

Descripción del comportamiento de variables atmosféricas y oleaje en el puerto de Tumaco a partir de observación de datos

Description on the wave and atmospheric behavior at the port of Tumaco based on data observations

Fecha de recepción: 2012-01-11 / Fecha de aceptación: 2012-07-30

Javier Enrique Gómez Torres¹ y Jesús Emel Peñaranda Cabarcas²

¹ **Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP).** Área de Oceanografía. Capitanía de Puerto de Tumaco, Vía El Morro, Tumaco, Colombia. Correo electrónico: jgomez@dimar.mil.co Tel: +57 (2) 727 26 37.

² **Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP).** Área de Oceanografía. Capitanía de Puerto de Tumaco, Vía El Morro, Tumaco, Colombia. Correo electrónico: mpenaranda@dimar.mil.co Tel: +57 (2) 727 26 37.

Gómez J. y Peñaranda, J. 2012. Descripción del comportamiento de variables atmosféricas y oleaje en el puerto de Tumaco a partir de observación de datos. Bol. Cient. CIOH (30): 75-92

RESUMEN

Conocer la dinámica y el comportamiento del clima en un lugar o región es una necesidad que se encuentra implícita en el desarrollo y progreso de la misma. A pesar de contar con información meteorológica y oceanográfica del litoral Pacífico colombiano, en el presente trabajo se determinaron específicamente las principales variables atmosféricas y de oleaje presentes en la Bahía de Tumaco.

Por medio de la recolección de datos de Estaciones Climatológicas Principales (ECP), Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales (EMAS) y Boyas Medidoras de Oleaje Direccional, en períodos que superan los 50 años para algunas variables meteorológicas se establecieron promedios climatológicos para la temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica y precipitación. Se realizó también una caracterización del comportamiento estacional del viento y del oleaje.

Con estos resultados se establece un marco de referencia sobre períodos climáticos definiendo la época húmeda durante el primer semestre y una época semi-húmeda durante el segundo, con un promedio de 200 mm mensuales. El Índice Oceánico Niño no representa claramente el efecto del fenómeno El Niño, salvo casos moderados a fuertes de anomalías positivas donde los índices de precipitación han superado los 900 mm. Los regímenes de viento y oleaje presentan un claro comportamiento estacional influenciado por la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), con mayor influencia de los Alisios del norte entre enero y abril, y vientos del suroeste durante el resto del año.

Palabras clave: Puerto de Tumaco, variación estacional, promedios multianuales, Estaciones Climatológicas Principales, Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales, altura significativa del oleaje, dirección del oleaje.

ABSTRACT

The knowledge of the climatic dynamics and its behavior in a specific region is an implicit requirement for the development and progress of the region itself. Though there exists meteorological and oceanographic information of the pacific Colombian littoral, in the present research has been determined specifically the principal atmospheric variables presented in Tumaco Bay.

Some variables have been monitoring for more than 50 years, and based on Principal Climatological Stations, Satellite Automatic Weather Stations and directional wave buoys' data collections. Climatological averages of temperature, relative humidity, atmospheric pressure and precipitation have been calculated. Additionally, it was carried out a monthly characterization of the wind's speed and a wave's direction analysis.

These results set a framework that involve seasonal variability defining the wet season in the first half of the year and semi-wet season in the second, with an average of 200 mm per month. The Oceanic Niño Index (ONI) does not clearly represent the effect of the El Niño, except in cases of moderate to strong positive anomalies where the precipitation rates have exceeded 900 mm. The wind and wave regimes present a clear seasonal behavior influenced by the position of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), with greater influence of the trade winds from the north during the months of January to April and southwesterly winds along the rest of the year.

Key words: Port of Tumaco, seasonal variability, multiannual average, Major Climatologically Stations, Satellite Automatic Weather Stations, significant wave height, wave direction.

INTRODUCCIÓN

El clima, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), puede definirse como "la descripción estadística en términos de la media y la variabilidad de las cantidades relevantes durante un período de tiempo" o, en un sentido más amplio, como el estado del sistema climático que comprende la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie de la litosfera y la biosfera. Todos estos elementos determinantes del estado y la dinámica del clima de la Tierra [1].

Debido a que el clima se relaciona generalmente con las condiciones predominantes en la atmósfera, éste se describe a partir de variables atmosféricas como la temperatura y la precipitación, denominados elementos climáticos; asimismo, existe una estrecha relación del clima con la vegetación y otros sistemas vivos tanto del continente como del océano (biosfera y antroposfera) [2], alcanzando a influir en las condiciones sociales, económicas y culturales de un lugar o región. De allí la importancia de conocer el clima del puerto de San Andrés de Tumaco.

El desarrollo tecnológico de dispositivos de almacenamiento de alta densidad y capacidad de fondeo de largo plazo ha permitido recolectar información de largas series de tiempo de datos oceánicos y meteorológicos. Las series de tiempo, llamadas también series cronológicas o series históricas, son un conjunto de datos numéricos que se obtienen en períodos regulares y específicos a través del tiempo; los tiempos pueden ser en años, meses, semanas, días u otra unidad adecuada al problema en cuestión, que para este caso es el clima. La primera etapa de análisis de los datos después de la verificación y edición implica cálculos de las medias aritméticas, variaciones, coeficientes de correlación y otros métodos estadísticos derivados (adaptado de [3]).

Dentro del análisis efectuado a las series de tiempo es importante determinar aspectos importantes en el comportamiento de las variables como son la tendencia y la variación estacional. La tendencia representa el comportamiento predominante de la serie en un largo período de tiempo. La variación estacional es una fluctuación periódica de la serie temporal de período fijo no superior al año, debida a la influencia de fenómenos correlacionados con las variaciones que evolucionan a lo largo del año.

La Dirección General Marítima (Dimar), en cabeza del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), ha adelantado importantes aportes para la recolección de información meteorológica, con el fin de conocer la dinámica y el comportamiento del tiempo y del clima sobre el litoral Pacífico colombiano. Estos proyectos se sustentan a partir de Estaciones Climatológicas Principales (ECP), en convenio con el Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales); asimismo, desde 2006, se dieron los primeros pasos para la implementación del proyecto Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (Smpomm), el cual tiene como objetivo principal monitorear las condiciones meteorológicas y oceanográficas de las zonas costeras y de las aguas marítimas de Colombia. Este sistema está compuesto por Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales (EMAS), estaciones mareográficas y boyas medidoras de oleaje direccional, las cuales permiten recolectar de manera continua información que se almacena generando series de tiempo de diferentes variables oceánicas y atmosféricas.

Actualmente, el CCCP genera publicaciones seriadadas como el 'Boletín Meteomarinero Mensual del Pacífico Colombiano' y el 'Monitoreo de Condiciones ENOS Pacífico Central Oriental', las cuales describen el comportamiento de las principales variables atmosféricas y el oleaje sobre el litoral Pacífico colombiano, monitoreadas con el SMPOMM, en conjunto con información provista por otras agencias. Las variables allí descritas requieren una comparación con promedios multianuales que permitan distinguir el comportamiento esperado del efecto causado por diferentes fenómenos océano-atmosféricos y el nivel de influencia que puedan generar, con lo cual se apoya la realización de los pronósticos del estado del tiempo que el CCCP elabora con frecuencia diaria sobre el litoral y la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC). Este tipo de literatura sobre la región Pacífica colombiana es muy deficiente y no se describe mes a mes este comportamiento.

Con los resultados de la presente investigación se pretende establecer un marco de referencia sobre el comportamiento de las principales variables atmosféricas y el oleaje, a partir del cual se pueda generar desarrollo en infraestructura costera y portuaria sobre el puerto de Tumaco, y cuantificar por medio de anomalías el efecto de eventos extremos como El Niño.

ÁREA DE ESTUDIO

La región costera de la CPC se encuentra en el extremo occidental del territorio colombiano, la cual tiene aproximadamente 80000 km² de superficie, siendo sus límites geográficos: la hoya del río Juradó, al Norte (7°28'N); el río Guaitará, afluente del río Patía, al Sur (0°14'N); el nacimiento del río San Juan, al Este (75°51'W), y la desembocadura del río Mira en Cabo Manglares, al Oeste (79°02'W) [4] (Fig. 1). Hacia el extremo sur de ésta se extiende el municipio de San Andrés de Tumaco, que hace parte del departamento de Nariño.

El litoral sur del Pacífico colombiano, donde se encuentra localizada la Bahía de Tumaco, hace parte del terreno suprayacente Atrato-San Juan-Tumaco [5] y es el resultado de la colmatación

de la cuenca formada durante la colisión entre el continente y la placa oceánica al occidente de Colombia [6]. Todo este territorio está inserto dentro de la planicie deltaica de Nariño, desarrollándose en su litoral los deltas de los ríos Patía y Mira, entre otros [7].

