

MODELACIÓN DEL PERFIL DE CLOROFILA-A EN LA CUENCA PACIFICA  
COLOMBIANA USANDO UNA APROXIMACIÓN GAUSSIANA

STELLA PATRICIA BETANCUR TURIZO

ESCUELA NAVAL DE CADETES "ALMIRANTE PADILLA"  
FACULTAD DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA DE OCEANOGRAFÍA  
CARTAGENA DE INDIAS, D.T Y C.  
2014

MODELACIÓN DEL PERFIL DE CLOROFILA-A EN LA CUENCA PACIFICA  
COLOMBIANA USANDO UNA APROXIMACIÓN GAUSSIANA

Proyecto de grado requisito para optar al título de Magister en Oceanografía

STELLA PATRICIA BETANCUR TURIZO

Director  
Eduardo Martín Santamaría del Ángel  
Doctor en Ciencias en Oceanografía Costera

ESCUELA NAVAL DE CADETES "ALMIRANTE PADILLA"  
FACULTAD DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA DE OCEANOGRAFÍA  
CARTAGENA DE INDIAS, D.T Y C.  
2014

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

Firma del Director

---

Firma del Evaluador

---

Firma del Evaluador

Cartagena de Indias, D.T y C., 12, mayo de 2014

**“Largo es el camino a la sabiduría, porque su recorrido engrandece el alma, forja el coraje y demuestra tu valía... perderse es fácil, pero los corazones sabios, nunca dejan de latir y cada latido es una señal al cerebro, una marcación inconfundible para hallar la ruta nuevamente”.**

***Amigos del alma, sabios amigos, gracias por latir a mi lado y permitirme volver al rumbo deseado.***

***sepabe***

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora desea expresar sus agradecimientos a mi director el doctor Eduardo Santamaría por sus consejos y acompañamiento constante, a Henry, Gise, Mary Luz, Jean y Moisés por su amistad y lealtad. A la Facultad de Oceanografía Física de la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, representada en sus decanos, Guillermo Laverde, Mauricio Moreno, Samuel Rivera, Juan Carlos Acosta, Ricardo Molares y Nelson Murillo, por la confianza dada para asumir las responsabilidades diarias, sobre las cuales adquirí el impulso requerido para culminar esta meta de mi vida. Al Centro de Investigaciones Oceanográficas del Pacífico (CCCP), por el suministro de los datos analizados, cuyos resultados serán fundamentales para el fortalecimiento de las futuras investigaciones de este centro y como aporte al conocimiento de la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC). Al Grupo de Investigación de Ecología del Fitoplancton de la Universidad Autónoma de Baja California, por la orientación, apoyo profesional y suministro de los datos de reflectancias satelitales requeridos para el desarrollo de este trabajo

A mi familia, por darme las bases necesarias para afrontar retos y trabajar en el logro de las metas deseadas, a pesar de los obstáculos del camino. A ti, mi amado Adán, por el acompañamiento en las etapas finales de mi investigación, tu guía y confianza, fueron fundamentales para el logro de los objetivos trazados.

*Stella Patricia Betancur Turizo*

## CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	6
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	7
3.1 ASPECTOS FÍSICOS.....	7
3.2 ASPECTOS GENERALES DEL FITOPLANCTON DE LA REGIÓN .....	11
4. METODOLOGÍA.....	15
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS ANALIZADA.....	15
4.2 DESCRIPCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS .....	19
4.3 CALCULO DE PARÁMETROS GAUSSIANOS.....	19
4.4 DETERMINACION DE ESCENARIOS DE VARIABILIDAD ESTACIONAL.....	23
4.5 DETERMINACIÓN DE REGIONES BIOGEOGRÁFICAS DINÁMICAS .....	23
4.5.1 Determinación de Regiones Biogeográficas Dinámicas .....	23
4.5.2 Selección de productos espectralradiométricos utilizados para definir las RBGs, en la CPC. ....	25
4.5.3 Determinación de las Funciones Empíricas Ortogonales Estandarizadas (SFEO). ....	27
4.5.4 Graficación de las SFEO <sub>1</sub> .....	30
4.5.5 Cálculo de rotacional del esfuerzo del viento .....	31
5. RESULTADOS .....	32
5.1 ANÁLISIS DE PERFILES DE CLOROFILA <i>IN SITU</i> VS PERFILES MODELADOS .....	32
5.1.1 Análisis de la base de datos de la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC) .....	32
5.1.2 Análisis de la distribución de los datos .....	35
5.1.3 Significancia estadística de los perfiles modelados.....	37
5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS GAUSSIANOS.....	43
5.2.1 Cruceros ERFEN tomados en época seca.....	45
5.2.2 Cruceros ERFEN tomados en época de lluvias .....	49
5.3 VARIABILIDAD ESTACIONAL .....	90
5.3.1 Región 5 en Años cálidos.....	98
5.3.2 Región 5 en Años Fríos.....	99
5.3.3 Región 5 en Años Promedios.....	101
6. DISCUSIÓN .....	104
7. CONCLUSIONES.....	109
8. RECOMENDACIONES .....	112
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>113</b>

## LISTA DE FIGURAS

pág.

- Figura 1.** Límites de la Cuenca Pacífica Colombiana. Tomado de (Betancur y Martínez, 2003) y editada para el presente trabajo. .... 7
- Figura 2.** Masas de agua superficial de la CPC, definidas de acuerdo con sus propiedades termohalinas. Modificado de Málikov et al. (2010). .... 11
- Figura 3.** Retícula de estaciones de cruceros oceanográficos realizados por el CCCP desde 1996, en la Cuenca Pacífica Colombiana. .... 15
- Figura 4.** Retícula de estaciones de cruceros oceanográficos realizados por el CCCP desde 1996 hasta 2012, sobre la cual se ha generado la base de datos de Clorofila-a empleada por la presente investigación. Cada punto representa una estación, los valores en color negro hacen referencia al número de la estación y los valores en color rojo hacen referencia al número de perfiles de clorofila-a tomados en cada una. .... 18
- Figura 5.** Representación esquemática de cómo una curva de Gauss superpuesta sobre una biomasa base constante ( $B_0$ ) se puede utilizar para representar columnas de agua verticalmente estratificadas con perfiles de biomasa no uniformes. Además de  $B_0$ , tres parámetros gaussianos determinan la forma y la magnitud de cada perfil: el parámetro  $\sigma$  define la anchura del pico de la clorofila;  $z_m$  determina la profundidad a la que se produce el máximo de clorofila, y  $h$  es la integral de la biomasa bajo la curva gaussiana. La altura máxima del pico de biomasa por encima de la biomasa base,  $H$ , se puede derivar de la ecuación  $H = h/(\sigma\sqrt{2\pi})$ . Tomado de (Platt y Sathyendranath, 2007). .... 20
- Figura 6.** Número de estaciones monitoreadas en cada crucero objeto de estudio. La línea roja representa el valor promedio de estaciones (20) por crucero de la base de datos analizada. .... 33
- Figura 7.** Frecuencia de monitoreo de las estaciones que integran la retícula ERFEN. El número del recuadro indica la estación y la convención su representación por crucero. .... 34
- Figura 8.** Relación entre los perfiles reales, correspondientes a los datos de Clorofila-a medidos en la Estación No. 29, y los perfiles modelados, determinados por el modelo de la Gaussiana desfasada definido por Platt et al. (1988). Cada gráfico representa esta relación en la Estación No.29, para: a) junio de 1996, b)

mayo de 1998, c) agosto de 2001, d) septiembre de 2003, e) marzo de 2006 y f) septiembre de 2010..... 40

**Figura 9.** Relación entre los perfiles reales, correspondientes a los datos de Clorofila-a medidos en la Estación No. 49, y los perfiles modelados, determinados por el modelo de la Gaussiana desfasada definido por Platt et al. (1988). Cada grafico representa esta relación en la Estación No.49, para: a) junio de 1996, b) mayo de 1999, c) agosto de 2001, d) septiembre de 2003, e) septiembre de 2007 y f) septiembre de 2012. .... 41

**Figura 10.** Relación entre los perfiles reales, correspondientes a los datos de clorofila-a medidos en la Estación No. 77, y los perfiles modelados, determinados por el modelo de la Gaussiana desfasada definido por Platt et al. (1988). Cada grafico representa esta relación en la Estación No.77, para: a) mayo de 1999, b) agosto de 2001, c) marzo de 2002, d) marzo de 2006, e) septiembre de 2009, y f) noviembre de 2011..... 42

**Figura 11.** Representación de la época seca por el campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento. Marzo de 2002..... 44

**Figura 12.** Representación de la época de lluvia por el campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento. Septiembre de 2002..... 44

**Figura 13.** Bioregionalización dinámica para marzo de 2002, en la Cuenca Pacífica Colombiana. .... 48

**Figura 14.** Bioregionalización dinámica para marzo de 2006, en la Cuenca Pacífica Colombiana ..... 48

**Figura 15.** Campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento, para: a) mayo de 1997, b) mayo de 1998, c) mayo de 1999 y d) mayo de 2000 en la Cuenca Pacífica Colombiana. .... 53

**Figura 16.** Bioregionalización dinámica para mayo de 1997, en la Cuenca Pacifica Colombiana ..... 55

**Figura 17.** Bioregionalización dinámica para mayo de 1998, en la Cuenca Pacífica Colombiana ..... 56

**Figura 18.** Bioregionalización dinámica para mayo de 1999, en la Cuenca Pacifica Colombiana ..... 57



<b>Figura 19.</b> Bioregionalización dinámica para mayo de 2000, en la Cuenca Pacífica Colombiana .....	57
<b>Figura 20.</b> Distribución vertical de las estaciones ubicadas en la <b>R5</b> del crucero de mayo de 1999.....	58
<b>Figura 21.</b> Distribución vertical de las estaciones ubicadas en la <b>R6</b> del crucero de mayo de 1999.....	59
<b>Figura 22.</b> Bioregionalización dinámica para junio de 2001, en la Cuenca Pacífica Colombiana .....	62
<b>Figura 23.</b> Bioregionalización dinámica para agosto de 2001, en la Cuenca Pacífica Colombiana .....	64
<b>Figura 24.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2002, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	71
<b>Figura 25.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2003, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	71
<b>Figura 26.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2004, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	72
<b>Figura 27.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2005, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	73
<b>Figura 28.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2006, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	74
<b>Figura 29.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2007, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	74
<b>Figura 30.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2008, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	75
<b>Figura 31.</b> Distribución vertical de las estaciones del crucero de septiembre de 2008, según la RBG descrita. a) <b>R5</b> , b) <b>R6</b> y c) <b>R7</b> .....	76
<b>Figura 32.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2009, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	77
<b>Figura 33.</b> Distribución vertical de las estaciones del crucero de septiembre de 2009, según la RBG descrita. a) <b>R5</b> , b) <b>R6</b> y c) <b>R11</b> .....	77

<b>Figura 34.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2010, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	78
<b>Figura 35.</b> Distribución vertical de las estaciones del crucero de septiembre de 2010, según la RBG descrita. a) <b>R5</b> y b) <b>R6</b> . ....	79
<b>Figura 36.</b> Bioregionalización dinámica para septiembre de 2012, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	79
<b>Figura 37.</b> Bioregionalización dinámica para octubre de 2009, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	83
<b>Figura 38.</b> Distribución vertical de las estaciones del crucero de octubre de 2009, según la RBG descrita. a) <b>R5</b> y b) <b>R6</b> . ....	83
<b>Figura 39.</b> Bioregionalización dinámica para octubre de 2010, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	84
<b>Figura 40.</b> Distribución vertical de las estaciones del crucero de octubre de 2010, según la.....	85
<b>Figura 41.</b> Bioregionalización dinámica para octubre de 2011, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	86
<b>Figura 42.</b> Distribución vertical de las estaciones del crucero de octubre de 2011, según la.....	86
<b>Figura 43.</b> . Campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento, para: a) noviembre de 2000 y b) noviembre de 2011 en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	88
<b>Figura 44.</b> Bioregionalización dinámica para noviembre de 2000, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	89
<b>Figura 45.</b> Bioregionalización dinámica para noviembre de 2011, en la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	90
<b>Figura 46.</b> Serie de Tiempo de anomalías de TSM (Temperatura Superficial del Mar) extraída del AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) para la estación de Tumaco (Nariño), coordenadas 2°N y -79°W.....	91
<b>Figura 47.</b> Análisis de factor para las categorías de variabilidad estacional: años fríos, años cálidos y años promedio de la CPC.....	93

**Figura 48.** Análisis de factor con base en componentes principales para la región 5 en años fríos..... 101

## LISTA DE TABLAS

pág.

<b>Tabla 1.</b> Resumen de los cruceros oceanográficos realizados en la CPC. Las casillas negras, representan los cruceros efectuados con personal del CCCP y corresponden a los empleados por el presente trabajo (CCCP, 2002). .....	16
<b>Tabla 2.</b> Periodos de muestreo de los cruceros ERFEN realizados entre 1996 – 2012, en los cuales se tomaron muestras de agua en la vertical para determinar concentración de Clorofila-a. Entre paréntesis se presenta, el número de perfiles tomados por crucero. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Cantidad de imágenes a 9km de reflectancias satelitales extraídas para la determinación de Regiones Biogeográficas en la CPC.....	26
<b>Tabla 4.</b> Relación de Reflectancias satelitales (Rrs) de cada sensor, disponibles (X) para cada crucero.....	28
<b>Tabla 5.</b> Promedio de Rrs <sub>412-413</sub> para el crucero de Septiembre de 2002. ....	29
<b>Tabla 6.</b> Promedio de Rrs <sub>490-488</sub> para el crucero de Septiembre de 2002 .....	29
<b>Tabla 8.</b> Distribución de los cruceros ERFEN, según el mes de muestreo y su presencia en la estacionalidad de la Cuenca Pacífica Colombiana. ....	33
<b>Tabla 8.</b> Planes de muestreo aplicado en la CPC entre los años 1996 y 2002. Las profundidades están expresadas en metros.....	36
<b>Tabla 9.</b> Planes de muestreo aplicado en la CPC entre los años 2003 y 2005. Las profundidades están expresadas en metros.....	36
<b>Tabla 10.</b> Planes de muestreo aplicado en la CPC entre los años 2006 y 2012. Las profundidades están expresadas en metros.....	36
<b>Tabla 11.</b> Relación del número y porcentaje de perfiles modelados de clorofila-a, estadísticamente significativos, respecto al total de perfiles modelados para cada crucero. ....	38
<b>Tabla 12.</b> Porcentaje de perfiles modelados estadísticamente significativos, según el número de datos (n). ....	39
<b>Tabla 13.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para el crucero No. 34 (marzo de 2002). ....	45

<b>Tabla 14.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para el crucero No. 42 (marzo de 2006). Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros.....	46
<b>Tabla 15.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de mayo de 1997.....	49
<b>Tabla 16.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de mayo de 1998.....	50
<b>Tabla 17.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de mayo de 1999.....	51
<b>Tabla 18.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de mayo de 2000.....	52
<b>Tabla 19.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de junio de 1996.....	60
<b>Tabla 20.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de junio de 2001.....	60
<b>Tabla 21.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de agosto de 2001. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros.....	63
<b>Tabla 22.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2002.....	65
<b>Tabla 23.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2003.....	65
<b>Tabla 24.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2004.....	66
<b>Tabla 25.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2005.....	66
<b>Tabla 26.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2006. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestras a cero metros.....	66
<b>Tabla 27.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2007.....	67

<b>Tabla 28.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2008. ....	67
<b>Tabla 29.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2009. ....	68
<b>Tabla 30.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2010. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros. ....	68
<b>Tabla 31.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2012. ....	69
<b>Tabla 32.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado clorofila-a, para tomados en el mes de octubre de 1996, 1998, 2004 y 2009. ....	80
<b>Tabla 33.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de octubre de 2010. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros. ....	81
<b>Tabla 34.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de octubre de 2011. ....	81
<b>Tabla 35.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de noviembre de 2000. ....	87
<b>Tabla 36.</b> Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de noviembre de 2011. ....	87
<b>Tabla 37.</b> Categorización de cada uno de los cruceros ERFEN, según el escenario de variabilidad estacional al que pertenecen por el año en el que fueron muestreados. ....	91
<b>Tabla 38.</b> Promedios de los parámetros gaussianos, de las estaciones correspondientes a cada categoría de variabilidad estacional. ....	92
<b>Tabla 39.</b> Promedios de los parámetros gaussianos, de las estaciones correspondientes a cada región de cada categoría de variabilidad estacional. ....	94
<b>Tabla 40.</b> Estaciones presentes en cada región por año frío, cálido y promedio. .	95
<b>Tabla 41.</b> Parámetros gaussianos determinados para las estaciones de la <b>R5</b> presente en los cruceros de años cálidos. ....	98

**Tabla 42.** Parámetros gaussianos determinados para las estaciones de la **R5** presente en los cruceros de años fríos. .... 99

**Tabla 43.** Parámetros gaussianos determinados para las estaciones de la R5 presentes en los cruceros de años promedios. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros..... 102

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Perfiles generalizados de chla-a (Gaussiana) .....	20
<b>Ecuación 2.</b> Correlación lineal de Pearson .....	22
<b>Ecuación 3.</b> Función Empírica Ortogonal clásica.....	24
<b>Ecuación 4.</b> Transformación Z .....	24
<b>Ecuación 5.</b> Correlación lineal de Pearson para variables estandarizadas.....	29
<b>Ecuación 6.</b> Función Empírica Ortogonal Estandarizada.....	30
<b>Ecuación 7.</b> Rotacional del esfuerzo del viento.....	31



## RESUMEN

Para determinar el perfil vertical de la biomasa de la clorofila, en una cuenca oceanográfica como la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC), se puede aplicar el modelo de distribución Gaussiana definido por Platt, *et al.* (1988), cuyos parámetros constituyentes, pueden variar ampliamente con las regiones y las estaciones. En la CPC, se han desarrollado monitoreos anuales desde 1996, dentro de los cuales se ha determinado la concentración de clorofila-a, en una retícula de 44 estaciones, que conforma una base de datos integrada por 459 perfiles. Un análisis de “match-up”, permitió determinar 231 perfiles modelados estadísticamente significativos (53%), a los cuales se les calcularon los cuatro parámetros gaussianos ( $B_0$ ,  $z_m$ ,  $\sigma$  y  $h$ ), la clorofila integrada a la profundidad del máximo de clorofila-a y la clorofila-a integrada total del perfil. Dichos parámetros, fueron analizados de acuerdo a regiones biogeográficas dinámicas (RBGs) identificadas en cada crucero. Estas RBGs, fueron determinadas, a partir de un análisis multisensor con las radianzas normalizadas  $Rrs_{412}$  (410 de VIIRS y 413 de MERIS) y  $Rrs_{490}$  (488 de MODIS y 486 de VIIRS), lo cual permitió identificar regiones asociadas a procesos costeros y oceánicos en la CPC. Los parámetros gaussianos fueron asociados y analizados según la región y el escenario de variabilidad estacional (año fríos, cálidos y promedio) determinada de la serie de tiempo de 1982 a 2012, extraída del AVHRR para la estación de Tumaco (Nariño). Los perfiles modelados describieron asociaciones del parámetro  $B_0$  para las regiones en periodos fríos, pero no pudo identificarse una asociación significativa en la distribución vertical de los perfiles, respecto a las regiones y escenarios de variabilidad estacional.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los océanos representan una gran incógnita en nuestro entendimiento debido a los complejos sistemas de interrelaciones que ocurren en él (EOS, 1989). Una de las metas en la oceanografía es el de determinar y entender en escala global los procesos que controlan la variación temporal de los flujos de carbón y de los elementos biogénicos con los que se encuentran asociados en el océano (Malone y Roederer, 1985).

Dentro de estos flujos, es de gran importancia la fijación de carbono en el océano por fotosíntesis, pues es rigurosamente del mismo orden de magnitud que la productividad orgánica primaria que se genera en el medio terrestre (EOS, 1986). Tanto la biomasa fitoplanctónica, así como su producción, constituyen variables de primordial interés, para los investigadores dedicados a los flujos de carbón.

Por otra parte para entender el papel biológico dentro de estos flujos, no hay que perder de vista a los procesos físicos, como lo son la irradiación solar y energía cinética turbulenta (TKE), los cuales afectan grandemente la dinámica del fitoplancton marino (v.gr. Mackas *et al.*, 1985 entre muchos otros) y por lo tanto pueden llegar a funcionar como reguladores de la producción orgánica primaria.

Sin embargo la visualización global de estos procesos puede ser muy difícil tanto en espacio como en tiempo, por lo que una vía para facilitar el estudio sinóptico-global de estos procesos, puede ser el uso de los satélites. Antes del surgimiento de esta herramienta, los estudios oceanográficos podían describir de una manera más o menos confiable, los fenómenos a mesoescala, más cuando se incursionaba en macroescala, se tenían que hacer uso de datos que no tenían una secuencia lógica ni espacio ni tiempo, pues eran resultado de diferentes campañas oceanográficas cada una con objetivos y lugares distintos. Aún y

cuando las campañas tuvieran objetivos similares, las diferencias metodológicas pueden causar una gran variación de los datos.

Procesos físicos como los jets de viento de Tehuantepec, Papagayo, y Panamá, han sido descritos por estudios sinópticos, sin embargo y aunque el uso de los satélites, fue fundamental para el conocimiento de estos fenómenos de mesoescala en el océano pacífico tropical, también es cierto que la ausencia de campañas oceanográficas periódicas, que estén respaldadas por un programa de monitoreo continuo, ha limitado el conocimiento de otros fenómenos oceanográficos, que permitan por ejemplo, describir la estructura vertical de estas masas de agua.

Otra zona con alto dinamismo oceanográfico, es la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC). cuya ubicación geográfica, la convierten en una cuenca altamente hidrodinámica, sus masas de agua tienen una relación directa con la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Málikov *et al.*, 2010). La hidrodinámica de la zona está influida por sus características topográficas (CCCP, 2002). Los vientos (sobre todo el jet de Panamá) provocan remolinos ciclónicos y anticiclónicos, los cuales influyen en las condiciones meteorológicas de la CPC (Rodríguez-Rubio *et al.*, 2003). Así mismo, la corriente de Humboldt influye en la estacionalidad presentada en la parte sur, ocasionando eventos fríos (Landinez-Mayorga, 2007).

Además de los procesos anteriormente descritos, cabe mencionar que en esta zona desembocan 200 ríos, que provienen de la vertiente del Pacífico la cual es considerada como una de las más pluviométricas del mundo (9000 mm anuales) (Ortega-Lara *et al.*, 2006). Estos caudales pueden influir en la productividad primaria del área, debido al aporte de nutrientes terrígenos a la zona.

Debido a la complejidad de la CPC, instituciones nacionales se han interesado por entender los procesos oceanográficos que operan en esta cuenca, sobre todo en aquellos que afectan las condiciones socio-económicas. Por ejemplo, los impactos sociales reportados cuando se da un evento El Niño, derivaron en la incorporación de Colombia, a la **Comisión Permanente del Pacífico Sur** (CPPS) y la creación del Programa de monitoreo oceanográfico **Estudio Regional del Fenómeno El Niño** (ERFEN).

La meta básica del ERFEN es la de poder predecir los cambios oceánico-atmosféricos, con anticipación suficiente para permitir políticas de adaptación o de emergencia frente a variaciones en el rendimiento pesquero, agrícola e industrial y decisiones de mercadeo, manejo de recursos hidrobiológicos y otras consideraciones (Ley colombiana 295 de 1996).

La Dirección General Marítima, a través del **Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico** (CCCP), fue la institución de investigación que en Colombia, asumió el monitoreo anual de parámetros físicos, químicos, meteorológicos y biológicos de la CPC, mediante una retícula amplia de estaciones, en cumplimiento de las obligaciones establecidas en el Artículo III del protocolo firmado (Ley 295 de 1996).

