

ARTÍCULO

## Análisis de la relación entre masas de aire y masas de agua superficiales sobre la Cuenca del Pacífico colombiano para el establecimiento de estaciones hidrometeorológicas de monitoreo

Analysis of the relationship between air masses and superficial water masses of the Colombian Pacific Ocean for the establishment of hydrometeorological monitoring stations

Fecha recepción: 2008-09-15 / Fecha aceptación: 2008-09-26



**Leonardo Moreno**, leonardomoreno@yahoo.com  
Dirección General Marítima, Carrera 54 No. 26-50 CAN, Bogotá

**Nancy Villegas**, nvillegasb@unal.edu.co  
Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 No. 45 01, Ed. Manuel Ancizar, Bogotá

**Igor Málíkov**, ig\_nan@yahoo.com  
Grupo de Investigación CENIT. Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 No. 45 01,  
Ed. Manuel Ancizar, Bogotá

### Resumen

En el presente estudio se realiza un análisis sobre la relación existente entre las masas de aire y las masas de aguas superficiales de la Cuenca del Pacífico colombiano - CPC. El trabajo se basa en el estudio del promedio climático de datos oceanológicos, modelados para el período 1971 - 2000 y, meteorológicos, tomados del archivo de re-análisis del NCEP-NCAR del mismo período. Se identifican las masas de aire y las masas de agua a través del análisis de clúster con las variables meteorológicas Temperatura del Aire -  $T_a$  y Humedad Relativa -  $H_r$  y, las variables oceanológicas Temperatura Superficial del Mar - TSM y Salinidad Superficial del Mar - SSM respectivamente, mes a mes y en promedio. Se establece la correlación entre las masas de aire y de agua por medio del análisis canónico. Se definieron nombres regionales de masas de aire de acuerdo a las características locales. Se dan a conocer las zonas con mayor correlación, las cuales son la base para la determinación de la ubicación de cuatro estaciones hidrometeorológicas de monitoreo en la CPC. Se sugieren tres transeptos hidrológicos para el monitoreo de aguas superficiales del área de estudio.

**Palabras claves:** Masas de agua, masas de aire, estaciones y transeptos de monitoreo hidrometeorológico, Cuenca del Pacífico colombiano.

### Abstract

The present study conducts an analysis on the relationship between air masses and superficial water masses in the Colombian Pacific Ocean (CPO). This work is based on the study of the climate average oceanographic data, modeled for the period 1971- 2000, and meteorological data, taken from the NCEPNCAR reanalysis file in the same period. The air masses and water masses were identified every month and in average, through the cluster analysis with meteorological variables: air temperature ( $T_a$ ) and relative humidity ( $H_r$ ), and oceanographic variables: sea surface temperature (SST) and sea surface salinity (SSM) respectively. The correlation between the air masses and water masses through the canonical analysis was determined. Regional names of air masses according to the local characteristics were defined. The zones with the highest correlation, which are the base for

the determination of the location of four hydrometeorological monitoring stations in the CPC, were shown. Three hydrologic transepts for the superficial water monitoring of the study area are suggested.

**Key words:** Water masses, air masses, hydrometeorological monitoring stations and transects, Colombian Pacific Ocean.

## Introducción

El monitoreo de las variables meteorológicas y oceanográficas en Colombia ha sido realizado de manera irregular por parte de las instituciones encargadas de esta actividad, debido a que los costos, el mantenimiento y el alto consumo de horas hombre hacen del monitoreo océano atmosférico una tarea, además de costosa, muy complicada. La Dirección General Marítima (DIMAR) ha iniciado el desarrollo de un sistema de medición de parámetros oceanográficos y de meteorología marina [1], en el cual se busca ubicar en los principales puertos de Colombia estaciones hidrometeorológicas en apoyo a la labor como autoridad marítima de salvaguardar la vida humana y la seguridad en el mar; sin embargo, no se cuenta con un estudio previo de las condiciones océano atmosféricas de los sitios considerados para la ubicación que permitan ser el factor de decisión.

Para la CPC en un trabajo previo [2] se determinaron zonas homogéneas superficiales que podrían ser la base para identificar la localización de estaciones de monitoreo océano atmosférico del área de estudio. El trabajo mencionado se realizó teniendo en cuenta datos de 82 estaciones, que contaban con información de TSM y SSM tomadas durante expediciones oceanográficas del período 1971-2000, pero infortunadamente no se contaba con datos mes a mes, ni con información meteorológica para obtener un conocimiento más detallado de las condiciones océano atmosféricas de la CPC. El trabajo actual cuenta con datos climáticos de 114 estaciones tanto de TSM como de SSM requerida para la identificación de las masas de agua, y de Ta y Hr superficiales para la determinación de masas de aire. En este trabajo se hace una descripción de los resultados del análisis de *clúster* con el cual se identificaron mes a mes y en promedio las masas de agua y de aire presentes en la CPC. Se describen los resultados de la correlación

canónica entre masas de agua y de aire promedio (7 masas de agua y 5 masas de aire), encontrando la mejor correlación entre ellas, lo que permite determinar las áreas más adecuadas para la ubicación de estaciones y transepts hidrometeorológicos en la CPC. Se realiza además, una regionalización de las masas de aire identificadas.

## Materiales y métodos

### Área de Estudio

La CPC situada al occidente de Colombia, se localiza entre los paralelos 01° 30' y 07° 10' latitud Norte y entre los 77° 40' y 84° 00' latitud Oeste (figura 1).



Figura 1. Cuenca del Pacífico colombiano.

### Datos Utilizados

Para la determinación de las masas de agua se tomaron los valores de las variables de TSM y SSM, resultantes del Modelo Termodinámico de la CPC [3] entre 1971-2000. Este modelo se realizó para el estudio sobre la formación y cambios de las características termodinámicas de las aguas de la CPC en diferentes escalas espacio temporales para la región [4] y [5], tomando información atmosférica global del archivo NCEP-NCAR [6], hidrológica regional [7], batimetría marina de la CPC [8] y campos de temperatura y salinidad del *World Ocean Atlas* [9]. Los resultados obtenidos del último estudio mencionado, fueron los

campos de temperatura, salinidad, nivel del mar y de los componentes de velocidad U y V de las corrientes, desde la superficie del mar hasta el fondo oceánico de la CPC con sus respectivas variaciones en el espacio y en el período de simulación 1948-2000. Los resultados del modelo fueron validados con información *in situ* de la región [3], y el modelo se explica en forma detallada en [10], donde se describe la circulación modelada de las aguas en la CPC.

Para la determinación de las masas de aire se utilizaron los valores de las variables de Ta y Hr del mismo período, del archivo de re-análisis NCEP-NCAR [11].

Con esta información, se procedió a realizar el análisis de *clúster*, el cual permite agrupar regiones teniendo en cuenta la similitud de sus propiedades internas, logrando así identificar las masas de aire (por Ta y Hr), y de agua superficiales (por TSM y SSM) en la región [12]. Seguidamente, se describen los resultados tomando como meses base a marzo, junio, septiembre y diciembre por ser los que presentan los máximos y mínimos de temperatura en la CPC [13] y también los resultados promedio.

Se organizaron los resultados de masas de aire y de agua, teniendo en cuenta los valores promedio de cada una de ellas, y se aplicó el método multivariable de correlación canónica con el fin de ver la relación entre las variables oceanográficas y atmosféricas involucradas. Los resultados de las correlaciones canónicas más altas encontradas en todas las variaciones realizadas, se presentan a manera de tablas. Las estaciones y transeptos hidrológicos propuestos se muestran en una figura con la ubicación sugerida para cada una de ellas, según los coeficientes de correlación canónica encontrados entre masas de aire y de agua.

## Resultados

### Masas de Aire en la CPC

Según el análisis de *clúster* llevado a cabo con la información de Ta y Hr, se determinaron las siguientes masas de aire para los meses de marzo y septiembre de enfriamiento y, junio y diciembre de calentamiento, siendo esto producido por el moviendo aparente de la Zona de Convergencia Intertropical ZCIT [13].

En marzo (figuras 2, 3 y 4) se distinguen cinco masas de aire: la primera se encuentra sobre la zona costera,

entre 1°30' y 6°30'N hasta aproximadamente los 79°W; avanzando hacia el oeste se encuentra una segunda que conserva la posición diagonal desde el noreste hacia suroeste de la CPC similar a la primera. La tercera se encuentra al continuar entre 30' y 1° más hacia la derecha de la anterior, siendo la menos extensa de todas. La cuarta se ubica en el sector suroeste, central y noreste de la CPC desde 1°30' hasta 5°30'N y, la quinta, se encuentra al noroeste de la CPC aproximadamente entre 4° y 5°N y 80° 30' y 84°W. En la tabla 1, se observa que el valor de Ta en las masas de aire de este mes ubicadas en la parte central y noroeste de la CPC, presentan un ligero incremento con relación a los otros meses.

En el mes de junio (figuras 2, 3 y 4) se observó que la ubicación de la masa de aire I va desde los 3°N hasta los 6°30'N y entre los 77°30'W hasta los 78° W inclusive. Las masas de aire II y III van de manera paralela a la masa I, sin embargo, ocurre una división en los 4°N. La masa de aire III va desde los 1°30'N hasta las 4°N. La masa de agua IV se ubica en la parte sur de la CPC a 1°30'N y desde los 80°W hasta los 81°30'W, disminuyendo su área a medida que va recorriendo de forma paralela las masas II y III hasta llegar a los 6°N. La masa de aire V se ubica a partir de los 3°N hasta los 5°N, desde los 79°30'W hasta los 84°W, indicando su comportamiento oceánico. Finalmente, la masa de aire VI se ubicó al suroeste de la CPC, llegando a los 84°W. Los valores de Ta en comparación con marzo, son mayores, excepto en las masas de aire III y IV (tabla 1).