San Andrés de Tumaco está situado a 300 km de San Juan de Pasto y tiene una extensión de 3760 km², los cuales representan un 12,11 % del departamento, con una población -según el DANE- de 161 490 habitantes hasta el año 2005; delimita por el norte con las islas La Viciosa y El Morro, al sur con El Bajito y Vaquería, al oriente con Bellavista y El Burrero, y por el occidente con la CPC; la cual se ubica geográficamente entre los paralelos 01°30' hasta los 07°10' de latitud Norte y entre los meridianos 77°40' y 82°00' de longitud Oeste [4].

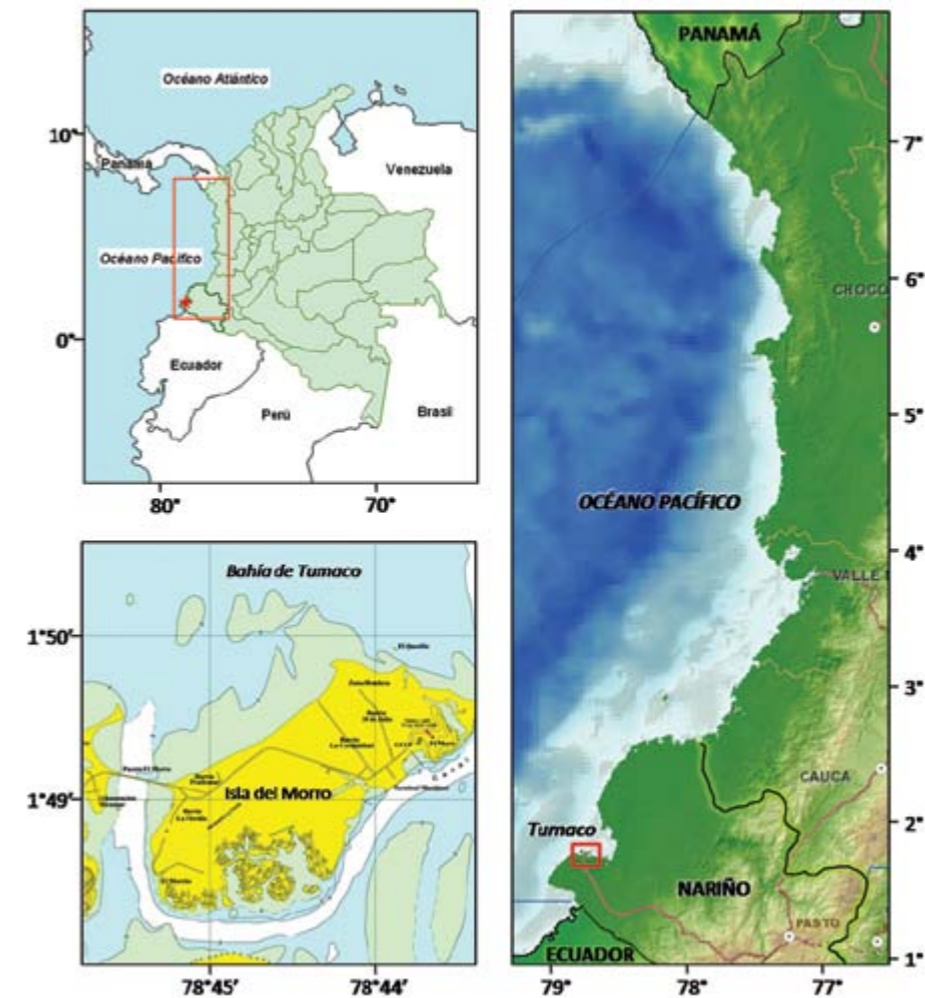


Figura 1. Área de estudio.

Este puerto del Pacífico colombiano es el mayor de los 64 municipios nariñenses, el primero y único puerto en Nariño, y el segundo en importancia después de Buenaventura [8]; su vasto territorio está integrado por su casco urbano, una extensa zona rural y el centro poblado San Juan de la Costa [6].

Asimismo, cuenta con una bahía comprendida entre Punta del Cocal hasta Punta de Cascajal, formando el archipiélago del mismo nombre, integrado por las islas de Tumaco, La Viciosa y El Morro. La Bahía de Tumaco constituye la mayor entrante de la costa Pacífica colombiana y está ubicada en cercanías de la frontera con Ecuador, entre las latitudes 1°45'N y 2°00'N, y las longitudes 78°30'W y 78°45'W, comprendiendo un área aproximada de 350 km² y sus aguas presentan profundidades que varían entre 0 y 50 m [9].

METODOLOGÍA

El análisis abarcado en la presente investigación se refiere a las variables precipitación, temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, viento y oleaje, de acuerdo con la información disponible de Ideam y Dimar.

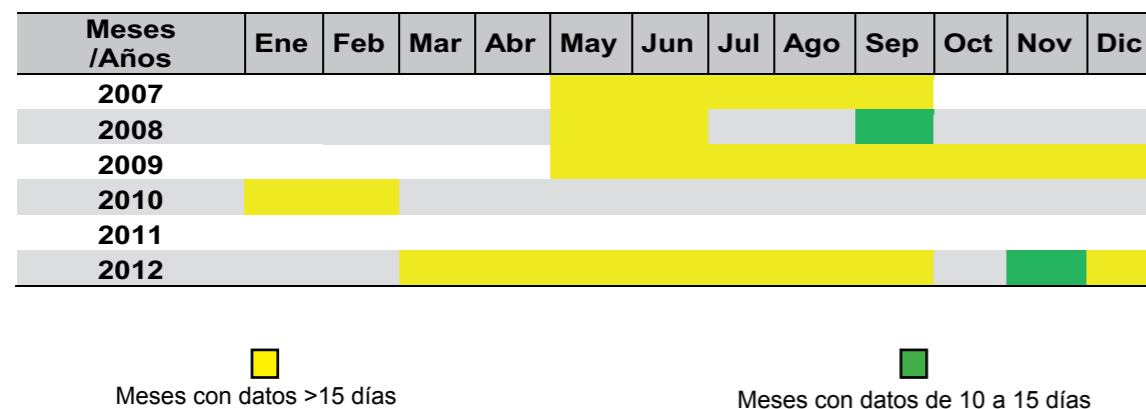
Los períodos base tomados para el establecimiento de promedios multianuales corresponden a 1958–2010 para la precipitación, 1961–2010 para la temperatura del aire, 1992–2010 para la humedad relativa y 2000-2010 para presión atmosférica.

A partir del 2000 se obtuvo una media mensual con base en los promedios diarios de las observaciones registradas a las 07:00, 10:00, 13:00, 16:00 y 19:00 horas. Antes de 2000 se cuenta con la información de promedios mensuales entregada por Ideam.

La descripción estacional del comportamiento de la dirección y velocidad del viento se realiza por períodos de agrupación de meses con características similares de predominancia en la dirección e intensidad, con base en el período 2009–2012, durante el cual se cuenta con un registro continuo de promedios mensuales desde febrero 2009 hasta enero de 2012, con una resolución temporal de 10 minutos.

Con relación a la dirección media y altura significativa de la ola se toma un período discontinuo entre 2007–2012, como lo muestra la Tabla I, en los cuales se cuenta con datos superiores a diez días.

Tabla I. Relación base de datos boya de oleaje direccional 2007-2012.



Obtención de datos *in situ*

Los datos meteorológicos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica fueron obtenidos a partir de una ECP ubicada en las instalaciones del CCCP, en las coordenadas geográficas 01°49,25' latitud Norte, 78°43,92' longitud Oeste (Fig. 1).

Los datos de viento fueron recolectados por una EMAS ubicada en el muelle de la Estación de Guardacostas de Tumaco, en las coordenadas geográficas 01°49,18' latitud Norte, -78°43,71' longitud Oeste (Fig. 1).

La ECP, debido a su categoría de estación climatológica principal, cuenta con un consolidado de ocho instrumentos meteorológicos mecánicos; sin embargo, para la presente investigación se tomaron las variables de mayor relevancia para la descripción climatológica del área de estudio (Tabla II).

El método observacional consistió en la recolección de los datos por parte de un observador meteorológico, de tal forma que se

tomó un dato cada 3 horas, entre las 07:00 y las 19:00 horas, para luego digitalizarlo en una base de datos.

La EMAS está integrada por instrumentos meteorológicos y componentes electrónicos que recolectan, procesan y almacenan información *in situ* de forma automática en diferente frecuencia o rata de muestreo (velocidad y dirección del viento cada 10 minutos) (Tabla III).

En cuanto a los datos de dirección, altura significativa y período promedio del oleaje se obtuvieron a partir de una boya de oleaje direccional, ubicada al noroeste de la Bahía de Tumaco, como lo muestra la Figura 2, la cual realiza todos sus procesos lógicos por medio de una unidad principal denominado Módulo de Telemetría y Sensores (TAS, por sus siglas en ingles); conformado por tres acelerómetros, tres giróscopos y una brújula, los cuales están interconectados al procesador de la boya, con una frecuencia de muestreo horaria, realizando cálculos promediados durante una ventana de 20 minutos [10].