Lo anterior ha dado como resultado, que se tenga una base de datos de cruceros oceanográficos en la CPC, de casi medio siglo (desde 1972 a la fecha), con al menos dos cruceros al año a partir de 1996.

Con esta base de datos, se han hecho estudios sobre la estabilidad oceánica de la zona (Villegas-Bolaños, 2003a); la distribución espacial y temporal del contenido de calor de la capa activa de la cuenca (Villegas-Bolaños, 2003b; Villegas, 2004) y la descripción de la circulación termohalina y de masas de agua (Karlin y Villegas, 2005). Los estudios anteriores, dieron lugar a la definición de zonas homogéneas,

a partir de las cuales, se construyeron series de tiempo de temperatura superficial de la CPC (Málikov y Villegas-Bolaños, 2005), que han sido base para estudios posteriores sobre procesos de interacción océano – atmósfera (Málikov *et al.*, 2010).

Sin embargo, aun y cuando la base de datos es parte de un sistema de monitoreo continuo, el número de publicaciones en esta zona es bajo y principalmente son estudios de procesos físicos, los cuales, si bien contribuyen con la meta básica del ERFEN, no son suficientes para describir otras variables oceanográficas, que den bases para la formulación de planes y políticas de desarrollo en el océano pacífico colombiano.

Por lo anterior, en el año 2002 el CCCP hizo una compilación y análisis de la base de datos de la CPC (CCCP, 2002). Esta publicación, identificó la necesidad de aumentar el número de cruceros al año, para contar con una serie de tiempo suficientemente larga, que permita presentar la climatología de las variables oceanográficas de la zona y cubra los periodos con ausencia de datos (enero-julio).

Debido a que se tiene que iniciar con la toma de datos de productividad en la CPC, y dado que esta variable requiere la toma de muchas muestras, se evidencia que los estudios basados en sensores remotos, son una herramienta para la descripción de la productividad primaria de la cuenca.

En otras cuencas oceánicas, con sistemas de monitoreo periódicos similares a la del CCCP, se han desarrollado investigaciones que buscan determinar la distribución vertical de la clorofila-a. Tal es el caso, del sistema de monitoreo CALCOFI (California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations), utilizado por Millán-Nuñez *et al.* (1997), para determinar perfiles verticales modelados de

clorofila-a, a partir del modelo de distribución Gaussiana definido por Platt, *et al.* (1988).

Sin embargo, pocos han sido los lugares, con sistemas de monitoreo similares a la red CALCOFI, en los cuales se han generado perfiles verticales prototipo de concentración de clorofila-a. Esto, se debe a los requerimientos de la base de datos *in situ* disponible, a partir de la cual, se pueden generar perfiles verticales que mejor representen las características de una región en un periodo estacional dado. Estos perfiles prototipo, tendrán una concentración de clorofila superficial, que podrá asociarse con la concentración de clorofila-a satelital. De esta manera entonces, se podrá determinar un modelo de productividad primaria basado en el uso de biomasa fitoplanctónica obtenida a partir de sensores remotos (Platt, *et al.* 1991), como herramienta para valorar la producción primaria global de la CPC.

Con base en lo anterior, a partir de la base de datos de concentración de clorofila-a, tomado por el CCCP entre 1996 y 2012 en la CPC, la presente investigación, hizo una descripción de la estructura vertical de la clorofila-a, mediante la aplicación del modelo de distribución Gaussiana definido por Platt, *et al.* (1988).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aplicación del modelo de distribución Gaussiana propuesta por Platt *et al.* (1988), como herramienta para la determinación de la distribución vertical de la concentración de clorofila-a como pigmento, en la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC).

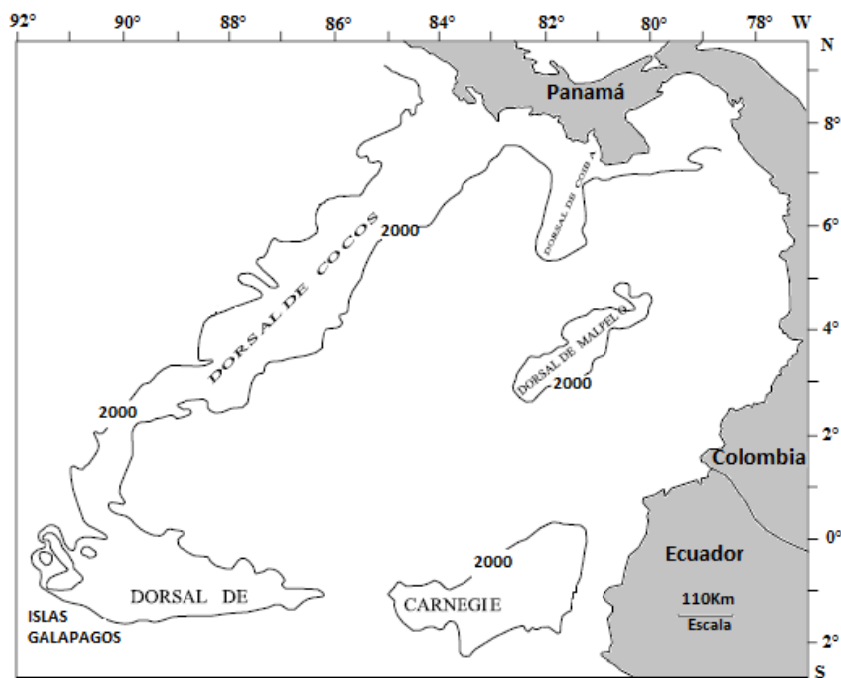
### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar la función de distribución Gaussiana propuesta por Platt *et al.* (1988), como herramienta de reconstitución de perfiles verticales de concentración de clorofila-a, tomados a partir de mediciones *in situ* en la CPC.
- Determinar Regiones Biogeográficas Dinámicas para cada uno de los cruceros analizados en la CPC.
- Evaluar la contribución que los parámetros obtenidos del modelo gaussiano, aportan a la variabilidad estacional (eventos fríos, eventos cálidos y condiciones promedio) de la CPC.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1 ASPECTOS FÍSICOS

La Cuenca Pacífica Colombiana (CPC) se ubica geográficamente entre los paralelos 1°30' hasta los 7°10' de latitud Norte y entre los 77°40' y 82°00' de longitud Oeste. Limita al Norte con las aguas del Golfo de Panamá; al Oriente con el litoral occidental de Colombia, integrado por los departamentos de Chocó, Valle, Cauca y Nariño; al Sur con las aguas de la costa ecuatoriana y la cordillera submarina de Carnegie; y al Occidente con las aguas territoriales de Panamá y la cordillera submarina de Cocos (Fig. 1).



**Figura 1.** Límites de la Cuenca Pacífica Colombiana. Tomado de (Betancur y Martínez, 2003) y editada para el presente trabajo.



Las cordilleras submarinas de Carnegie y de Cocos, se unen en la plataforma de Galápagos; característica que le otorga a la CPC la forma de piscina cerrada, en atención a que se enmarca por fronteras líquidas y sólidas (Hey, 1977; Lonsdale y Klitgord, 1978 y Meschede *et al.*, 1998; Betancur y Martínez, 2003).

Esta cuenca además se encuentra localizada en el margen occidental de la placa continental de Sudamérica, que choca con la placa oceánica de Nazca, la cual se hunde ocasionando en la fosa Peruana-Chilena, una zona de subducción de 200-300 Km, a una velocidad media de 6 cm/año, que se extiende a lo largo de las costas occidentales del continente suramericano y la ubican dentro del llamado cinturón de fuego del Pacífico, que le otorga a la región, una alta actividad tectónica que hace probable la ocurrencia de Tsunamis (Wiches-Chaux y Velásquez, 1993; Betancur y Martínez, 2003).

Las aguas oceánicas de la CPC son limitadas por la cordillera de los Cocos y cordillera de Carnegie, previniendo el intercambio de aguas profundas con el pacífico central. Por tanto, el intercambio de calor, salinidad y movimiento de aguas ocurre solo por encima de los 200 m (Tchantsev y Cabrera-Luna, 1998; Rodríguez-Rubio y Stuardo, 2002).

La CPC, forma parte del Pacífico Oriental Tropical (POT), el cual está altamente influenciado por los giros subtropicales del pacífico Norte y Sur, la corriente pacífico ecuatorial y la piscina de agua cálida ecuatorial (Wang y Fiedler, 2006).

El oleaje oceánico predominante en la CPC, al igual que el viento y la corriente, provienen del suroeste. Se trata de trenes de olas de largo periodo y escasa alturas procedentes del océano abierto, que incrementan su altura sobre fondos someros y se refractan perdiendo su energía y cambiando la dirección (CCCP, 2002). Por encontrarse en una zona de baja presión atmosférica conocida como Concavidad Ecuatorial de Baja Presión (CEBP), cuenta con la convergencia de los

vientos alisios de cada hemisferio, elementos que constituyen la llamada, Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) (Tchantsev y Cabrera-Luna, 1998).

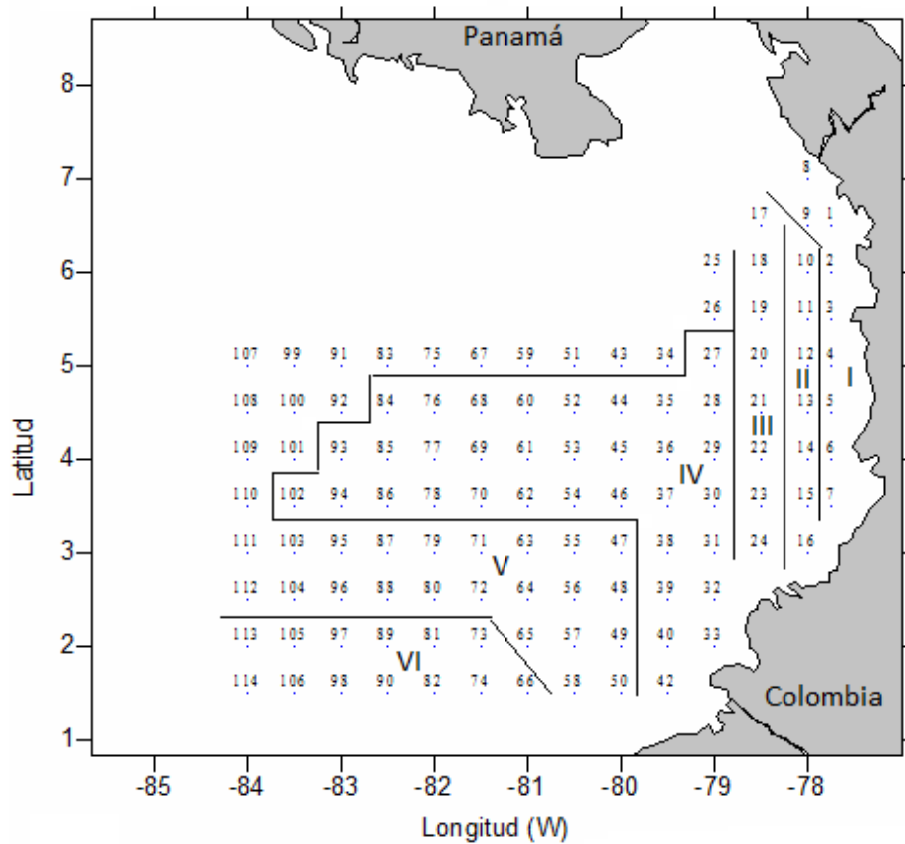
Por pertenecer al POT, la variabilidad estacional está representada por dos estaciones: La estación seca (diciembre a abril), caracterizada por la intensificación de los vientos alisios del noreste, y la ZCIT migra hacia el sur llegando a su posición meridional en marzo (aproximadamente 1° N), que permite el paso de los vientos intensos a través del istmo de Panamá, produciendo el Jet de Panamá (Amador *et al.*, 2006). La presencia de este jet de viento a través del istmo, produce mezcla y surgencias, que aportan aguas frías sub-superficiales menores a 20°C, salinidades mayores a 34.5 y aguas productivas en la región, con alta biomasas de fitoplancton y zooplancton (Rodríguez-Rubio and Stuardo, 2002; Fernández-Alamo and Färber-Lorda, 2006; Pennington *et al.*, 2006; Valencia *et al.*, 2013).

En cambio, durante la temporada de lluvias (mayo a noviembre), los vientos alisios del sudeste se intensifican, y la ZCIT migra hacia el norte alcanzando su posición más norte durante septiembre (Aproximadamente 10°N) (Amador *et al.*, 2006). Ya no se observa el Jet Panamá y la cuenca se caracteriza por aguas cálidas mayores a 20°C, aguas con salinidades menores a 34.5 y aguas poco productivas (Rodríguez-Rubio and Stuardo, 2002; Rodríguez-Rubio *et al.*, 2003; Devis-Morales *et al.*, 2008; Valencia *et al.*, 2012).

La variabilidad de las condiciones oceanográficas de la CPC depende de la variabilidad de las condiciones de la parte ecuatorial del océano Pacífico, a su vez relacionado con las oscilaciones de la ZCIT. La nubosidad debida a los vientos alisios del noreste se extiende de noviembre a mayo (Tchantsev y Cabrera-Luna, 1998).

Los factores generales que determinan el régimen hidrodinámico y termohalino son la radiación solar, distribución del viento, precipitación, escorrentías de aguas dulces y las variaciones de la corriente de Humboldt y contracorriente ecuatorial (Rodríguez-Rubio y Stuardo, 2002).

En la CPC, se han delimitado zonas homogéneas en la capa superficial, a partir de cruceros oceanográficos esporádicos desarrollados entre 1970 y 1998, lo cual permitió la determinación de una climatología aproximada de la cuenca (Málikov *et al.*, 2010). En general la CPC puede dividirse en tres zonas superficiales: una costera, una zona intermedia y una zona oceánica, cada una con una estructura vertical calculada a partir del promedio de seis masas de agua superficial (Fig. 2) que permiten asociar los procesos zonales y estacionales propios de la región (Málikov *et al.*, 2010).



**Figura 2.** Masas de agua superficial de la CPC, definidas de acuerdo con sus propiedades termohalinas. Modificado de Málíkov *et al.* (2010).

### 3.2 ASPECTOS GENERALES DEL FITOPLANCTON DE LA REGIÓN

El término fitoplancton se refiere a todo organismo microscópico con características vegetales, que vive en la capa superficial iluminada de los océanos, estos microorganismos juegan un papel importante en muchos ciclos biogeoquímicos. Su existencia es de fundamental interés, toda vez que son la base de la red trófica acuática, cumpliendo una función ecológica esencial para toda la vida de los océanos (Alvain *et al.*, 2011).

Tal como las plantas terrestres, el fitoplancton usa pigmentos que capturan la energía de los fotones. Entre estos pigmentos fitoplanctónicos está la clorofila-a, que ha sido usada como un índice de biomasa fitoplanctónica (Alvain *et al.*, 2011; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011).

La distribución espacial del fitoplancton en la superficie oceánica no es homogénea; de manera similar, la distribución vertical en la columna de agua no es homogénea y generalmente exhibe un máximo sub-superficial (Cullen y Eppley, 1981; Millán-Nuñez *et al.*, 1996 En: Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011). La distribución y el tamaño de los parches depende de un número de factores físicos (luz, procesos de mezcla turbulenta como el viento, sobretensiones), químicos (nutrientes) y biológicos (tipo de alga) (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011).

Factores físicos como los giros oceánicos, que afectan la distribución espacial del fitoplancton, han sido documentados para el Pacífico Oriental Tropical (POT). En esta zona se ha evidenciado la influencia de giros subtropicales del Pacífico norte y sur. Para el caso de los giros ciclónicos, se ha determinado que son menos numerosos y se disipan relativamente rápido (Gonzalez-Silvera *et al.*, 2004), mientras que los giros anticiclónicos han sido observados hasta por seis meses, con una propagación de hasta 1500 Km de la costa (Palacios y Bograd, 2005).

Particularmente los giros de Tehuantepec y Papagayo, han sido documentados como importantes transportadores de material biogénico desde el margen continental al interior del Pacífico Nordeste Tropical (Gonzalez-Silvera *et al.*, 2004).

La CPC está fuertemente influenciada por los vientos Alisios del sureste y Alisios del noreste (Jet de Panamá), los cuales influyen en la formación de giros ciclónicos y anticiclónicos que determinan las características de sus masas de agua (Rodríguez-Rubio *et al.*, 2003).

Durante la época de influencia de los vientos alisios del sureste, se reporta una circulación anticiclónica, que genera aumento del nivel del mar y calentamiento de la zona norte del golfo durante los meses de verano. En contraste con la presencia del Jet de Panamá, que desarrolla en su parte este, un giro ciclónico (descenso del nivel del mar, surgencia) de gran importancia para el favorecimiento de la productividad primaria de la zona (Rodríguez-Rubio *et al.*, 2003).

Las oscilaciones interanuales antes mencionadas, se combinan con eventos de mayor escala como El Niño o La Niña, los cuales según la época del año intensifican o modifican las condiciones de las masas de agua, tal es el caso de lo reportado por Camacho (1998), en mayo de 1998, cuando el calentamiento del fenómeno El Niño se sumó al calentamiento propio de la oscilación, generando anomalías positivas de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) de 2.0 a 3.5°C, así como el registro de liberación de zooxantelas y blanqueamiento de los corales de la Isla Gorgona.

La comunidad fitoplanctónica de la CPC, está altamente influenciada por las variaciones estacionales de la temperatura y la salinidad causadas por la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Ramírez y Giraldo, 2006). De igual forma, se ha reportado en la CPC que la abundancia de grupos fitoplanctónicos como diatomeas y dinoflagelados, está determinado por la presencia de eventos cálidos y eventos fríos (Medina-Campos, 1997).

El incremento del grupo de dinoflagelados, se reporta como mejor indicador de ingreso de masas de aguas cálidas y oceánicas hacia el sector costero de la cuenca, en comparación con el grupo de las diatomeas que se asocia a ingreso de aguas frías (Medina-Campos, 1997; García-Hansen y Málikov, 2002; García-Hansen, 2001).

Durante la presencia del fenómeno de El Niño de 1998, en el norte de la CPC se observó un aumento de la temperatura, acompañado del incremento del grupo de los dinoflagelados, representado principalmente por el género *Ceratium* y la especie *Prorocentrum mexicanum* (CCCP, 2002). Esta especie, catalogada como de hábitats neríticos y estuarinos (Carmelo, 1995), fue registrada en mayo de 1998 por primera vez en la zona, y junto con otras 30 especies de dinoflagelados ha sido observada únicamente durante un evento cálido (CCCP, 2002).

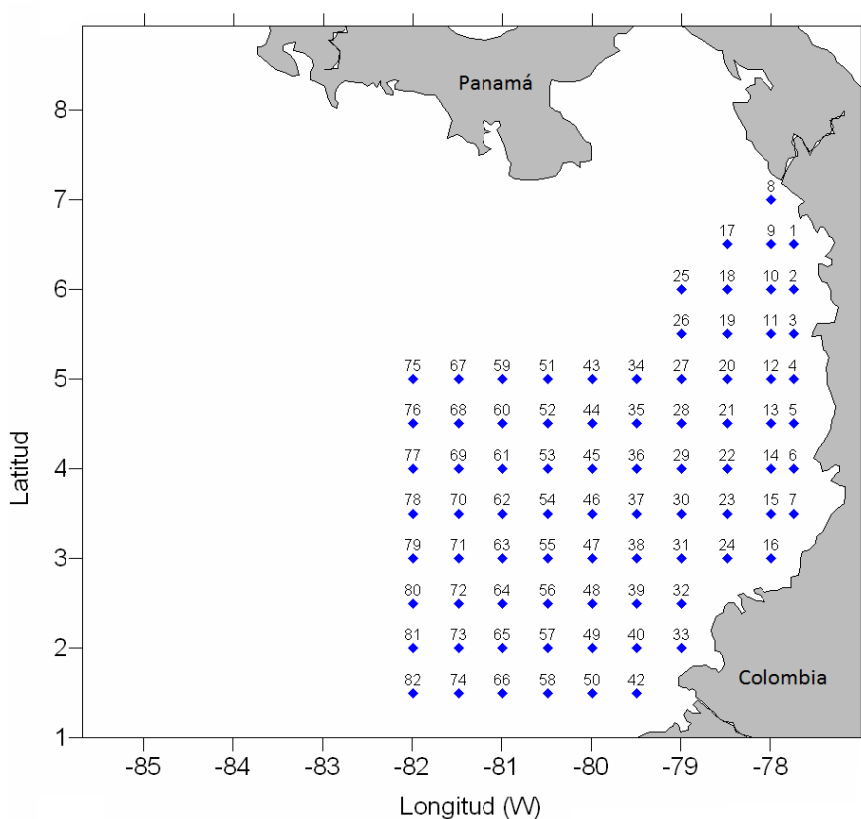
Por otro lado, para mayo de 1999 y 2000, considerados respectivamente como años La Niña y Promedio se registró en la CPC florecimientos de la especie *Skeletonema costatum* y presencia de las especies *Dactyliosolem fragilissimus*, *Rhizosolenia imbricata*, *Bacteriastrum furcatum* y varias especies de *Chaetoceros*, las que a su vez han sido descritas por varios autores como altamente productivas (CCCP, 2002).

Un aspecto adicional descrito por el CCCP (2002), indica que independientemente de la época climática en la CPC, los máximos valores de abundancia de los organismos fitoplanctónicos fueron detectados hacia la región costera, en especial frente a la bahía de Tumaco e isla Gorgona y en la región oceánica que circunda la isla de Malpelo. En estas zonas, se presentó una alta diversidad de especies y dominancia de diatomeas, lo que además se asoció con los más altos registros de clorofila-a.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS ANALIZADA

La base datos empleada por el presente proyecto, fue suministrada por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), quienes desde el año 1972 han desarrollado cruceros oceanográficos en la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC). Los cruceros realizados y la periodicidad de los mismos, se describen en la Tabla 1 y la distribución de las estaciones definidas para el estudio de la CPC, puede verse en la Figura 3.



**Figura 3.** Retícula de estaciones de cruceros oceanográficos realizados por el CCCP desde 1996, en la Cuenca Pacífica Colombiana.



**Tabla 1.** Resumen de los cruceros oceanográficos realizados en la CPC. Las casillas negras, representan los cruceros efectuados con personal del CCCP y corresponden a los empleados por el presente trabajo (CCCP, 2002).

MES	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
CRUCEROS OCEANOGRÁFICOS		1972	1970	1989	1976	1972		1989	1976	1976	1977	1978
		1975	1972	1990	1986	1986			1990	1977	1978	1982
		2002	1988	1991	1987	1993			1991	1990	1982	1997
			1989	1993	1997	1996			1993	1991	1988	2000
			1990		1998	1998			2001	1993	1994	
			1991		1999	2000			2002	1996	1997	
					2000	2001				1998	2000	
TOTAL POR MES	0	3	6	4	7	7	0	1	6	7	7	4

Aunque la CPC ha sido monitoreada desde el año 1972, para efectos de la presente investigación, la base de datos analizada, corresponde al periodo comprendido entre 1996 y 2012. Los periodos de muestreo, variaron entre los meses de marzo, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre, siendo el mes de septiembre el periodo predominante para los muestreos realizados en la CPC (Tabla 2).