En septiembre (figuras 2, 3 y 4) se obtuvieron seis masas. Las masas I y II conservan en promedio la misma posición que en los meses descritos, pero el *clúster* III se presenta solo al sureste de la CPC, desde la zona costera hasta los 80°30' W y entre 1°30' y 3°30' N. La masa IV presenta una división, masa VI aparece por diferencias con su entorno tanto en Ta como en Hr. La V se mantiene al noroeste de la CPC. Los valores de Ta son menores a los del mes descrito anteriormente (tabla 1).

En diciembre (figuras 2, 3 y 4) las masas de aire presentaron un comportamiento que agrupa las características de Ta y Hr en cinco masas de aire, definidas particularmente por la masa I ubicada de manera paralela a la costa Pacífica, la masa II que localizada desde los 1°30' N hasta los 7°N recorriendo

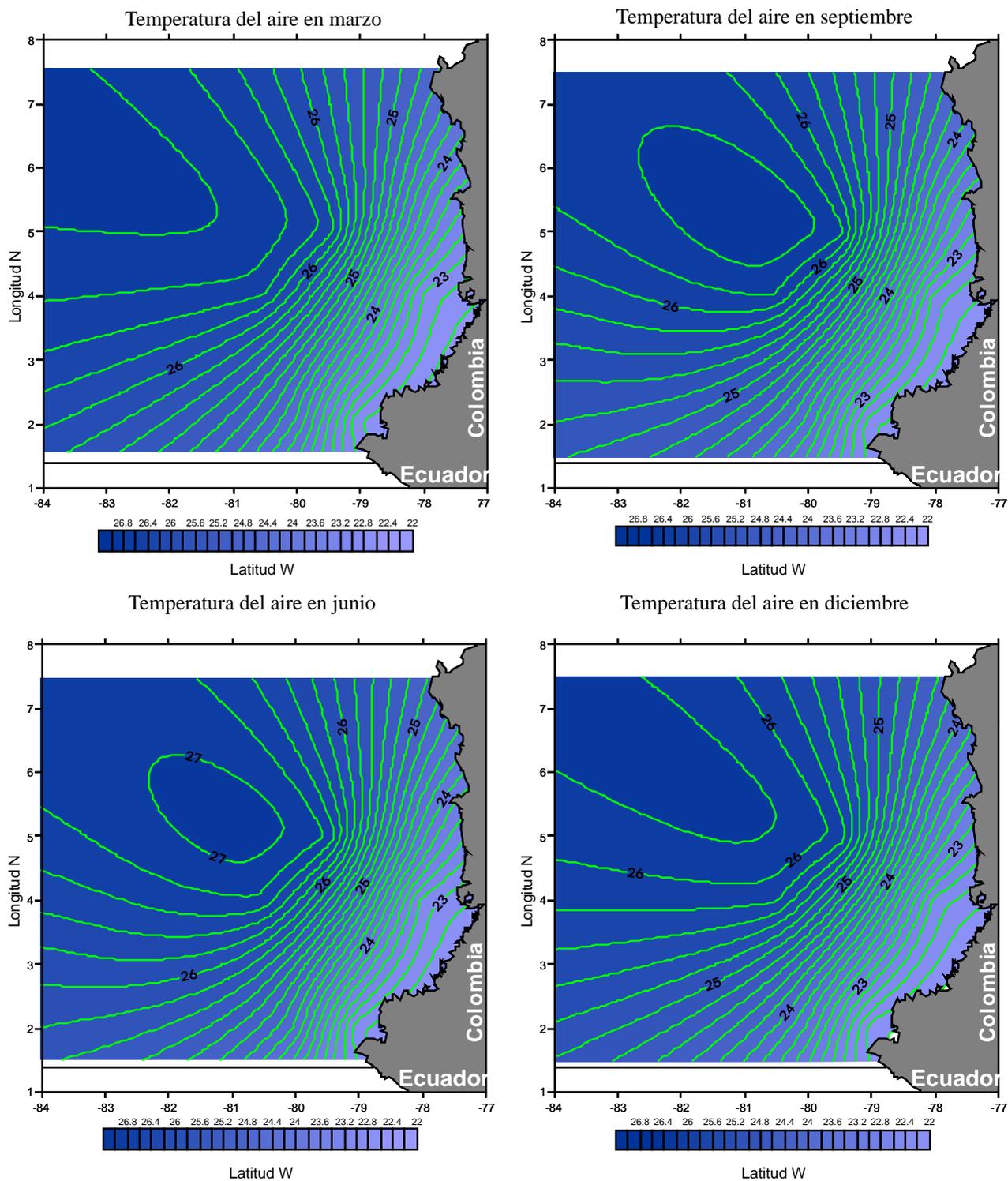


Figura 2. Temperatura del aire en marzo, junio, septiembre y diciembre sobre la CPC.

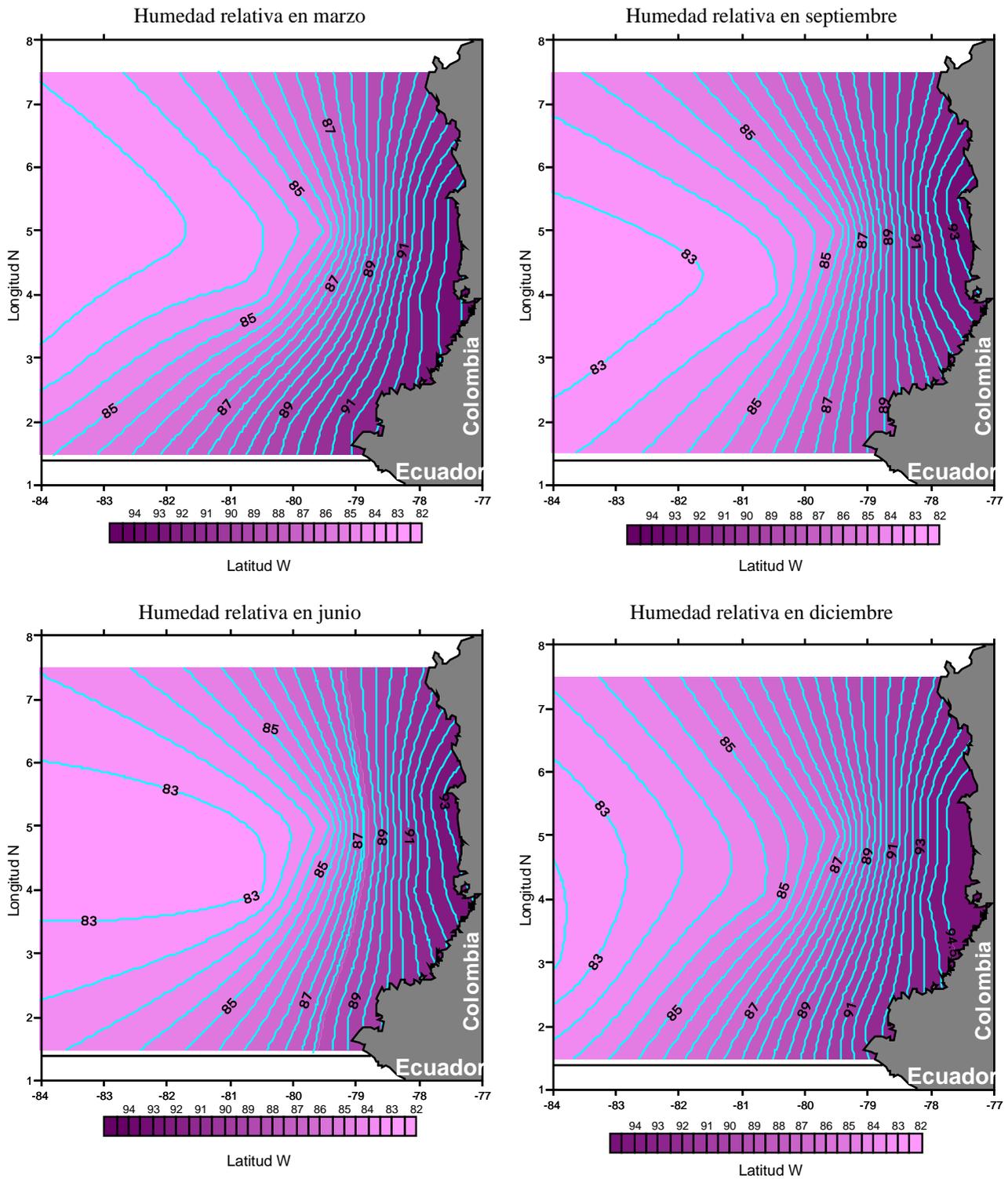


Figura 3. Humedad relativa en marzo, junio, septiembre y diciembre sobre la CPC.