Tabla II. Características técnicas instrumentos meteorológicos ECP.

Estación Climatológica Principal (ECP)			
Instrumentos	Tipo	Resolución	Rango
Sensor de temperatura	Psicrómetro	0,1 °C	-30 a 60 °C
Sensor de humedad	Higrómetro	1 %	0 a 100°
Sensor de presión	Barómetro	1 hpa	800 a 1060 hpa
Pluviómetro	Embudo	0,2 mm	0 a 15 mm

Tabla III. Características técnicas instrumentos meteorológicos EMAS.

Estación Meteorológica Automática Satelital (EMAS)			
Instrumentos	Tipo	Resolución	Rango
Sensor de dirección del viento	Ultra-sónico	11,5°	0 a 360°
Sensor de velocidad del viento	Ultra-sónico	10 impulsos por revolución	0,5 a 50 m/s



Figura 2. Ubicación boya de oleaje direccional al Noroeste de la Bahía de Tumaco.

Análisis estadístico

Durante la revisión de la calidad de los datos, se identificaron brechas o períodos en los cuales no se registraron datos, los cuales fueron rellenados utilizando el método de interpolación lineal, de la forma:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

Las series de tiempo relacionadas anteriormente son expresadas como la suma de las cuatro componentes principales (tendencia, estacionalidad, variaciones cíclicas y variaciones irregulares), para lo cual se tomó el método aditivo:

$$Y(t_j) = T(t_j) + E(t_j) + C(t_j) + I(t_j) \quad (2)$$

Donde,

- Y, representa la serie de tiempo observada.
- T, la tendencia.
- E, la variación estacional.
- C, las variaciones cíclicas e I las variaciones irregulares.

Teniendo en cuenta que se pretende describir el comportamiento promedio de las variables se estimó y retiró la tendencia; de igual forma se obtuvo el promedio multianual determinado por las variaciones estacionales, mostrando

finalmente la serie compuesta por variaciones cíclicas e irregulares, entre las cuales llegan a observarse fenómenos de escalas mayores a un año.

La estimación de la tendencia se realizó mediante ajuste lineal con el método de mínimos cuadrados aplicado a cada una de las series de tiempo de temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y precipitación. La estimación de la componente estacional se realizó utilizando promedios climatológicos, de la forma:

$$\bar{x}_{ene}, \bar{x}_{feb}, \bar{x}_{mar} \dots \bar{x}_{dic} \quad (3)$$

$$\bar{x}_{ene} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_i^{ene} \quad (4)$$

Donde,

- \bar{X} , Es el promedio climatológico.
- n, El número de años de acuerdo con el período base.
- y, El dato promedio mensual de cada variable.

Restando el promedio climatológico a las observaciones sin tendencia, se obtuvieron las anomalías.

RESULTADOS

En la Tabla IV se registra el resumen estadístico de las series de tiempo de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica. A continuación se describe por cada una de estas variables, el comportamiento promedio a lo largo de un año y se muestran las anomalías sobre cada uno de los períodos base.

Tabla IV. Resumen estadístico de las series de tiempo de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, viento y oleaje de acuerdo al período base establecido para cada variable.

Variables	Datos Estadísticos				
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Media	Desviación Estándar	Pendiente de Tendencia
Precipitación (mm)	0	902	200,9	159,5	0,004
Temperatura del Aire (°C)	24,1	27,7	26,0	0,51	0,00002
Humedad Relativa (%)	77,0	93,4	85,2	3,2	0,0004
Presión Atmosférica (hPa)	1008	1012	1009	0,86	0,00004
Velocidad del Viento (Nudos)	0,2	21	4,98	2,06	N/A
Dirección del Viento	0	360	258°	61,9	N/A
Altura de la Ola (m)	0,2	2,8	0,98	0,24	N/A
Dirección de la Ola	0	360	265	44,1	N/A

Precipitación

La variable de precipitación para el puerto de Tumaco oscila en promedio entre 306 y 107 mm a lo largo de un año, la media aritmética se encuentra alrededor de 200 mm. Los valores de precipitación más altos se encuentran ubicados en el primer semestre del año, siendo mayo el mes más lluvioso; los más bajos en el segundo semestre, encontrando el menor entre agosto, octubre y noviembre (Fig. 3).

Las anomalías de precipitación a lo largo del período 1958–2010 se encuentran entre -295 y 616 mm. La mayor parte del conjunto de datos está contenida dentro de una desviación estándar; sin embargo, se observa un sesgo en la distribución debido a la asimetría entre la media y los valores extremos.

El 2 % de las observaciones se encuentra por fuera del rango de 3 desviaciones estándar (observaciones atípicas), siendo todas positivas y superando ampliamente esta referencia.

El período más representativo de anomalías positivas corresponde a 1997-1998, por ser el de mayor duración de registros continuos; otros valores positivos se encuentran en 1974, 2007 y 2010; registros de anomalías negativas se destacan en períodos discontinuos entre 1961 y 1963, otros valores extremos se presentan a lo largo de la serie de tiempo, pero de muy corta duración (Fig. 4).

Temperatura del aire

La temperatura del aire oscila en promedio entre 25,7 y 26,3°C, con una media aritmética de 26°C. Las temperaturas más bajas se observan en los meses de septiembre a enero, siendo enero el valor promedio más bajo; las temperaturas más altas se ubican entre febrero y junio, reconociendo a abril como el más cálido (Fig. 5).

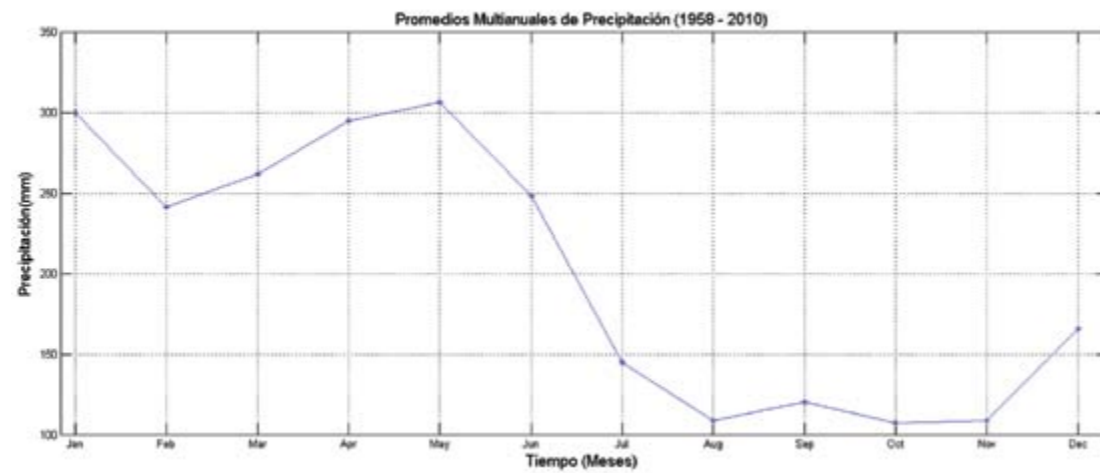


Figura 3. Promedio multianual de precipitación, utilizando el período base 1958–2010.

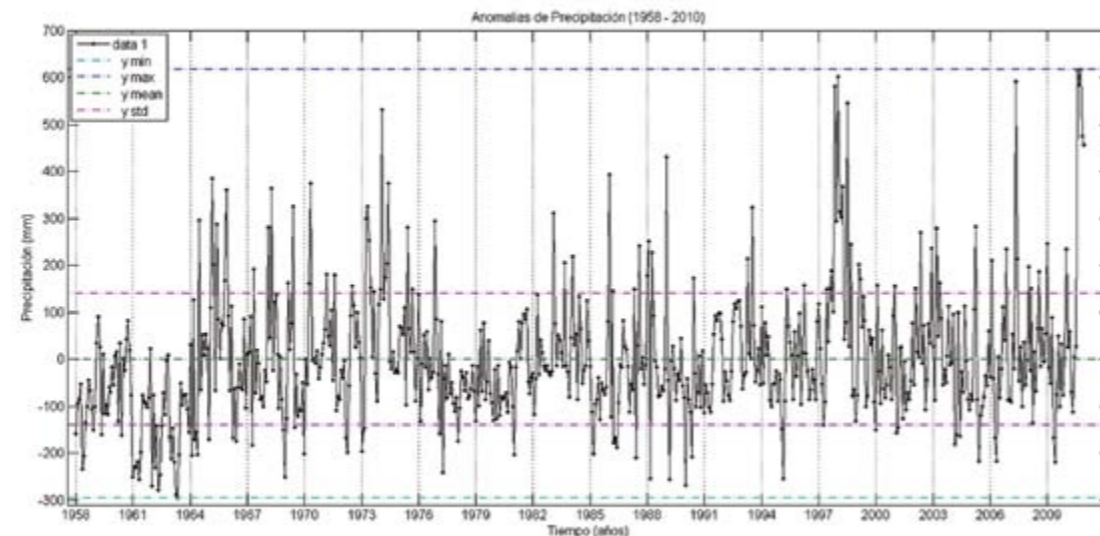


Figura 4. Anomalías de precipitación durante el período 1958- 2010.

