciones. Las lluvias son de tipo monomodal, considerándose el invierno en el primer semestre, con su mayor intensidad en el segundo trimestre, y la época de verano el resto del año. Las máximas temperaturas ambiente se presentan entre abril y mayo, con valores entre 26.1 y 26.3° C, en la época seca los valores disminuyen a 25.7° C (CCCP, 2002a).

El régimen climático del área se encuentra bajo la influencia de los desplazamientos sur-norte-sur sobre la franja Ecuatorial de la ZCIT (Fig. 1); la cual regula, en asociación con los sistemas pluviogénéticos regionales, la climatología de la región (CCCP, 2002a). También ejercen influencia fenómenos de escala local como los procesos convectivos e intercambios continente-océano-continente (brisas del mar).

El área está influenciada durante todo el año por vientos del sur y suroeste, variando su intensidad. En enero y febrero predomina el viento del suroeste; durante marzo se observan vientos variables, con predominio del oeste y oeste-sur-oeste y algunas interacciones con vientos del este; en abril y mayo ocurre un incremento en la velocidad, con rangos entre 7 y 10 nudos para vientos del oeste; de julio a agosto se observan dos componentes predominantes del oeste y del oeste-noroeste, con velocidades promedio de 4 a 6 nudos; en septiembre el comportamiento es similar, pero con predominio de vientos del oeste; en noviembre y diciembre predominan los vientos del oeste, con velocidades que oscilan entre 1 y 6 nudos, con menor proporción de vientos del noroeste-norte.

La estación hidrometeorológica No. 5, ubicada a 10 MN costa afuera de Tumaco (Fig. 2), presenta una profundidad aproximada de 150 m. Por su posición, esta zona está más influenciada por procesos oceánicos que costeros.

METODOLOGÍA

Durante las salidas quincenales a la estación No. 5 (02° 00' N y 78° 51' W) se midieron la temperatura y salinidad con 2 CTD's SBE-19, hasta una profundidad

de 100 m. A estos equipos de medición oceanográfica no se les realizó calibraciones debido a que estaban nuevos.

Con los muestreos realizados desde julio de 1999 se generaron perfiles verticales de temperatura y salinidad, los cuales se elaboraron en la primera etapa del análisis. Para mostrar su variación temporal se calcularon promedios de las dos salidas mensuales, con los cuales se elaboraron series de tiempo. Para complementar la información faltante se utilizó el método de interpolación [Kriging](#) y se realizó la presentación gráfica con el programa Surfer.

Además, se tomaron muestras de agua a 0, 10 y 20 m con botellas Niskin, para obtener información de nutrientes. Estas se almacenaron en botellas Nalgene de 250 ml y se congelaron hasta su análisis en laboratorio, de acuerdo con la técnica de [Parsons et al., \(1984\)](#).

Para el presente estudio se utilizó información meteorológica recolectada desde 1992 de la estación climatológica principal (Fig. 2), ubicada en las instalaciones del CCCP (01° 48' N y 78° 46' W).

La metodología utilizada para la obtención de datos climatológicos se relacionó a métodos estándares regidos por la Organización Meteorológica Mundial, OMM. Con la información obtenida se lograron las gráficas del comportamiento diario de cada uno de los parámetros meteorológicos, el promedio mensual, así como su respectiva anomalía con relación al promedio histórico derivado de la información acopiada para esta zona desde 1960.

Se tomaron datos de TSM y NMM, desde 1980, con mediciones cada tres horas. El nivel del mar fue establecido por un mareógrafo automático Leupold & Stevens A-35. Los procedimientos de análisis fueron los determinados por la UNESCO en 1984 -1985. La TSM fue tomada con un termómetro de cazoleta (10 a 50° C).

RESULTADOS

El comportamiento presentado por los parámetros mostró una relación inversa entre la temperatura (Fig. 3) y la salinidad (Fig. 4). La temperatura disminuyó conforme aumentaba la profundidad, a su vez, la salinidad se incrementó.

En ambos parámetros, durante un ciclo anual, se evidenció una capa homogénea (isotermal e isohalina) que, según la época del año, osciló entre 10 y 30 m de espesor. La temperatura de esta capa fue en promedio de 27° C y la salinidad varió según la época de 31 a 32.

Asímismo, se observó por debajo de la capa homogénea la presencia de fuertes gradientes de temperatura y salinidad (termoclina y haloclina), que al igual que las capas homogéneas presentaron una variabilidad durante el año de 26 a 20° C y de 32.2 a 34, respectivamente, aproximadamente a 20 m. Siguiendo este

comportamiento durante un ciclo anual se identificaron dos épocas, marcadas por la características termohalinas: la primera, 'fase fría', período comprendido por los meses de febrero, marzo y principios de abril; la segunda, 'fase cálida', va desde mediados de abril hasta enero.

La característica principal de la primera época es la desaparición de la capa homogénea superficial y el ascenso de la termoclina y haloclina hacia la superficie, ocupando los primeros 20 m, debido al afloramiento de aguas subsuperficiales. Durante esta época la TSM se mantuvo alrededor de 26° C y la temperatura mínima encontrada a 100 m fue de 13.6° C (Fig. 3). La salinidad superficial fue de 30.94 y a 100 m de 34.94 (Fig. 4).

Asímismo, durante estos meses la concentración promedio de nutrientes (Fig. 5) aumentó, encontrándose los máximos de nitritos (0.2 μM), nitratos (4 μM), fosfatos (1.2 μM), silicatos (10 μM) y amonio (2.3 μM).

En el segundo período se observó una capa isotermal con mayores temperaturas en los primeros 30 m de profundidad, la termoclina y haloclina estacional se ubicaron hasta los 50 m. La TSM se mantuvo alrededor de 27° C y los menores valores a 100 m fueron de 14° C. La salinidad superficial fue en promedio de 30.32 y a 100 m fue de 34.95. Los nutrientes (Fig. 5) no presentaron variación significativa, siendo en la mayoría de meses muy bajos o no detectables (ND) por el método utilizado.