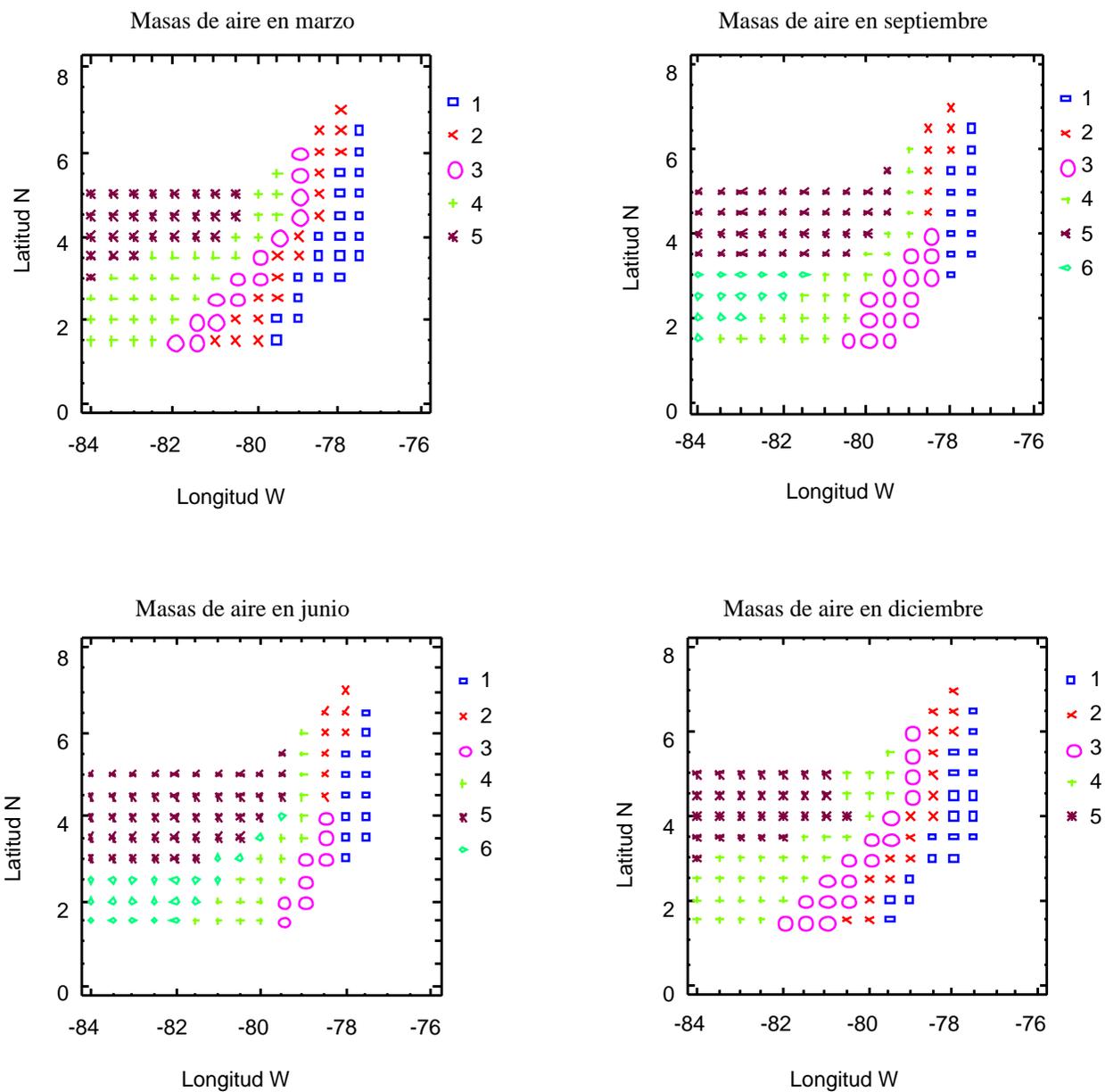


Figura 4. Masas de aire en marzo, junio, septiembre y diciembre de la CPC.

paralelamente la masa I desde los 80°30' W hasta los 78°W; la masa III se comporta de manera idéntica. Finalmente la masa IV ha sido dividida en los 3°30'N por la masa de aire V, la cual se ubicó al noroeste de la CPC. Se nota aquí un descenso en la Ta y aumento de Hr en las zonas I y II (tabla 1).

**Tabla 1.** Valores de las propiedades de Ta y Hr de masas de aire en cuatro meses sobre la CPC.

Mes	Masa de Aire	Ta, °C	Hr, %
<b>Marzo</b>	<b>I</b>	23.4	92
	<b>II</b>	24.5	89
	<b>III</b>	25.3	87
	<b>IV</b>	26.0	85
	<b>V</b>	26.7	84
<b>Junio</b>	<b>I</b>	23.5	92
	<b>II</b>	24.9	90
	<b>III</b>	23.5	89
	<b>IV</b>	25.0	87
	<b>V</b>	26.6	83
	<b>VI</b>	25.7	84
<b>Septiembre</b>	<b>I</b>	23.1	92
	<b>II</b>	24.4	91
	<b>III</b>	23.4	88
	<b>IV</b>	24.9	85
	<b>V</b>	26.1	83
	<b>VI</b>	25.3	83
<b>Diciembre</b>	<b>I</b>	22.8	93
	<b>II</b>	23.8	91
	<b>III</b>	24.5	88
	<b>IV</b>	25.3	85
	<b>V</b>	25.9	83

En promedio de la información del período 1971-2000, son cinco las áreas sobre la CPC que mantienen características uniformes en cuanto a su Ta y Hr, las primeras tres masas se ubican de norte a sur al lado este de la CPC, comenzando desde la costa y llegando hasta aguas centrales o de mezcla, las masas IV y V abarcan el resto de la región cubriendo las aguas centrales y oceánicas hasta la parte oeste de la CPC, la IV ubicada al norte y noroeste y la V al sur y suroeste (figuras 5). La primera masa comienza en 77°30' W con 6°30' N continúa hacia el oeste y sur finalizando sobre 79°30' W con 1°30' N, la segunda a la izquierda de la primera, cubre zonalmente la región entre 78° y 80°30' W y meridionalmente entre 7° y 1°30' N. La tercera más central se ubica entre 79° y 83°30' W y de norte a sur nuevamente. La cuarta inicia al norte en 5°30' N con 79°30' W cruza diagonalmente por el centro de la CPC hasta los 84°W con 1°30'N. Finalmente el quinto y último *clúster* más occidental caracterizado por tener la Ta más alta y menor Hr se ubica entre 80°30' W y 84°W entre 4° y 5°N (tabla 2).

**Tabla 2.** Valores de las propiedades de Ta y Hr de masas de aire promedio (1971-2000) de la CPC.

Masas de aire	Ta, °C	Hr, %
<b>I</b>	23.2	92
<b>II</b>	24.3	89
<b>III</b>	25.1	86
<b>IV</b>	25.9	84
<b>V</b>	26.5	83

Al comparar los valores de Ta de las masas de aire promedio de la región de estudio, con los valores establecidos en los rangos de Ta de las masas de aire conocidas a nivel mundial (cuyas extensiones son de varios kilómetros) y, teniendo en cuenta los procesos que influyen en el comportamiento y distribución de las masas de aire de la CPC (como los vientos alisios del suroeste y del noreste y la posición de cada una de las masas con respecto a la costa y respectivamente al mar abierto), se logró establecer que las masas de aire sobre la CPC pueden ser regionalizadas como masas de aire locales de poca extensión horizontal con la siguiente denominación (figura 6): Masa de Aire Tropical Húmeda Costera, Masa de Aire Tropical Intermedia, Masa de Aire Ecuatorial Intermedia, Masa de Aire Ecuatorial marítima y Masa de Aire Tropical Seca (14).

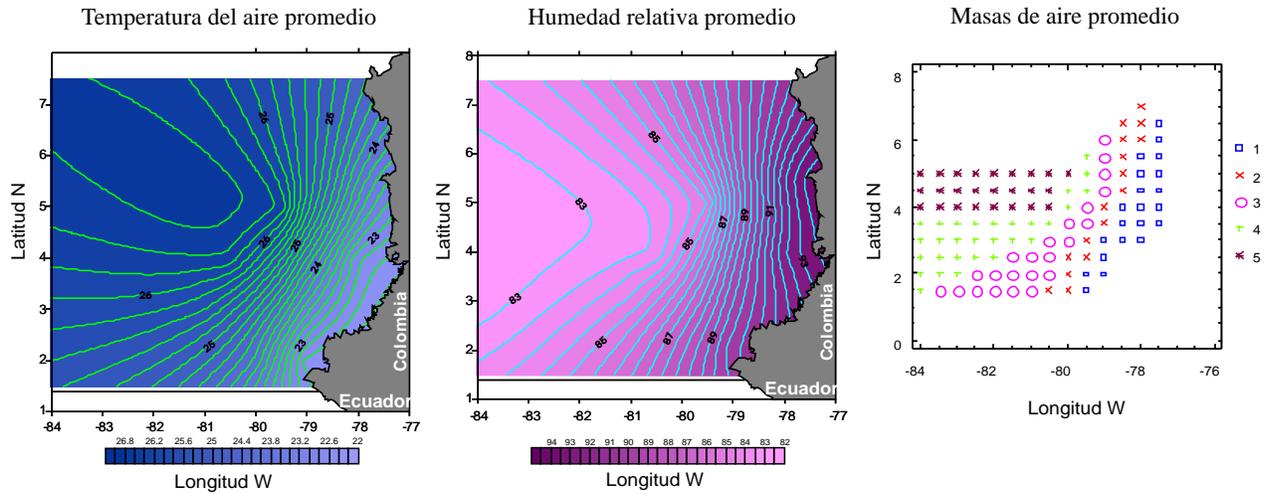
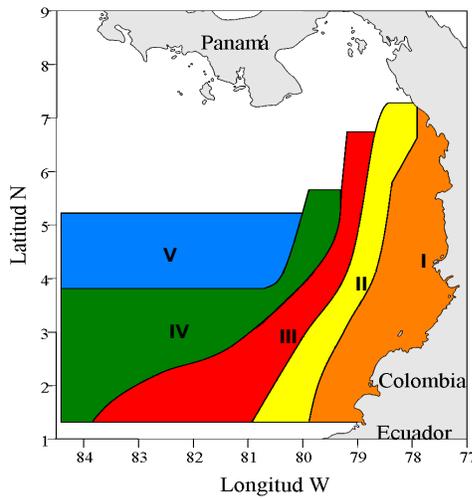


Figura 5. Temperatura del aire, humedad relativa y masas de aire promedio de la CPC. Período 1971-2000.