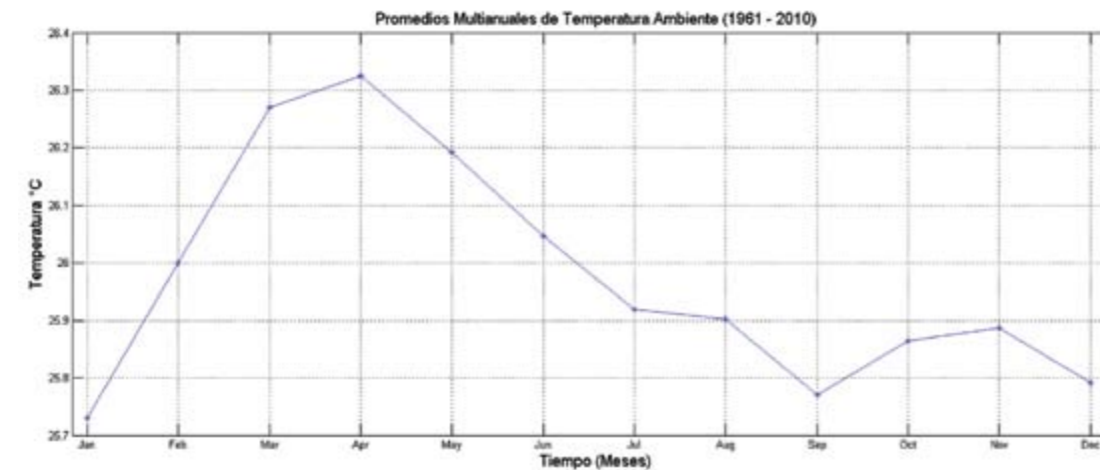


Figura 5. Promedio multianual de temperatura del aire, utilizando el período base 1961–2010.

Humedad relativa

La humedad relativa para Tumaco se presenta a lo largo del año en promedio entre 84,2 y 86,5 %, con una media aritmética de 85,2 %. Los valores de humedad más bajos se observan entre agosto y octubre, siendo agosto el mes con el valor promedio más bajo; los registros más altos se ubican entre diciembre y febrero, encontrando que enero es el más húmedo (Fig. 7).

Las anomalías de humedad relativa a lo largo del período 1992–2010 se encuentran entre -7,3 y 6,8 %. Todas las anomalías de humedad relativa se ubican dentro del rango de 3 desviaciones estándar (Fig. 8).

Las anomalías de temperatura del aire a lo largo del período 1961–2010 se encuentran entre -1,6 y -1,7°C. La distribución se asemeja a una normal por la simetría que presenta, dentro del rango de una desviación estándar se ubica gran parte del conjunto de datos; alrededor del 1% las observaciones se encuentran por fuera de 3 desviaciones estándar considerándose atípicas.

En el período 1997-1999 se observa un amplio período de anomalías positivas continuas, con valores bastante alejados de la media, otros períodos representativos de anomalías se encuentran en 1972, 1983 y 1987 para anomalías positivas; 1975-1976, 1996 y 2008 para anomalías negativas (Fig. 6).

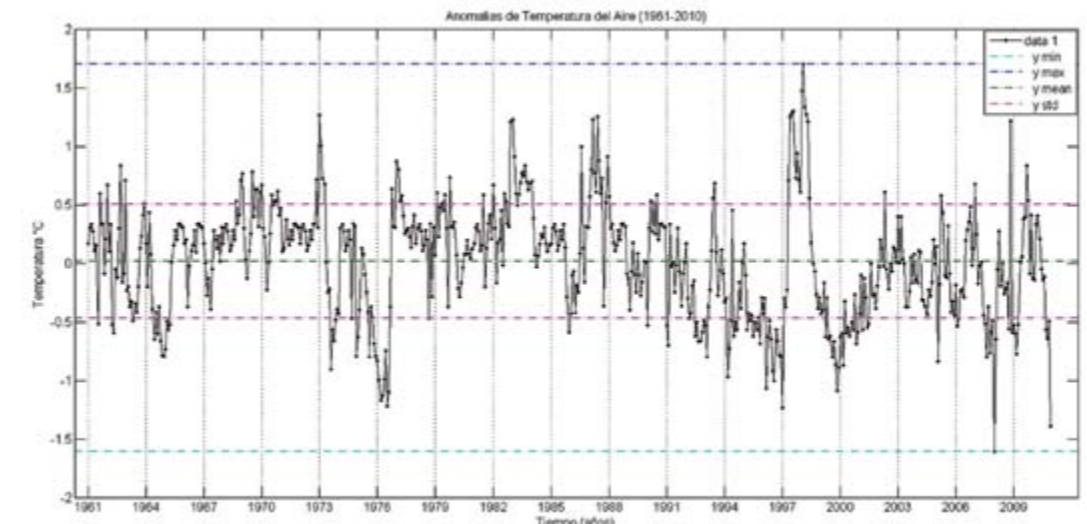


Figura 6. Anomalías de temperatura del aire durante el período 1961-2010.

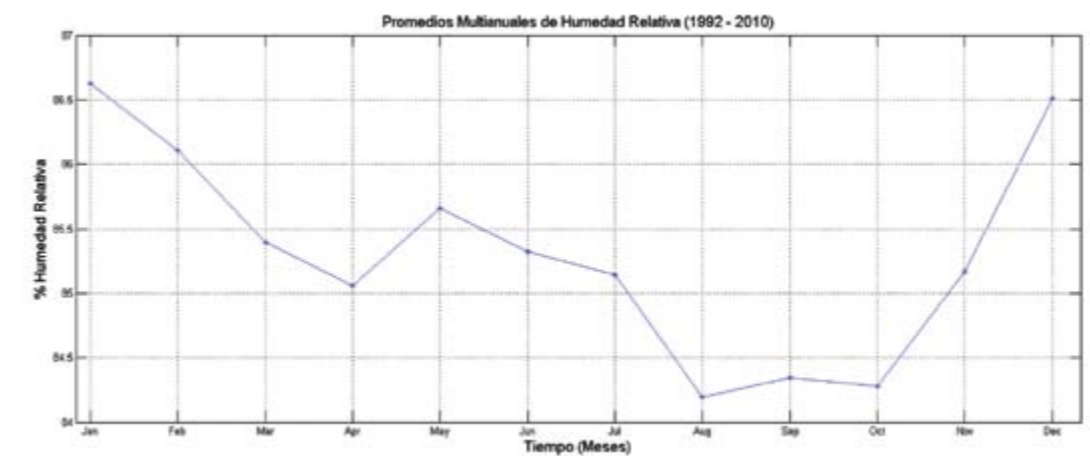


Figura 7. Promedio multianual de humedad relativa, utilizando el período base 1992–2010.

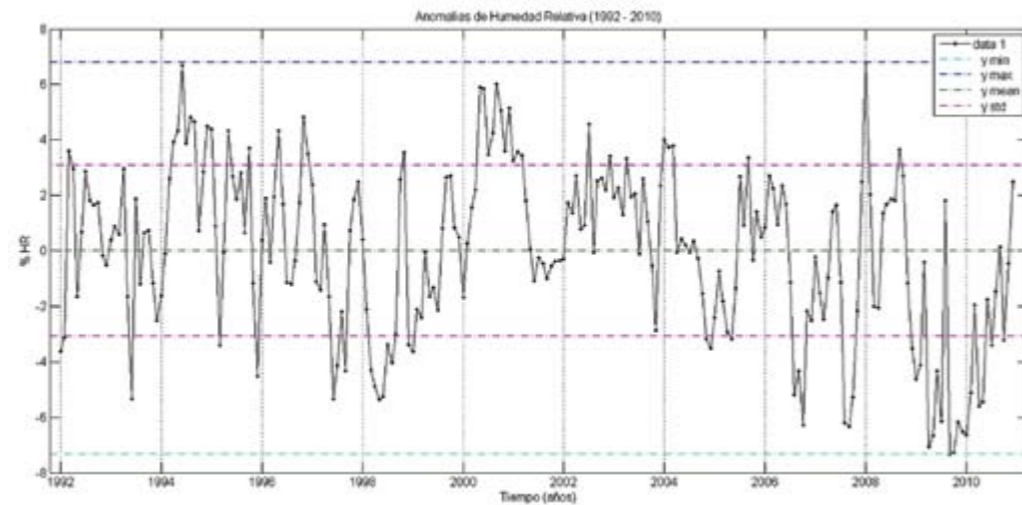


Figura 8. Anomalías de humedad relativa durante el período 1992-2010.