Durante el segundo semestre de 1999 la estructura térmica sobre la estación fija de Tumaco evidenció la presencia del evento frío 'La Niña', identificado por la disminución de la TSM (Fig. 3); debido al desplazamiento de aguas de la Corriente de Humboldt (Costera de Perú), por influencia de la intensificación de los vientos del sureste que registraron promedios superiores a 5 ms^{-1} sobre el área de estudio (CCCP, 2000). Estas condiciones fueron observadas hasta marzo de 2000 (Boletín Meteorológico No. 38, CCCP 2000).

Desde julio hasta octubre de 1999 la capa isotermal se ubicó hasta los 30 m, encontrando una TSM de 26.7° C, descendiendo la temperatura hasta encontrar anomalías de -0.6° C con respecto al promedio calculado; la termoclina fue encontrada entre los 30 y 50 m, y la isoterma de 20° C a 38 m de profundidad. Durante noviembre y diciembre la TSM descendió aún más, hasta los 26.4° C, con anomalías negativas de hasta -1.7° C (Fig. 3).

La salinidad durante el segundo semestre de 1999 (Fig. 4) presentó los valores superficiales más bajos del período de estudio, en promedio fue de 29, con tendencia a disminuir hacia final del año. Durante esta época, los valores de fosfato fluctuaron entre 2.5 y 0.04 μM , el amonio entre 4.1 y 0.57 μM , los nitritos entre 0.2 y 0.02 μM , los nitratos entre 0.76 y 0.08 μM , y los silicatos entre 50.15 y 5.8 μM (Fig. 5).

A lo largo de 1999 las anomalías del NMM estuvieron entre -5 y -25 cm, manteniéndose estas condiciones durante el año 2000, pero menos intensas (-5 a -15 cm) (Fig. 6). La TA mantuvo anomalías negativas de -0.5° a -1.3° C durante 1999 y -0.5° C durante el 2000 (Fig. 7). Asimismo, se observó un déficit de lluvia, con algunos casos anomalías negativas de hasta -100 mm (Fig. 8).

Los nutrientes alcanzaron sus concentraciones medias más altas del período de estudio, los últimos meses de 1999 y principios del 2000 (Fig. 5), esto en concordancia con las bajas temperaturas superficiales y el ascenso de las isotermas a la superficie (Fig. 3).

A partir del segundo semestre del año 2000 se observó una tendencia hacia condiciones de normalidad, con algunas anomalías negativas en la TA (Fig. 7), hasta -0.6° C y el NMM de hasta -8 cm (Fig. 6) y otras positivas en la humedad relativa (Hr) hasta de $+6\%$ (Fig. 9).

En el transcurso de este año predominó el viento de componente oeste y oeste-sur-oeste y las velocidades se mantuvieron en el margen de los 4 a 6 nudos, con excepción de algunos meses como lo fueron agosto y septiembre, donde se hizo más notorio el incremento en la velocidad de este parámetro.

A mediados de abril de 2001 se evidenció la presencia de aguas cálidas a nivel superficial y el hundimiento de la termoclina en la costa colombiana y a lo largo del Pacífico Ecuatorial. Al finalizar el 2001 el Pacífico Central Ecuatorial era 0.5° C más cálido, pero las condiciones se mantuvieron más frías de lo normal al este, sugiriendo la culminación del evento frío 'La Niña' sobre el Pacífico Central y la tendencia hacia condiciones de normalidad para la CPC.

Dentro del período estudiado (1999-2002) los meses de mayo han presentado los mayores valores en promedio de TSM (27.8° C), TA de (26.4° C), NMM (3.79 m) precipitación (393 mm) y Hr (86%) (Fig. 3, 7, 6, 8 y 9).

Desde septiembre de 2002 se apreció la isoterma de 15° C más profunda (Fig. 3), ubicándose por debajo de los 100 m; asimismo, el NMM (Fig. 6) aumentó en esta época 10 cm por encima del promedio calculado del mes.

Según los promedios mensuales de TSM, durante el primer semestre de 2002, se presentaron anomalías significativas tanto positivas como negativas durante los meses de febrero, marzo y abril con 0.6 , -0.6 y -0.5° C, respectivamente, lo que indica que este parámetro en el área de estudio se encontraba bajo condiciones variables. Durante el segundo semestre de 2002 las anomalías fueron mínimas oscilando entre -0.2 a $+0.1^{\circ}$ C.

Para el primer semestre del año 2002 la TA presentó un comportamiento similar al de la TSM, registrando oscilaciones por encima de los promedios históricos (anomalías mensuales de -0.1 C a $+0.6^{\circ}$ C), esto se acentuó en el mes de mayo donde se presentaron temperaturas relativamente altas que alcanzaron valores

máximos de 28° C (Fig. 7). En el segundo semestre se registraron disminuciones con oscilaciones dentro de los promedios entre 25 y 26.5° C. Durante diciembre de 2002 se registró un promedio mensual de 25.8° C, presentando una anomalía positiva de +0.3° C con relación al valor histórico mensual.

La precipitación durante el año 2002 (Fig. 8) presentó un comportamiento regular en sus registros, determinada por tener una época relativamente húmeda durante el primer semestre, registrando las anomalías positivas más altas en febrero, con 152.8 mm por encima del valor medio mensual (235 mm), y mayo con una anomalía de +282 mm con relación al promedio mensual de 295 mm.

Para el segundo semestre del 2002 se advierte una marcada disminución en los registros diarios de precipitación, considerándose un período comparativamente seco, donde se destacan agosto y septiembre con un déficit considerable en la precipitación ya que la sumatoria total por mes fue de 2.0 mm y 76.6 mm, respectivamente. Lo anterior concuerda con el comportamiento presentado por este mismo parámetro para los mismos meses en el 2001, siendo la mayoría de días sin precipitación. Durante diciembre, se registró un total de precipitación de 401.5 mm, cuando el promedio histórico del mes fue de 197.4 mm (Fig. 8).