- I -Masa de Aire Tropical Húmeda Costera
- II -Masa de Aire Tropical Intermedia
- III -Masa de Aire Ecuatorial Intermedia
- IV - Masa de Aire Ecuatorial marítima
- V -Masa de Aire Tropical Seca

Figura 6. Clasificación local de las masas de aire para la CPC. Período 1971-2000. Fuente: Moreno, 2009.

### Masas de Agua en la CPC

En marzo (figuras 7, 8 y 9, tabla 3) la zona costera se divide en dos masas de agua, la primera se encuentra en el norte (I:  $T=24.68$  y  $^{\circ}\text{C}$ ,  $S=33.88$ ) y la segunda (II:  $T=24.25$   $^{\circ}\text{C}$  y  $S=33.22$ ) en la parte sur de la costa, hasta los  $78^{\circ}$  W. La zona de la mezcla de las aguas costeras con las aguas oceánicas se reparte entre las tres masas de agua siguientes (III:  $T=25.12$   $^{\circ}\text{C}$  y  $S=33.91$ ; IV:

$T=25.36$   $^{\circ}\text{C}$  y  $S=33.97$ ; y V:  $T=25.60$   $^{\circ}\text{C}$  y  $S=34.00$ ) en forma lineal desde el norte de la CPC hacia el sur, desde los  $78^{\circ}$  hasta los  $79^{\circ} 30'$  W. La sexta masa de agua (VI:  $T=25.96$   $^{\circ}\text{C}$  y  $S=34.03$ ) ocupa los sectores central y nor-central de la CPC hasta los  $2^{\circ}$  N. La séptima masa de agua (VII:  $T=26.17$   $^{\circ}\text{C}$  y  $S=33.91$ ) se encuentra en los sectores occidental y sur de la CPC.

En la distribución de las masas de agua en junio (figuras 7, 8 y 9, tabla 3) se observa que la tercera masa la zona de mezcla es más delgada que la del mes descrito. La zona costera se divide en dos masas, la primera (I:  $T=26.91\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $S=33.83$ ) se ubica en el norte de la costa desde los  $5^{\circ}\text{N}$ , la segunda (II:  $T=25.64\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $S=32.77$ ) en el sur de la costa. La tercera (III:  $T=26.66\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $S=34.02$ ) se ubica en la zona de mezcla de

las aguas costeras con las aguas oceánicas entre los  $77^{\circ}45'$  y  $78^{\circ}\text{W}$ . La cuarta masa de agua (IV:  $T=26.71\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $S=34.14$ ) ocupa mayor parte de la CPC desde los  $78^{\circ}$  hasta los  $80^{\circ}$  en el sur y hasta  $83^{\circ}\text{W}$  en el norte. Las quinta y sexta masas de agua (V:  $T=26.90\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $S=33.98$  y VI:  $T=25.78\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $S=34.10$ ) se ubican en forma diagonal desde el nor-occidente hacia sur-oriente de la CPC.

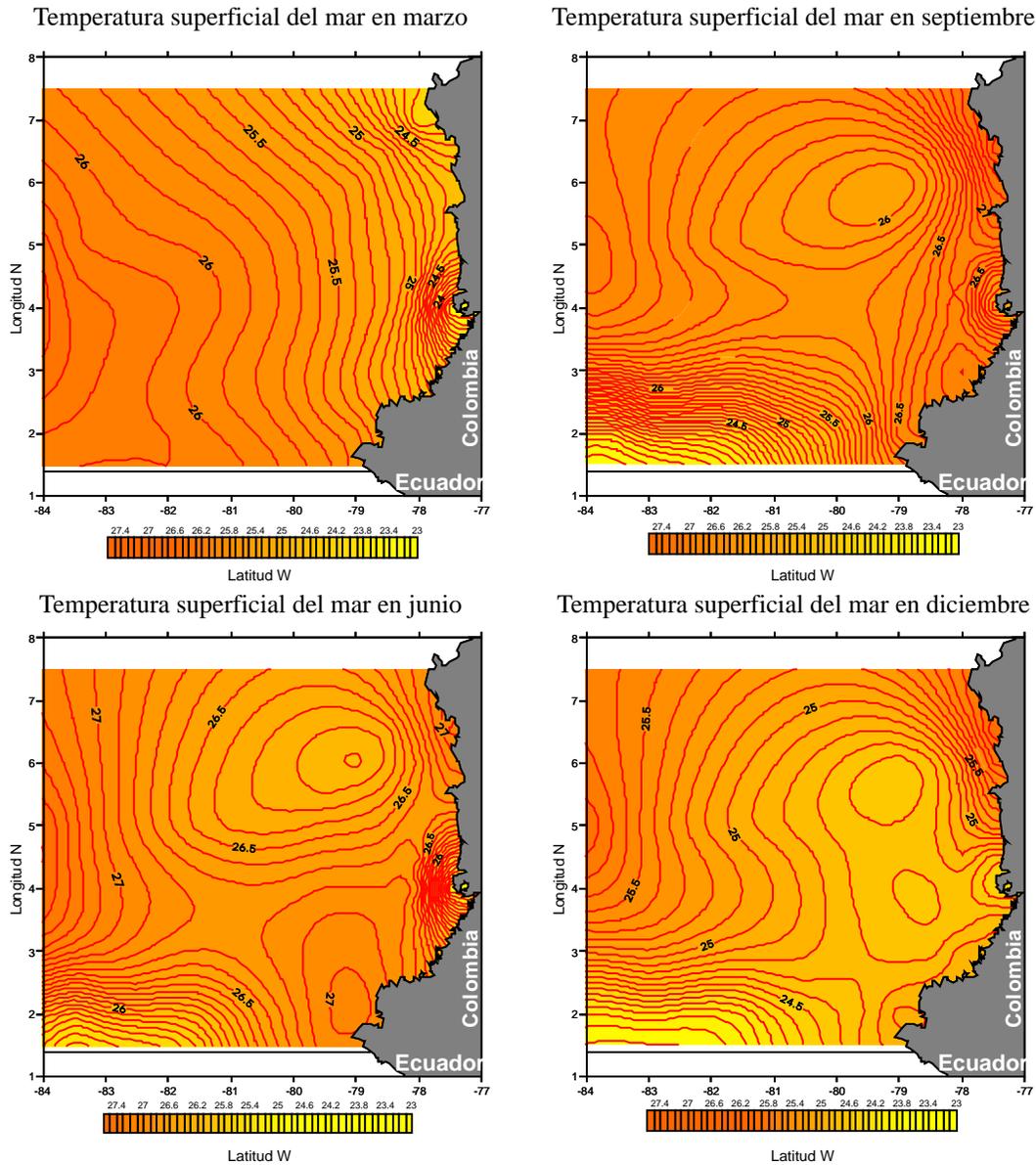


Figura 7. Temperatura superficial del mar en marzo, junio, septiembre y diciembre sobre la CPC.