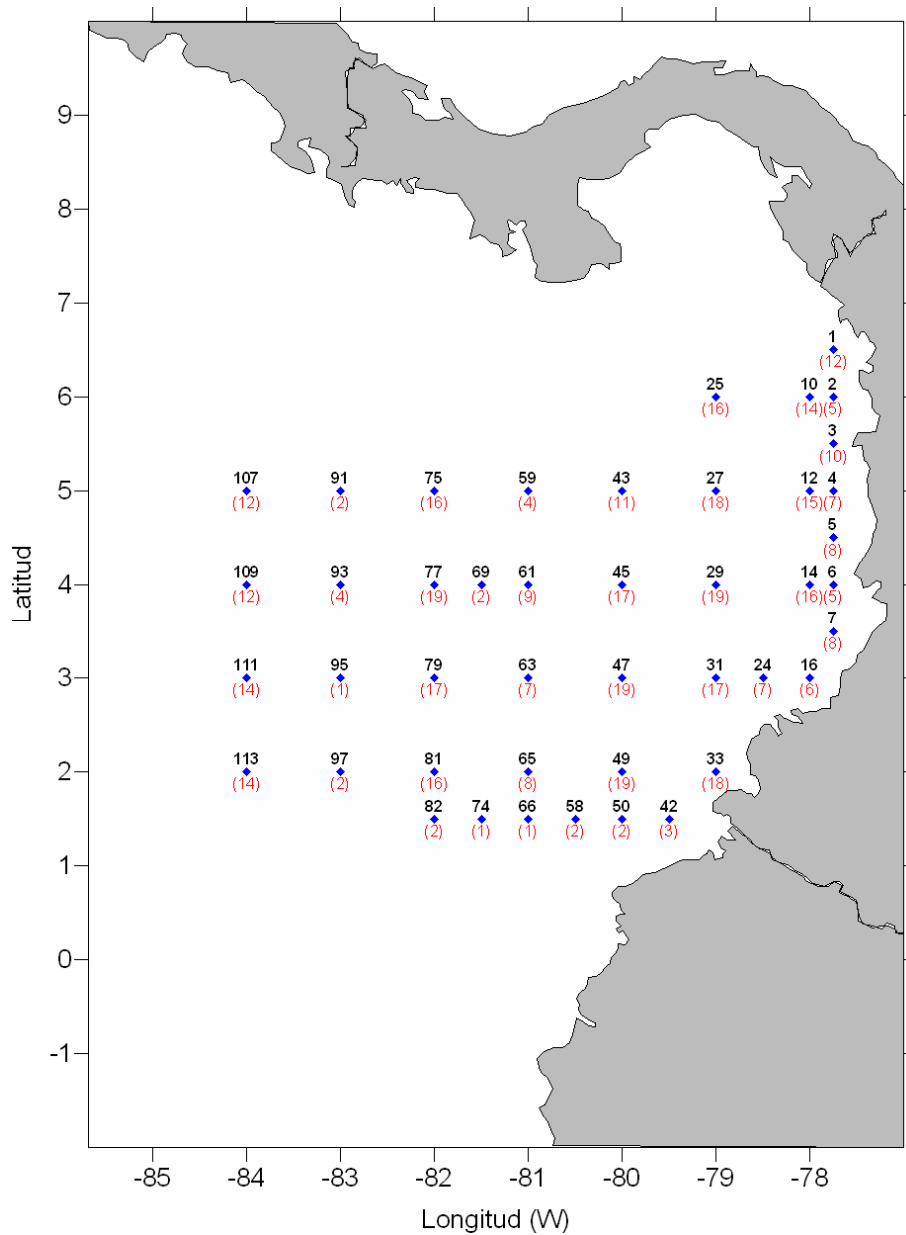
Los cruceros ERFEN tienen una retícula definida de 81 estaciones (Fig. 3), dentro de la cual se toma información fisicoquímica y biológica en 44 estaciones (Fig. 4). Sin embargo, no fue posible el acceso a datos de parámetros como temperatura, salinidad o nutrientes, razón por la cual, en el análisis de los datos de clorofila-a, no integró otros parámetros tomados en la CPC.

El CCCP (2002) establece que los datos de clorofila-a, se obtuvieron a partir de muestras de agua colectada a profundidades estándar (0, 25, 50, 75, 100 y 150) con botellas Niskin. Las muestras de clorofilas fueron preservadas y almacenadas para su posterior análisis en los laboratorios del CCCP. Para la determinación de dicho parámetro, se filtraron 1800 ml de agua en un set de filtración preparado con filtros de microcelulosa de 0.45µm, adicionando carbonato de magnesio, los filtros se almacenaron en sobres de papel aluminio rotulados y se mantuvieron en un desecador para su posterior lectura en el laboratorio (CCCP, 2002).

La concentración de clorofila-a fue determinada usando el método espectrofotometría visible formulado por Strickland y Parson en 1972 y modificado por el laboratorio de química del CCCP (CCCP, 2002).

**Tabla 2.** Periodos de muestreo de los cruceros ERFEN realizados entre 1996 – 2012, en los cuales se tomaron muestras de agua en la vertical para determinar concentración de Clorofila-a. Entre paréntesis se presenta, el número de perfiles tomados por crucero.

CRUCERO	MAR	MAY	JUN	AGO	SEP	OCT	NOV
1996			ERFEN 23 (15)			ERFEN 24 (6)	
1997		ERFEN 25 (14)					
1998		ERFEN 27 (18)				ERFEN 28 (2)	
1999		ERFEN 29 (21)					
2000		ERFEN 30 (26)					ERFEN 31 (22)
2001			ERFEN 32 (28)	ERFEN 33 (19)			
2002	ERFEN 34 (23)				ERFEN 35 (25)		
2003					ERFEN 36 (26)		
2004					ERFEN 37 (18)	ERFEN 37 (7)	
2005					ERFEN 39 (21)		
2006	ERFEN 42 (24)				ERFEN 43 (8)		
2007					ERFEN 45 (19)		
2008					ERFEN 47 (23)		
2009					ERFEN 48 (12)	ERFEN 48 (11)	
2010					ERFEN 51 (14)	ERFEN 51 (10)	
2011						ERFEN 52 (17)	ERFEN 52 (8)
2012					ERFEN 53 (24)		
<b>Número total de perfiles de clorofila-a analizados durante periodo 1996-2012</b>				459			



**Figura 4.** Retícula de estaciones de cruceros oceanográficos realizados por el CCCP desde 1996 hasta 2012, sobre la cual se ha generado la base de datos de Clorofila-a empleada por la presente investigación. Cada punto representa una estación, los valores en color negro hacen referencia al número de la estación y los valores en color rojo hacen referencia al número de perfiles de clorofila-a tomados en cada una.

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS

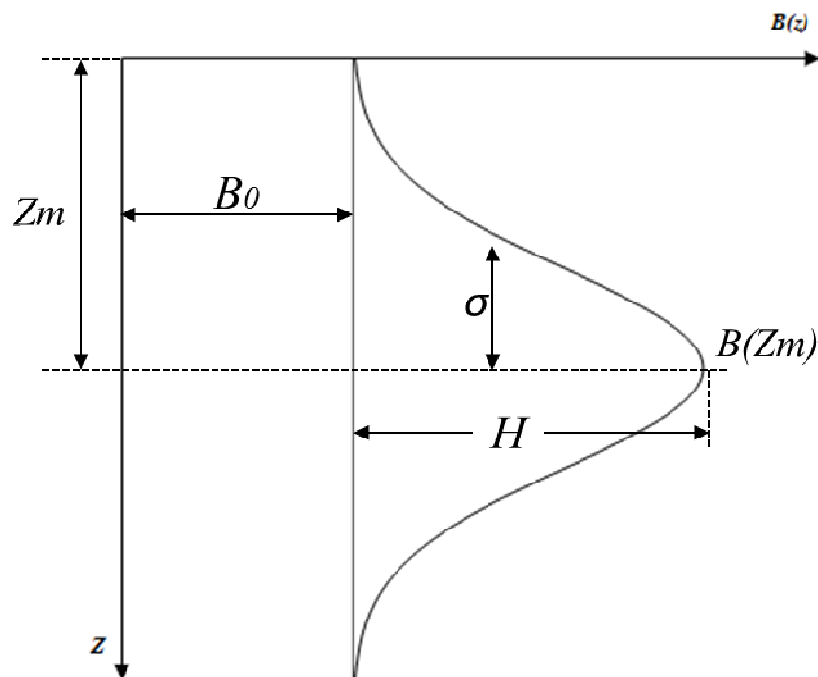
Para la presente investigación, se tomó como fundamento la metodología aplicada por Platt, *et al.* (1988), en la cual se asume una distribución normal de los perfiles verticales de clorofila-a y la presencia de un máximo de clorofila-a. La aplicación de esta metodología se describe en Millán *et al.* (1997), quienes descartaron 750 perfiles (18%) por presentar perfiles con presencia de dos o más máximos.

Para identificar el esquema de toma de muestras aplicado por los cruceros ERFEN, se hizo una categorización de los planes de muestreo aplicado entre los años 1996 y 2012.

## 4.3 CALCULO DE PARÁMETROS GAUSSIANOS

Se ha encontrado que el perfil vertical de la biomasa de la clorofila en el océano puede ser representado por una curva de Gauss desfasada, cuyos parámetros constituyentes, pueden variar ampliamente con las regiones y las estaciones (Platt y Sathyendranath, 1988; Sathyendranath *et al.*, 1989; Platt *et al.*, 1991).

Dicha representación, consiste en una curva gaussiana superpuesta sobre una base constante, de tal manera que los valores de superficie pueden ser emparejados sin perjuicio del resto del perfil (Fig. 5). Esto ha demostrado ser una expresión extremadamente versátil, capaz de describir el perfil de la biomasa en una amplia variedad de regímenes oceanográficos, y se ha convertido en el perfil estándar adoptado por diversos autores (Morel y Berthon 1989; André, 1992; Gordon 1992).



**Figura 5.** Representación esquemática de cómo una curva de Gauss superpuesta sobre una biomasa base constante ( $B_0$ ) se puede utilizar para representar columnas de agua verticalmente estratificadas con perfiles de biomasa no uniformes. Además de  $B_0$ , tres parámetros gaussianos determinan la forma y la magnitud de cada perfil: el parámetro  $\sigma$  define la anchura del pico de la clorofila;  $z_m$  determina la profundidad a la que se produce el máximo de clorofila, y  $h$  es la integral de la biomasa bajo la curva gaussiana. La altura máxima del pico de biomasa por encima de la biomasa base,  $H$ , se puede derivar de la ecuación . Tomado de (Platt y Sathyendranath, 2007).

El modelo de distribución Gaussiana, definido por Platt, *et al.* (1988), establece que, la Gaussiana desfasada esquematizada en la Figura 46, se representa por la siguiente ecuación:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{(Ecu. 1)}$$

Donde,  $B(z)$  es la concentración de clorofila-a una profundidad  $Z$  (miligramos por metro cúbico),  $B_0$  representa la biomasa base, superpuesta sobre una curva gaussiana con los siguientes parámetros:  $z_m$  es la profundidad del máximo de clorofila;  $\sigma$  controla el espesor de la capa de máximo profundo de clorofila (DCM); y  $h$  es la biomasa total por encima de la línea de base  $B_0$  (miligramos por metro cúbico), por tanto,  $H = h/(\sigma\sqrt{2\pi})$  representa la altura del pico por encima de la biomasa base. Cada uno de los cuatro parámetros puede variar independientemente, dado como resultado, de una amplia variedad de perfiles que pueden ser generados.

La base de datos estuvo integrada por 459 perfiles, los cuales fueron depurados, mediante el descarte de aquellos perfiles a los cuales se les identificó dos o más máximos de clorofila y menos de 4 profundidades de muestreo. A cada uno de los perfiles reales depurados se les calculó los cuatro parámetros Gaussianos según la Ecuación 1, que permitió la obtención de  $B_0$ ,  $z_m$ ,  $\sigma$  y  $h$ .

Para determinar el grado de asociación entre los perfiles reales y los perfiles modelados, se aplicó la técnica "match-up", descrita por Santamaría-del-Ángel *et al.* (2011), la cual, es una técnica gráfica basada en una línea recta teórica ajustada a dos variables con idénticos patrones de distribución. Esto es básicamente lo que se observa cuando se grafica una variable contra sí misma, una línea recta con una pendiente de 45 grados. En este trabajo, las dos variables graficadas fueron el perfil real de clorofila-a (eje y) contra el perfil modelado de Clorofila-a (eje x).

La validez estadística de los perfiles modelados, se determinó mediante el coeficiente de correlación de Pearson o comúnmente llamado coeficiente de correlación "r", cuya expresión matemática es:

$$r = \frac{Cov_{A,B}}{SD_A \times SD_B} \text{ (Ecu. 2)}$$

Donde  $r$ , es el coeficiente de correlación de Pearson;  $Cov_{A,B}$  es la covarianza de A y B;  $SD_A$  es la Desviación Estándar de A y  $SD_B$  es la Desviación Estándar de B. Esto es una medida de correlación lineal entre dos variables A y B, cuyos resultados se encuentran entre +1 y -1 inclusive (1 indica una relación lineal directa, -1 indica una relación lineal inversa y cero indica una relación no lineal).

La significancia del coeficiente, se determina con una prueba de hipótesis, conocida como análisis de correlación:

$$H_0: r = 0$$

$$H_a: r \neq 0$$

Para aceptar o rechazar la  $H_0$ , se comparó el valor  $r_{\text{calculado}}$  (Coeficiente de correlación de Pearson " $r$ ") con el valor  $r_{\text{crítico}}$  (tabla de valores críticos), determinado en función de los grados de libertad ( $gl = n-1$ ) y el error  $\alpha$  (1 - Nivel de confianza del 95%).  $r_{\text{crítico}}$  es el valor mínimo significativo de " $r$ ". Si  $r_{\text{calculado}} > r_{\text{crítico}}$ , se rechaza la  $H_0$  y por tanto, es estadísticamente significativa, pero si  $r_{\text{calculado}} < r_{\text{crítico}}$ ,  $H_0$  no puede ser rechazada y por tanto " $r$ " no es significativo.

En este análisis de correlación, la toma de decisiones se hace más robusto, con un mayor número de datos, es así como el número de puntos que integran el perfil de clorofila-a de cada estación, se convierte en un elemento fundamental para la significancia del perfil modelado.

Aquellos perfiles no significativos fueron descartados, con lo cual solo se trabajó con los perfiles modelados estadísticamente significativos.

#### 4.4 DETERMINACION DE ESCENARIOS DE VARIABILIDAD ESTACIONAL

Para la determinación de los escenarios de variabilidad estacional, se tomó la serie de tiempo de 1982 a 2012, extraída del AVHRR para la estación de Tumaco (Nariño) (Fig. 6), dentro de la cual se definió, que años con anomalías positivas superiores a 0.5 se denominarían cálidos, años con anomalías negativas inferiores a -0.5 se denominarían fríos, y años con anomalías entre -0.5 y 0.5 se denominarían promedio.

#### 4.5 DETERMINACIÓN DE REGIONES BIOGEOGRÁFICAS DINÁMICAS

Para cada uno de los cruceros ERFEN, se determinaron Regiones Biogeográficas, mediante la aplicación de una aproximación indirecta que usa imágenes de satélite como mapas virtuales, para generar una base de datos de la capa superficial de los océanos (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011). Así mismo, como apoyo a la descripción del área en cada crucero, se utilizó el rotacional del esfuerzo del viento para determinar mapas que identifiquen el campo de viento predominante y zonas con ascensos del nivel del mar (zonas de surgencia) y zonas con descensos del nivel de mar.

##### 4.5.1 Determinación de Regiones Biogeográficas Dinámicas

Para la determinación de patrones de asociación producidos por la variación temporal y espacial concurrente entre geo-ubicaciones, lo cual, se traduce en una Región Biogeográfica (RBG), se emplean diferentes aproximaciones matemáticas, una de ellas es la Función Empírica Ortogonal Estandarizada (SFEO) y para entenderla se toman las bases de la Función Empírica Ortogonal (FEO) (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011).



Al aplicar una FEO se obtienen tantas FEOs, como variables hayan, y la primera FEO es la mejor combinación lineal de la colección de variables, dado que es la que explica la mayor variabilidad de los datos (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011).

Cada FEO puede ser descrita por una ecuación polinomial de primer grado, es así como la FEO<sub>1</sub> estaría definida por la siguiente ecuación:

$$FEO_1 = (b_{1A} \times A) + (b_{1B} \times B) + (b_{1C} \times C) + \dots + (b_{1j} \times j) \quad (\text{Ecu. 3})$$

Donde  $b_1$  constituye el  $\text{eigenvector}_1$  y al desarrollar este polinomio se obtiene un número de componentes igual al número de variables iniciales ( $j$ ), cada uno con un "n" igual al de las variables originales.

Dado que las variables analizadas pueden ser de diferente naturaleza y la interpretación de los resultados puede ser compleja, se hace necesaria la normalización de los datos originales a la misma escala, mediante una transformación que respete la integridad de la distribución de dichos datos. Es así como se escogió la transformación Z cuya ecuación es la siguiente:

$$Z = \frac{(Xi - \bar{X})}{SDx} \quad (\text{Ecu. 4})$$

Donde  $Xi$  representa cada una de las variables,  $\bar{X}$  es la media y  $SDx$  es la desviación estándar de la variable.

La transformación Z corresponde a la distancia estadística de un grupo de datos con respecto al valor medio de la variable, expresado en unidades de desviación estándar. Así los valores de  $Z=0$  indican que el dato tiene el mismo valor del promedio ( $Xi = \bar{X}$ ) y valores de  $Z=1$  indican que el dato está a una SD del

promedio (un valor positivo indica que el dato está por arriba del promedio, y un valor negativo indica que el dato está a una SD por abajo del promedio).

Aplicando entonces la metodología propuesta por Santamaría-del-Ángel *et al.* (2011), para determinar Regiones Biogeográficas (RBGs) usando datos de sensores remotos, a continuación se describen cada uno los pasos desarrollados por la presente investigación, para la obtención de dichas regiones en cada uno de los meses en los cuales se tomaron muestras de agua para determinación de concentración de clorofila-a en la vertical, desde 1996 hasta 2012 en la CPC.

#### **4.5.2 Selección de productos espectralradiométricos utilizados para definir las RBGs, en la CPC.**

Las Reflectancias satelitales (Rrs en Inglés, Remote sensing reflectance) son productos espectralradiométricos derivados de los sensores remotos y cada una representa una respuesta espectral del sensor de color del océano, es así como para el presente estudio se seleccionaron las Rrs<sub>412</sub> (410 de VIIRS y 413 de MERIS) y Rrs<sub>490</sub> (488 de MODIS y 486 de VIIRS) porque la primera mide la señal de las sustancias amarillas, frecuentemente asociada con la costa y la segunda se ha utilizado, porque es una longitud de onda cercana a 500 nm, en donde todos los componentes en la columna de agua absorben menos, de tal manera que se puede utilizar para clasificar las aguas costeras y oceánicas (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011).

Las compuestas mensuales de estos productos espectralradiométricos derivadas del OCTS (Ocean Colour and Temperature Sensor), SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor), MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua y Terra, MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) y VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), fueron extraídas del <http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>, con apoyo del Grupo de investigación de

Ecología del Fitoplancton de la Universidad Autónoma de Baja California (POPEYE, del Inglés PhytOPplankton Ecology tEam).

La resolución espacial de cada imagen fue de 9 km y el análisis multisensor permitió contar con datos de la mayoría de los cruceros analizados, es así como el OCTS cubrió el crucero de May-1997; el SeaWiFS cubrió los cruceros pertenecientes al periodo May-1998 a Oct-2010; el MODIS Aqua cubrió los cruceros pertenecientes al periodo Sep-2002 a Sep-2012; el MODIS Terra cubrió los cruceros pertenecientes al periodo May-2000 a Sep-2012, MERIS cubrió los cruceros pertenecientes al periodo Sep-2002 a Nov-2011 y el VIIRS cubrió el crucero de Sep-2012.

Teniendo en cuenta lo anterior, se extrajeron 150 imágenes de compuestas mensuales a 9km en formato hdf (Tabla 3), correspondientes a cada uno de los sensores con  $Rrs_{412}$  (410 de VIIRS y 413 de MERIS) y  $Rrs_{490}$  (488 de MODIS y 486 de VIIRS) disponibles para los meses de los cruceros ERFEN analizados por el presente estudio.

**Tabla 3.** Cantidad de imágenes a 9km de reflectancias satelitales extraídas para la determinación de Regiones Biogeográficas en la CPC.

SENSOR	REFLECTANCIA SATELITAL (Rrs)					
	410	412	413	486	488	490
OCTS		1				1
SeaWiFS		21				21
MODIS AQUA		16			16	
MODIS TERRA		21			21	
MERIS			15			15
VIIRS	1			1		

Usando el programa WIM (Windows Image Manager <http://www.wimsoft.com>) se abrieron las 150 imágenes hdf globales y se seleccionó en cada una el área de estudio. Cada imagen cortada fue convertida a un archivo vectorial latitud, longitud, valor geofísico con una proyección cilíndrica equidistante y con extensión .dat. De cada matriz se eliminaron los píxeles de tierra y nubes (NaN) y la matriz resultante, fue la base para el análisis de Funciones Empíricas Ortogonales Estandarizadas (SFEO).

#### **4.5.3 Determinación de las Funciones Empíricas Ortogonales Estandarizadas (SFEO).**

Se importaron los archivo .dat que contienen las columnas Latitud, Longitud y las columnas con el valor geofísico de cada Rrs por sensor, de tal manera que se generaron matrices con 4 a 10 columnas según el crucero analizado (Tabla 4).

**Tabla 4.** Relación de Reflectancias satelitales (Rrs) de cada sensor, disponibles (X) para cada crucero.

AÑO	MES	OCTS		SeaWiFS		MODIS Aqua		MODIS Terra		MERIS		VIIRS	
		Rrs 412	Rrs 490	Rrs 412	Rrs 490	Rrs 412	Rrs 488	Rrs 412	Rrs 488	Rrs 413	Rrs 490	Rrs 410	Rrs 486
1996	JUN												
	OCT												
1997	MAY	X	X										
1998	MAY			X	X								
	OCT			X	X								
1999	MAY			X	X								
2000	MAY			X	X			X	X				
	NOV			X	X			X	X				
2001	JUN			X	X			X	X				
	AGO			X	X			X	X				
2002	MAR			X	X			X	X				
	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
2003	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
2004	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
	OCT			X	X	X	X	X	X	X	X		
2005	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
2006	MAR			X	X	X	X	X	X	X	X		
	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
2007	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
2008	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
2009	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
	OCT			X	X	X	X	X	X	X	X		
2010	SEP			X	X	X	X	X	X	X	X		
	OCT			X	X	X	X	X	X	X	X		
2011	OCT					X	X	X	X	X	X		
	NOV					X	X	X	X	X	X		
2012	SEP					X	X	X	X			X	X

Para cada matriz, se calculó según el caso, el promedio de las  $Rrs_{412}$  y  $Rrs_{490}$ , obteniéndose el promedio con base en los valores geofísicos disponibles (Tabla 5 y 6).

**Tabla 5.** Promedio de  $Rrs_{412-413}$  para el crucero de Septiembre de 2002.

MODIS Aqua 412	SeaWiFS 412	MERIS 413	MODIS Terra 412	PROM Rrs 412
0.0043	0.0049	0.0048	0.0044	0.0046

**Tabla 6.** Promedio de  $Rrs_{490-488}$  para el crucero de Septiembre de 2002

SeaWiFS 490	MERIS 490	PROM Rrs <sub>490</sub>	MODIS Terra 488	MODIS Aqua 488	PROM Rrs <sub>488</sub>	PROM Rrs <sub>488-490</sub>
0.0036	0.0037	0.0036	0.0034	0.0036	0.0035	0.0035

Con las matrices listas, integradas por 4 columnas (Latitud, Longitud, Promedio de  $Rrs_{412-410-413}$  y Promedio de  $Rrs_{490-488-486}$ ), se aplicaron los siguientes pasos:

- 1) Estandarización de las variables: Se aplica la transformación Z, descrita por Ecuación 4. Los resultados obtenidos se almacenaron en una Matriz M1.
- 2) Correlación de las variables (Promedio de  $Rrs_{412}$ ) con (Promedio de  $Rrs_{490}$ ), mediante la correlación lineal de Pearson, definida por la Ecuación 5.

$$r_{\text{Pearson}} = \frac{\text{Cov}_{AB}}{SD_A * SD_B} \quad (\text{Ecu. 5})$$

Donde, la  $\text{Cov}_{AB}$  hace referencia a la covarianza de las variables A y B, SD a la desviación estándar de A y B. Con este coeficiente se determinó la tasa de covariabilidad entre el producto de la dispersión de cada una de las

variables, permitiendo además establecer el porcentaje de la variabilidad total de los datos. El resultado de la correlación de Pearson, se guardó en una Matriz M2.