Presión atmosférica

La presión atmosférica para el puerto de Tumaco se presenta en promedio entre 1008,8 y 1009,8 hPa, con una media aritmética de 1009 hPa. Las presiones más bajas se observan durante el primer semestre encontrando el menor registro en marzo; durante el segundo semestre predominan mayores valores con el dato más alto en julio (Fig. 9).

Las anomalías de presión atmosférica observadas durante el período 2000-2010 se encuentran entre -1,5 y 2,5 hPa, el 99 % de las observaciones se ubican dentro del rango de 3 desviaciones estándar. Durante el año 2000 encuentra un período continuo de anomalías positivas que contienen los mayores valores del conjunto de datos; en 2009 se encuentra análogamente un registro continuo de anomalías negativas (Fig. 10).

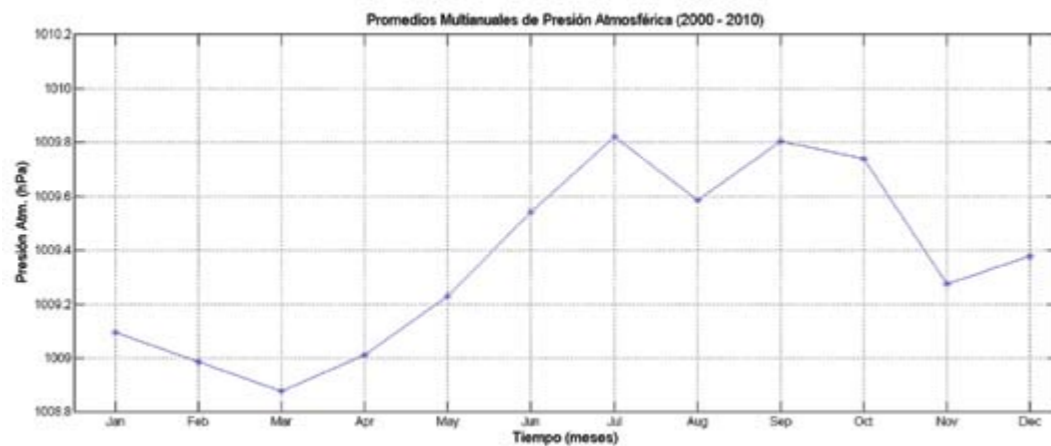


Figura 9. Promedio multianual de presión atmosférica relativa, utilizando el período base 2000-2010.

Dirección y velocidad del viento

En la Tabla V se presenta el comportamiento de la velocidad y dirección del viento con su resultado mes a mes.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mes a mes se establecieron tres períodos de análisis de viento a lo largo del año: enero-abril, mayo-agosto y septiembre-diciembre.

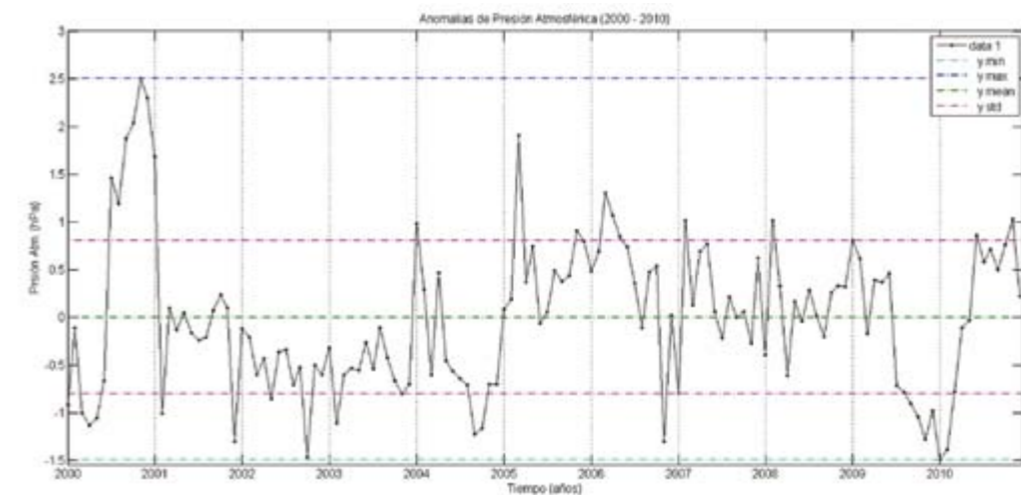


Figura 10. Anomalías de presión atmosférica durante el período 2000-2010.

Tabla V. Comportamiento de la dirección e intensidad promedio del viento mes a mes. Dirección en componentes cardinales, intensidad en nudos.

Mes	Dirección		Intensidad	
	Predominio	Porcentaje	Predominio	Porcentaje
Enero	N-NO	36 %	3 - 5	40 %
	S-SO	34 %	5 - 7	28 %
	O	16 %	2 - 3	15 %
Febrero	N-NO	34 %	3 - 5	38 %
	S-SO	31 %	5 - 7	27 %
	O	10 %	2 - 3	14 %
Marzo	N-NO	35 %	3 - 5	39 %
	S-SO	26 %	5 - 7	27 %
	O	18 %	2 - 3	14 %
Abril	N-NO	34 %	3 - 5	34 %
	S-SO	27 %	5 - 7	26 %
	O	15 %	2 - 3	16 %
Mayo	O-NO	35 %	3 - 5	40 %
	O	24 %	5 - 7	27 %
	S-SO	22 %	2 - 3	17 %
Junio	O	48 %	3 - 5	41 %
	S-SO	25 %	5 - 7	30 %
	N-NO	15 %	2 - 3	14 %
Julio	O	45 %	3 - 5	41 %
	S-SO	26 %	5 - 7	31 %
	N-NO	15 %	2 - 3	13 %
Agosto	O	57 %	3 - 5	42 %
	S-SO	28 %	5 - 7	33 %
	N-NO	12 %	2 - 3	12 %
Septiembre	O	60 %	3 - 5	40 %
	S-SO	21 %	5 - 7	34 %
	N-NO	14 %	2 - 3	12 %
Octubre	O	60 %	3 - 5	43 %
	S-SO	21 %	5 - 7	35 %
	N-NO	14 %	2 - 3	10 %
Noviembre	O	65 %	3 - 5	43 %
	S-SO	20 %	5 - 7	32 %
	N-NO	11 %	2 - 3	13 %
Diciembre	O-NO	34 %	3 - 5	42 %
	O	24 %	5 - 7	29 %
	S-SO	20 %	2 - 3	14 %

La dirección del viento durante los primeros cuatro meses del año presentó un predominio del componente norte-noroeste con un porcentaje de ocurrencia del 20 %, seguido por el componente sur-suroeste y oeste; asimismo, las intensidades entre 3 y 5 nudos fueron las dominantes con porcentajes de ocurrencia superiores al 50 %. Entre mayo y agosto se observó que los componentes oeste y oeste-noroeste son los dominantes con porcentajes de ocurrencia del 18 y 17 %, respectivamente, seguido de los componentes sur-suroeste y norte-noroeste. Para este período continuó el dominio de las velocidades entre 3 y 5 nudos, seguido por velocidades entre 5 y 7 nudos. Para el último período prevalece, al igual que en el anterior, el predominio del componente oeste con un porcentaje de ocurrencia del 20 % y velocidades entre 3 y 5 nudos (Fig. 11).

La altura y dirección de la ola presenta un comportamiento marcado por el predominio de las alturas entre 0,5 y 1,0 m, con un porcentaje de ocurrencia mayor al 70 %, asimismo se observa la influencia de los componentes del oeste y noroeste con porcentajes de ocurrencia superiores al 60 %, durante los primeros cuatro meses del año.

De igual manera, hacia el segundo período del año, de mayo a agosto, se aprecia la influencia de alturas de ola entre 0,7 y 1,0 m, con un porcentaje de ocurrencia superior al 90 %, y el componente sur-suroeste es el de mayor predominancia, seguido del componente oeste con porcentajes de ocurrencia del 31 y 24 %, respectivamente. Para el último período, septiembre a diciembre, continúan prevaleciendo las alturas de ola entre 0,7 y 1,5 m y los componentes sur-suroeste y oeste con porcentajes de ocurrencia del 40 y 31 %, respectivamente (Fig. 12).