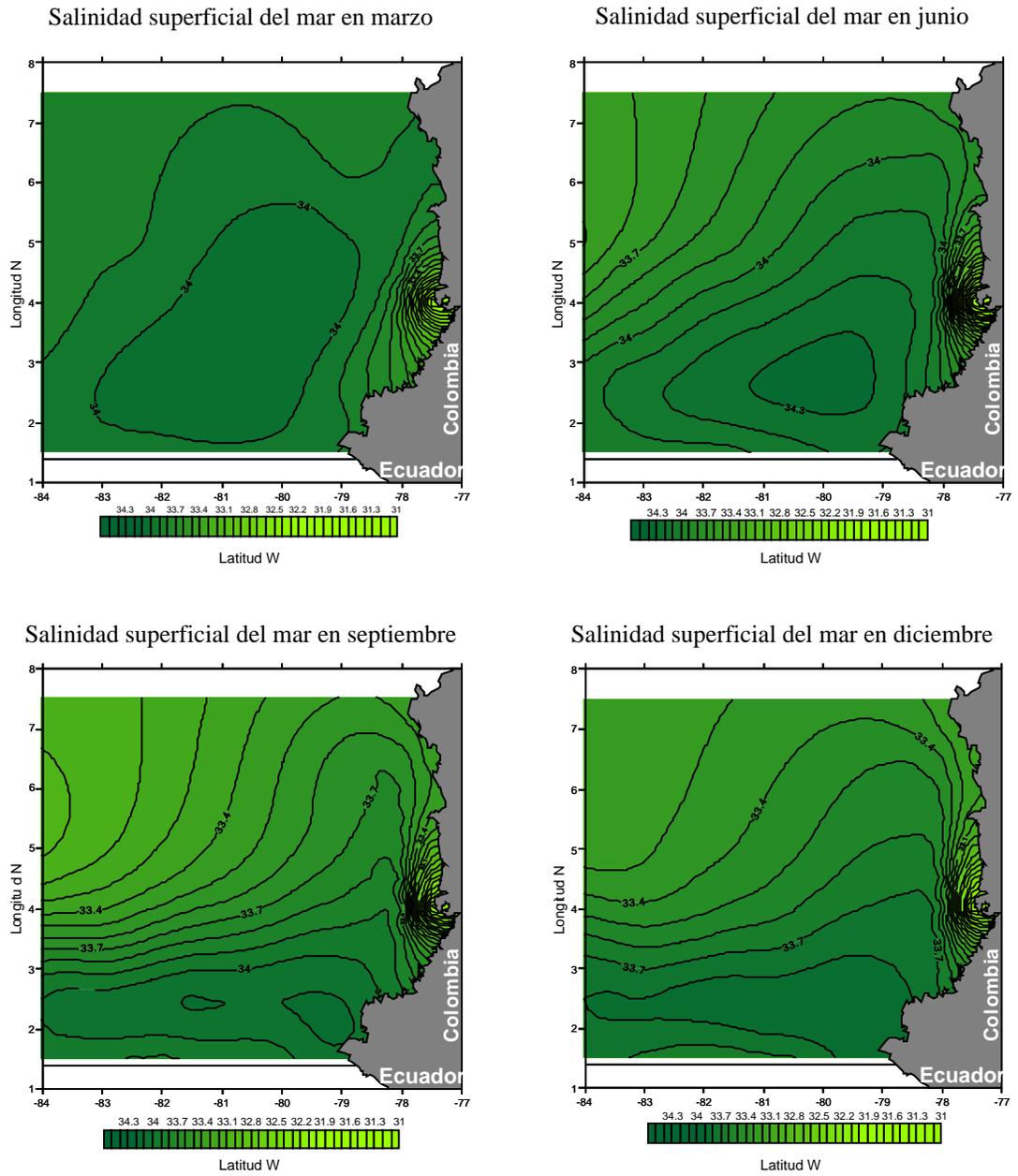


Figura 8. Salinidad superficial del mar en marzo, junio, septiembre y diciembre sobre la CPC.

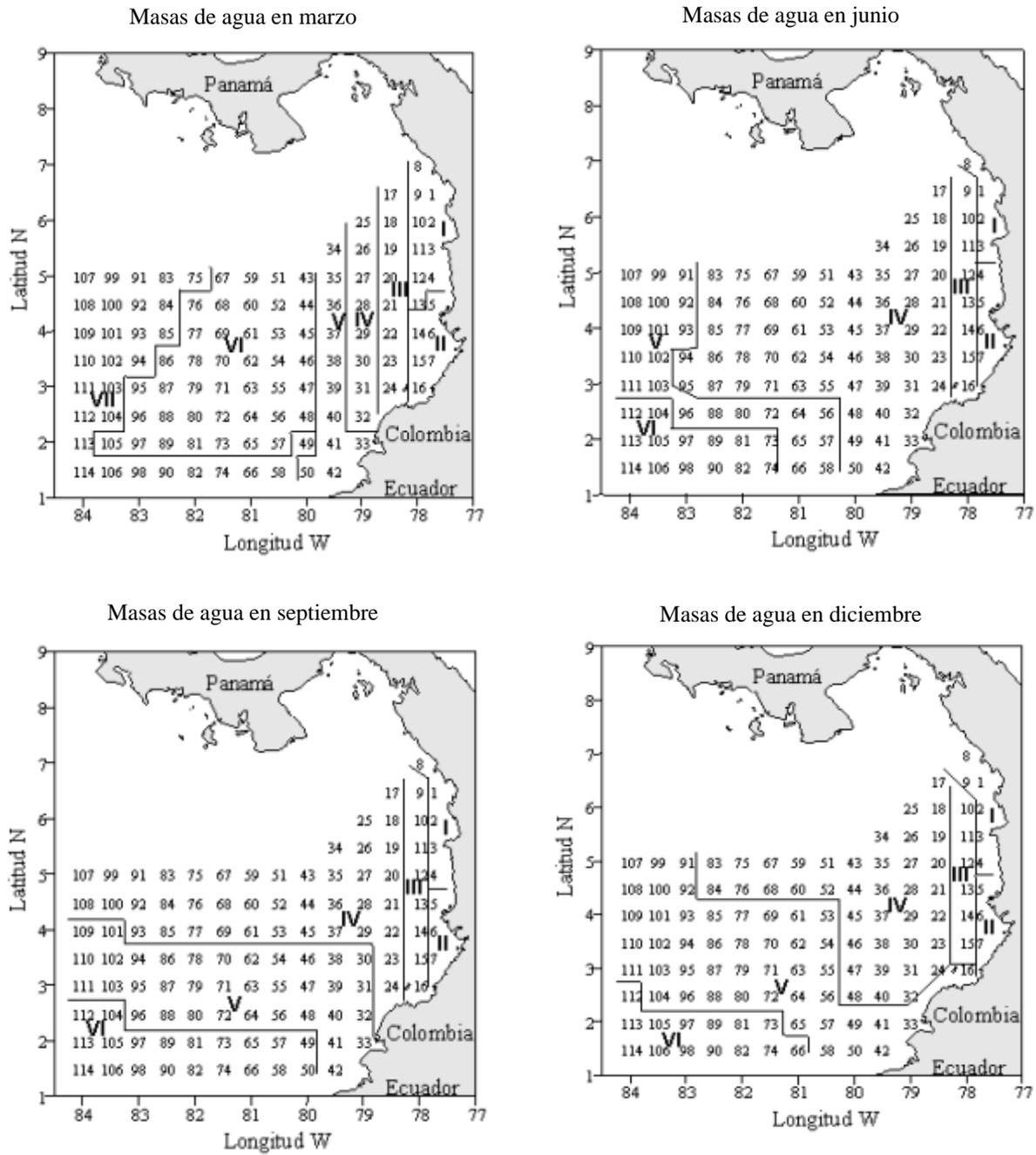


Figura 9. Masas de agua en marzo, junio, septiembre y diciembre de la CPC.

En septiembre (figuras 7, 8 y 9, tabla 3) la primera masa de agua (I: T=27.18 °C y S=33.38) se localiza en el norte de la costa desde los 4° 30' N, la segunda (II: T=26.19 °C y S=32.59) en el sur de la costa. La tercera (III: T=26.75 °C y S=33.77) se ubica en la zona de mezcla de las aguas costeras con las aguas oceánicas en los 78° W. La cuarta masa de agua (IV: T=26.37 °C y S=33.55) se encuentra desde el norte hasta el sur de la CPC en los 78° 30' W y después se ubica desde la parte central hacia el norte de la CPC hasta los 84° W. La quinta masa de agua (V: T=26.02 °C y S=33.91) queda en la parte central de la CPC, aproximadamente entre los 2° y 4° N, atravesando la CPC del oeste al este. La sexta masa de agua (VI: T=24.22 °C y S=33.98) se ubica en el sector sur de la CPC desde los 80° hasta los 84° W.

**Tabla 3.** Valores de las propiedades de TSM y SSM de masas de agua en cuatro meses sobre la CPC.

Mes	Masas de Agua	Temperatura, °C	Salinidad
Marzo	I	24.68	33.88
	II	24.25	33.22
	III	25.12	33.91
	IV	25.36	33.97
	V	25.60	34.00
	VI	25.96	24.03
	VII	26.17	33.91
Junio	I	26.91	33.83
	II	25.64	32.77
	III	26.66	34.02
	IV	26.71	34.14
	V	26.90	33.98
	VI	25.78	34.10
Septiembre	I	27.18	33.38
	II	26.19	32.59
	III	26.75	33.77
	IV	26.37	33.55
	V	26.02	33.91
	VI	24.22	33.98
Diciembre	I	25.56	33.18
	II	24.58	32.42
	III	24.82	33.58
	IV	24.75	33.62
	V	25.01	33.65
	VI	23.96	33.74

En diciembre (figuras 7, 8 y 9, tabla 3) las primeras dos masas de agua dividen a la costa en dos partes, la parte norte con la masa de agua I (I: T=25.56 °C y S=33.18) desde los 4° 30' N, y la parte sur, con la masa de aguas

II (II: T=24.58 °C y S=32.42). La tercera masa de agua (III: T=24.82 °C y S=33.58) se ubica en la zona de mezcla de las aguas costeras con las aguas oceánicas en los 78° W. La cuarta masa de agua (IV: T=24.75 °C y S=33.62) ocupa desde los 2° 30' hacia el norte y en el oeste hasta los 80° W, después de los 80° W, la cuarta masa de agua ocupa la parte norte de la CPC hasta los 4° 30', y hacia el oeste hasta los 82° 30'. La quinta masa de agua (V: T=25.01 °C y S=33.65) queda en diagonal desde el nor-oeste hacia sur-este de la CPC. La sexta masa de agua (VI: T=23.96 °C y S=33.74) queda en la parte sur-oeste de la CPC.