- 3) Cálculo de los eigenvectores y eigenvalores: Los eigenvalores son las raíces del polinomio, en tanto que los eigenvectores corresponden a los coeficientes del polinomio. Los eigenvectores calculados se guardaron en una Matriz M3.
- 4) Cálculo de las SFEO: Se calculó la SFEO mediante la multiplicación de los valores Z (M1) por los eigenvectores (M3) y su resultado se guardó en una Matriz M4. Este proceso se representa en la Ecuación 6, que es una modificación de la Ecuación 3, que considera las variables normalizadas de acuerdo a la Ecuación 4.

$$SEOF_1 = (b_{1Z_A} * Z_{nLW_{412}}) + (b_{1Z_B} * Z_{nLW_{490}}) \text{ (Ecu. 6)}$$

Donde,  $(b_{1Z_A}$  y  $b_{1Z_B})$  corresponden a los eigenvectores (M3) y  $(Z_{nLW_{412}}$  y  $Z_{nLW_{490}})$  a las variables estandarizadas (M1).

#### 4.5.4 Graficado de las SFEO<sub>1</sub>

Los valores resultantes del proceso anterior, generaron archivos .dat para cada uno de los cruceros, los cuales, estuvieron integrados por tres columnas: Longitud, Latitud y SFEO<sub>1</sub>, que fueron graficados, aplicando el método de interpolación Kriging. A cada una de las gráficas resultantes, les fue superpuesta las estaciones que les corresponden según el crucero.

Se escogió el score cero en la SFEO<sub>1</sub>, porque es la que divide áreas con anomalías espaciales normalizadas positivas de áreas con anomalías espaciales normalizadas negativas. Es decir, el score cero representa que los valores de

interpolación de la SFEO<sub>1</sub> para Rrs<sub>412-410-413</sub> y Rrs<sub>490-488-486</sub>, están operando en el promedio.

#### 4.5.5 Cálculo de rotacional del esfuerzo del viento

El rotacional del esfuerzo del viento, fue calculado a partir de los promedios mensuales de los vectores “u” y “v”, obtenidos del producto PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), disponible al dominio público en <ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/ccmp/>. A partir de los datos en formato netcdf extraídos, se calculó el rotacional del esfuerzo del viento, mediante la ecuación (Gill, 1982):

$$\nabla \times \vec{\tau} = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \quad (\text{Ecu. 7})$$

Los resultados obtenidos para cada crucero se almacenaron en archivos .dat, que fueron graficados aplicando el método de interpolación Kriging.



## 5. RESULTADOS

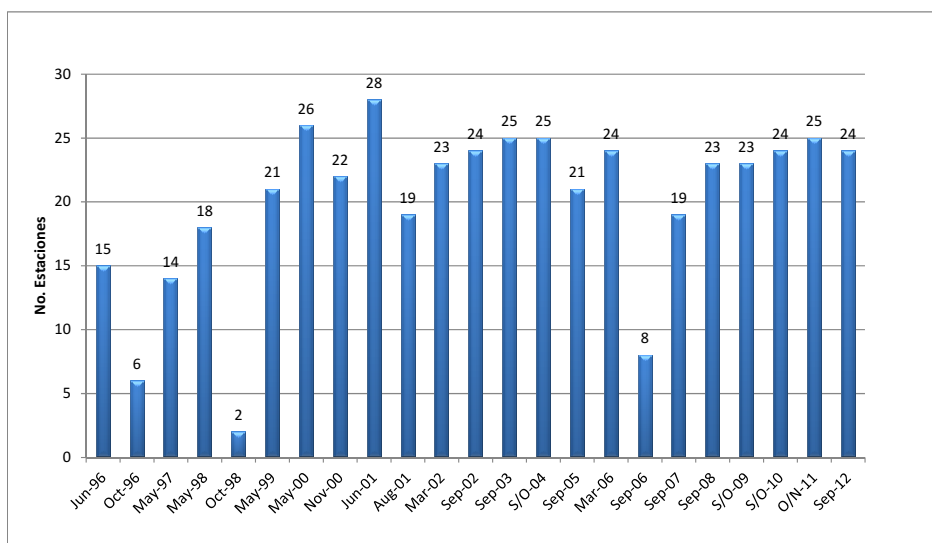
### 5.1 ANÁLISIS DE PERFILES DE CLOROFILA *IN SITU* VS PERFILES MODELADOS

#### 5.1.1 Análisis de la base de datos de la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC)

La base de datos analizada, corresponde a una retícula oceanográfica de 44 estaciones de la CPC. Los 23 cruceros oceanográficos (Tabla 2) que integraron dicha base de datos, corresponden a un periodo de estudio de 17 años (1996 y 2012), dentro del cual se analizaron 459 perfiles verticales de clorofila-a.

No obstante lo anterior, la base de datos estuvo integrada por series de tiempo discontinuas y no hubo un crucero que reportara la retícula completa de 44 estaciones (Fig. 6).

De igual forma, para el análisis de los perfiles verticales de clorofila-a, se clasificaron las estaciones según su representatividad en la base de datos (Fig. 7), encontrándose que de las 44 estaciones que integran la retícula de la CPC, nueve estuvieron representadas en 17 a 19 cruceros, 12 en 11 a 16 cruceros, nueve en seis a diez cruceros y 14 en uno a cinco cruceros.

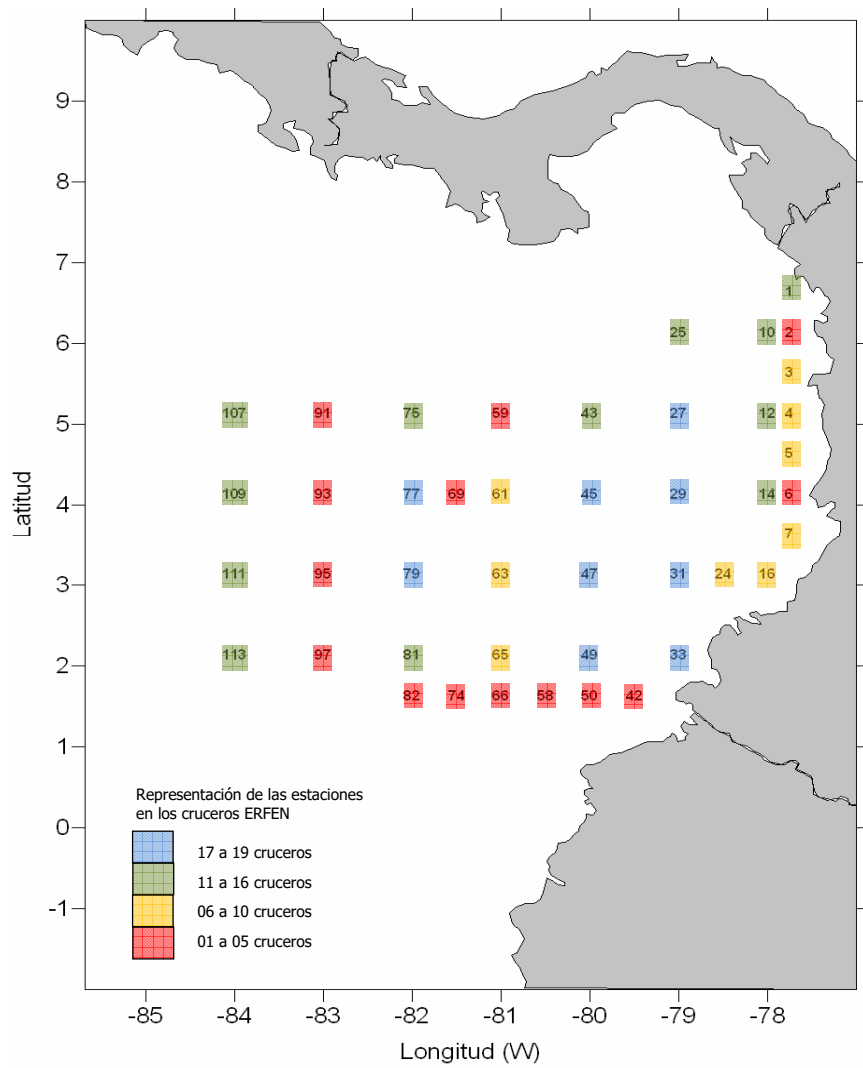


**Figura 6.** Número de estaciones monitoreadas en cada cruceo objeto de estudio. La línea roja representa el valor promedio de estaciones (20) por cruceo de la base de datos analizada.

En cuanto a la estacionalidad representada por los cruceos, se identificó la predominancia de la época de lluvias como periodo de muestreo, mientras que la época seca, solo estuvo representada por dos cruceos ERFEN (Tabla 8).

**Tabla 7.** Distribución de los cruceos ERFEN, según el mes de muestreo y su presencia en la estacionalidad de la Cuenca Pacífica Colombiana.

ÉPOCA SECA					ÉPOCA DE LLUVIAS							
DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	
									35			
									36			
									37			
					25				39	24		
			34		27	23			43	28		
			42		29	32		33	45	37	31	
					30				47	48	52	
									48	51		
									51	52		
									53			



**Figura 7.** Frecuencia de monitoreo de las estaciones que integran la retícula ERFEN. El número del recuadro indica la estación y la convención su representación por crucero.

### 5.1.2 Análisis de la distribución de los datos

El CCCP estableció, que los perfiles verticales de clorofila-a, fueron tomados a profundidades estándar y con ello, se esperaba una base de datos con seis profundidades (0, 25, 50, 75, 100 y 150), las cuales podían variar según la profundidad óptica del perfil. Sin embargo, la base de datos analizada no contó con datos que permitieran valorar las propiedades ópticas de la masa de agua, por tanto la diversidad de profundidades tomadas en los perfiles pudo deberse a criterios del director de crucero, condiciones oceanoatmosféricas o novedades técnicas propias del proceso de toma de muestras. En este sentido, hubo perfiles integrados por tres profundidades hasta perfiles integrados por nueve profundidades.

Con base en lo anterior, se hizo un contraste de las condiciones mínimas que debía cumplir cada perfil para aplicar el modelo de la gaussiana desfasada definido por Platt *et al.* (1988), las cuales, básicamente consideraron tener cuatro o más datos en la vertical, y no contar con la presencia de dos o más picos clorofila-a; es así como de los 456 perfiles que integran la base de datos se descartaron 27 perfiles (5.3%) por incumplir estas condiciones.

El criterio de mínimo cuatro datos en la vertical fue basado en un análisis que consideró la existencia de bases de datos integradas por un número pequeño de puntos en la vertical, como es el caso de esta base de datos, cuya característica es la toma discreta de muestras en las columna de agua, integrada por registros que tuvieron un “n” de 4, 5, 6, 7, 8 ó 9 datos en la vertical.

Para entender las diferencias en los “n” de cada perfil analizado, se identificó para cada crucero el esquema de toma de muestras, definido por los respectivos planes de crucero (Tabla 8, 9 y 10).

**Tabla 8.** Planes de muestreo aplicado en la CPC entre los años 1996 y 2002. Las profundidades están expresadas en metros.

CRUCERO											
23	24	25	27	28	29	30	31	32	33	34	35
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-25	-25	-25	-25	-25	-25	-25	-25	-25	-25	-25	-25
-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50
-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
		-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
		-150	-150		-150	-150	-150				-150

**Tabla 9.** Planes de muestreo aplicado en la CPC entre los años 2003 y 2005. Las profundidades están expresadas en metros.

CRUCERO			
36	37		39
-1	-1	-9	-1
-10	-10	-19	-10
-20	-20	-29	-20
-25	-30	-49	-30
-30	-50	-74	-50
-50	-75	-99	-75
-75	-100	-149	-100
-100	-150		-150
-150			

**Tabla 10.** Planes de muestreo aplicado en la CPC entre los años 2006 y 2012. Las profundidades están expresadas en metros.

CRUCERO							
42	43	45	47	48	51	52	53
0	0	0	0	0	0	0	0
-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30
-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50
-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
-150	-150	-150	-150	-150	-150	-150	-150

Los esquemas antes descritos, contemplan puntos fijos y discretos para cada estación muestreada, es decir un número fijo de profundidades a tomar, que además puede resultar en un número menor de registros, en atención a las novedades y condiciones propias del proceso de muestreo o del análisis del parámetro. Por ejemplo, los cruceros 23 y 24 tienen un “n” máximo de cuatro profundidades, las cuales son suficientes para obtener una gaussiana representativa del perfil.

### **5.1.3** Significancia estadística de los perfiles modelados

A cada uno de los 432 perfiles que cumplieron con las condiciones mínimas para aplicar el modelo de la gaussiana desfasada definido por Platt *et al.* (1988), se les corrió el modelo. Para evaluar el grado de correlación entre los perfiles reales y los perfiles modelados, se aplicó la técnica “match-up” (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011), cuyo resultado permitió determinar que 231 perfiles modelados se ajustaron a los perfiles reales de Clorofila-a, es decir, el 53% de los perfiles modelados, son estadísticamente significativos (Tabla 11), un porcentaje superior a los obtenidos en otros estudios que oscilan entre 25% y 27% de significancia de los perfiles modelados (Platt y Sathyendranath, 2007).

**Tabla 11.** Relación del número y porcentaje de perfiles modelados de clorofila-a, estadísticamente significativos, respecto al total de perfiles modelados para cada crucero.

<b>Junio de 1996 a Noviembre de 2000</b>								
Crucero	23	24	25	27	28	29	30	31
# perfiles modelados	15	6	14	18	2	21	26	22
# perfiles modelados estadísticamente significativos	10	1	3	18	1	21	23	4
% perfiles modelados estadísticamente significativos	67%	17%	21%	100%	50%	100%	88%	18%
<b>Junio de 2001 a Marzo de 2006</b>								
Crucero	32	33	34	35	36	37	39	42
# perfiles modelados	28	19	22	20	25	25	21	24
# perfiles modelados estadísticamente significativos	6	7	4	12	15	5	6	15
% perfiles modelados estadísticamente significativos	21%	37%	18%	60%	60%	20%	29%	63%
<b>Septiembre de 2006 a Septiembre de 2012</b>								
Crucero	43	45	47	48	51	52	53	
# perfiles modelados	8	14	18	19	20	21	24	
# perfiles modelados estadísticamente significativos	5	3	9	17	13	13	20	
% perfiles modelados estadísticamente significativos	63%	21%	50%	89%	65%	62%	83%	
<b>TOTAL</b>								
Crucero	<b>23</b>							
# perfiles modelados	<b>432</b>							
# perfiles modelados estadísticamente significativos	<b>231</b>							
% perfiles modelados estadísticamente significativos	<b>53%</b>							

En el análisis de “match-up”, la toma de decisiones se hace más robusta con un mayor número de datos, es así como el número de puntos en la vertical que integran el perfil de clorofila-a de cada estación se convierte en un elemento fundamental para la significancia del perfil modelado.

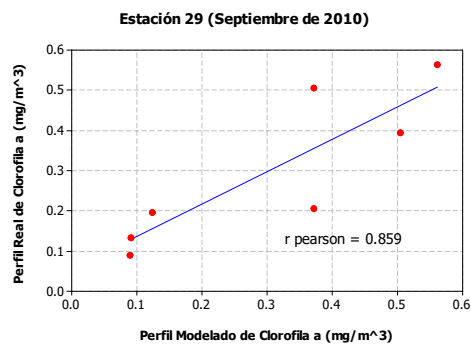
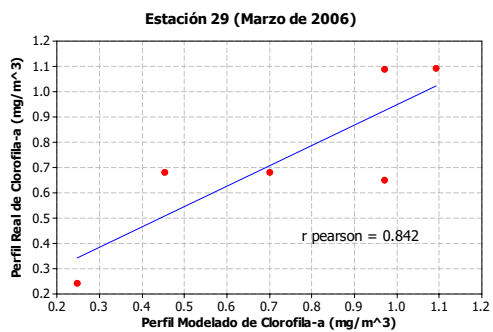
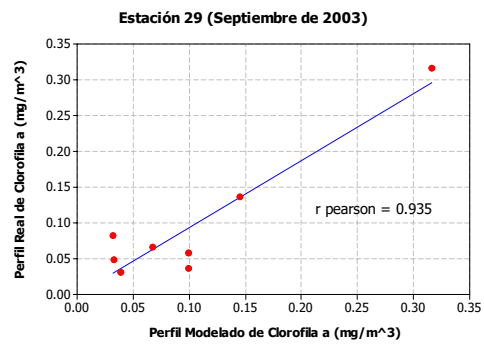
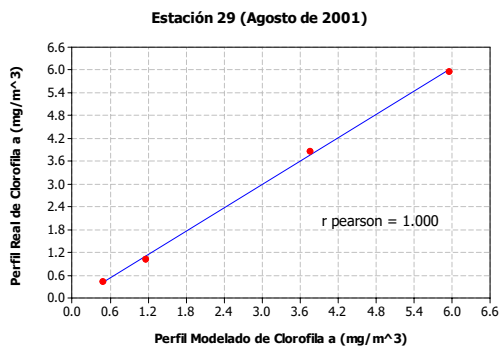
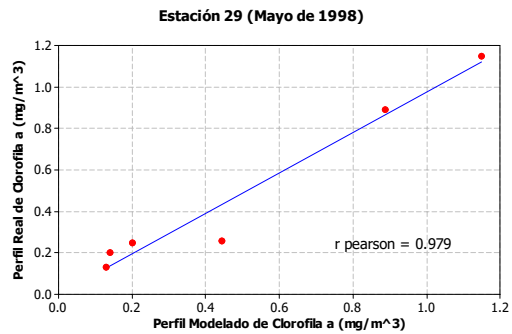
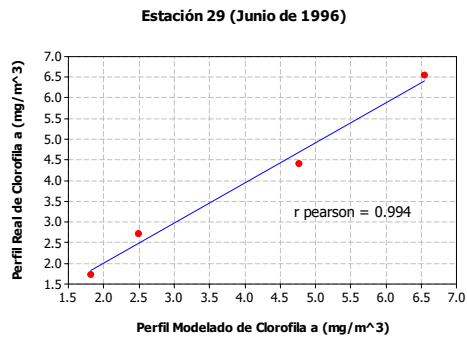
Analizando los resultados obtenidos con base en el número de profundidades (“n”) por perfil (Tabla 12), se confirma la tendencia de que, a mayor número de datos por perfil, mayor porcentaje de perfiles modelados estadísticamente significativos. Sin embargo, la relación directa no es concluyente y otros elementos relacionados con las características ópticas del perfil, deben considerarse, porque el “n” sería determinante, si los perfiles fueran monotónicos y esto no es la constante en los perfiles que integran esta base de datos analizada.

**Tabla 12.** Porcentaje de perfiles modelados estadísticamente significativos, según el número de datos (n).

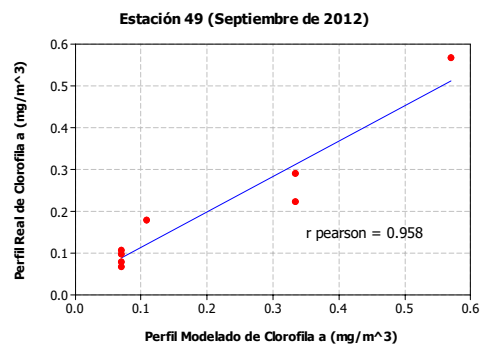
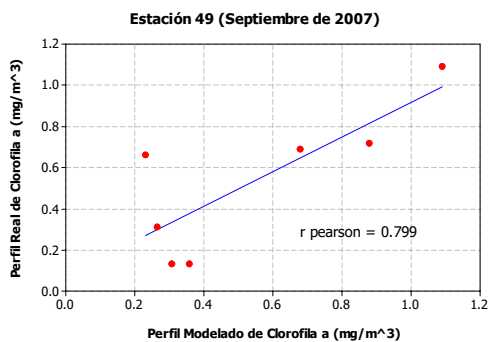
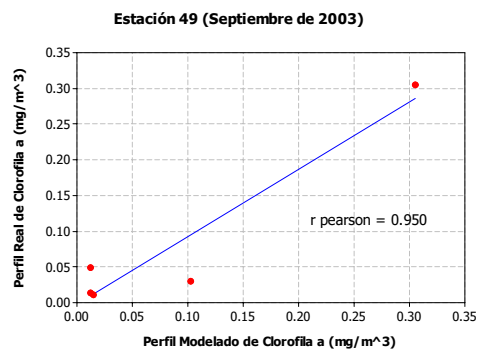
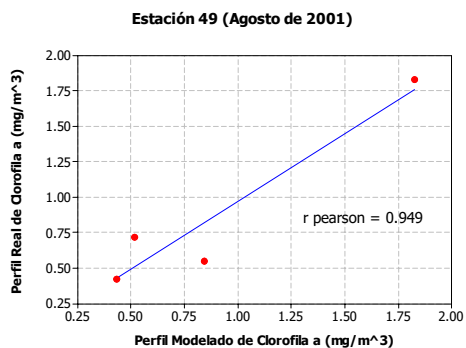
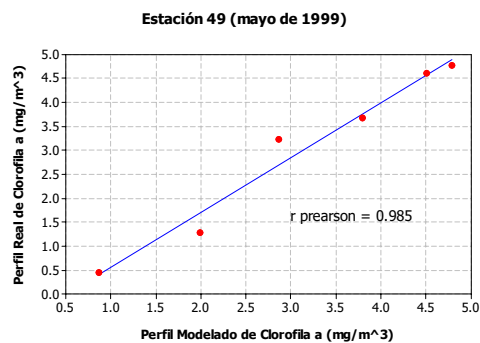
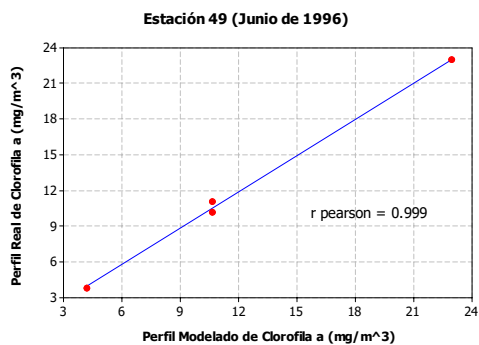
Numero de datos por perfil	n=4	n=5	n=6	n=7	n=8	n=9	<b>Total</b>
Número total de perfiles modelados	67	122	115	61	65	2	<b>432</b>
Número total de perfiles modelados estadísticamente significativos	25	44	79	37	45	1	<b>231</b>
Porcentaje de perfiles modelados estadísticamente significativos	37%	36%	69%	61%	69%	50%	<b>53%</b>

Para ilustrar los resultados obtenidos al aplicar el análisis de “match-up”, se tomaron las estaciones más representativas de la base de datos, es decir, aquellas que estuvieron presentes en el mayor número de cruceros analizados y cuyo valor “n” varió entre cruceros. Dichas estaciones fueron la 29 (Fig. 8), 49 (Fig. 9) y 77 (Fig. 10), y estuvieron presentes en 12 de los 23 cruceros ERFEN.