Altura significativa y dirección de la ola

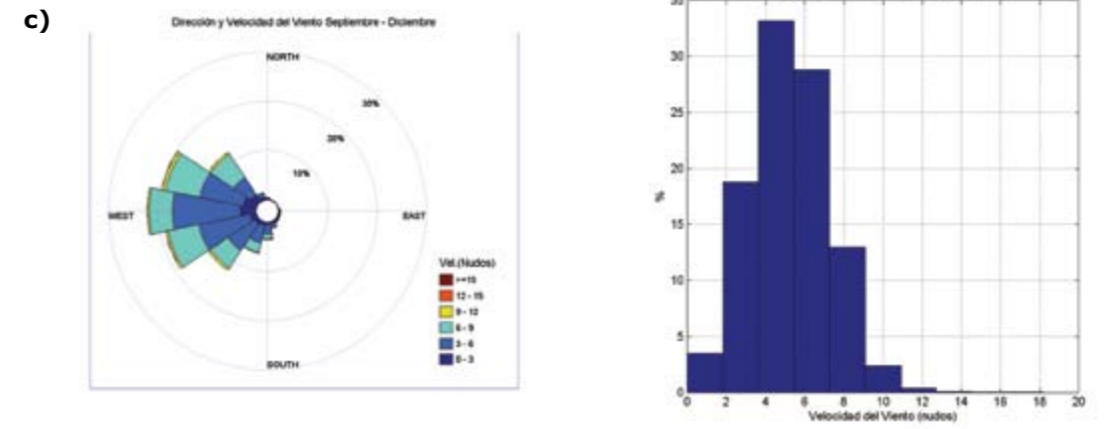
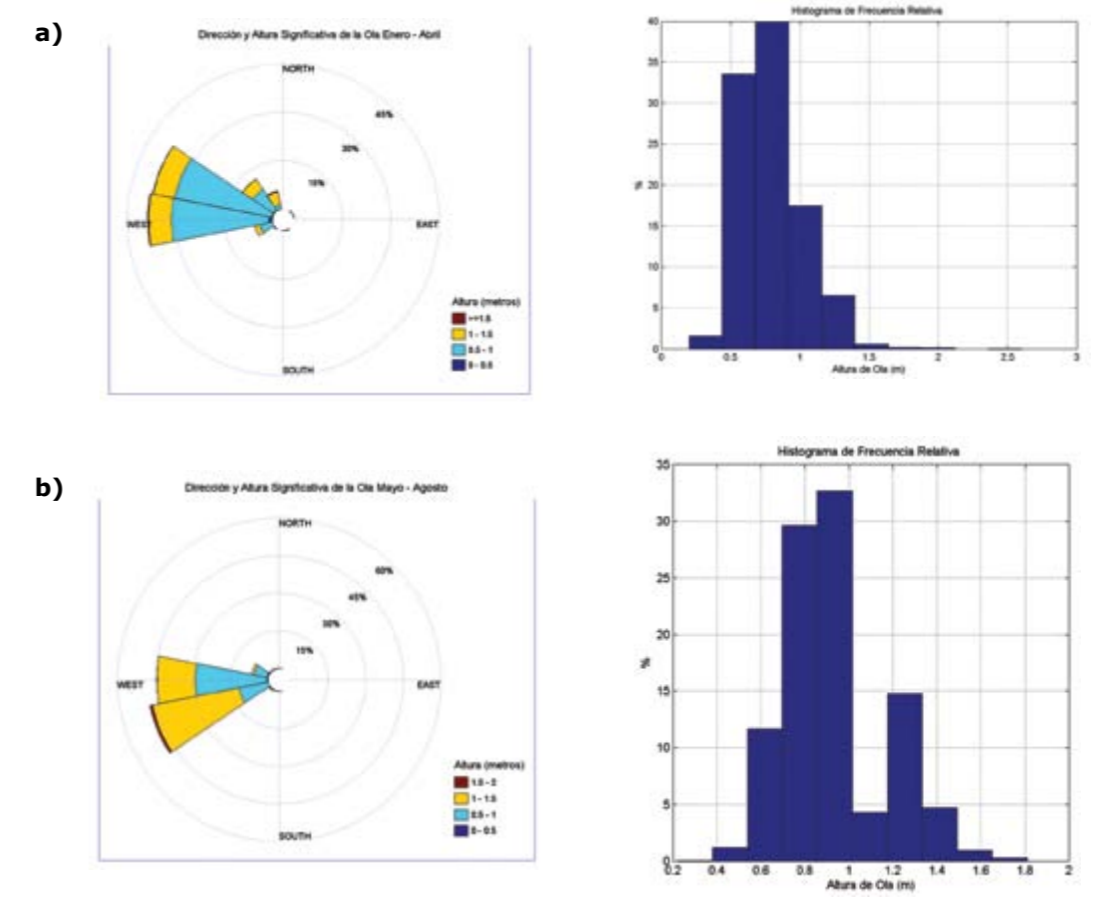
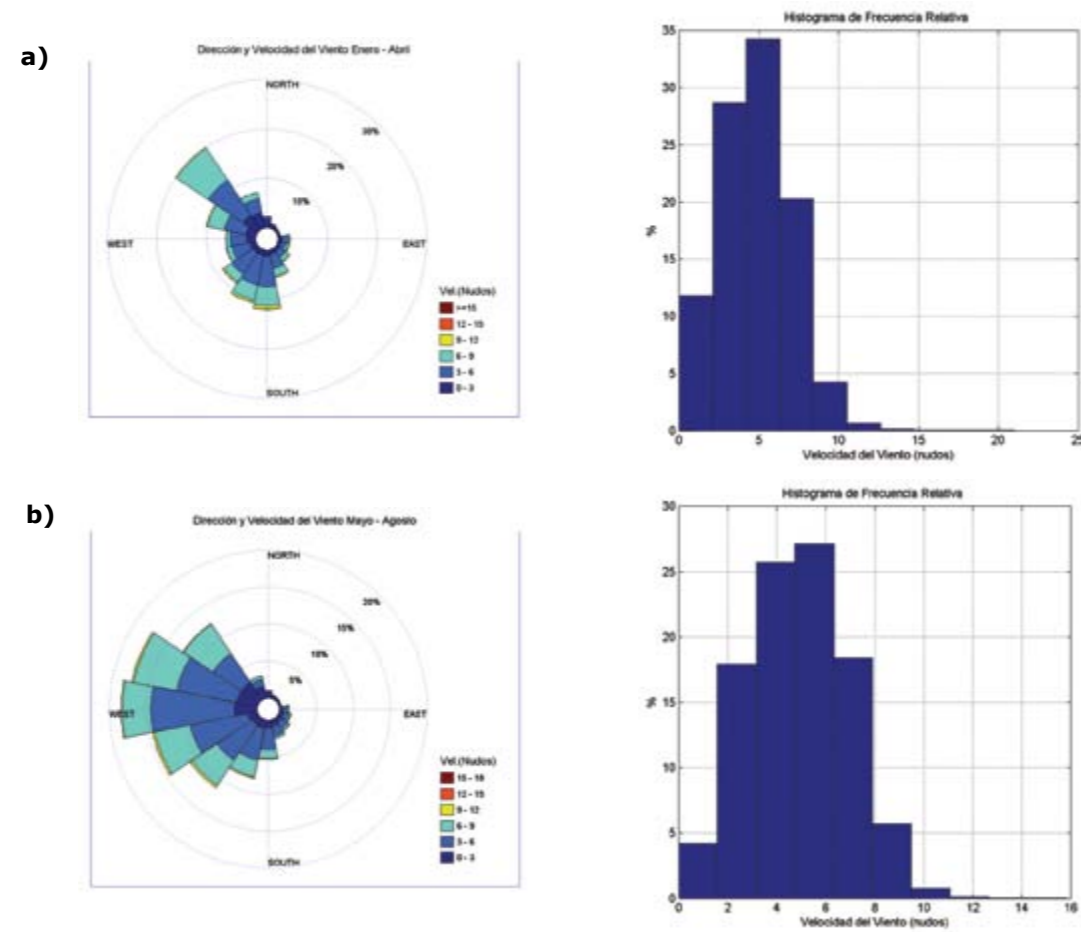


Figura 11. Rosas de vientos (izquierda) y distribuciones de frecuencia (derecha) para Tumaco en los períodos: **a)** Enero-abril, **b)** Mayo-agosto, **c)** Septiembre-diciembre. Velocidades en nudos.



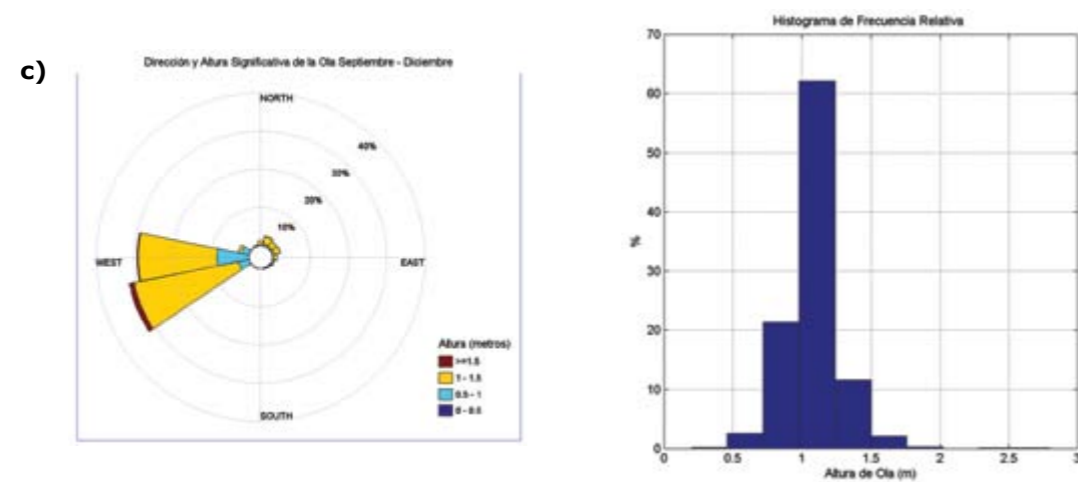


Figura 12. Rosas de dirección del oleaje (izquierda) y distribuciones de frecuencia (derecha) para Tumaco en los períodos: **a)** Enero-abril, **b)** Mayo-agosto y **c)** Septiembre-diciembre. Alturas de la ola en metros.