DISCUSIÓN

Se ha investigado la variabilidad de las condiciones oceanográficas y meteorológicas de la bahía de Tumaco a partir de mediciones de temperatura, salinidad y nutrientes a 10 MN del litoral; y de TSM, NMM, TA, precipitación y humedad relativa tomados en la costa. El análisis se ha enmarcado entre julio de 1999 y febrero de 2003. Este período es de especial interés por varias razones: la ocurrencia de los eventos La Niña 1999-2000 y El Niño 2002-2003, que causaron efectos sobre el litoral Pacífico colombiano y el resto del país; además de la gran cantidad de información disponible sobre dichos eventos, y de los últimos adelantos científicos publicados. Durante esta misma época se estandarizaron los métodos de medición de temperatura y salinidad, y se contó con equipos calibrados.

Los resultados documentan la relación inversa existente entre la temperatura y salinidad del mar, con las temperaturas más bajas y las salinidades más altas entre febrero y principios de abril, contrario a los registros del período de finales de abril a enero.

Las características registradas a principio de los años 2000, 2001 y 2002, sobre la estación fija a 10 MN de Tumaco son: ascenso de la termoclina y haloclina cerca de la superficie (0 a 20 m), con el afloramiento de aguas frías y salinas y una concentración elevada de nutrientes. Los meses de marzo y abril son los más húmedos (89%), con altas precipitaciones y aumentos graduales en la TA.

La TSM en el Pacífico Ecuatorial Este se encuentra balanceada por tres procesos importantes: la intensidad de las surgencias; la velocidad de las corrientes hacia el oeste, que traen aguas frías de las costas de Ecuador y Perú, y los flujos de calor a lo largo de la superficie ecuatorial (Stewart, 2002). La evaporación, precipitación, el flujo de calor y los aportes de los ríos son, entre otros, los principales factores de la distribución de la salinidad superficial del océano.

Durante la fase fría los vientos predominantes en la bahía de Tumaco han sido del suroeste y oeste, lo cual no sería favorable para la activación de afloramientos costeros al norte del Ecuador, pero que de manera contraria producen una fuerte surgencia ecuatorial y costera en el hemisferio Sur, con temperaturas promedio de alrededor de 24° C, las cuales forman la denominada 'lengua fría ecuatorial' que

se extiende hacia el oeste desde las costas de Perú hasta la línea de cambio de fecha (Kessler *et al.*, 1998). Las surgencias en el Pacífico Este se centran al sur del Ecuador, debido a que los vientos Alisios del Sureste forzan las corrientes, resultando en divergencia al sur y un flujo hacia el norte que cruza el Ecuador, y convergencia al Norte (Philander y Delecluse, 1983).

Las aguas de surgencias desplazan la región de TSM más cálidas al norte del Ecuador, coincidente con la ZCIT. El frente donde se encuentran las aguas frías y cálidas produce uno de los gradientes de temperatura más marcados, con un máximo estacional que sobrepasa 1° C por grado de latitud (Koutavas y Lynch-Stieglitz, 2002).

La dinámica de este frente está asociada a la interacción océano-atmósfera que regula la intensidad de las surgencias de manera estacional, interanual y a escalas de tiempo mayores. Por lo tanto, la dinámica entre la ZCIT y la 'lengua fría' son de gran importancia para la circulación ecuatorial en el Pacífico Tropical y por lo tanto en el clima global (Koutavas y Lynch-Stieglitz, 2002)

La ZCIT durante estos meses se encuentra en la parte sur del Pacífico colombiano. La circulación oceánica, calculada a partir de un modelo hidrodinámico para la CPC (Tchantsev, 1999), muestra el período de enero a marzo con predominio de corrientes provenientes del sur. Esto indica que las aguas frías, producto de las surgencias costeras al sur del Ecuador, son arrastradas hacia el norte, ocupando la zona de aguas cálidas en la región sur de la CPC, en especial de la bahía de Tumaco.

Posterior al enfriamiento observado durante el primer trimestre de los años estudiados, en el área de estudio se han presentado los máximos picos de TSM, TA, Hr, precipitación y NMM durante el mes de mayo (Fig. 3, 7, 9, 8, 6).

Observando las condiciones a escala global (Fig. 10), se ha identificado que durante los meses de marzo a mayo de 2000 a 2002 la TSM aumenta alrededor de los 80 a 90° de longitud Oeste, con anomalías de hasta +2° C, desplazándose hacia las costas de Sudamérica. Estas anomalías producen un ligero aumento en

los parámetros oceanográficos y meteorológicos en las costas suramericanas, efectos también son presentados en la bahía de Tumaco. [Hayes y Halpern \(1984\)](#) encuentran una propagación hacia el este, entre los 110 y 91° W (islas Galápagos), a partir de información de corrientes y nivel del mar en 1980-1981. Sus datos mostraron ondas Kelvin ecuatoriales del primer modo baroclínico, generadas por vientos del oeste, en el Pacífico Occidental, las cuales ocurrieron en la primavera boreal de cada año.

El flujo hacia el este, confinado a los primeros 100 a 150 m ha sido denominado la Corriente Ecuatorial Este (EEC) ([Delcroix et al., 1992](#); [Johnson et al., 2000](#)). Comparaciones con los cambios en los vientos superficiales indicaron que la EEC es dirigida por vientos anómalos del oeste sobre el Pacífico Ecuatorial Occidental ([Cronin et al., 2000](#)).