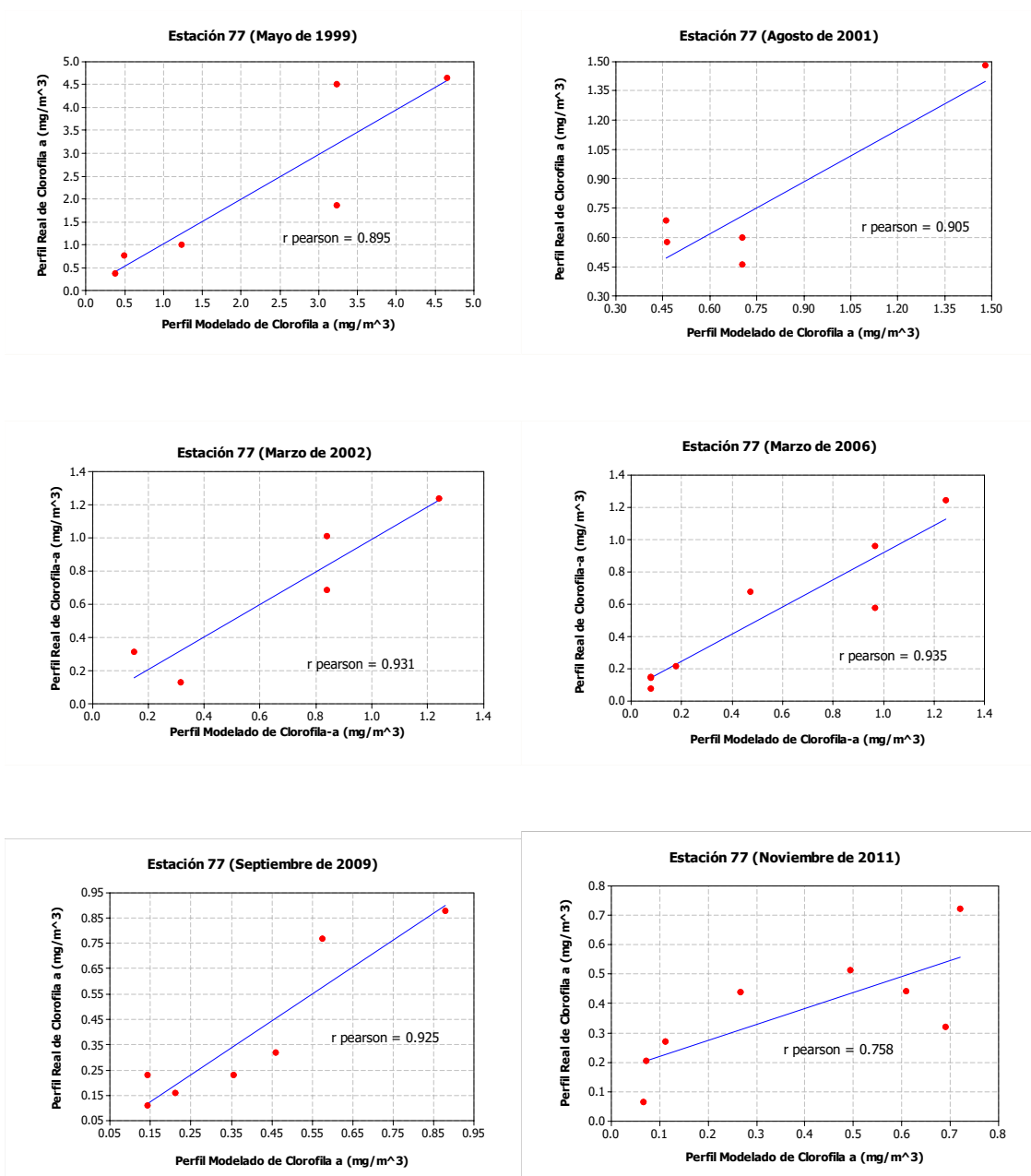




**Figura 8.** Relación entre los perfiles reales, correspondientes a los datos de Clorofila-a medidos en la Estación No. 29, y los perfiles modelados, determinados por el modelo de la Gaussiana desfasada definido por Platt *et al.* (1988). Cada grafico representa esta relación en la Estación No.29, para: a) junio de 1996, b) mayo de 1998, c) agosto de 2001, d) septiembre de 2003, e) marzo de 2006 y f) septiembre de 2010.



**Figura 9.** Relación entre los perfiles reales, correspondientes a los datos de Clorofila-a medidos en la Estación No. 49, y los perfiles modelados, determinados por el modelo de la Gaussiana desfasada definido por Platt *et al.* (1988). Cada grafico representa esta relación en la Estación No.49, para: a) junio de 1996, b) mayo de 1999, c) agosto de 2001, d) septiembre de 2003, e) septiembre de 2007 y f) septiembre de 2012.



**Figura 10.** Relación entre los perfiles reales, correspondientes a los datos de clorofila-a medidos en la Estación No. 77, y los perfiles modelados, determinados por el modelo de la Gaussiana desfasada definido por Platt *et al.* (1988). Cada grafico representa esta relación en la Estación No.77, para: a) mayo de 1999, b) agosto de 2001, c) marzo de 2002, d) marzo de 2006, e) septiembre de 2009, y f) noviembre de 2011.

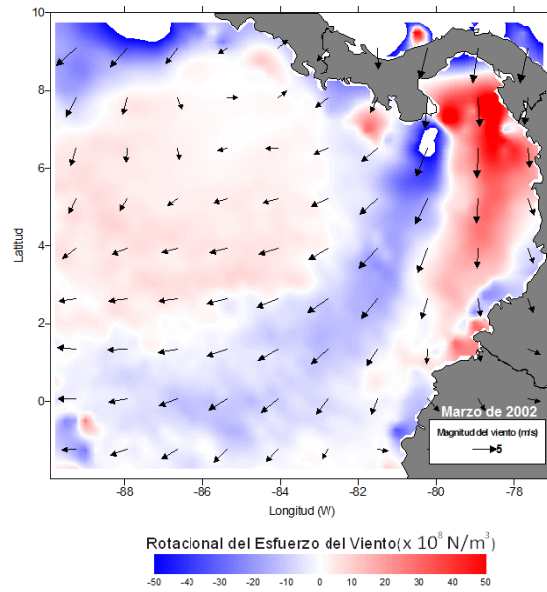
## 5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS GAUSSIANOS

Cada corrida del modelo, aplicada a los perfiles reales de clorofila-a, generó cuatro parámetros gaussianos ( $B_0$ ,  $z_m$ ,  $\sigma$  y  $h$ ) que definen la arquitectura del perfil modelado, así como el cálculo de la clorofila integrada a la profundidad del máximo de clorofila-a y la clorofila-a integrada total del perfil.

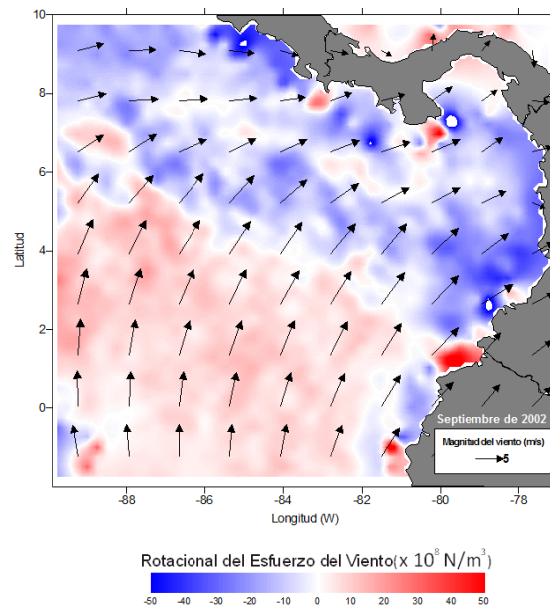
Como apoyo a la descripción vertical de los perfiles, se consideró el uso de mapas de campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento, los cuales, describieron los patrones estacionales propios de cada época climática en la CPC. Es así como, en la Figura 11 se representa la época seca (diciembre – abril) caracterizada por aguas frías, saladas y muy productivas, predominancia de los vientos Alisios del Noreste y la Zona de Convergencia Intertropical-ZCIT se ubica al Sur de la CPC (Villegas, 1997; Camacho, 1998; CCCP, 2002; y Giraldo *et al.*, 2008).

Así mismo, en la Figura 12, se representa la época de lluvias (mayo – noviembre), caracterizada por aguas cálidas, dulces y poco productivas, predominancia de los vientos Alisios de Sureste y la Zona de Convergencia Intertropical-ZCIT se ubica al Norte de la CPC (Villegas, 1997; Camacho, 1998; CCCP, 2002; y Giraldo *et al.*, 2008).

La descripción de la distribución vertical de la concentración de clorofila-a, de las estaciones presentes en cada uno de los 23 cruceros analizados, se hizo considerando las regiones biogeográficas dinámicas (RBGs) de cada crucero, y la presentación de los resultados se hizo según las dos épocas climáticas de la CPC.



**Figura 11.** Representación de la época seca por el campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento. Marzo de 2002



**Figura 12.** Representación de la época de lluvia por el campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento. Septiembre de 2002

### 5.2.1 Cruceros ERFEN tomados en época seca

Solo dos cruceros fueron tomados en época seca, el ERFEN 34 (marzo de 2002) y el ERFEN 42 (marzo de 2006). Los cuales, estuvieron influenciados por el Jet de Panamá, identificándose en ambos periodos una zona de surgencia que cubrió el golfo de panamá y se extendió hasta la zona norte de la costa pacífica colombiana, aunque con una mayor extensión durante el crucero del año 2002 (Fig. 10).

En el crucero de marzo de 2002, de los 22 perfiles modelados, se obtuvieron cuatro perfiles modelados estadísticamente significativos (Tabla 13), dentro de los cuales se identificó el parámetro  $z_m$  a 25 metros de profundidad, con una concentración máxima de clorofila-a promedio, de  $1.173 \text{ mg/m}^3$ . Mientras que en el crucero de marzo de 2006, de los 24 perfiles modelados, se obtuvieron 15 perfiles modelados estadísticamente significativos (Tabla 14) y no se identificó un patrón definido del parámetro  $z_m$ , sin embargo, el parámetro  $B_0$ , presentó como patrón común, la misma concentración de la clorofila base de  $0.079 \text{ mg/m}^3$ , en ocho (25, 43, 47, 75, 77, 79, 111 y 113) de las 15 estaciones modeladas, las cuales se ubican en las estaciones más alejadas a la costa.

**Tabla 13.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para el crucero No. 34 (marzo de 2002).

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
7	2002	MAR	0.035	-25	17.558	85.774	1.984	3.252	4.650
14	2002	MAR	0.129	-25	20.568	53.363	1.164	2.018	3.376
31	2002	MAR	0.360	-25	13.058	47.282	1.805	2.338	4.438
77	2002	MAR	0.128	-25	18.713	52.095	1.238	2.247	3.374

**Tabla 14.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para el crucero No. 42 (marzo de 2006). Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
1	2006	MAR	0.545	-30	8.968	55.742	3.025	7.402	8.981
10	2006	MAR	0.237	-75	10.047	101.769	4.278	6.489	7.169
25	2006	MAR	0.079	-10	3.164	28.649	3.691	4.135	4.627
27	2006	MAR	0.237	-10	1.902	0.983	0.443		1.154
29	2006	MAR	0.237	-20	12.759	27.364	1.093	2.862	4.427
33	2006	MAR	0.119	-20	4.542	76.948	6.877	8.899	11.212
43	2006	MAR	0.079	-50	7.642	157.259	8.289	9.616	10.206
47	2006	MAR	0.079	-10	6.494	14.736	0.984	1.349	1.960
75	2006	MAR	0.079	-50	14.946	46.002	1.307	2.487	4.051
77	2006	MAR	0.079	-20	9.573	28.025	1.247	2.889	4.057
79	2006	MAR	0.079	-10	6.714	21.338	1.347	1.958	3.306
81	2006	MAR	0.216	-50	10.437	37.292	1.641	3.363	4.011
107	2006	MAR	0.059	-50	14.946	14.382	0.443	0.970	1.421
111	2006	MAR	0.079	-30	14.804	36.126	1.053	2.647	4.132
113	2006	MAR	0.079	-30	10.523	19.711	0.826	1.769	2.675

En este periodo (marzo de 2002 y marzo de 2006) se identificaron tres RBGs (Fig. 13 y 14), denominadas, así:

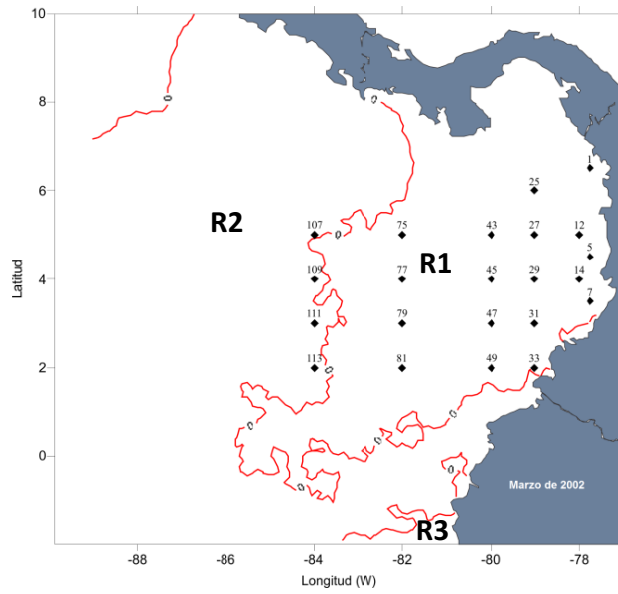
- **R1**, Región fría pacífico colombiana: Ubicada aproximadamente entre los  $-83.5^\circ$  y  $-77.7^\circ$ W de longitud y entre los  $8^\circ$  y  $1^\circ$ N de latitud (Fig. 13 y 14). Estos cruceros fueron monitoreados en la época seca, la cual está influenciada por los vientos Alisios del Norte y se caracteriza por aguas frías, saladas y muy productivas (Villegas, 1997; Camacho, 1998; CCCP, 2002 y (Giraldo, Rodríguez-Rubio, y Zapata, 2008)).
- **R2**, Región fría tropical colombiana: Ubicada aproximadamente entre los  $-82^\circ$  y  $-88^\circ$ W de longitud y entre los  $8^\circ$  y  $2^\circ$ N de latitud (Fig. 13 y 14). Estos cruceros fueron monitoreados en la época seca, la cual está influenciada por el jet de

panamá y se caracteriza por aguas frías, saladas y muy productivas (**Villegas, 1997; Camacho, 1998; CCCP, 2002 y Giraldo et al., 2008**).

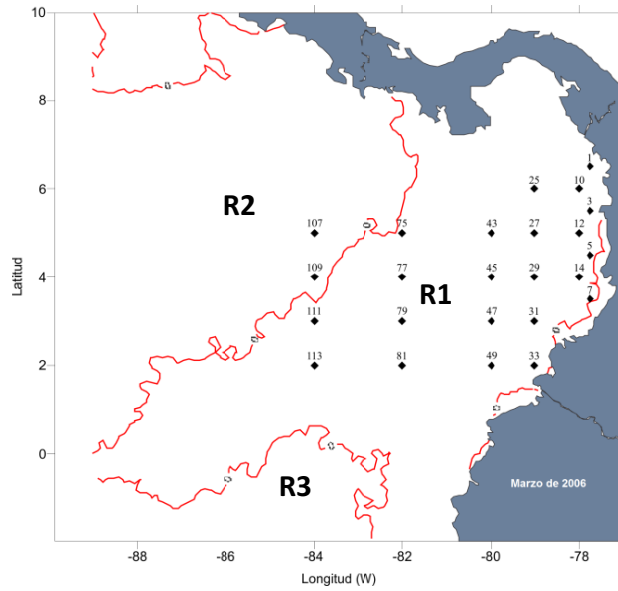
- **R3**, Región fría ecuatorial: Ubicada entre los -88°y -81°W de longitud y entre los 0° y -2°S de latitud (Fig. 13 y 14). En marzo de 2002, esta región describe una marcada influencia del jet de panamá en la CPC que se extiende hasta los -1°S de latitud, con temperaturas superficiales entre 26 y 27.5°C (**Rodríguez-Rubio et al., 2003**) y para marzo de 2006, se describe un descenso de la temperatura superficial en el Océano Pacífico Ecuatorial (**Martínez-Aguilar, Giraldo, y Rodríguez-Rubio, 2010**).

Las ocho estaciones, con la misma concentración de  $B_0$ , identificadas en el crucero de marzo de 2006, se ubican en las estaciones más costeras de la **R1**, mientras que las estaciones con mayores valores de  $B_0$  (1, 10, 27, 29, 33 y 81), se ubican en las estaciones más oceánicas de esta misma región. Solo una estación (107) estuvo presente en la **R2** y la misma registro el valor  $B_0$ , más bajo (0.059 mg/m<sup>3</sup>).





**Figura 13.** Bioregionalización dinámica para marzo de 2002, en la Cuenca Pacífica Colombiana.



**Figura 14.** Bioregionalización dinámica para marzo de 2006, en la Cuenca Pacífica Colombiana

### 5.2.2 Cruceros ERFEN tomados en época de lluvias

El mayor número de cruceros que integran la base de datos analizada, fue tomado en época de lluvias, por tanto, la descripción de los parámetros gaussianos se hizo de acuerdo al mes de muestreo de este periodo climático.

Dado que estos cruceros fueron tomados en la misma época, el patrón de vientos es igual al descrito en la Figura 12, salvo por los cruceros tomados en los meses de mayo y junio, que marcan el inicio de las lluvias en la CPC, por tanto constituyen la denominada época de transición, en atención al cambio entre el fin de la época seca y el inicio de la época de lluvias (Camacho, 1998).

#### Cruceros tomados en el mes de Mayo:

Los cuatro parámetros gaussianos ( $B_0$ ,  $z_m$ ,  $\sigma$  y  $h$ ), la clorofila integrada a la profundidad del máximo de clorofila-a y la clorofila-a integrada total del perfil, calculados para los perfiles modelados estadísticamente significativos, de los cruceros de mayo de 1997, 1998, 1999 y 2000, se presentan respectivamente en las Tablas 15, 16, 17 y 18.

**Tabla 15.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de mayo de 1997.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
33	1997	MAY	0.190	-100	11.500	312.489	11.030	13.860	13.860
61	1997	MAY	0.500	-100	22.711	19.356	0.840	2.700	3.280
74	1997	MAY	0.190	-75	15.656	90.652	2.500	2.890	4.490

**Tabla 16.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de mayo de 1998.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
4	1998	MAY	0.030	0	26.793	49.699	0.770	0.770	1.890
6	1998	MAY	0.090	0	41.749	82.672	0.880	0.880	3.010
24	1998	MAY	0.080	0	26.793	100.069	1.570	1.570	3.990
27	1998	MAY	0.290	0	19.192	135.185	3.100	3.100	6.320
29	1998	MAY	0.130	0	23.001	58.808	1.150	1.150	2.880
33	1998	MAY	0.150	0	19.192	15.876	0.480	0.480	1.340
42	1998	MAY	0.140	0	34.319	47.313	0.690	0.690	2.330
45	1998	MAY	0.190	0	11.537	16.484	0.760	0.760	1.500
47	1998	MAY	0.070	0	30.567	19.921	0.330	0.330	1.020
50	1998	MAY	0.050	0	26.793	22.835	0.390	0.390	1.090
59	1998	MAY	0.160	0	19.192	68.314	1.580	1.580	3.160
63	1998	MAY	0.220	0	11.537	81.265	3.030	3.030	4.190
66	1998	MAY	0.110	0	19.192	30.789	0.750	0.750	1.580
69	1998	MAY	0.240	0	11.537	9.833	0.580	0.580	1.860
75	1998	MAY	0.110	0	19.192	28.865	0.710	0.710	1.550
77	1998	MAY	0.110	0	19.192	58.211	1.320	1.320	2.750
79	1998	MAY	0.240	0	19.192	77.936	1.860	1.860	4.000
82	1998	MAY	0.100	0	26.793	26.864	0.500	0.500	1.440

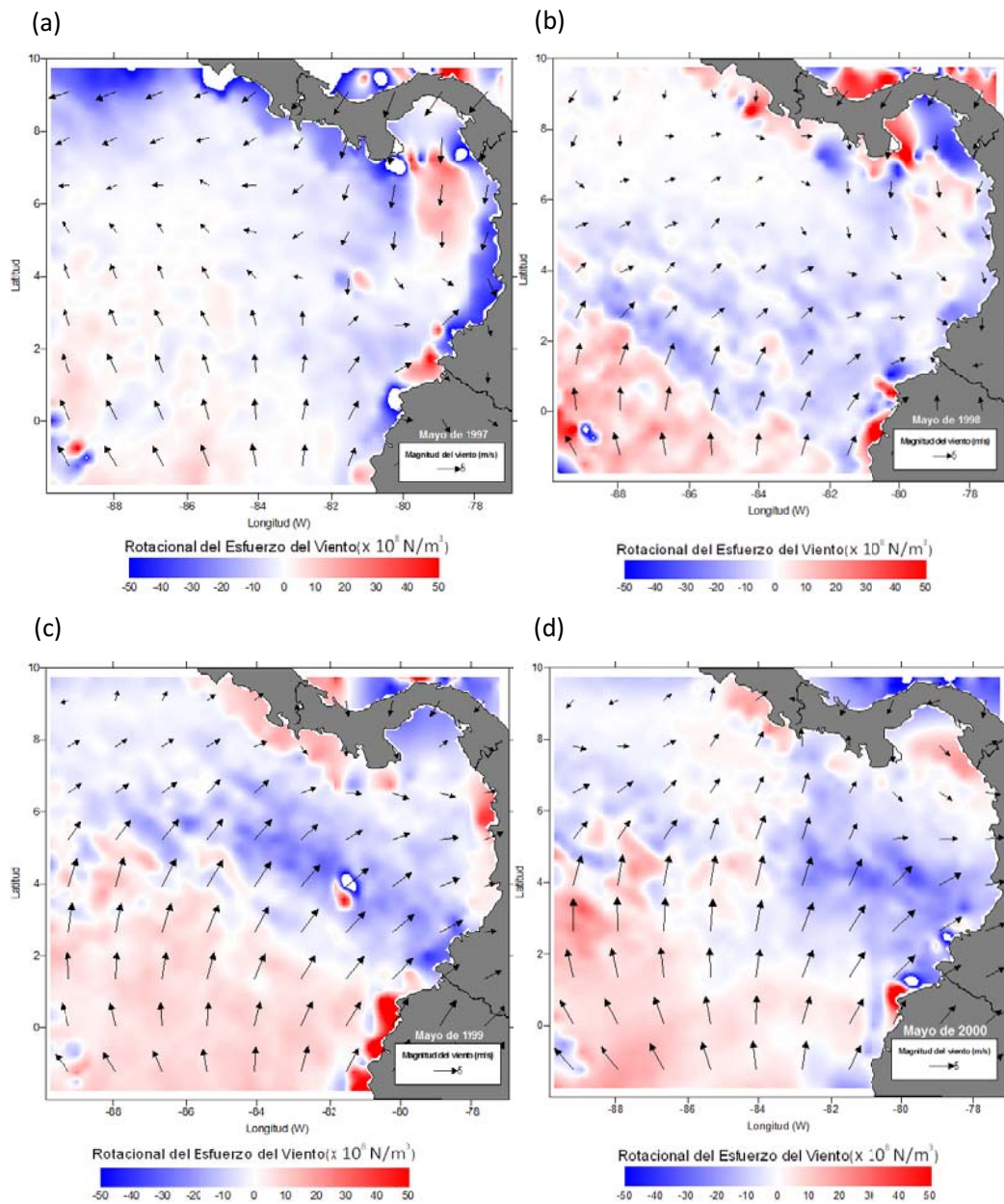
**Tabla 17.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de mayo de 1999.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
4	1999	MAY	0.622	0	34.319	343.911	4.620	4.620	15.230
12	1999	MAY	0.641	0	38.047	377.567	4.600	4.600	15.384
14	1999	MAY	0.339	0	34.319	320.956	4.070	4.070	12.199
16	1999	MAY	0.843	0	38.047	358.319	4.600	4.600	16.152
24	1999	MAY	0.925	0	34.319	304.067	4.460	4.460	15.655
27	1999	MAY	0.768	0	45.422	440.851	4.640	4.640	17.567
29	1999	MAY	1.030	-25	24.519	229.868	4.770	9.460	18.477
31	1999	MAY	0.686	0	38.047	341.820	4.270	4.270	15.200
33	1999	MAY	0.931	0	38.047	363.310	4.740	4.740	16.921
45	1999	MAY	0.799	0	41.749	406.124	4.680	4.680	17.550
47	1999	MAY	0.639	0	45.422	439.560	4.500	4.500	17.157
49	1999	MAY	0.453	0	49.064	532.139	4.780	4.780	18.026
59	1999	MAY	0.931	0	23.001	228.813	4.900	4.900	13.071
61	1999	MAY	0.781	0	30.567	268.078	4.280	4.280	13.934
63	1999	MAY	1.219	0	49.064	418.234	4.620	4.620	18.379
65	1999	MAY	0.942	0	45.422	419.958	4.630	4.630	18.271
69	1999	MAY	0.106	0	26.793	316.629	4.820	4.820	11.895
75	1999	MAY	0.402	0	26.793	294.052	4.780	4.780	12.077
77	1999	MAY	0.373	-25	19.712	211.312	4.650	9.160	13.161
79	1999	MAY	0.419	0	41.749	400.926	4.250	4.250	14.835
81	1999	MAY	0.578	0	45.422	478.461	4.780	4.780	18.215