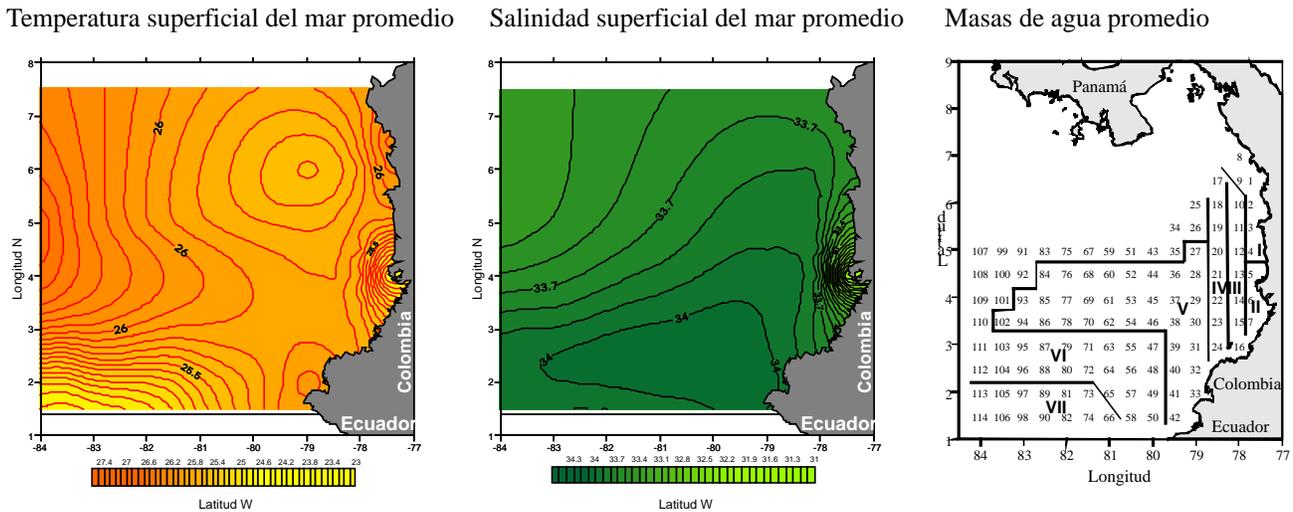
De manera general, esta distribución se encuentra influenciada por la migración de la ZCIT ya que, a finales del año, permite que en el sur de la CPC se establezcan los parámetros físicos logrando una homogeneidad temporal que puede durar 3 meses. A partir del inicio del año, el movimiento aparente de la ZCIT hacia el norte del país se ve reflejado en la variación de los parámetros Termohalinos, brindando la posibilidad de un aumento de la cantidad de masas de agua.

Al tomar toda la información del período 1971- 2000 se obtienen en promedio 7 masas de agua en la CPC (figura 10), de cuyas características generales, el área de la CPC se puede dividir en tres grandes zonas: una zona costera, una zona de mezcla y una zona oceánica (tabla 4). La zona costera se forma por oscilaciones de TSM y SSM debido a la influencia de los aportes de ríos y de los movimientos horizontales y verticales característicos de las zonas costeras, por la influencia de flujos de calor y de las aguas dulces de los ríos. La zona de mezcla caracteriza a la mezcla de las masas de agua con valores de TSM y SSM tanto costeros como oceánicos. La oceánica está conformada por masas de aguas con valores de TSM menores a los de las zonas costera y de mezcla y valores de SSM más altos que los de las dos zonas mencionadas.

Esta subdivisión en tres grandes zonas de las masas de agua de la CPC, pueden ser tomadas para estudios generales, aunque para investigaciones específicas, hay que tener en cuenta que el hecho de que en la zona costera existan a su vez tres masas de agua, dadas por diferentes TSM y SSM, puede advertir la presencia de meandros de intensidad variable que podrían formar parte de corrientes locales costeras a lo largo del Chocó, así mismo como de la corriente de Colombia,

lo cual fue analizado en [15] y que ameritaría estudios más detallados. Lo mismo ocurre con las zonas de mezcla y costera, las que a su vez tienen en su interior a dos masas de agua, que pueden ser estudiadas específicamente para continuar el análisis elaborado en [16], en cuanto a que la mayor proporción de agua proviene del Pacífico Central. También sería importante la realización de un estudio por separado de las siete masas de agua encontradas con

información de los últimos 30 años a fin de entender si las variaciones entreanuales de salinidad y temperatura en aguas superficiales vistas en [17], corresponden a fenómenos océanoatmosféricos de escala global, como las señales de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) encontradas en [18] para la costa Pacífica colomboecuatorial y las relaciones espaciotemporales entre la TSM y Ta sobre la CPC y ENOS analizadas en [19 y 20].



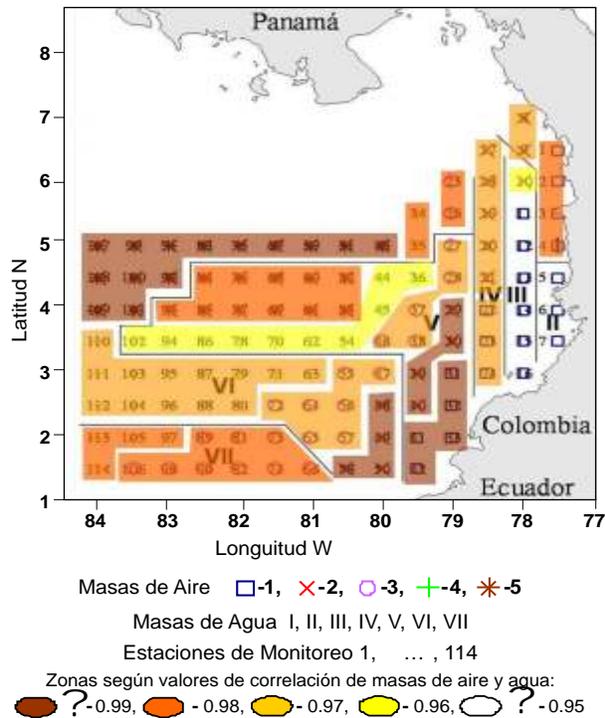
**Figura 10.** Temperatura superficial del mar, salinidad superficial del mar y masas de agua promedio de la CPC. Período 1971-2000.

**Tabla 4.** Valores de las propiedades de TSM y SSM de las masas de agua promedio (1971- 2000) en la CPC.

Zona en la CPC	Masas de agua	TSM, °C	SSM, o/oo
Costera	I	26.0	33.58
	II	25.0	32.61
	III	25.8	33.78
De mezcla	IV	25.7	33.86
	VI	25.6	34.04
Oceánica	V	26.0	33.78
	VII	25.0	33.95

**Correlación canónica entre las masas de agua y masas de aire promedio sobre la CPC**

Con el fin de encontrar la coincidencia entre cada una de las masas de aire y de agua promedio que se encuentran en la CPC, se realizó un análisis estadístico multivariante de relación canónica, cuyos resultados se presentan en la figura 11 y en la tabla 5.



**Figura 11.** Superposición resultante de la correlación canónica entre masas de agua y de aire en la CPC.

**Tabla 5.** Correlación canónica entre masas de agua (O1,...,O7) y de aire (M1,...,M5) promedio (1971- 2000) sobre la CPC.

	M1	M2	M3	M4	M5
O1	0.98	0.97	0.98	0.99	0.99
O2	0.84	0.85	0.96	0.93	0.88
O3	0.95	0.96	0.95	0.95	0.97
O4	0.97	0.97	0.94	0.94	0.96
O5	0.99	0.99	0.97	0.96	0.98
O6	0.99	0.99	0.97	0.97	0.99
O7	0.96	0.95	0.98	0.98	0.97

Colores según valores de correlación de masas de aire y agua:  
 ? - 0.99, ? - 0.98, ? - 0.97, ? - 0.96, ? - 0.95

En la tabla 5 se encuentran los valores de correlación canónica obtenidos entre las siete masas de agua promedio (O1,...,O7) y las cinco masas de aire promedio (M1,...,M5), donde se diferencian los valores en celdas de colores para facilitar la interpretación de los resultados. Debido a que la importancia aquí consiste en definir cuáles son los puntos estratégicos para toma de datos océano atmosféricos en la región, se pretende que, por medio de este análisis de correlación, se puedan encontrar las futuras estaciones de muestreo permanentes que representen a un sector específico dentro de la CPC, según la homogeneidad de sus características atmosféricas y oceanográficas base (Ta, Hr, TSS y SSM), conservando el comportamiento lógico de distribución de las masas de aire y de agua promedio. Esto permitiría optimizar la cantidad de recursos económicos y humanos que se requieren para el monitoreo de la CPC. Es por eso que, se presentan los valores más altos de correlación encontrados, los cuales se clasificaron por rangos y se presentan en celdas de colores: el marrón corresponde a valores iguales o superiores a 0.99, naranja oscuro a valores hasta 0.98, naranja claro a valores hasta 0.97, amarillo a valores hasta 0.96 y finalmente a valores inferiores a 0.95 se les asignó un color blanco.

Lo anterior facilita no sólo la diferenciación de los resultados si no también su observación sobre la figura 11, donde se sobrepuso a las gráficas que representan las masas de agua y de aire con un óvalo del color correspondiente a los valores mencionados. Es así como, según el análisis del comportamiento de las masas de agua y de los resultados de la correlación canónica, se obtuvo que hay 25 correlaciones con un valor superior o igual a 0.96 y, de éstas sólo 16 tienen una correspondencia lógica con el comportamiento espacial de las masas de aire y de agua en la CPC, las cuales corresponden en la tabla 5 a las celdas con números resaltados en color verde. Es decir, que éstas, al sobreponer las masas de aire y de agua promedio, corroboran la coincidencia espacial relacionada con los procesos océano atmosféricos propios de la región (como corrientes y migración de la ZCIT) y, que por lo tanto, pueden servir como base para la ubicación de estaciones permanentes de monitoreo debido a que serán representativas de zonas de características océano atmosféricas homogéneas.