DISCUSIÓN

Antes de empezar a definir y/o entender las condiciones climáticas de escala local del puerto de Tumaco, se deben conocer las condiciones de meso y de escala global (sinópticas) que rigen esta área, las cuales están relacionadas entre sí, conformando el clima de un lugar o área específica.

La posición estratégica de Colombia en la zona tropical, hace que su territorio sea partícipe de las mayores proporciones de energía que el Sol transfiere a la Tierra. Justamente en los trópicos se absorbe la mayor parte de la energía solar que luego se transfiere a la atmósfera, configurándose de esa forma el motor que determina el desplazamiento del aire entre las latitudes ecuatoriales y polares, mediante una circulación meridional. Cerca de la superficie de la Tierra, en la zona tropical, se desarrollan vientos provenientes del noreste y del sureste, denominados Alisios, como consecuencia del efecto Coriolis, generado por la rotación terrestre en torno al eje que pasa por sus polos.

El encuentro de estos vientos cerca al Ecuador obliga al aire cálido ecuatorial a elevarse, según la denominada rama ascendente de la celda de Hadley. Este movimiento ascendente provoca un enfriamiento del aire por expansión, condición que favorece la condensación y por ende, el desarrollo de las nubes y de precipitaciones [2].

La confluencia de los vientos Alisios sobre la costa colombiana, en combinación con los efectos de calentamiento superficial y el ascenso orográfico forzado por la cordillera Occidental de los Andes, produce una atmósfera altamente inestable, lo cual favorece la convección profunda y las altas precipitaciones a lo largo de la costa Pacífica [11], lo cual provoca que sobre la CPC ocurran fuertes lluvias durante todo el año.

Esta región se caracteriza como tropical lluviosa isotermal, según la clasificación del modelo climático de Koeppen; lo que sugiere la presencia de precipitaciones durante todo el año y diferencias menores a 5°C entre el mes más cálido y el más frío [12].

La zona sur del Pacífico colombiano, donde se encuentra ubicado el municipio de San Andrés de Tumaco, presenta durante el año un comportamiento climático definido en dos semestres; donde es más regular el primero en relación al comportamiento de los parámetros meteorológicos, presentando mayores variaciones durante el segundo semestre [4]. El aspecto de lluvias es de tipo monomodal, considerándose la época húmeda durante el primer semestre, acentuándose en el trimestre abril-junio; la época seca se considera el segundo semestre, con un promedio histórico anual de 2300 mm (adaptado de [4]). Los valores de precipitación anual obtenidos durante el presente estudio coinciden con estos registros, en promedio. Sin embargo, la varianza de la serie de tiempo de precipitación

y los altos valores de anomalías, especialmente positivas, reflejan una amplia dispersión de los datos respecto a la media, donde algunos años pueden superar ampliamente este promedio.

La temperatura ambiente presenta durante la época húmeda valores superiores o iguales a 25,8°C, siendo abril el mes que tiende a presentar un mayor valor en el rango de la temperatura con promedios que oscilan entre 26,1 y 26,3°C. Entre julio y diciembre la temperatura disminuye y se estabiliza por debajo de los 25,7°C, ajustándose el comportamiento de la temperatura a manifestaciones monomodales, con un período caliente de febrero a junio y otro relativamente frío de julio a enero [4].

La CPC se caracteriza por la influencia de los vientos Alisios del Norte y del Sur, los cuales generan la denominada ZCIT. En la costa Pacífica colombiana los vientos Alisios del sureste se curvan y se convierten en vientos Ecuatoriales del oeste. Estos vientos de componente oeste se presentan al sur de la ZCIT cerca de 1°N. Los vientos más intensos del oeste coinciden con la posición más septentrional de la ZCIT. De igual forma, los vientos Alisios del noreste se curvan al norte de la ZCIT, adquiriendo un nuevo componente noroeste y en consecuencia se forman líneas de convergencia cerca de la costa [4].

Este comportamiento es evidente en los resultados de dirección de viento y oleaje, en los cuales se observa una influencia de vientos del noroeste durante los primeros meses del año, cuando se manifiestan los Alisios del Norte; a lo largo del resto del año, las principales componentes del viento y del oleaje son oeste-suroeste, debido a la presencia de los Alisios del Sur. La intensidad del viento y la altura significativa del oleaje no presentan variaciones significativas a lo largo del año, manteniendo sus magnitudes predominantes. La variación estacional del oleaje estaría asociada a la dirección e intensidad del viento en estrecha relación con el desplazamiento de la ZCIT.

La distribución del viento sobre el Pacífico colombiano a través del año, según los desplazamientos de la ZCIT, está asociada con fuerte actividad convectiva atmosférica que determina las épocas climáticas. Al analizar y obtener las variaciones estacionales de los parámetros meteorológicos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica sobre el puerto de San

Andrés de Tumaco, se observa que para los dos primeros su comportamiento se puede catalogar estadísticamente como monomodal, donde ambos presentan valores máximos durante el primer semestre (exceptuando enero para la temperatura del aire), considerando esta como la época húmeda.

Si bien es cierto que durante el segundo semestre descienden marcadamente los índices pluviométricos, los menores valores registrados se encuentran sobre los 100 mm en promedio mensual, por lo cual no se podría catalogar como época seca, en consecuencia se le denomina a este período época semi-húmeda. El comportamiento antes mencionado va acorde con lo descrito por autores como Lobo A. y Guerrero U. [13] y CCCP [4].

La humedad relativa no presenta un comportamiento estacional marcado por dos periodos claramente diferenciables como los anteriores, sin embargo predominan los mayores valores entre los meses de diciembre y febrero.

La presión atmosférica presenta un comportamiento regido por dos períodos claramente diferenciables, que coinciden con las épocas climáticas descritas anteriormente; sin embargo, el arco de tiempo utilizado para la descripción de la humedad relativa y la presión atmosférica no permite establecer en términos estadísticos, una climatología de estas variables y no existen series de tiempo más extensas obtenidas localmente.

Las anomalías observadas sobre cada una de las variables meteorológicas (Fig. 4, 6, 8 y 10) en Colombia se ven influenciadas también por los eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) del ENOS (El Niño Oscilación del sur) [14]. La fase cálida del ENOS, tomada como referencia por su gran magnitud e impacto (1997-1998), representa datos extremos de anomalías positivas en las series de tiempo de temperatura del aire y precipitación, al igual que otros fenómenos El Niño y La Niña de gran relevancia. De esta forma, anomalías positivas de precipitación coinciden en algunos casos con los eventos cálidos y en mayor proporción los datos extremos anomalías positivas y negativas de la temperatura ambiente, con eventos cálidos y fríos, respectivamente.

Lo anterior concuerda con estudios preliminares sobre el comportamiento de la precipitación en el país durante las fases cálidas o frías del ENOS en la cuenca del Pacífico Tropical,

que han puesto de manifiesto una íntima conexión entre la ocurrencia de éstas y las disminuciones o aumentos pluviométricos correspondientes; evidenciando que las lluvias son más abundantes de lo tradicional en el sur de la Región Pacífica en la fase cálida. En la fase fría no se puede catalogar el efecto climático como totalmente opuesto al de la fase cálida, aunque se muestra, que en términos generales, tiene características inversas [14].

Para la verificación de datos atípicos o extremos en las anomalías de las variables atmosféricas, se tuvieron en cuenta los eventos o episodios ENOS cálidos (Niño) y fríos (Niña), de intensidad moderado a muy fuerte, considerados más allá de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ en anomalías de temperatura superficial del mar (TSM), con referencia a la base de datos "Temporada de Episodios Fríos y Cálidos" de la NOAA-CPC [15], comprendida de 1950 a 2010 y que toma como referencia en Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) con base en la región Niño 3.4. Estos episodios se contrastaron con las series de tiempo de anomalías de temperatura y precipitación, encontrando que el ONI sólo representa claramente eventos de magnitud muy fuertes y extensos, como El Niño 1997-1998 y La Niña 1961-1963.