**Tabla 18.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de mayo de 2000.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
2	2000	MAY	0.021	0	26.793	29.867	0.466	0.466	1.093
4	2000	MAY	0.081	0	23.001	20.268	0.432	0.432	1.058
6	2000	MAY	0.677	0	30.567	80.954	1.734	1.734	6.598
10	2000	MAY	0.236	0	41.749	49.461	0.708	0.708	2.890
24	2000	MAY	1.041	0	34.319	95.674	2.154	2.154	9.371
25	2000	MAY	0.016	0	38.047	48.791	0.528	0.528	1.608
27	2000	MAY	0.191	0	19.192	52.585	1.284	1.284	2.993
29	2000	MAY	0.907	0	59.784	111.625	1.652	1.652	8.480
31	2000	MAY	0.110	0	23.001	20.060	0.457	0.457	1.213
33	2000	MAY	0.112	0	15.370	182.167	4.841	4.841	7.402
47	2000	MAY	0.141	0	23.001	18.081	0.455	0.455	1.476
49	2000	MAY	0.165	0	52.673	38.015	0.453	0.453	2.107
59	2000	MAY	0.316	0	41.749	41.624	0.713	0.713	3.162
61	2000	MAY	0.931	0	41.749	77.126	1.668	1.668	8.040
63	2000	MAY	0.260	0	30.567	56.380	0.996	0.996	3.387
65	2000	MAY	0.219	0	30.567	27.773	0.582	0.582	2.238
77	2000	MAY	0.216	0	15.370	87.629	2.491	2.491	4.134
91	2000	MAY	0.124	0	15.370	49.779	1.416	1.416	2.558
93	2000	MAY	0.490	0	45.422	60.964	1.025	1.025	4.777
97	2000	MAY	0.010	0	49.064	54.673	0.455	0.455	1.682
107	2000	MAY	0.080	0	30.567	48.888	0.718	0.718	2.037
109	2000	MAY	0.172	0	38.047	27.566	0.461	0.461	1.910
111	2000	MAY	0.019	0	38.047	69.956	0.753	0.753	2.352

Dentro de los cruceros monitoreados en este mes, se evidenció en los mapas de campo de viento y rotacional del esfuerzo de viento de mayo de 1997 y 1998 (Fig. 15a y 15b), diferencias en el patrón característico de la época de lluvias (Fig. 15c y 15d), los cuales se asocian a la incursión en la CPC, del fenómeno El Niño de 1997-1998 (Camacho, 1998, Villegas, 1997).

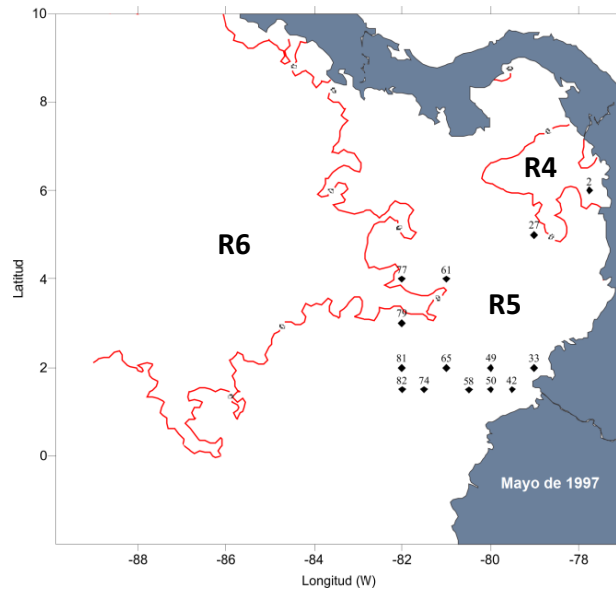


**Figura 15.** Campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento, para: a) mayo de 1997, b) mayo de 1998, c) mayo de 1999 y d) mayo de 2000 en la Cuenca Pacífica Colombiana.

Se identificó como patrón común para los cruceros tomados en el mes de mayo, excepto por el crucero de 1997, la presencia de la concentración máxima de clorofila-a, es decir el  $z_m$  a cero (0) metros de profundidad, con un promedio superficial de 1.979 mg/m<sup>3</sup> de clorofila-a para mayo de 1998, 0.687 mg/m<sup>3</sup> de clorofila-a para mayo de 1999 y 1.130 mg/m<sup>3</sup> de clorofila-a para mayo de 2000. Se identificó además en el crucero de mayo de 1999, un valor muy homogéneo de concentración máxima de clorofila-a, con un promedio de 4.592 mg/m<sup>3</sup>.

En el crucero de mayo de 1997 se identificaron tres RBGs (Fig. 16), denominadas, así:

- **R4**, Región de surgencia Panamá-Colombia: Ubicada entre los -77.7° y -81°W de longitud y entre los 7° y 5°S de latitud (Fig. 16). Representa un frente de surgencia, descrito para la costa norte del pacífico colombiano (**Rodríguez-Rubio et al., 2003**) e identificado por el rotacional del esfuerzo del viento (Fig. 15a).
- **R5**, Región cálida pacífico colombiana: Su denominación obedece al ingreso de aguas cálidas a la CPC, gracias a los vientos Alisios del Sureste (**Villegas, 1997; Camacho, 1998; CCCP, 2002 y Giraldo et al., 2008**).
- **R6**, Región cálida tropical colombiana: Su denominación obedece a la influencia de las aguas tropicales del pacífico oriental (**CCCP, 2002**).

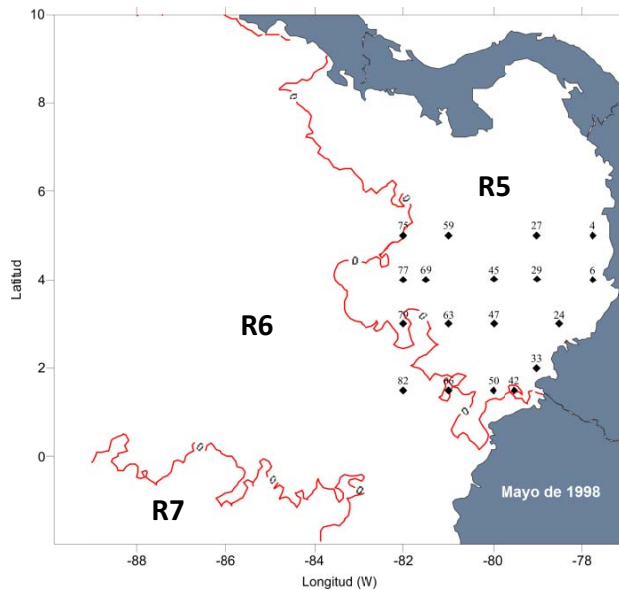


**Figura 16.** Bioregionalización dinámica para mayo de 1997, en la Cuenca Pacifica Colombiana

En el crucero ERFEN 25 (mayo de 1997), de los 14 perfiles modelados, se obtuvieron tres perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos tres perfiles están representados por las estaciones 33, 61 y 74, presentes en la **R5** (Fig. 16), los cuales no describen un patrón de distribución vertical, que pueda ser asociado con la región o época climática.

Para mayo de 1998, al igual que mayo de 1997, se evidencian tres regiones (Fig. 17). Dos de las cuales, describen las mismas características identificadas para las regiones **R5** y **R6** del crucero de mayo de 1997 por ello se mantiene el mismo nombre. Así mismo, se evidencia una región denominada **R7** o Región fría ecuatorial, dado la influencia de masas de agua provenientes del ecuador, lo cual se asocia con la corriente de Humboldt o corriente del Perú, caracterizada por aguas frías que ingresan a la CPC en la época seca entre mayo-noviembre (CCCP, 2002).

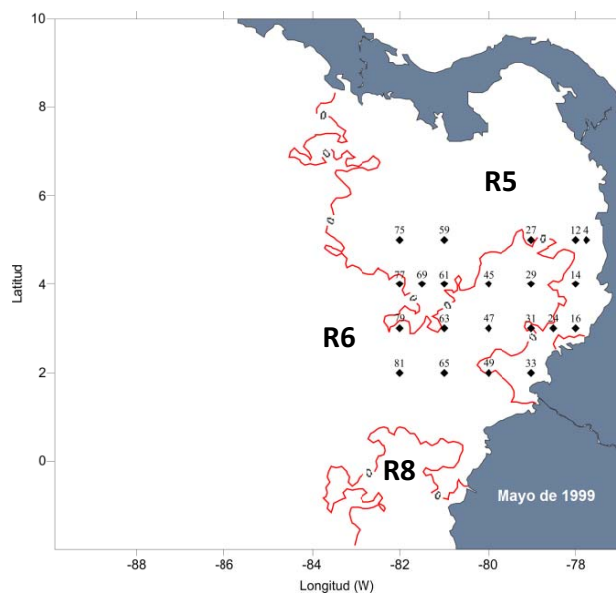




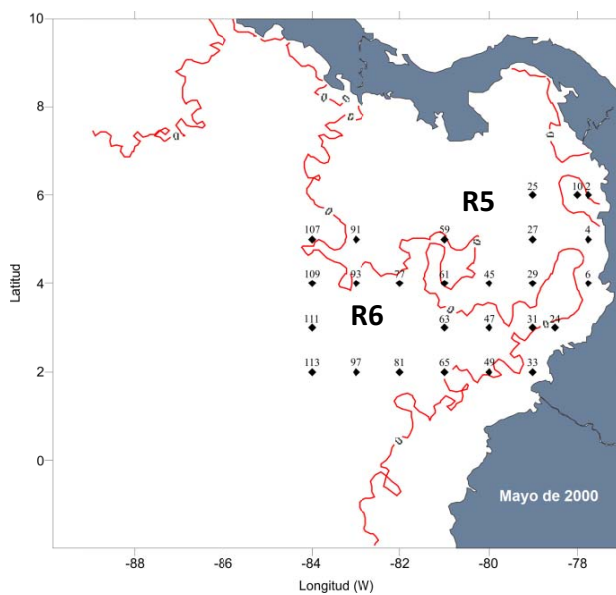
**Figura 17.** Bioregionalización dinámica para mayo de 1998, en la Cuenca Pacífica Colombiana

En el crucero ERFEN 27 (mayo de 1998), los 18 perfiles modelados fueron estadísticamente significativos, por tanto, en la **R5** se identifican la mayoría de las estaciones tomadas, salvo por las estaciones 42 y 82, que se ubican en la **R6** (Fig. 17). Este crucero, al igual que el de mayo de 1997, no describe un patrón de distribución vertical, que pueda ser asociado con la región o época climática.

Para mayo de 1999 y 2000 (Fig. 18 y 19), se evidencian dos regiones con las mismas características identificadas para las regiones **R5** y **R6** de los cruceros de mayo de 1997 y 1998, por ello se mantiene el mismo nombre. Así mismo, en mayo de 1999, se identifica una pequeña región denominada **R8** o Región asociada a un núcleo de surgencia en las costas del Ecuador, coincidente con el proceso presente en la misma posición del mapa de rotacional del esfuerzo del viento (Fig. 15c).



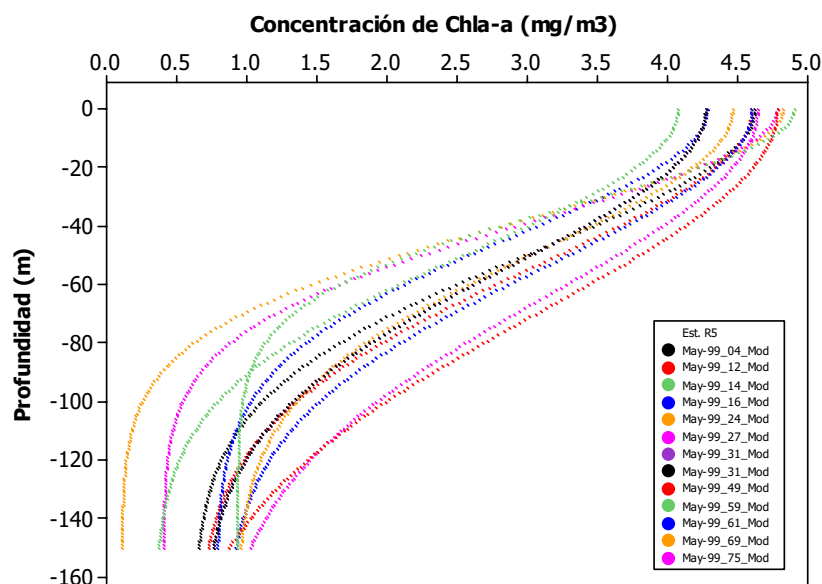
**Figura 18.** Bioregionalización dinámica para mayo de 1999, en la Cuenca Pacífica Colombiana



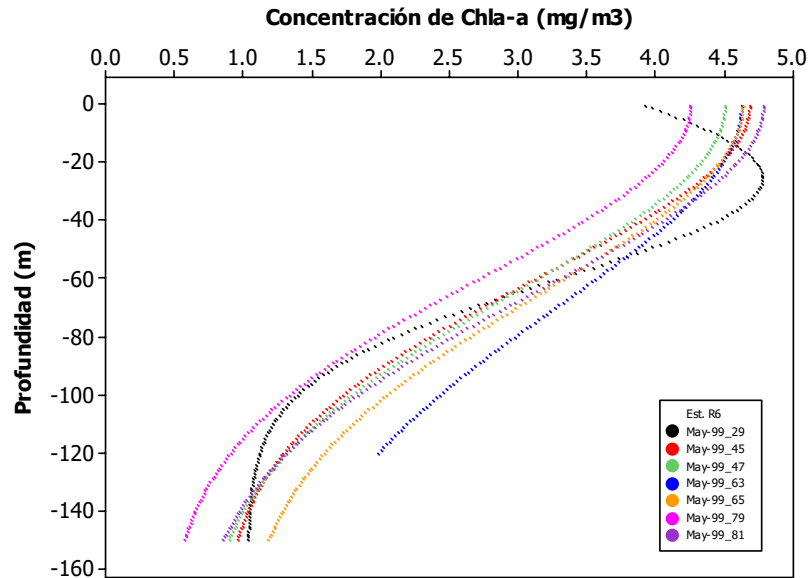
**Figura 19.** Bioregionalización dinámica para mayo de 2000, en la Cuenca Pacífica Colombiana

En el crucero ERFEN 29 (mayo de 1999), los 21 perfiles modelados fueron estadísticamente significativos, así entonces, en el mapa de RBGs (Fig. 18), hay representación de todas las estaciones tomadas, por tanto, en la **R5** se ubican las estaciones 4, 12, 14, 16, 24, 27, 31, 33, 49, 59, 61, 69 y 75; en la **R6** se ubican las estaciones 29, 45, 47, 63, 65, 79 y 81 y en la **R8** no hubo estaciones. Este crucero, fue el único que identificó un patrón homogéneo en la distribución vertical de la clorofila-a para los perfiles de la región **R5** (Fig. 20) y para la región **R6**, excepto por la estación 29 (Fig. 21).

En el crucero ERFEN 30 (mayo de 2000), de los 26 perfiles modelados, se obtuvieron 23 perfiles modelados estadísticamente significativos. En la Figura 19, se pueden identificar las estaciones 2, 4, 6, 24, 25, 27, 29, 31, 33 y 91 ubicadas en la **R5** y las estaciones 47, 49, 59, 61, 63, 65, 77, 93, 97, 107, 109 y 111 ubicadas en la **R6**. En este crucero los perfiles analizados, no describen un patrón de distribución vertical, que pueda ser asociado con la región o época climática.



**Figura 20.** Distribución vertical de las estaciones ubicadas en la **R5** del crucero de mayo de 1999.



**Figura 21.** Distribución vertical de las estaciones ubicadas en la **R6** del crucero de mayo de 1999.

### Cruceros tomados en el mes de Junio:

En el crucero ERFEN 23 (junio de 1996), de los 15 perfiles modelados, se obtuvieron 10 perfiles modelados estadísticamente significativos. En el crucero ERFEN 32 (junio de 2001), de los 28 perfiles modelados, se obtuvieron seis perfiles modelados estadísticamente significativos.

En el crucero de junio de 1996, se identificaron los más altos registros de concentración máxima de clorofila-a de toda la base de datos analizada, con un promedio de  $16.038 \text{ mg/m}^3$  y valor mínimo y máximo de  $2.673 \text{ mg/m}^3$  y  $33.947 \text{ mg/m}^3$  respectivamente (Tabla 19). En el crucero de junio de 2001, no se identificaron patrones en los parámetros gaussianos (Tabla 20).

**Tabla 19.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de junio de 1996.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
2	1996	JUN	0.003	0	23.001	1065.946	18.491	18.491	34.825
4	1996	JUN	0.401	-25	9.605	54.702	2.673	3.609	4.678
24	1996	JUN	3.208	-75	14.268	926.719	29.120	50.014	50.014
25	1996	JUN	1.738	-75	18.399	221.896	6.549	15.419	15.419
29	1996	JUN	3.742	-75	26.306	493.548	11.227	31.943	31.943
42	1996	JUN	4.678	-50	14.062	909.179	30.472	49.183	68.161
49	1996	JUN	3.836	-50	12.266	588.859	22.988	37.917	48.074
58	1996	JUN	0.002	0	19.192	382.847	7.960	7.960	14.110
61	1996	JUN	4.277	-50	7.642	568.327	33.947	45.976	50.252
65	1996	JUN	3.074	-75	8.625	150.263	10.024	19.914	19.914

**Tabla 20.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de junio de 2001.

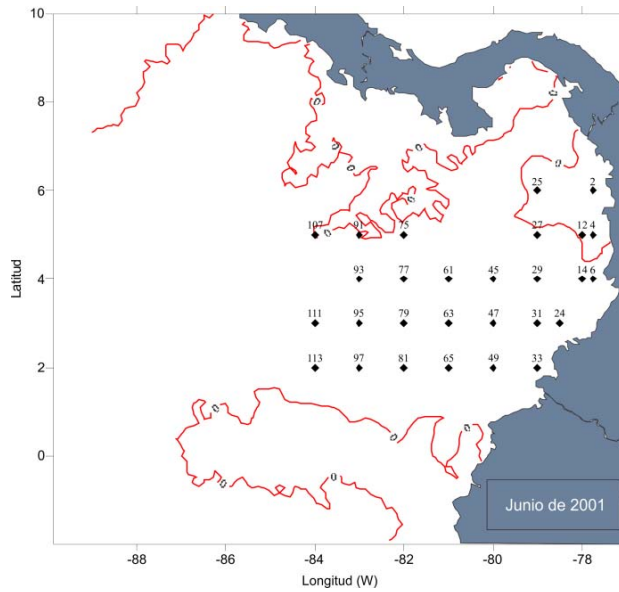
Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
4	2001	JUN	0.058	-25	12.337	31.104	1.064	1.344	2.029
24	2001	JUN	0.433	-75	15.656	25.396	1.080	2.896	3.469
33	2001	JUN	0.611	-50	12.266	62.076	2.630	4.003	6.314
49	2001	JUN	0.047	-100	35.075	199.593	2.317	4.731	4.731
63	2001	JUN	0.283	-25	15.356	12.704	0.613	0.970	2.104
65	2001	JUN	0.225	-25	14.414	53.416	1.703	2.422	4.032

En los cruceros tomados en el mes de junio, solo se cuenta con la bioregionalización de junio de 2001, en atención a la ausencia de información satelital para el año 1996.

Para junio de 2001 (Fig. 22), se evidencian dos regiones con las mismas características identificadas para las regiones **R5** y **R7** de los cruceros anteriores, por ello se mantiene el mismo nombre. Así mismo, en este periodo, se identifican dos nuevas regiones, así:

- **R9** o Región costera pacífico colombiana: ubicada para este periodo en la costa norte del pacífico colombiano entre las latitudes 5°N y 7°N y las longitudes -78°W y -80°W. Su presencia se asocia con las características de la época climática, en la cual se reportan precipitaciones que favorecen los caudales de los ríos aportando aguas dulces al sistema, demarcando una separación en la zona de aguas costeras con menores salinidades y mayores temperaturas que las aguas oceánicas (**CCCP, 2002**).
- **R10** o Región costera de Panamá: su presencia se asocia al ingreso de vientos en la cuenca de Panamá, provenientes del oeste (**CCCP, 2002, Rodríguez-Rubio et al., 2003**).

En este crucero, no se identifica una asociación de la distribución vertical de los perfiles respecto a las RBGs. Por ejemplo, la estación 4 presente en la **R9**, no describe un perfil con características que la separen de las estaciones 24, 33, 49, 63 y 65, presentes en la **R5**.



**Figura 22.** Bioregionalización dinámica para junio de 2001, en la Cuenca Pacífica Colombiana

### **Cruceros tomados en el mes de Agosto:**

En el crucero ERFEN 33 (agosto de 2001), de los 19 perfiles modelados, se obtuvieron siete perfiles modelados estadísticamente significativos, cuyos parámetros gaussianos, no evidencian ningún patrón en la distribución vertical (Tabla 21).