## Discusión

Estudios previos para la identificación de masas de aire propias de la CPC, no se han realizado. Se conoce una descripción aproximada resultante de la extrapolación de información meteorológica del litoral del Pacífico colombiano hacia la CPC [21]. En [21] se asegura que debido a que el litoral Pacífico colombiano (parte continental de Colombia) se puede subdividir en tres zonas climáticas, las correspondientes zonas marítimas serían tres: Zona Norte, (entre 07°08' y 04°57' N), Zona Centro (entre 04°57' y 03°00' N) y Zona Sur (entre 03°00' y 01°36' N). Pero por las características océano atmosféricas locales de la CPC es lógico entender que esta subdivisión es muy general y no corresponde a los procesos que determinan a la dinámica de la región.

En el presente trabajo, la utilización de información meteorológica del archivo NCEP-NCAR, ha permitido obtener por primera vez una descripción detallada mes a mes y en promedio del comportamiento de las masas de aire propios de la CPC. Se obtuvo que en promedio las masas de aire sobre la CPC son cinco. De éstas, hay tres masas de aire que se posicionan a lo largo de la costa representando con sus valores de Ta y Hr no a una correspondencia latitudinal como se menciona en [21], si no al acompañamiento de los movimientos oceánicos característicos de las zonas costeras. En este caso, el valor promedio de Ta de la masa de aire I es el menor, el cual se da como combinación entre las masas de aire costeras frías provenientes de la cordillera y las masas de aire de carácter local de la CPC formadas por influencia de las aguas de los ríos que llegan del continente, así mismo, el alto valor de Hr estaría correspondiendo a los procesos de convección característicos de la costa.

La masa de aire II, por sus valores un poco más altos de Ta y aún altos de Hr, representa en sí su interacción con la corriente marítima superficial cálida de Colombia, la cual atraviesa el sector en forma permanente y proporciona calor y humedad al aire sobre él. Con relación a la III, ésta refleja a la masa de aire que se encuentran sobre aguas que inician su alejamiento de la costa del Pacífico colombiano y acercamiento a las aguas cálidas panameñas del norte y frías que llegan del sur, logrando así una combinación en las características Ta y Hr que reflejan un valor promedio al ser comparados con los valores de las otras 4 masas de aire.

Al hacer un paralelo entre los valores de Ta de las masas de aire IV y V, se observa que la Ta de la masa de aire localizada sobre las aguas provenientes del sur es menor que la Ta de la masa de aire ubicada sobre aguas panameñas, lo cual muestra que la determinación de masas de aire realizado en este trabajo si refleja el comportamiento lógico de interacción océano atmosférica de la región de estudio.

Este comportamiento que se ve con los valores promedio de Ta y Hr, permite además proponer la clasificación local de masas de aire observada en la figura 6.

En cuanto a las masas de agua, las zonas homogéneas identificadas en [2], presentan VII masas, las cuales se determinaron con información promediada de valores *in situ* de TSM y SSM de 82 estaciones oceanográficas obtenidas durante 1970-2000 sobre la CPC en expediciones oceanográficas de la Dirección General Marítima (DIMAR). En el presente estudio la información utilizada son valores de TSM y SSM modelados para 114 estaciones, obteniendo VII masas de agua promedio.

En [2], las siete masas de agua son agrupadas a su vez en tres grandes zonas: zona costera, zona de mezcla y zona oceánica. Con el fin de hacer una comparación de los resultados aquí obtenidos, se realiza la misma división de zonas, encontrando que la zona costera presentada en el trabajo mencionado muestra valores de TSM mayores hasta en 2°C y valores de SSM menores hasta en cinco. La diferencia indica que las TSM y SSM modeladas utilizadas para el presente estudio no muestran la influencia de los procesos costeros, como lo hacen los valores de TSM y SSM *in situ* utilizados en el trabajo [2].

Las zonas homogéneas II y III presentadas en [2] son definidas como zonas de mezcla de las aguas costeras con las aguas oceánicas pero, para las masas de agua del presente estudio se delimitaron como las masas de agua IV y VI también encontradas en [13]. Nuevamente el estudio de [2], presenta valores de TSM mayores en 1.5°C y de SSM menores en 3 aproximadamente.

Finalmente las masas de agua oceánicas para el presente estudio se componen de las masas V y VII teniendo temperaturas ligeramente por encima de las

masas de la zona de mezcla. En [2] se contempla a la zona oceánica con las zonas homogéneas IV, V, VI y VII, con ligeros cambios de TSM entre sí, estando en promedio en los 27°C, mientras que en el presente estudio el promedio es de 25.5°C, así mismo la SSM en las zonas homogéneas de [2] están alrededor de 32.5, teniendo una diferencia de aproximadamente 1.4 con respecto al presente estudio.

La comparación muestra, que a medida que hay un alejamiento de la costa, los valores modelados presentan menores diferencias. Además, aunque la información de TSM y SSM utilizada en el presente trabajo es resultado de una modelación, ésta permitió determinar la misma cantidad de masas de agua encontradas en [2 y 13] y el comportamiento es similar.

Por lo anterior se entiende que, aunque la existencia de modelos numéricos para la obtención de información oceanológica y atmosférica facilita la investigación, es indispensable la utilización de información *in situ* para corroborar dichos modelos. La parcial falta actual de información *in situ* de la CPC, debido a la irregularidad del monitoreo tanto en el tiempo como en el espacio [21], muestra la importancia de hacer un trabajo detallado de identificación de masas de aire y de agua con información modelada y no modelada existente con el fin de obtener una mejor aproximación del comportamiento océano atmosférico de la región de estudio que apoye a la búsqueda de la ubicación más adecuada de estaciones hidrometeorológicas permanentes para el logro de un continuo monitoreo de variables océano atmosféricas que alimenten nuevos modelos y enriquezcan el conocimiento meteorológico y oceanográfico de la CPC.

Con el análisis de correlación canónica realizado entre las masas de aguas y de aire sobre la CPC, se puede clarificar lo encontrado en el trabajo [12], donde se sugieren ocho estaciones hidrometeorológicas permanentes basado en el análisis de *clúster* de masas de agua, distribuidas según tabla 6.

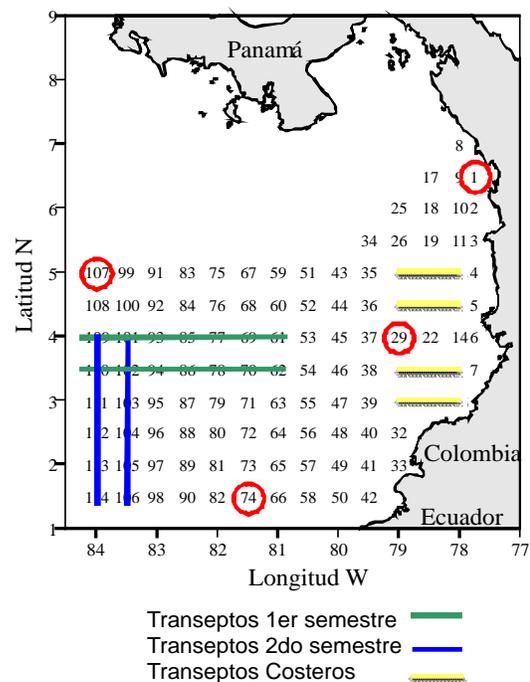
Al localizar la posición de los ocho puntos geográficos de la tabla 6 en la gráfica de superposición resultante de la correlación canónica (figura 11), se observa que las mejores opciones para instalación de estaciones océano atmosféricas permanentes (boyas oceanográficas con equipos de medición de variables atmosféricas y oceanológicas superficiales y subsu-

perficiales) son: para la zona costera, el identificado como punto 1, el cual estaría representando a las masas de agua I y de aire I; para la zona de mezcla, el punto 29 que representaría a las masas de agua V y de aire II; y, para la zona oceánica, el punto 74 que representaría a las masas de agua VII y de aire III. Además, teniendo en cuenta que las boyas oceanográficas tienen como fin obtener información permanente en lugares donde es difícil el acceso continuo de buques oceanográficos, como es el caso de sectores alejados a la costa, se sugiere el punto 107 que representa a la masa de agua VI y masa de aire VI (figura 12).

**Tabla 6.** Posición sugerida para estaciones hidrometeorológicas permanentes en la CPC.

Zona	Longitud Oeste	Latitud Norte	Profundidad, m	No. estación
Costera	77° 30'	6° 30'	300	1
	77° 30'	3° 30'	150	7
	78°	5°	3000	12
De mezcla	78° 30'	6° 30'	3000	17
	79°	4°	2500	29
	80°	4° 30'	2500	44
Oceánica	81° 30'	1° 30'	2500	74
	84°	3°	2500	111

Fuente: Moreno, et al.; 2008.