Del análisis de [Kutsuwada y McPhaden \(2002\)](#) se puede identificar una relación entre las ondas Ecuatoriales de Kelvin del primer modo baroclínico, que ocurren como respuesta oceánica al forzamiento y calentamiento intraestacional del viento, que se presenta en el Pacífico Ecuatorial Este y la bahía de Tumaco en la primavera boreal. Dichas investigaciones documentan la ocurrencia de ondas Kelvin que se propagan por el Pacífico Ecuatorial Este, las cuales tienen un forzamiento remoto. Esto produce variaciones en las corrientes con períodos de dos a tres meses, y velocidades de fase de 2.6 ms^{-1} . Estos resultados son consistentes con estudios anteriores sobre el tema ([Boulanger y Menkes 1999](#); [McPhaden y Yu 1999](#)).

Durante 1999 y primer trimestre de 2000, las condiciones océano-atmosféricas sobre la estación 5, evidenciaron la presencia de un evento frío, 'La Niña' (Fig. 2), coincidiendo esto con las gráficas de la TSM sobre el Pacífico Ecuatorial (región Niño 3), donde se registraron anomalías más intensas (-2 a -3° C) durante 1999 ([Boletín de Diagnóstico Climático No. 00/10, 2000](#)).

Este evento La Niña ocasionó en el área de estudio descensos de la TSM en el orden de los 26 a 26.5° C (Fig. 2) y anomalías negativas de hasta -25 cm en el NMM, debido al arrastre de aguas superficiales producto de las surgencias costeras de Perú y Ecuador hacia el Norte, por intermedio de la intensificación de los Alisios de Sureste. La estructura vertical termohalina mostró una acumulación de las isotermas e isohalinas (Fig. 3 y 4); los nutrientes mostraron una alta concentración superficial (Fig. 5), como consecuencia de la intrusión de aguas provenientes de sur.

Entre diciembre de 2001 y enero de 2002 se inicia una evolución más rápida hacia condiciones El Niño (Fig. 10), las cuales se establecieron en abril-junio de 2002, con valores de TSM de más de +0.5° C por encima del promedio, tomando tres meses consecutivos, en la región Niño 3.4 (120 W - 170W y 5° N - 5° S).

A diciembre de 2002 la temperatura subsuperficial en el océano Pacífico Ecuatorial Central y Oriental presentaba una anomalía positiva de +2° C, habiendo

iniciado su arribo a las costas de Sudamérica ([Boletín de Diagnóstico Climático NOAA, Diciembre 2002](#)).

En los últimos muestreos realizados en el 2002 en las costas de Tumaco se observó un incremento en la temperatura, desapareciendo de los primeros 100 m de profundidad la isoterma de 15° C, la cual se había venido presentando en los últimos tres años, para la época de agosto a febrero (Fig. 3). La termoclina se apreció más profunda durante diciembre de 2002. Además, se presentaron anomalías positivas en el NMM de +10 cm hasta +17 cm, de septiembre a noviembre (Fig. 6). Para diciembre, de este mismo año, la TA registró un promedio mensual de 25.8° C, presentando una anomalía positiva de +0.3° C (Fig. 7); se acumuló un total de precipitación de 401.5 mm, 204 mm por encima del promedio del mes (Fig. 8), y la Hr presentó una variación de +3% (Fig. 9).

Las condiciones atmosféricas y oceanográficas en la bahía de Tumaco, durante el período estudiado (1999-2002), han sido relacionadas con la migración de la ZCIT, la intensificación de los vientos Alisios del Sureste y Noreste, las ondas Kelvin Ecuatoriales del primer modo baroclínico, los sistemas de corrientes oceánicas y frentes ecuatoriales, y los eventos ENOS.

Durante los primeros meses del año, cuando la ZCIT está en su posición sur, aguas frías y salinas producto de las surgencias costeras de Perú y Ecuador desplazan hacia el norte las aguas cálidas propias de la corriente cálida El Niño (Panamá), modificando las características termohalinas y la concentración de nutrientes en la bahía de Tumaco, presentándose un período relativamente frío. En mayo del período estudiado se encontraron los valores más altos de TSM, TA, NMM, Hr, y precipitación, debido al efecto que produce la presencia de ondas Kelvin Ecuatoriales del primer modo baroclínico, que aparecen cada año entre marzo y mayo, desplazándose desde los 120° W hacia la costa de Sudamérica, con anomalías máximas de TSM de hasta +2° C, ubicadas entre las longitudes 90 y 80° W.

Las características presentadas durante 1999 hasta mediados del año 2000 en Tumaco son de un evento frío, 'La Niña', evidenciado por la disminución de la TSM, debido al fortalecimiento de los vientos Alisios del Sureste. Esta condición afectó la precipitación, produciendo un déficit hídrico en la región; además de una anomalía negativa en el NMM y la TA, dichas condiciones favorecieron la concentración de nutrientes.

A partir del segundo semestre del 2000 las condiciones descritas tuvieron una tendencia hacia la normalidad. Hacia finales del 2002 se evidenció una variación significativa en la estructura vertical de temperatura, al observarse el hundimiento de la isoterma de 15° C por debajo de los 100 m de profundidad y el aumento del NMM. Estas condiciones fueron los primeros indicadores de la presencia de un fenómeno El Niño en la bahía de Tumaco, evento que fue identificado desde abril por la persistente anomalía positiva de TSM de más de +1° C en la región Niño 3.4

(Pacífico Ecuatorial Central) y por los valores negativos del Índice de Oscilación Sur, IOS.

La etapa madura de El Niño se observó en el área de estudio durante diciembre del 2002, por las anomalías positivas de la TA, la TSM y la precipitación, así como en la profundización de las isotermas superficiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, C. 1992. Movimiento geostrofico en el Pacífico colombiano. Boletín Científico CIOH. Cartagena : CIOH, Colombia, No. 12. Pp.23-38.

Boullanger, J. P., y C. Menkes, 1999. Long equatorial wave reflection in the Pacific Ocean from TOPEX /Poseidon data during the 1992-1998 period. *Climate Dyn.*, 15, pp 205-225.

Busalacchi, A. J. and J. J. O'Brien, 1980. The seasonal variability in the tropical Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 10, pp1929–1952.