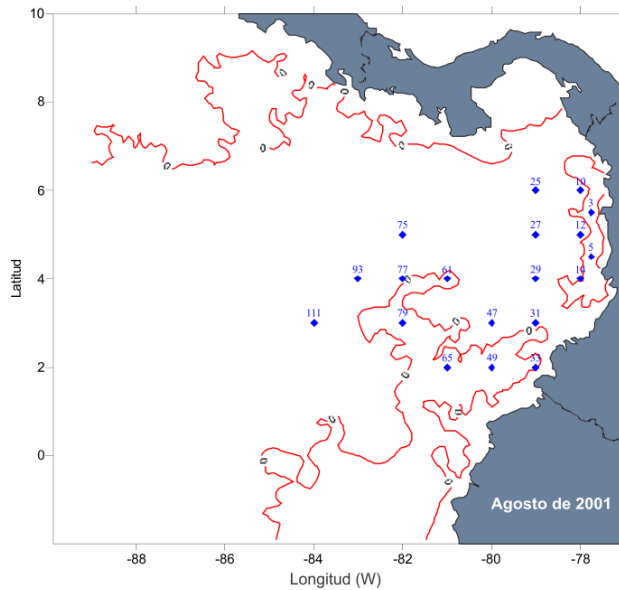
**Tabla 21.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para los cruceros tomados en el mes de agosto de 2001. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	H	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
14	2001	AGO	0.106	-50	16.684	78.878	1.992	3.147	3.648
29	2001	AGO	0.423	-25	17.558	243.259	5.950		11.276
47	2001	AGO	0.533	-100	13.397	240.859	7.706	12.744	12.744
49	2001	AGO	0.423	-100	22.711	80.103	1.830	3.516	3.516
61	2001	AGO	0.346	-100	35.075	104.428	1.533	3.762	3.762
75	2001	AGO	0.163	-50	16.684	94.333	2.418	4.168	5.994
77	2001	AGO	0.461	-25	10.418	26.651	1.481	1.942	3.802

Para agosto de 2001 (Fig. 23) se evidencian cuatro regiones, dos con las mismas características identificadas para las regiones **R5** y **R7** de los cruceros anteriores, y las otras dos, con las mismas características de las regiones **R9** y **R10** del crucero de junio de 2001, por ello se mantienen las mismas denominaciones.

De las cuatro RBGs identificadas para el crucero de agosto de 2001, la **R5** estuvo representada por perfiles verticales de clorofila-a, correspondientes a las estaciones 14, 29 y 47 (Fig. 23), mientras que la **R7** estuvo representada por las estaciones 49, 61, 75 y 77 (Fig. 23). Los cuales no describen un patrón de distribución vertical, que pueda ser asociado con la región o época climática.





**Figura 23.** Bioregionalización dinámica para agosto de 2001, en la Cuenca Pacífica Colombiana

### **Cruceros tomados en el mes de Septiembre:**

Los cuatro parámetros gaussianos ( $B_0$ ,  $z_m$ ,  $\sigma$  y  $h$ ), la clorofila integrada a la profundidad del máximo de clorofila-a y la clorofila-a integrada total del perfil, calculados para los perfiles modelados estadísticamente significativos, de los cruceros de septiembre de 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2012, se presentan respectivamente en las Tablas 22 a 31.

Este mes representa, la mayor dominancia de los monitoreos en la CPC, ya que 10 de los 23 cruceros ERFEN, fueron tomados en este periodo.

**Tabla 22.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2002.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
1	2002	SEP	0.151	-75	11.462	115.467	4.170	6.833	7.374
12	2002	SEP	0.085	0	11.537	106.701	3.775	3.775	5.323
14	2002	SEP	0.239	0	11.537	91.593	3.406	3.406	5.309
25	2002	SEP	0.176	-25	15.949	66.688	1.845	2.606	4.653
29	2002	SEP	0.153	-25	7.910	113.265	5.866	6.440	7.541
45	2002	SEP	0.128	-25	7.910	146.002	7.492	8.028	9.248
47	2002	SEP	0.208	0	11.537	127.828	4.629	4.629	6.889
49	2002	SEP	0.177	0	26.793	31.092	0.639	0.639	1.715
77	2002	SEP	0.153	-50	11.355	34.363	1.361	2.341	2.850
81	2002	SEP	0.073	0	30.567	160.736	2.171	2.171	5.648
107	2002	SEP	0.145	-150	17.251	446.769	10.477	12.062	12.062
113	2002	SEP	0.157	-50	10.437	97.303	3.876	5.626	6.251

**Tabla 23.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2003.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
3	2003	SEP	0.022	-30	8.437	9.379	0.465	1.497	1.519
10	2003	SEP	0.044	-50	14.062	7.924	0.269	0.790	0.941
12	2003	SEP	0.032	-20	6.328	6.024	0.412	0.579	1.340
14	2003	SEP	0.046	-50	8.580	7.202	0.380	0.683	0.764
16	2003	SEP	0.109	-20	4.175	3.799	0.472	0.789	1.301
27	2003	SEP	0.017	-75	17.033	6.131	0.160	0.426	0.494
29	2003	SEP	0.031	-50	10.437	7.446	0.316	0.656	0.775
33	2003	SEP	0.049	-50	11.355	8.403	0.344	0.835	0.835
45	2003	SEP	0.030	-75	10.047	5.505	0.248	0.376	0.444
47	2003	SEP	0.044	-50	13.168	4.813	0.189	0.577	0.699
49	2003	SEP	0.011	-30	2.306	1.701	0.305	0.360	0.409
79	2003	SEP	0.007	-50	7.642	7.744	0.412	0.530	0.530
107	2003	SEP	0.022	-100	29.892	10.527	0.162	0.434	0.434
109	2003	SEP	0.011	-100	19.023	7.014	0.158	0.310	0.384
111	2003	SEP	0.015	-75	12.870	2.429	0.090	0.176	0.207

**Tabla 24.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2004.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
5	2004	SEP	0.207	-150	36.798	75.609	1.027	2.952	2.952
12	2004	SEP	0.095	-30	24.489	39.961	0.746	1.862	3.405
16	2004	SEP	0.504	-10	3.842	2.161	0.728	1.292	2.338
25	2004	SEP	0.286	-100	24.532	45.911	1.033	3.244	3.886

**Tabla 25.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2005.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
3	2005	SEP	0.015	-150	42.185	48.071	0.470	0.753	0.753
5	2005	SEP	0.072	-20	4.906	20.397	1.730	2.253	3.263
14	2005	SEP	0.072	-30	5.148	13.501	1.119	1.339	1.909
43	2005	SEP	0.205	-75	11.462	14.208	0.699	1.549	1.974
49	2005	SEP	0.118	-30	16.500	9.802	0.355	1.168	1.742
113	2005	SEP	0.103	-50	13.168	7.797	0.339	1.029	1.249

**Tabla 26.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2006. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestras a cero metros.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
49	2006	SEP	0.119	-50	16.684	27.092	0.766	2.401	2.963
81	2006	SEP	0.205	-20	7.352	12.520	0.885	1.209	2.623
109	2006	SEP	0.032	-100	43.259	44.544	0.442		2.094
111	2006	SEP	0.222	-100	19.023	25.974	0.766	2.505	2.829
113	2006	SEP	0.119	-30	7.901	10.804	0.664	1.344	1.906

**Tabla 27.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2007.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
25	2007	SEP	0.260	-30	7.901	3.367	0.430	1.340	1.610
29	2007	SEP	0.260	-100	24.532	18.448	0.560	2.460	2.880
49	2007	SEP	0.130	-150	50.053	120.445	1.090	3.730	3.730

**Tabla 28.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2008.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
3	2008	SEP	0.060	-30	14.804	17.812	0.540	1.480	2.130
10	2008	SEP	0.100	-30	12.978	14.639	0.550	1.460	2.260
12	2008	SEP	0.110	-50	12.266	13.528	0.550	1.320	1.690
14	2008	SEP	0.060	-30	18.787	15.541	0.390	1.100	1.870
77	2008	SEP	0.060	-50	17.538	9.671	0.280	0.850	1.010
79	2008	SEP	0.110	-50	23.178	21.497	0.480	1.870	2.470
81	2008	SEP	0.160	-50	13.168	21.125	0.800	2.050	2.210
111	2008	SEP	0.100	-50	20.835	28.725	0.650	2.280	2.970
113	2008	SEP	0.100	-50	14.946	18.357	0.590	1.570	2.090

**Tabla 29.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2009.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
7	2009	SEP	0.200	-30	11.028	18.797	0.880	2.510	3.140
14	2009	SEP	0.160	-30	27.614	22.150	0.480	1.820	2.940
29	2009	SEP	0.200	-50	11.355	23.340	1.020	2.300	3.090
31	2009	SEP	0.100	-30	11.526	23.691	0.920	1.940	3.240
33	2009	SEP	0.260	-50	11.355	20.494	0.980	2.580	3.470
45	2009	SEP	0.100	-50	15.820	30.535	0.870	2.530	2.980
47	2009	SEP	0.310	-50	7.642	40.608	2.430	3.910	4.690
77	2009	SEP	0.110	-50	14.062	27.141	0.880	2.270	2.700
113	2009	SEP	0.200	-75	22.419	28.098	0.700	2.660	3.230

**Tabla 30.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2010. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
14	2010	SEP	0.076	-30	17.297	20.422	0.547	1.654	2.482
29	2010	SEP	0.090	-30	13.907	16.477	0.563		2.090
45	2010	SEP	0.118	-30	10.011	11.778	0.587	1.332	2.150
49	2010	SEP	0.095	-30	19.816	36.922	0.839	2.808	3.987
77	2010	SEP	0.059	-50	15.820	39.177	1.047	1.973	2.547
81	2010	SEP	0.145	-50	11.355	55.705	2.102	3.990	4.972
111	2010	SEP	0.102	-50	20.029	28.381	0.667	2.061	2.931
113	2010	SEP	0.165	-30	21.925	21.471	0.555	1.993	3.113

**Tabla 31.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de septiembre de 2012.

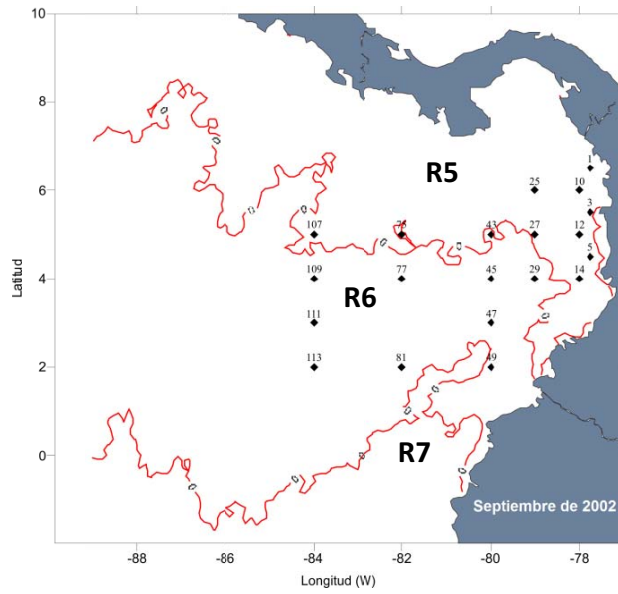
Est	Año	Mes	B <sub>0</sub>	Z <sub>max</sub> (z <sub>m</sub> )	Sigma (σ)	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Z <sub>max</sub>	Clorofila-a Integrada
1	2012	SEP	0.066	-20	9.271	17.122	0.803	1.388	2.638
3	2012	SEP	0.072	-50	20.029	25.263	0.575	2.074	2.425
10	2012	SEP	0.084	-30	7.901	16.245	0.904	1.679	2.214
12	2012	SEP	0.064	-50	24.674	33.475	0.605	2.378	2.932
14	2012	SEP	0.061	-30	15.669	23.657	0.664	1.787	2.745
16	2012	SEP	0.243	-30	5.148	6.585	0.753	1.679	1.679
25	2012	SEP	0.076	-20	9.573	23.884	1.071	1.901	3.536
29	2012	SEP	0.094	-50	19.210	27.582	0.667	2.214	2.723
31	2012	SEP	0.126	-50	9.512	14.720	0.743	1.417	1.844
33	2012	SEP	0.084	-30	18.059	18.554	0.494	1.779	2.282
43	2012	SEP	0.065	-30	18.059	15.979	0.418	1.256	1.966
45	2012	SEP	0.069	-50	14.946	24.372	0.719	1.931	2.344
47	2012	SEP	0.099	-50	12.266	30.267	1.083	1.893	2.526
49	2012	SEP	0.069	-10	6.262	7.865	0.570	0.793	1.619
77	2012	SEP	0.079	-50	17.538	26.260	0.676	1.772	2.546
79	2012	SEP	0.119	-50	13.168	14.884	0.570	1.462	1.846
107	2012	SEP	0.098	-50	20.835	22.166	0.522	1.666	2.456
109	2012	SEP	0.136	-75	27.569	29.486	0.563	2.260	2.759
111	2012	SEP	0.189	-50	13.168	11.566	0.539	1.642	2.110
113	2012	SEP	0.087	-50	14.062	37.257	1.144	2.641	3.284

En los cruceros de septiembre de 2008, 2009 y 2010 se identificó que el parámetro  $z_m$  está predominantemente entre 30m y 50m. Los valores promedio de la concentración máxima de clorofila-a para septiembre de 2008 (Tabla 28) a 30m fue de 0.493 mg/m<sup>3</sup> y a 50m, fue de 0.558 mg/m<sup>3</sup>; para septiembre de 2009 (Tabla 29) a 30m fue de 0.760 mg/m<sup>3</sup> y a 50m fue de 1.236 mg/m<sup>3</sup> y para septiembre de 2010 (Tabla 30) a 30m fue de 0.618 mg/m<sup>3</sup> y a 50m fue de 1.272 mg/m<sup>3</sup>.

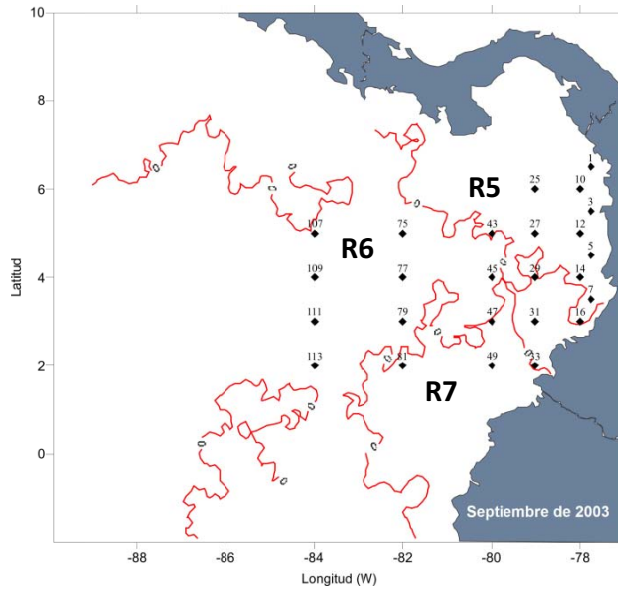
Los mapas de RBGs, determinados para cada uno de los cruceros monitoreados en el mes de septiembre, evidencian diferencias en la extensión y dominio de las regiones identificadas por año. En estos cruceros se han identificado en suma cuatro regiones, tres de las cuales presentan las mismas características de las regiones **R5**, **R6** y **R7** descritas por los cruceros anteriores, y una nueva región denominada **R11** o Región delta Río Patía-Sanquianga, se ubica en el delta del Río Patía-Sanquianga (Fig. 32) y se asocia con el periodo climático caracterizado por la presencia de lluvias entre los meses de abril a noviembre, siendo septiembre y octubre, los meses con mayores precipitaciones (**Giraldo et al., 2008**),

En el crucero ERFEN 35 (septiembre de 2002), de los 20 perfiles modelados, se obtuvieron 12 perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar según la RBG correspondiente (Fig. 24), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 1, 12, 14, 25 y 107; en la **R6** se encuentran las estaciones 29, 45, 47, 49, 77, 81 y 113; y en la **R7** no se tomaron estaciones. Los cuales no describen un patrón de distribución vertical, que pueda ser asociado con la región o época climática.

En el crucero ERFEN 36 (septiembre de 2003), de los 25 perfiles modelados, se obtuvieron 15 perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar según la RBG correspondiente (Fig. 25), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 3, 10, 12, 14, 16 y 27; en la **R6** se encuentran las estaciones 29, 33, 45, 79, 107, 109 y 111; y en la **R7** se encuentran las estaciones 47 y 49. Los cuales no describen un patrón de distribución vertical, que pueda ser asociado con la región o época climática.



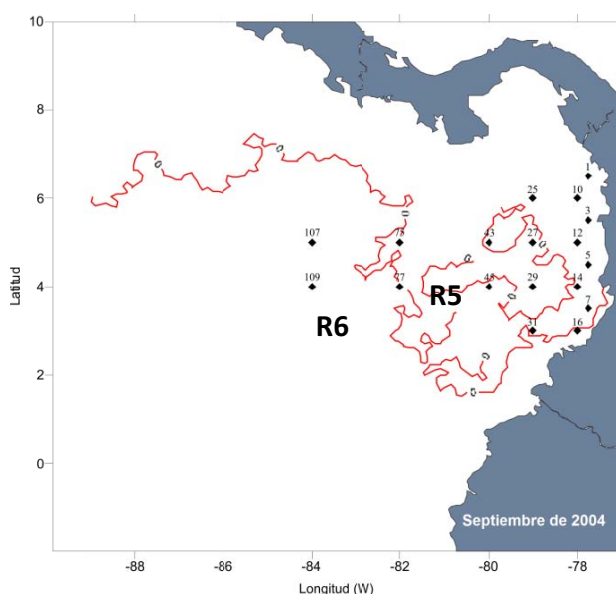
**Figura 24.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2002, en la Cuenca Pacífica Colombiana.



**Figura 25.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2003, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

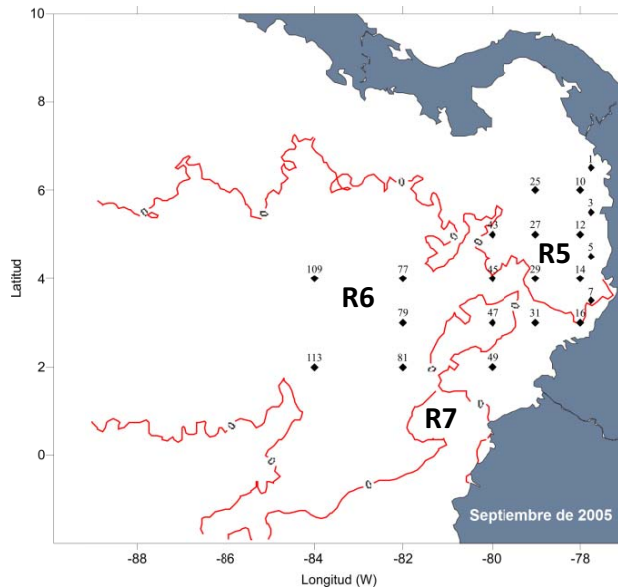


En el crucero ERFEN 37 (septiembre de 2004), de los 18 perfiles modelados, se obtuvieron cuatro perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las dos RBGs presentes (Fig. 26), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 5, 12 y 25; y en la **R6** se encuentra la estación 16. Los cuales no describen un patrón de distribución vertical, que pueda ser asociado con la región o época climática.



**Figura 26.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2004, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

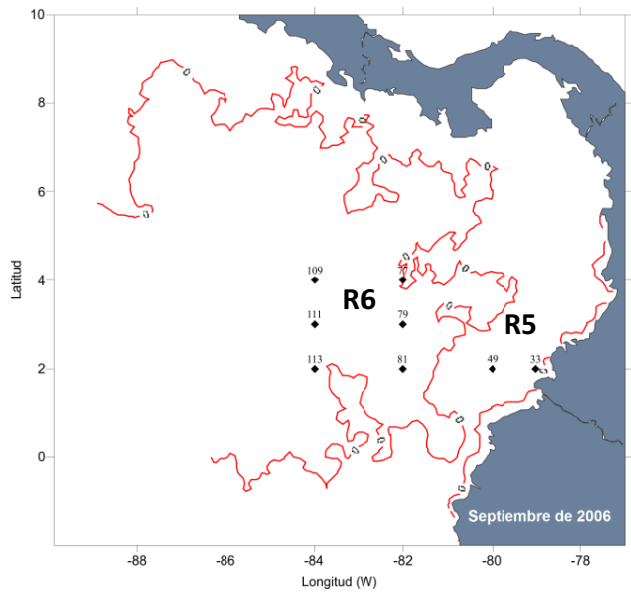
En el crucero ERFEN 39 (septiembre de 2005), de los 21 perfiles modelados, se obtuvieron seis perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar según la RBG correspondiente (Fig. 27), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 3, 5, 14 y 43; en la **R6** se encuentran las estaciones 49 y 113; y en la **R7** no hubo perfiles modelados estadísticamente significativos. No se evidencia un patrón en la distribución vertical de los perfiles de clorofila-a, asociada a las regiones. Los cuales no describen un patrón de distribución vertical, que pueda ser asociado con la región o época climática.



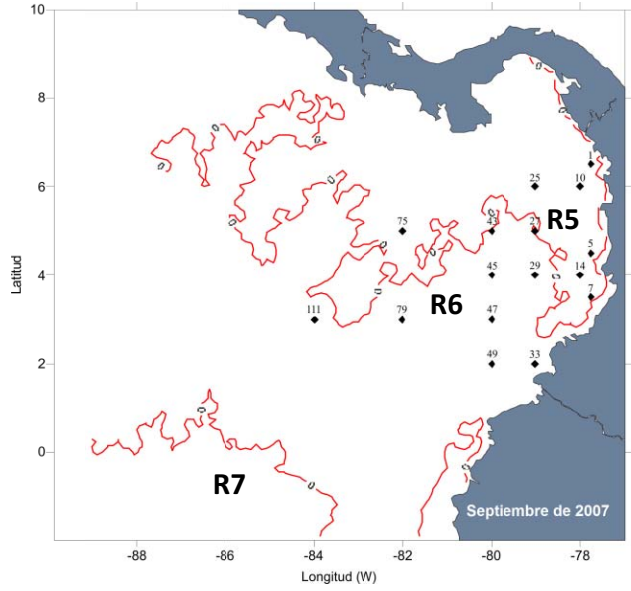
**Figura 27.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2005, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

En el crucero ERFEN 43 (septiembre de 2006), de los ocho perfiles modelados, se obtuvieron cinco perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las dos RBG presentes (Fig. 28), es decir, en la **R5** se encuentra la estación 49; y en la **R6** se encuentran las estaciones 81, 109, 111 y 113. No se evidencia un patrón en la distribución vertical de los perfiles de clorofila-a, asociada a las regiones.

En el crucero ERFEN 45 (septiembre de 2007), de los 14 perfiles modelados, se obtuvieron tres perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar según la RBG correspondiente (Fig. 29), es decir, en la **R5** se encuentra la estación 25; en la **R6** se encuentran las estaciones 29 y 49; y en la **R7** no se tomaron estaciones. No se evidencia un patrón en la distribución vertical de los perfiles de clorofila-a, asociada a las regiones.