**Figura 12.** Puntos estaciones hidrometeorológicas y transectos sugeridos para el monitoreo.

Para los sectores no mencionados, se sugiere la continua realización de expediciones oceanográficas estableciendo transeptos teniendo en cuenta los principios de organización de estaciones oceanográficas que son de aplicación general para cualquier región, a excepción de áreas que se desconocen totalmente [22]: a) los transeptos deben ser perpendiculares a las isolíneas de las propiedades (en este caso: temperatura, salinidad) que van a ser objeto de muestreo; b) la distancia entre las estaciones debe determinarse en primer lugar, de acuerdo al supuesto cambio de las propiedades que se van a medir a lo largo del transepto (a no ser de que ya existan estaciones regulares establecidas) y, en segundo lugar, según el ritmo espacial esperado de cambio de las propiedades que se muestrean (cuanto mayor sea éste, menor la distancia entre estaciones); y c) la frecuencia del muestreo debe estar relacionada con la periodicidad esperada de cambio de las propiedades que se muestrean con el transcurso del tiempo propio de la región de estudio. De acuerdo con estos criterios, y teniendo en cuenta que algunos sectores no son cubiertos por los cuatro puntos sugeridos de monitoreo con boyas, se propone además, tres transeptos hidrológicos, dos de los cuales se ubican en el sector oceánico entre los paralelos  $03^{\circ} 30'$  y  $04^{\circ} N$  desde los  $81^{\circ} W$  hasta los  $84^{\circ} W$  en el primer semestre del año y entre los  $83^{\circ} 30'$  y  $84^{\circ} W$  desde los  $01^{\circ} 30' N$  hasta los  $04^{\circ} N$  para el segundo semestre; y, un último transepto en el sector costero ubicado en los paralelos  $03^{\circ}$ ,  $03^{\circ} 30'$ ,  $04^{\circ} 30'$  y  $05^{\circ}$  cubriendo las longitudes  $78^{\circ}$  y  $79^{\circ} W$  para expediciones oceanográficas programadas en cualquier época del año (figura 12).

## Conclusiones

Existen cinco masas de aire sobre la CPC teniendo en cuenta la homogeneidad de la Ta y la Hr. Las primeras tres masas se ubican de norte a sur del sector este de la CPC, comenzando desde la costa y llegando hasta aguas centrales o de mezcla, las masas IV y V abarcan el resto de la región cubriendo las aguas centrales y oceánicas hasta el oeste de la CPC, la IV ubicada al norte y noroeste y, la V al sur y suroeste.

Las masas de agua sobre la CPC son siete, de acuerdo con la homogeneidad de la TSM y la SSM. Éstas, a su

vez pueden agruparse en tres grandes zonas de acuerdo con su lejanía de la costa y mezcla de aguas cálidas del norte y frías del sur, a las que se pueden denominar: zona costera, zona de mezcla y zona oceánica.

Se observa una gran influencia de la ZCIT tanto en el comportamiento de las masas de aire como en el de las masas de agua.

Se obtiene una mejor aproximación en el conocimiento de las masas de aire debido a la utilización de información sobre la CPC acorde con procesos océano atmosféricos de la región, lo que no se tuvo en cuenta en estudios anteriores, donde el análisis se realizaba a través de información de estaciones meteorológicas localizadas en la costa.

Se establecieron nombres para las diferentes masas de aire locales, teniendo los siguientes nombres: Masa de Aire Tropical Húmeda Costera, Masa de Aire Tropical Intermedia, Masa de Aire Ecuatorial Intermedia, Masa de Aire Ecuatorial marítima y Masa de Aire Tropical Seca.

Aunque la herramienta de la modelación matemática es muy importante para la investigación oceanográfica y atmosférica de una región de estudio, se corrobora la importancia del acceso a información *in situ* para la verificación de datos, mejoramiento de modelos y estudios específicos.

Se comprueba que existe una fuerte relación entre las variables meteorológicas y oceanográficas en la CPC, presentando una coincidencia lógica entre los valores de correlación encontrados y los procesos océano atmosféricos presentes en la región.

Los valores de correlación entre masas de aire y de agua encontrados, proveen una aproximación espacial para la localización de cuatro puntos estratégicos de instalación de estaciones océano atmosféricas permanentes (boyas oceanográficas con equipos de medición de variables atmosféricas y oceanológicas superficiales y subsuperficiales) que cubrirían el estudio de las masas de aire I, II, III y VI y las masas de agua I, V, VI y VII. Para las masas no cubiertas, es necesaria la continuación periódica de expediciones oceanográficas con los transeptos sugeridos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen y reconocen el apoyo financiero y soporte recibido por parte del Departamento de Geociencias de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá y del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología Francisco José de Caldas - COLCIENCIAS, enfocado hacia la ejecución del proyecto de investigación del cual fue posible obtener el material requerido para la elaboración del presente artículo.

## Referencias bibliográficas

- [1] Moreno J, Muñoz A. Desarrollo de un sistema de medición de parámetros oceanográficos y de meteorología marina, para el litoral Caribe y Pacífico colombianos. *Boletín Científico CIOH* 2006;24: 148-157.
- [2] Villegas N. 2002. Determinación de zonas homogéneas de aguas superficiales del Océano Pacífico colombiano. *Materiales sección final Cons. Cient.* 3031 enero 2002. St. Petersburg. RSHU: 126-128.
- [3] Villegas N. 2003. Leyes de formación de estructura termodinámica de la Cuenca del Pacífico colombiano. Tesis Doctoral para obtención del título de Ph.D. en ciencias físicas y matemáticas. Universidad Hidrometeorológica del Estado Ruso. San. Petersburgo, Rusia: RSHU. 189.
- [4] Neelov I, Villegas N. Modelación de los cambios estacionales de la circulación de las aguas de la Cuenca del Pacífico colombiano. Material de la sección final del Consejo científico 30-31 enero 2002. St. Petersburg. RSHU 2002:123-124.
- [5] Villegas N, Karlin L. Modelación de la Circulación y de la Estructura Termohalina de las Aguas de la Cuenca del Pacífico colombiano. Selección de Trabajos de Jóvenes Científicos en Hidrometeorología. St. Petersburg. RSHU 2004:116-125.
- [6] Kalnay ER, Kistler Collins, WS Saha, White GJ, Woollen Chelliah, MW Ebisuzaki, Kanamitsu MV, Kousky Van den Dool, HR Jenne, Fiorino M. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2001;82:247-268.
- [7] Vörösmarty CJ, B Fekete, BA Tucker. River Discharge Database, Version 1.0 (RivDIS v1.0), Volumes 0 through 6. A contribution to IHP-V Theme 1. Technical Documents in Hydrology Series. UNESCO, Paris. 1996.
- [8] <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO5/TOPO/ETOPO5/>
- [9] NOAA/NESDIS/NATIONAL OCEANOGRAPHIC DATA CENTER. 1994. World Ocean Atlas 1994. (WOA94)//CD-ROM Data sets Version 4. Washington: Ocean Climate Laboratory National Oceanographic Data Center USA Department of commerce, USA.
- [10] Villegas N, I Málikov. Modelación de la estructura dinámica de las aguas de la Cuenca del Pacífico colombiano. *Boletín Científico CCCP* 2006;(13):97-114.
- [11] <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.coads.1deg.html>.
- [12] Moreno J, Villegas N, Málikov I. Localización de estaciones de monitoreo de las aguas del Pacífico colombiano con base en el estudio de información meteorológica y oceanográfica. Ponencia VIII Congreso Colombiano de Meteorología, Quibdo, Chocó. Marzo 2008.
- [13] Villegas N. Variación anual del contenido de calor de la capa activa del Pacífico colombiano. *Boletín Científico CCCP* 2003;(10):33-46.
- [14] Moreno J. Localización de estaciones de monitoreo de las aguas de la Cuenca del Pacífico colombiano con base en el estudio de información meteorológica y oceanográfica. Tesis para obtención del título de Magister en Ciencias Meteorología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2009. 147.
- [15] Andrade C. Movimiento geostrofico en el Pacifico colombiano. *Boletín Científico CIOH* 1992;(12): 23-38.
- [16] Cabrera E. Estudio del comportamiento de capa de mezcla en un área del Pacífico colombiano y su comparación con un modelo numérico unidimensional. *Boletín Científico CIOH* 1992;(12): 3-12.
- [17] Málikov I, G Camacho. Método de aproximación para determinar cambios entreanuales aplicado a parámetros de temperatura y salinidad del Pacífico colombiano. *Boletín Científico CCCP* 1998;(7):30-41.
- [18] Villegas N, Málikov I, Reyna J, Paul Y. Búsqueda de Señales de El Niño Oscilación del Sur en las Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar de la Costa Pacífica Colombo - Ecuatoriana. Libro de Resúmenes XII Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar (COLACMAR). 15 a 19 de abril 2007. Florianópolis, Brasil.
- [19] Hernández D, Málikov I, Villegas N. Relaciones espacio-temporales entre la Temperatura Superficial del Mar de la Cuenca del Pacífico colombiano y el ciclo El Niño Oscilación del Sur. *Memorias del VII Congreso Colombiano de Meteorología. Adaptación a la Variabilidad y al Cambio Climático.* 5, 6 y 7 de Junio 2006. Bogotá, Colombia.
- [20] Hernández D, Málikov I, Villegas N. Respuestas de las temperaturas superficial del mar y del aire de la Cuenca del Pacífico colombiano producidas por El Niño Oscilación del Sur. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* 2008;7: 57-65.

[21] Devis A, García I, Málíkov I, Villegas N. Compilación oceanográfica de la Cuenca Pacífica colombiana. Panamericana formas e impresiones S.A. Tumaco: Centro Control Contaminación del Pacífico 2002: 124.

[22] Korovin Y. Hidrometría Marina. LGMI. Leningrado 1988: 180.