Comisión Permanente del Pacífico Sur. 2003. Boletín Alerta Climática (BAC). CPPS. No. 106 a 148. Julio 1999-enero 2003.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2003. Boletín Meteomarinero Mensual No. 28 a 70. Julio 1999 a enero 2003. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2000. Modelo Matemático de la Dinámica Marina del Pacífico Colombiano y Monitoreo de la Alteración ENOS. Informe técnico. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2001a. Modelo Hidrodinámico para la Ensenada de Tumaco con Capacidad para Cálculo de Transporte de Contaminantes y Monitoreo de la Alteración ENOS. Informe técnico. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia, 76 pp.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2001b. Estudio de las Condiciones Oceanográficas y Biológicas en la Cuenca del Pacífico Colombiano - 2001. Informe técnico. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia, 91 pp.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2002a. Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. Centro Control Contaminación del Pacífico. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia, 107 pp.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2002b. Estudio de las Condiciones Oceanográficas y Biológicas en la Cuenca del Pacífico Colombiano – 2002. Informe técnico. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia, 97 pp.

Climate Prediction Center. Boletín de Diagnóstico Climático de la NOAA. Near Real Time Analysis Ocean-Atmosphere Nos. 00/3, 00/6, 00/10. US Department of Commerce NOAA-NWS-NCEP.

Climate Prediction Center. Boletín de Diagnóstico Climático mensual de la NOAA/NCEP enero 2002 a febrero 2003. www.elnino.noaa.gov

Cronin, M. F., y R. H. Weisberg, 2000. Wind forced reversing jets in the western equatorial Pacific. *J. Oceanogr.*, 30, pp. 657-677.

Delcroix, T., G. Eldin, M. H. Radenac, J. Toole, y E. Firing, 1992. Variations of the western equatorial Pacific Ocean, 1986-1988. *J. Geophys. Res.*, 97, pp. 5423-5445.

Eslava Ramírez, J. A. 1994. Climatología del Pacífico Colombiano. Academia Colombiana de Ciencias Geofísicas Colección Eratóstenes No. 1, Editorial Gente Nueva, Bogotá, 79 pp.

Gutzler, D. & R. A. Madden. 1989. Seasonal variations in the spatial structure of intraseasonal tropical wind fluctuations. *J. Atmos. Sci.*, 46, pp. 641-660.

Hastenrath, S. 1996. Climate Dynamics of the tropics. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 489 pp.

Hayes, S. P. y D. Halpern. 1984. Correlation of current and sea level in the Eastern equatorial Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, pp. 811-824.

Johnson, G. C., M. J. McPhaden, G. D. Rowe, y K. E. McTaggart. 2000. Upper equatorial Pacific Ocean current and salinity variability during the 1996-98 El Niño-La Niña cycle. *J. Geophys. Res.*, 105, pp.1037-1053.

Kessler, W. S. 1990. Observations of long Rossby waves in the northern tropical Pacific. *J. Geophys. Res.*, 95, 5183–5217.

Kessler, W. S. and J. P. McCreary. 1993. The annual wind-driven Rossby wave in the subthermocline equatorial Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 23, pp.1192–1207.

Kessler, W. S. and M. J. McPhaden. 1995. Forcing of intraseasonal Kelvin waves in the equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.* 10, 613-10, 631.

Kessler, W. S., L. M. Rothstein y D. Chen. 1998. The Annual Cycle of SST in the Eastern Tropical Pacific, Diagnosed in an Ocean GCM. *Journal of Climate*. Vol. 11: pp. 777- 799.

Kindle, J. C., 1979. Equatorial Pacific Ocean variability-Seasonal and El Niño time scales. Ph.D. dissertation, The Florida State University, 104 pp.

Koutavas, A. y J. L. Lynch-Stieglitz, 2002. Glacial-Interglacial Pattern of Variation in the Eastern Equatorial Pacific Cold Tongue-ITCZ Complex. Conferencia en: The Hadley Circulation: Present, past and future. International Pacific Research Center. Honolulu. HI, Abstract.

Knauss, J.A, 1960. Measurement of the Cromwell Current. *Deep Sea Research* 6: pp. 265-286.

Kutsuwada, K., y M. J. McPhaden, 2002. Intraseasonal Variations in the upper equatorial Pacific Ocean prior and during the 1997-98 El Niño. *J. Oceanogr.*, pp. 1133-1149.

McPhaden, M. J. y B. A. Tarf 1988. Dynamics of seasonal and intraseasonal variability in the Eastern equatorial Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, pp. 55-67.

McPhaden, M. J. y X. Yu. 1999. Equatorial waves in the 1997-98 El Niño, *Geophys. Res. Lett.*, 26, pp. 2961-2964.

Meyers, G. 1979a. Annual variation in the slope of the 148C isotherm along the equator in the Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 9, pp. 885–891.

Meyers, G. 1979b. On the annual Rossby wave in the tropical North Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 9, pp. 663–674.

Minobe, S. and K. Takeuchi. 1995. Annual period equatorial waves in the Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 100 (C9), pp. 18 379–18 392.

Parsons, T. R., Y. Maita & C. M. Lalli. 1984. A Manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. U. K. 173 pp.

Peña-Gómez, J. J. 1995. Un modelo de caja aplicado al transporte de partículas y tiempo de residencia de las aguas del sector del Pindo, Ensenada de Tumaco. *Boletín Científico CCCP*. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia, pp. 5-28.

Philander S. G. and P. Delecluse. 1983. Coastal currents in low latitudes (with application to the Somali and El Niño currents). *Deep-Sea Res.*, 30, pp. 887–902.

Piñeros, A. 2001. Caudales del río Mira. Informe técnico. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia.

Rodríguez-Rubio, E. y W. Schneider. 2003. On the seasonal circulation within the Panama Bight derived from satellite observations of wind, altimetry and sea Surface temperature. *Geophysical Research Letters*, vol. 30, NO. 7, 1410, 10.1029/2002GL016794.