Una comparación efectuada con un índice de variabilidad interanual e interdecadal desarrollado por el CCCP para la isla de Tumaco, basado en series de tiempo de TSM, precipitación y temperatura del aire [16], coincide con la mayor parte de los eventos extremos fríos y cálidos (Fig. 13). Algunos datos dispersos a lo largo de la serie no están relacionados con la presencia de eventos Niño/Niña de acuerdo a este índice.

Con la descripción estacional de las variables analizadas en la presente investigación, se establece una referencia para el estudio de impacto de fenómenos océano-atmosféricos sobre el litoral Pacífico colombiano, haciendo necesario obtener el comportamiento de las mismas sobre las principales localidades en la región. Los resultados de la comparación del Índice Multivariado de Tumaco con la precipitación y la temperatura local, presenta a la comunidad científica una puerta abierta para generar correlaciones con diferentes variables oceánicas y atmosféricas en largos períodos de tiempo, y su relación con oscilaciones de amplios períodos como El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico.

CONCLUSIONES

El puerto de Tumaco presenta un comportamiento climático monomodal, catalogándose como clima tropical lluvioso isotermal.

La época húmeda corresponde al primer semestre del año con valores de precipitación alrededor de 300 mm mensuales; y una época semi-húmeda durante el segundo semestre con índices por encima de 100 mm de precipitación mensual acumulada.

El promedio de precipitación se encuentra alrededor de 200 mm acumulados por mes. El rango de temperaturas se presenta entre 25,7 y 26,3°C a lo largo del año.

El Índice Oceánico Niño no representa el comportamiento de las variables atmosféricas en el puerto de Tumaco, salvo casos extremos y extensos. Un índice local que utilice además de la TSM otras variables atmosféricas como la precipitación y la temperatura del aire, puede dar mayores resultados en la comparación de anomalías con períodos Niño.

Eventos cálidos del fenómeno El Niño representan para el puerto de Tumaco un incremento en las precipitaciones. La influencia de eventos Niña sobre la disminución de precipitaciones solamente ha sido claramente observada en eventos extremos representando los menores registros obtenidos de anomalías negativas desde 1958.

Existen otros datos extremos aislados de precipitación y temperatura que no corresponden a eventos ENOS.

El comportamiento estacional del viento y del oleaje para el puerto de Tumaco están relacionados con el desplazamiento de la ZCIT; entre enero y abril las direcciones predominantes son de componente noroeste influenciados por los Alisios del Norte; entre mayo y diciembre predomina el viento y el oleaje de componentes oeste-suroeste por influencia de los Alisios del Sur.

La intensidad del viento y la altura significativa del oleaje no presentan variaciones significativas a lo largo del año.

LITERATURA CITADA

[1] World Meteorological Organization, http://www.wmo.int/pages/themes/climate/understanding_climate.php. [Consultado en julio 24 de 2012].

[2] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, 2005. Atlas Climatológico Nacional, ISBN 958-8067-14-6, Vol.1, p. 11.

[3] Emery, W. & R. Thomson. 1998. Data analysis methods in physical oceanography. PergamonPress, 654 pp.

[4] Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, 2002. Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana. (Ed.) DIMAR. San Andrés de Tumaco: CCCP, Serie Publicaciones Especiales Vol.1, p. 16.

[5] Etayo et al. 1986. En: Alejandro Tovar Vélez. 2002. Variación de la Línea de Costa entre los años 1958 y 2000 en la Ensenada de Tumaco. Departamento de Nariño. Medellín, 132 pp. Trabajo de grado (Ingeniero Geólogo). Universidad EAFIT. Facultad de Ingenierías. Departamento de Geología.

[6] Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, 2003. Aportes al Entendimiento de la Bahía de Tumaco Entorno Oceanográfico, Costero y de Riesgos. (Ed.) DIMAR. San Andrés de Tumaco: CCCP, p. 19.

[7] Centro Control Contaminación del Pacífico. CCCP, 2001. Proyecto Calidad de Aguas. Informe técnico. San Andrés de Tumaco: CCCP, Colombia.

[8] Corpes de Occidente. 1999. Ordenamiento Físico Portuario Ambiental de los Litorales Colombianos. Incoplant Parsons. (UN 009-OP Fase I Diagnóstico). En: Pinzón F., L. 2001. Guía Metodológica para Diagnóstico Ambiental en la Zona Costera del Pacífico Colombiano en la Ensenada de Tumaco. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia.

[9] Tejada, C. 2002. Clima marítimo de la Bahía de Tumaco, un caso de aplicación

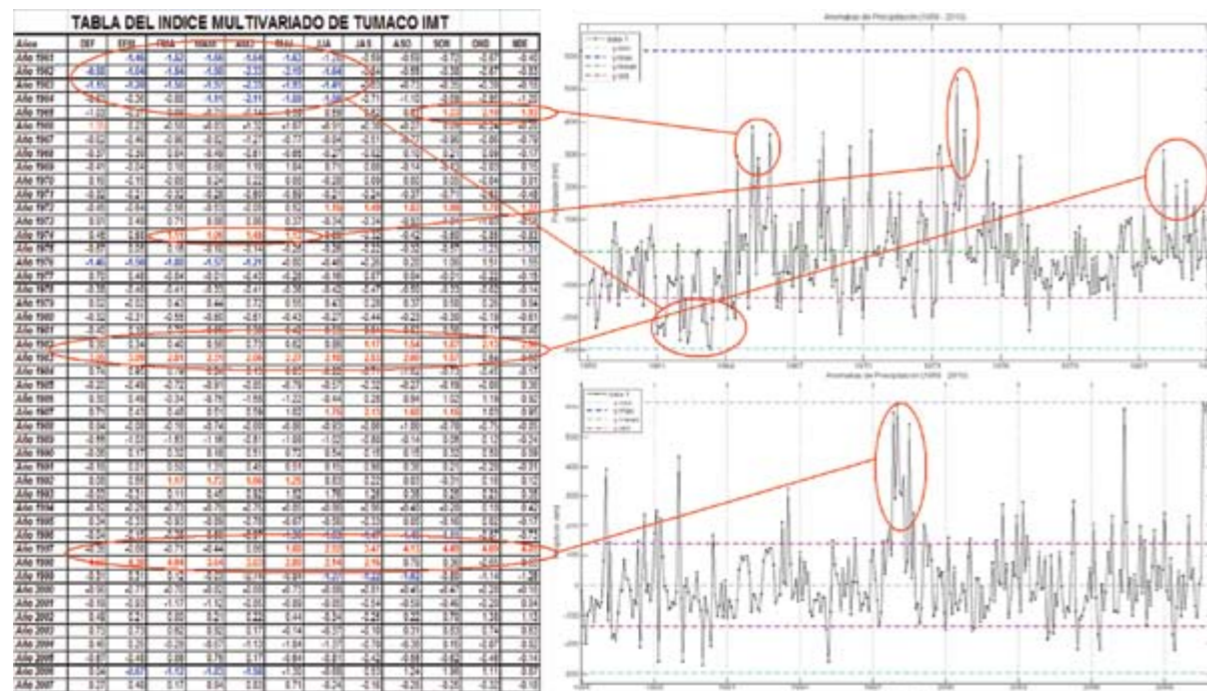


Figura 13. Comparación entre el Índice Multivariado Local de Tumaco con la serie de tiempo de anomalías de precipitación. Los círculos rojos y las flechas conectan períodos cálidos/fríos que coinciden con anomalías positivas/negativas de precipitación.

del sistema de modelado integral de zonas costeras para Colombia. Cantabria 44 pp. Tesis de maestría (MSc en Ciencias Tecnológicas para la Gestión de la Costa). Universidad de Cantabria. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas.

- [10] Manual de Operación Boya Direccional de Oleaje TRIAXYS. Axys Environmental Systems. British Columbia Canadá, 2006.
- [11] Correa, I.D. y Restrepo, J.D. (eds). Geología y Oceanografía del delta del Rio San Juan, litoral pacífico colombiano. Fondo Editorial Universidad EAFIT. Medellín. 221 pp.
- [12] Eslava, J. 1994. Climatología del Pacífico Colombiano. Academia Colombiana de Ciencias Geofísicas. Colección Eratóstenes No. 1. Bogotá DC. Colombia.
- [13] Lobo Alberto-Guerrero Uscátegui. 1993. Hidrología e Hidrogeología de la Región Pacífica Colombiana. Publicado en Leyva, P. (ed) (1993) Colombia-Pacífico. Tomo I, Fondo para la Protección del Medio Ambiente "José Celestino Mutis", FEN Colombia, Bogotá, pp 122.
- [14] Montealegre, E. y J. Pabón. 2002. Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia. Meteorología. Colombia. 5:59-65. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. - Colombia.
- [15] The National Oceanic and Atmospheric Administration-Climate Prediction Center.
- http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears_1971-2000_climo.shtml. [Consultado en agosto 05 de 2012].
- [16] Rodríguez-Rubio, E. 2013. *A multivariate climate index for the western coast of Colombia*. *Adv. Geosci.*, 11, 1-6, 2013.