Sánchez Reus, G. y C. Zabaleta-Vidales. 1972. Curso de meteorología y oceanografía. 2ª. Edición de la Subsecretaría de la Marina Mercante. Madrid. 498 pp.

Stewart, R. H. 2002. Introduction to physical Oceanography. Texas A & M University. Spring Edition, 340 pp.

Tchantsev, V. 1998. Algunos aspectos de Investigación de la formación del régimen oceanográfico en el Pacífico Colombiano. Boletín Científico CCCP, No. 7. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia.

Tejada, C. 2002. Clima marítimo de la bahía de Tumaco, un caso de aplicación del sistema integrado de zona costera para Colombia. Cantabria, 44 pp. Tesis de maestría (MsC en ciencias 'Tecnológicas para la Gestión de la Costa). Universidad de Cantabria. Grupo de Investigación en Ingeniería Oceanográfica y de Costas.

Tomczak, M. y J. S. Godfrey 1994. *Regional Oceanography: an Introduction* Pergamon, Oxford, 442 pp.

Tovar, A. 2002. Variación de la línea de Costa entre los años 1958 y 2000 en la Ensenada de Tumaco, Departamento de Nariño. Tumaco, 132 p. Trabajo de Grado (Ingeniero Geólogo). Universidad EAFIT. Departamento de Geología.

UNESCO. 1985. Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume I. Basic Procedures. IOC Manuals and Guides No. 14, 83 pp.

UNESCO. 1994. Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume II. Emerging Technologies. IOC Manuals and Guides No. 14, 72 pp.

Yang, Y. J., T. Y. Tang, and R. H. Weisberg. 1997. Basin-wide zonal wind stress and ocean thermal variations in the equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 102, 911–927.

Yu, X y M. J. McPhaden 1998. Seasonal Variability in the Equatorial Pacific. *J. Phys. Ocean.*, 29, pp. 925-947.

Yu, X y M. J. McPhaden 1999. Dynamical analysis of seasonal and interannual variability in the equatorial Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, pp. 2350-2369.

Zuta, S. y O. Guillén, 1970. Oceanografía de las aguas costeras del Perú. Boletín Instituto del Mar del Perú Volumen 2 Numero 5: pp. 157-324

Páginas de Internet utilizadas:

www.efis.ucr.ac.cr/capituloVII.pdf. Circulación Oceánica.

FIGURAS

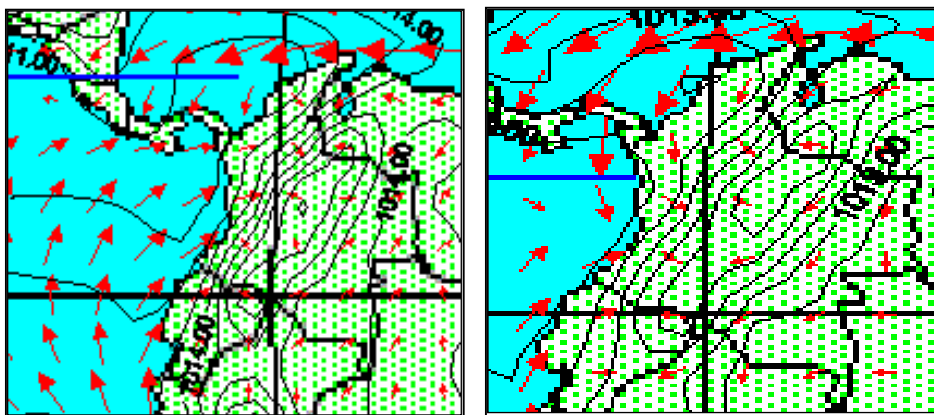


Figura 1. Campos de Presión Atmosférica en mBar y dirección del viento predominante durante el mes de junio y diciembre en la CPC. La línea azul indica la posición de la ZICIT (CCCP, 2002a).

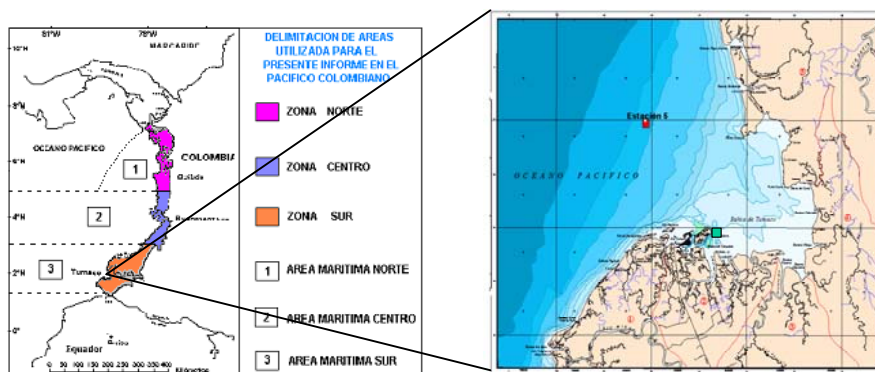


Figura 2. a) Cuenca del Pacífico Colombiano y división por zonas b) Bahía de Tumaco y posición de la estación No. 5 a 10 Mn de la costa (cuadro rojo) y de la estación costera (cuadro verde), (CCCP, 2002a).

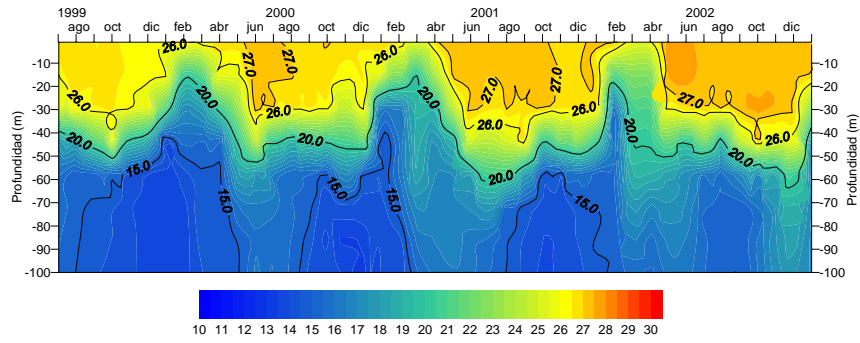


Figura 3. Distribución vertical de temperatura ($^{\circ}$ C) a 10 Mn de la costa de Tumaco, julio 1999 a enero 2003.

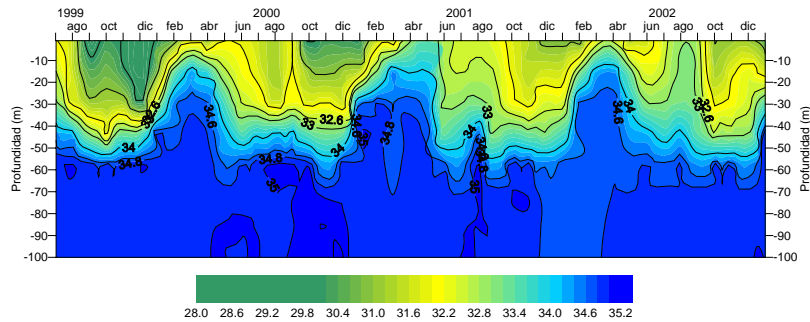


Figura 4. Distribución vertical de salinidad (ups) a 10 Mn de la costa de Tumaco, julio 1999 a enero 2003.

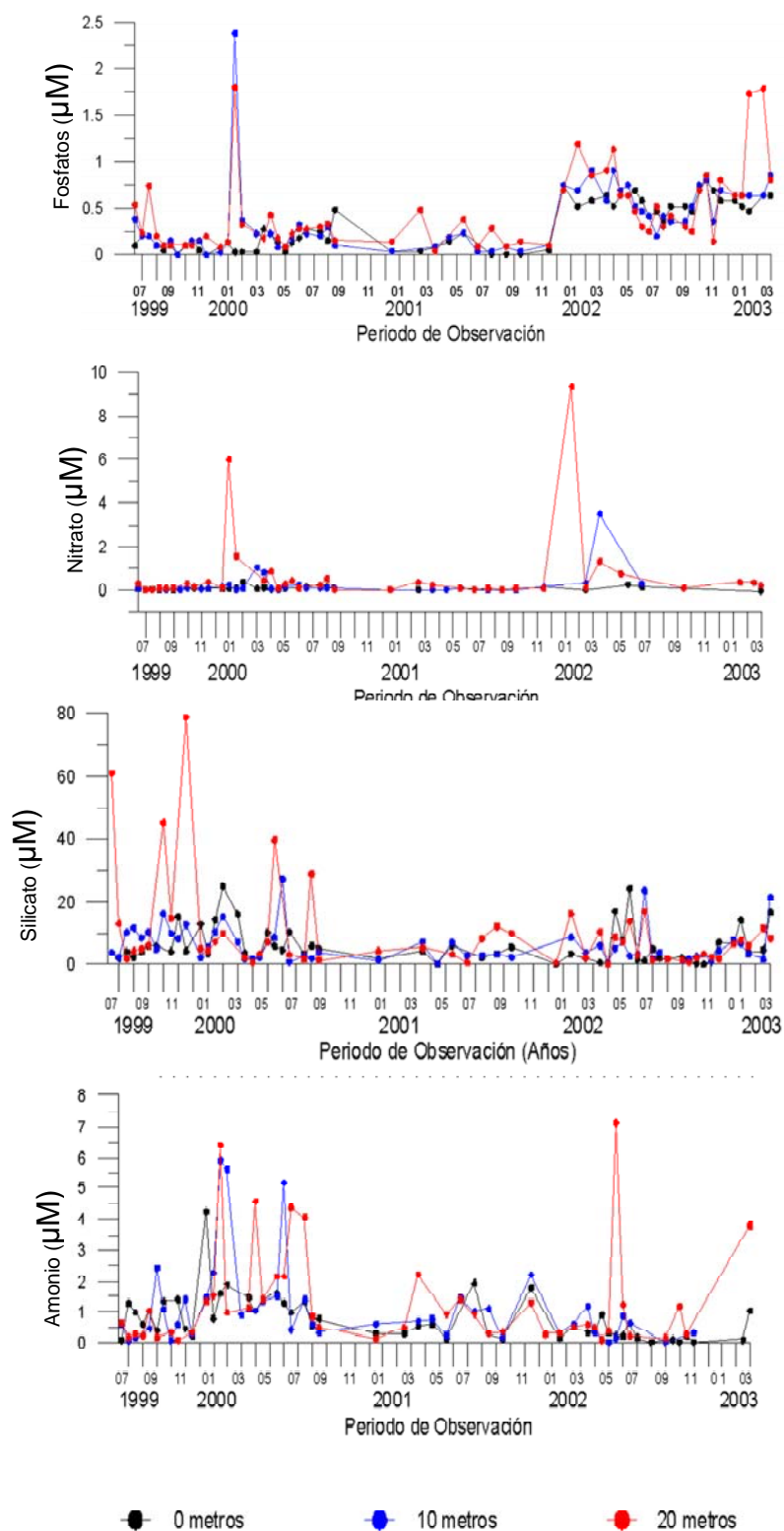


Figura 5. Distribución vertical de nutrientes (μM) a 10 Mn de la costa de Tumaco, período julio 1999 - enero 2003; Fosfato (PO_4), Nitrito (NO_2), Nitrato (NO_3), Silicato (SiO_4) y Amonio (NH_4), a 0, 10 y 20 m de profundidad.

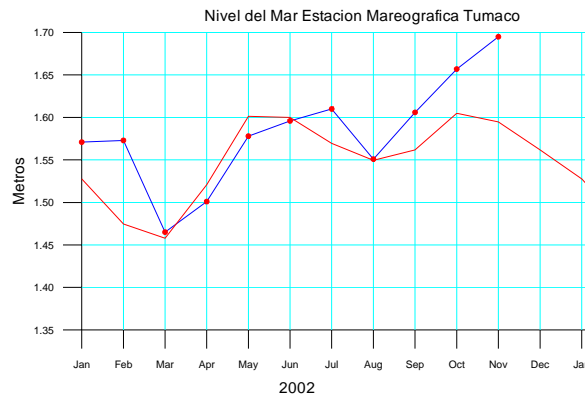


Figura 6. Nivel medio del mar (NMM) estación mareográfica de Tumaco, medición (azul) y promedio calculado a partir de información acopiada desde 1980.

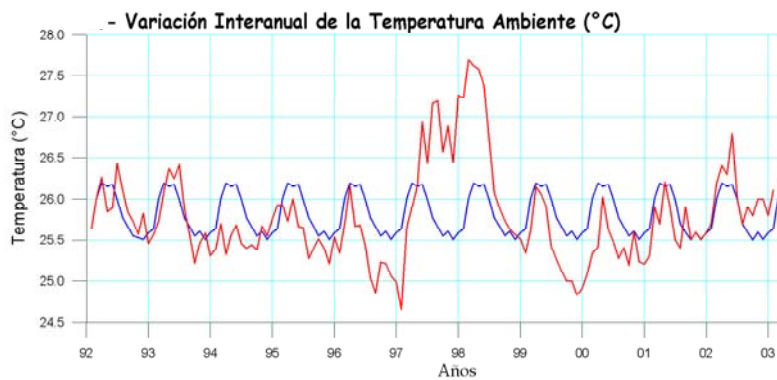


Figura 7. Variación interanual de TA (° C) en la estación meteorológica principal, ubicada en las instalaciones del CCCP en Tumaco. Las líneas rojas indican medición *in situ* y las azules el promedio histórico, calculado a partir de observaciones realizadas desde 1960.

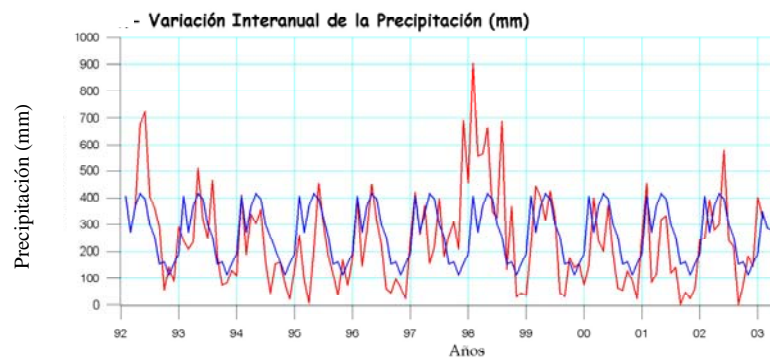


Figura 8. Variación interanual de precipitación (mm) en la estación meteorológica principal, ubicada en las instalaciones del CCCP en Tumaco. Las líneas rojas indican medición *in situ* y las azules el promedio histórico, calculado a partir de observaciones realizadas desde 1960.

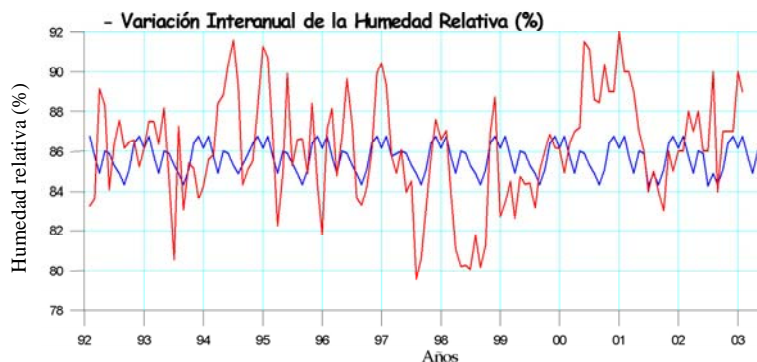


Figura 9. Variación interanual de la humedad relativa (%) en la estación meteorológica principal, ubicada en las instalaciones del CCCP en Tumaco. Las líneas rojas indican medición *in situ* y las azules el promedio histórico, calculado a partir de observaciones realizadas desde 1960.

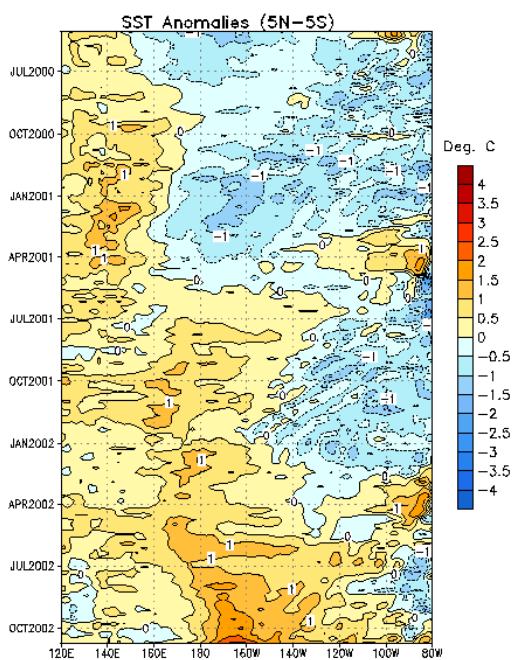


Figura 10. Anomalía de TSM ($^{\circ}$ C), sección tiempo-longitud, entre 5° N Y 5° SUR. Fuente: CLIMATE PREDICTION CENTER / NCEP, octubre, 2002.