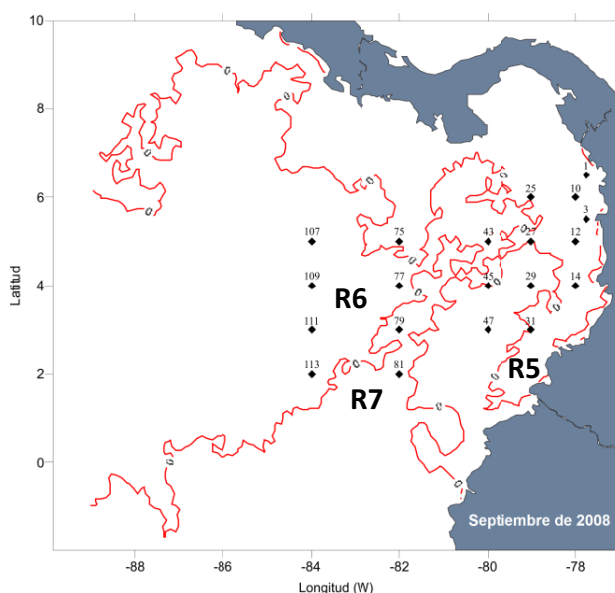


**Figura 28.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2006, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

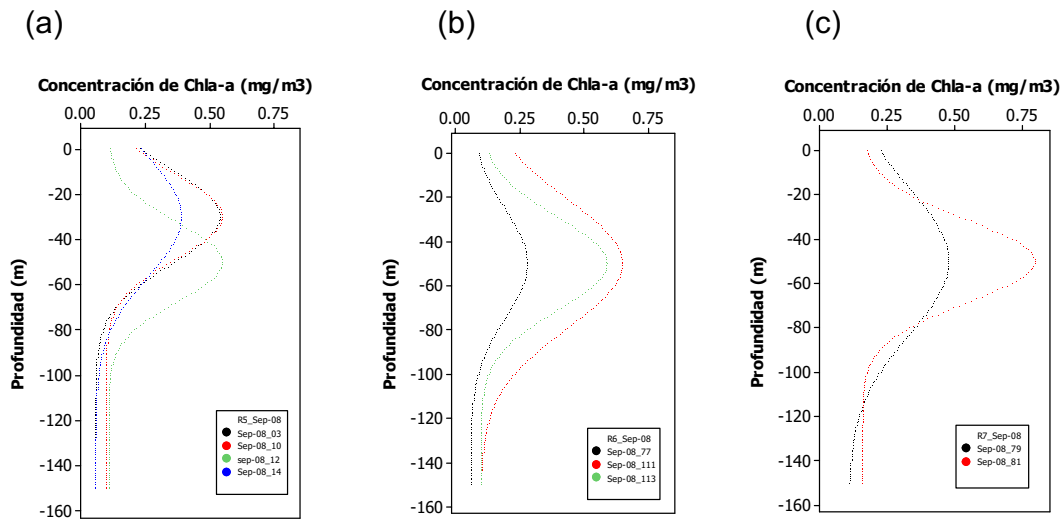


**Figura 29.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2007, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

En el crucero ERFEN 47 (septiembre de 2008), de los 18 perfiles modelados, se obtuvieron nueve perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar según la RBG correspondiente (Fig. 30), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 3, 10, 12 y 14; en la **R6** se encuentran las estaciones 77, 111 y 113; y en la **R7** se encuentran las estaciones 79 y 81. La distribución vertical de estos perfiles, describió un **Zm** común a 30m y 50m en las tres RBGs (Fig. 31).

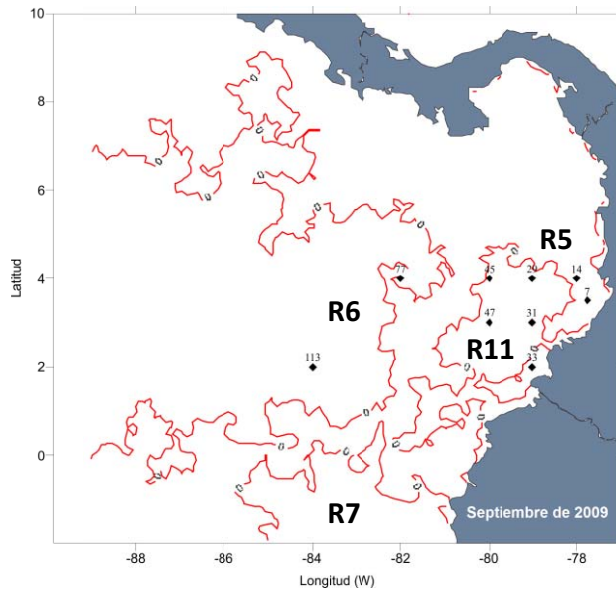


**Figura 30.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2008, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

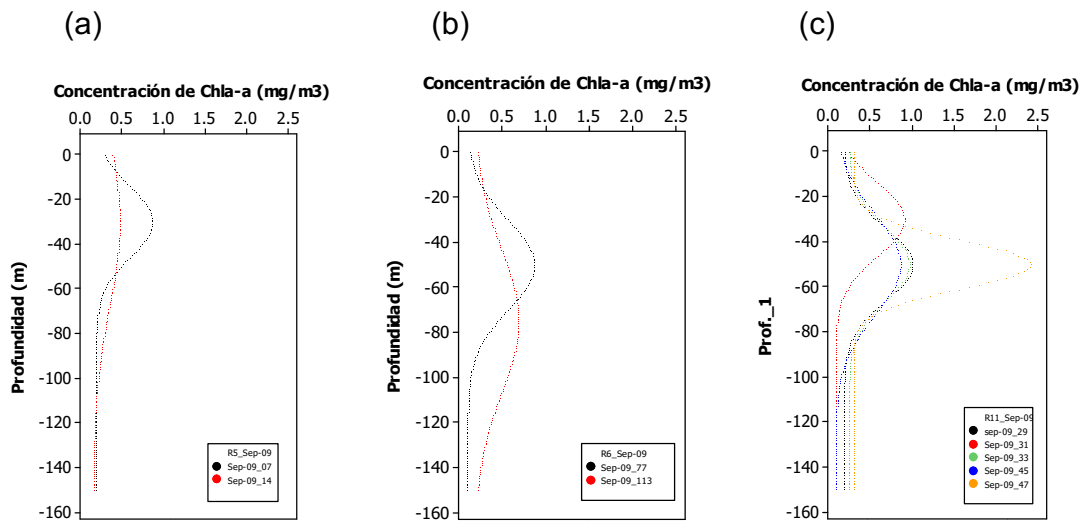


**Figura 31.** Distribución vertical de las estaciones del crucero de septiembre de 2008, según la RBG descrita. a) **R5**, b) **R6** y c) **R7**.

En el crucero ERFEN 48 (septiembre de 2009), los nueve perfiles modelados, fueron estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar según la región biogeográfica dinámica correspondiente (Fig. 32), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 7 y 14; en la **R6** se encuentran las estaciones 77 y 113; en la **R7** no se tomaron estaciones; y en la **R11** se encuentran las estaciones 29, 31, 33, 45 y 47. Al igual que el crucero de septiembre de 2008, la distribución vertical de estos perfiles, describió un **Zm** común a 30m y 50m, en las regiones **R5**, **R6** y **R11** (Fig. 33).



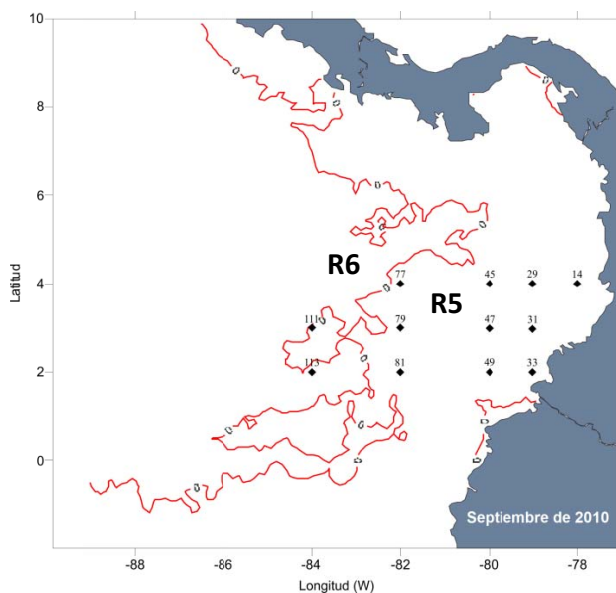
**Figura 32.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2009, en la Cuenca Pacífica Colombiana.



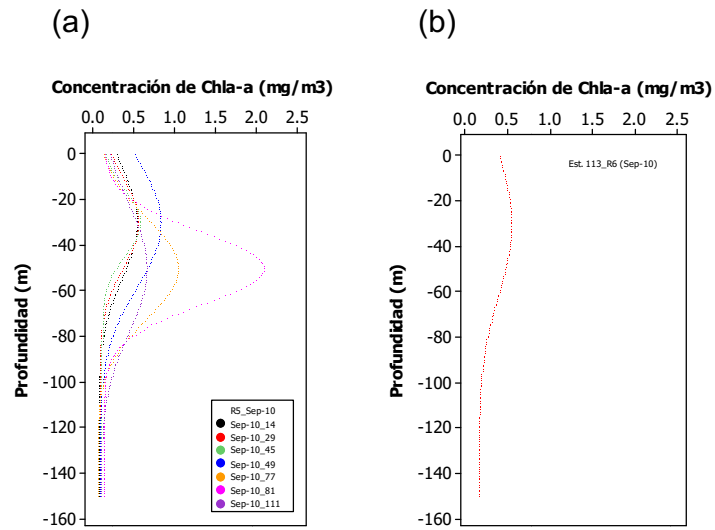
**Figura 33.** Distribución vertical de las estaciones del crucero de septiembre de 2009, según la RBG descrita. a) R5, b) R6 y c) R11.

En el crucero ERFEN 51 (septiembre de 2010), de los 12 perfiles modelados, se obtuvieron ocho perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las dos regiones biogeográficas dinámicas definidas para el crucero (Fig. 34), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 14, 29, 45, 49, 77, 81 y 111; y en la **R6** se encuentra la estación 113. Al igual que los cruceros de septiembre de 2008 y 2009, la distribución vertical de estos perfiles, describió un **Zm** común a 30m y 50m, en las regiones **R5** y **R6** (Fig. 35).

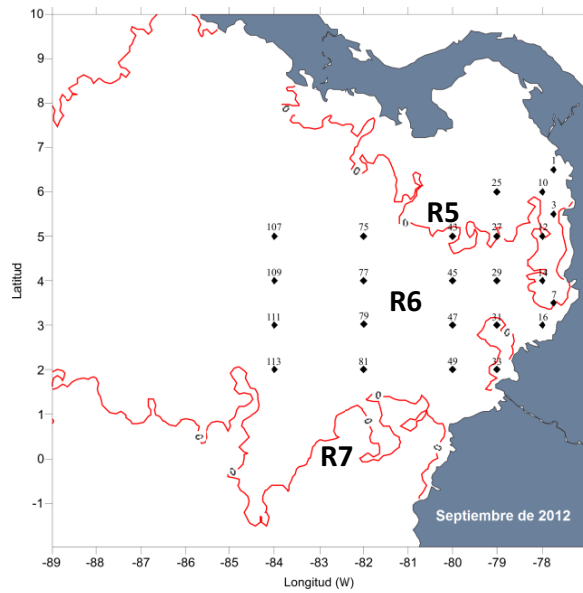
En el crucero ERFEN 53 (septiembre de 2012), de los 24 perfiles modelados, se obtuvieron 20 perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las dos regiones biogeográficas dinámicas definidas para el crucero (Fig. 36), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 1, 3, 10, 12, 14 y 25; y en la **R6** se encuentran las estaciones 29, 31, 33, 43, 45, 47, 49, 77, 79, 107, 109, 111 y 113; y en la **R7** no se tomaron estaciones. No se evidencia un patrón en la distribución vertical de los perfiles de clorofila-a, asociada a las regiones.



**Figura 34.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2010, en la Cuenca Pacífica Colombiana.



**Figura 35.** Distribución vertical de las estaciones del crucero de septiembre de 2010, según la RBG descrita. a) R5 y b) R6.



**Figura 36.** Bioregionalización dinámica para septiembre de 2012, en la Cuenca Pacífica Colombiana.



### Cruceros tomados en el mes de Octubre:

Los cuatro parámetros gaussianos ( $B_0$ ,  $z_m$ ,  $\sigma$  y  $h$ ), la clorofila integrada a la profundidad del máximo de clorofila-a y la clorofila-a integrada total del perfil, calculados para los perfiles modelados estadísticamente significativos, de los cruceros de octubre de 1996, 1998, 2004 y 2009 se presentan en la Tabla 32, los cruceros de octubre de 2010 y 2011, se presentan respectivamente en las Tablas 33 y 34.

**Tabla 32.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado clorofila-a, para tomados en el mes de octubre de 1996, 1998, 2004 y 2009.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	H	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
61	1996	OCT	0.050	-50	5.750	0.288	0.070	0.170	0.220
31	1998	OCT	0.240	0	26.793	34.252	0.750	0.750	2.050
13	2004	OCT	0.252	-74	14.077	39.765	1.378	2.677	3.581
10	2009	OCT	0.220	-75	25.026	16.938	0.490	2.040	2.040
12	2009	OCT	0.100	-30	8.437	13.112	0.720	1.490	2.080
16	2009	OCT	0.170	-30	6.813	8.539	0.670	1.490	1.490
27	2009	OCT	0.160	-30	14.804	8.164	0.380	1.160	1.910
43	2009	OCT	0.160	-30	16.089	13.308	0.490	1.660	2.210
75	2009	OCT	0.110	-50	17.538	21.540	0.600	1.970	2.400
107	2009	OCT	0.100	-50	18.380	24.878	0.640	2.060	2.530
109	2009	OCT	0.100	-50	10.437	15.959	0.710	1.380	1.870

**Tabla 33.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de octubre de 2010. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
10	2010	OCT	0.068	-50	25.402	36.985	0.649	2.770	3.244
27	2010	OCT	0.055	-20	5.978	23.150	1.600	2.042	3.524
43	2010	OCT	0.070	-30	15.669	25.115	0.710	2.226	2.889
75	2010	OCT	0.060	-50	24.674	22.962	0.431		1.901
107	2010	OCT	0.215	-50	13.168	9.307	0.496	1.603	1.603

**Tabla 34.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de octubre de 2011.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
14	2011	OCT	0.072	-30	15.669	17.994	0.530	1.566	2.284
31	2011	OCT	0.083	-30	14.804	14.362	0.470	1.252	2.065
47	2011	OCT	0.064	-50	13.168	21.435	0.713	1.288	1.835
61	2011	OCT	0.093	-20	18.940	20.711	0.529	1.263	2.111
79	2011	OCT	0.175	-50	11.355	19.801	0.870	1.929	2.374
81	2011	OCT	0.094	-30	13.446	10.295	0.400	1.124	1.770
93	2011	OCT	0.156	-50	15.820	11.431	0.444	1.575	1.948
107	2011	OCT	0.076	-75	22.419	15.024	0.344	1.240	1.444
109	2011	OCT	0.069	-50	17.538	21.048	0.548	1.723	2.106

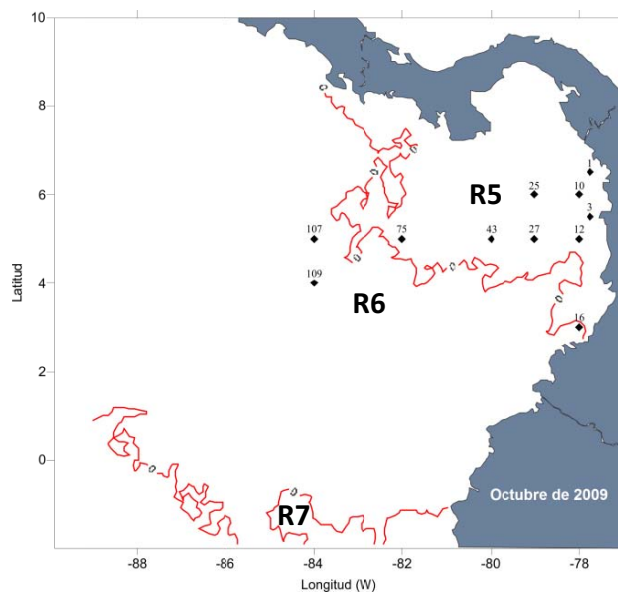
El mes de octubre corresponde a la época de lluvias, pero en un periodo de máximas precipitaciones, con predominancia de los vientos Alisios del Sureste y la Zona de Convergencia Intertropical-ZCIT inicia su desplazamiento hacia el Sur de la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC) (Villegas, 1997; Camacho, 1998; CCCP, 2002; y Giraldo *et al.*, 2008). Sin embargo, los campos de viento y el rotacional del esfuerzo del viento, calculado para estos cruceros, no describieron un patrón diferente a las condiciones de la época de lluvias, presentado en la Figura 12.

Para los cruceros de octubre de 1996, 1998 y 2004, el análisis de la distribución vertical, no pudo establecerse, dado que solo hubo un perfil para cada crucero.

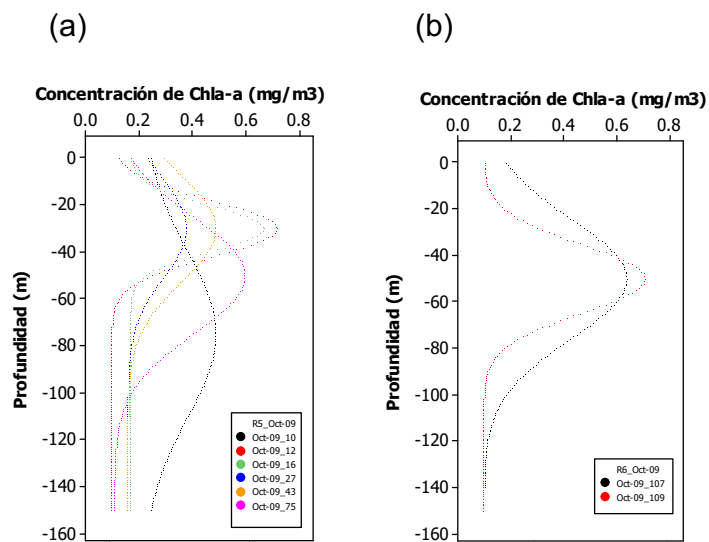
En los cruceros de octubre de 2009, 2010 y 2011, se identificó que el parámetro  $z_m$  estuvo entre 30m y 50m. Los valores promedio de la concentración máxima de clorofila-a para octubre de 2009 (Tabla 32) a 30m fue de 0.565 mg/m<sup>3</sup> y a 50m fue de 0.650 mg/m<sup>3</sup>; para octubre de 2010 (Tabla 33) a 50m fue de 0.526 mg/m<sup>3</sup>; y para octubre de 2011 (Tabla 34) a 30m fue de 0.467 mg/m<sup>3</sup> y a 50m fue de 0.644 mg/m<sup>3</sup>.

Los mapas de RBGs, determinados para los cruceros de octubre de 2009, 2010 y 2011, evidencian diferencias en la extensión y dominio de las regiones identificadas por año. En estos cruceros se han identificado en suma 5 regiones con características similares a las descritas en los anteriores cruceros, por ello se mantuvo las mismas denominaciones, así: **R5** o Región cálida pacífico colombiana, **R6** o Región cálida tropical colombiana, **R7** o Región fría ecuatorial, **R8** o Región asociada a un núcleo de surgencia en las costas del Ecuador y **R10** o Región costera de Panamá.

En el crucero ERFEN 48 (octubre de 2009), de los 10 perfiles modelados, se obtuvieron ocho perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las tres RBGs definidas para el crucero (Fig. 37), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 10, 12, 16, 27, 43 y 75; en la **R6** se encuentran las estaciones 107 y 109; y en la **R7** no se tomaron estaciones. La distribución vertical de estos perfiles, describió un **Zm** común a 30m y 50m, en las regiones **R5** y **R6** (Fig. 38).

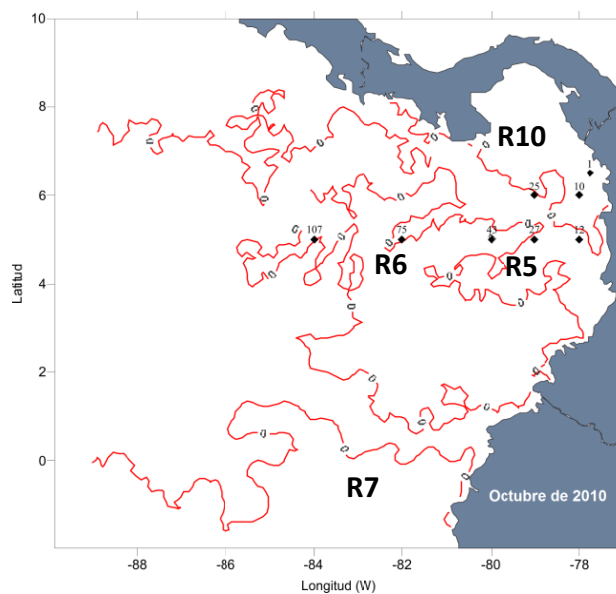


**Figura 37.** Bioregionalización dinámica para octubre de 2009, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

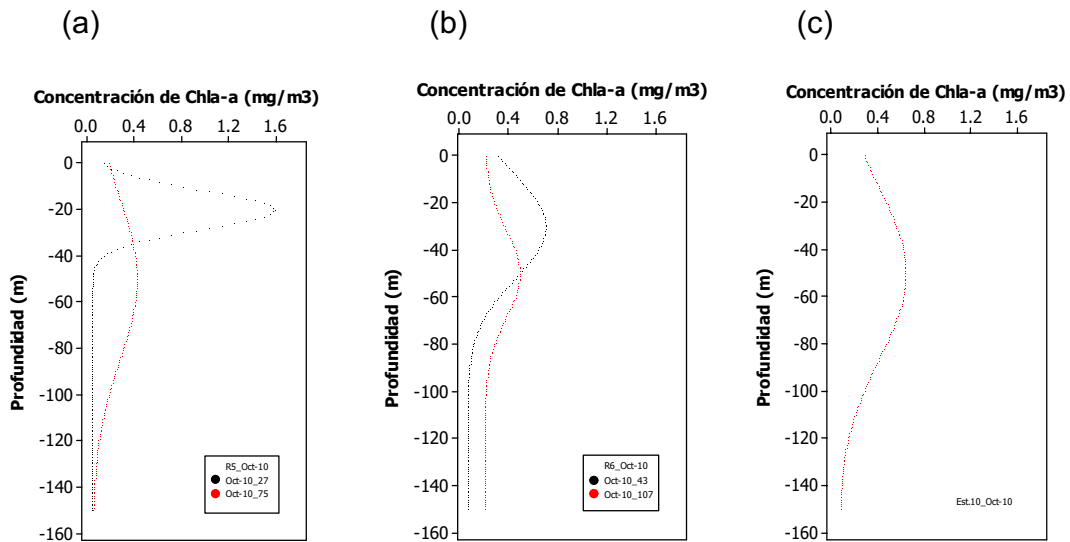


**Figura 38.** Distribución vertical de las estaciones del crucero de octubre de 2009, según la RBG descrita. a) R5 y b) R6.

En el crucero ERFEN 51 (octubre de 2010), de los 8 perfiles modelados, se obtuvieron cinco perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las cuatro RBGs definidas para el crucero (Fig. 39), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 27 y 75; en la **R6** se encuentran las estaciones 43 y 107; en la **R7** no se tomaron estaciones; y en la **R10** se encuentra la estación 10. La distribución vertical de estos perfiles, al igual que en el crucero de octubre de 2009, describió un **Zm** común a 30m y 50m, en las regiones **R5**, **R6** y **R10** (Fig. 40).

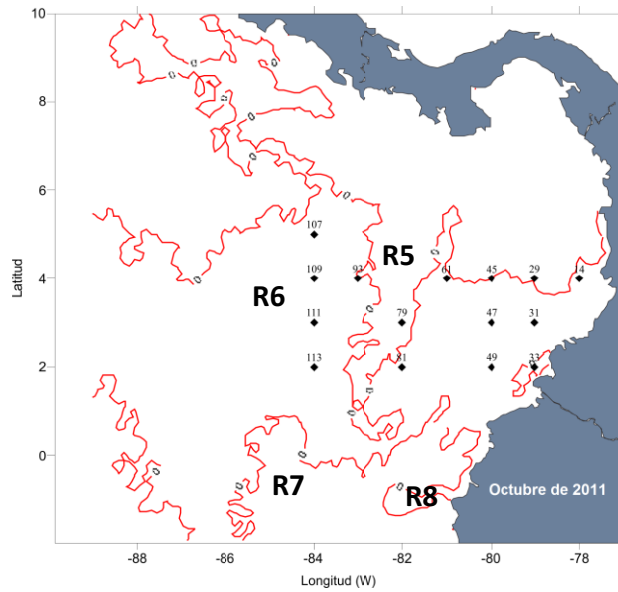


**Figura 39.** Bioregionalización dinámica para octubre de 2010, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

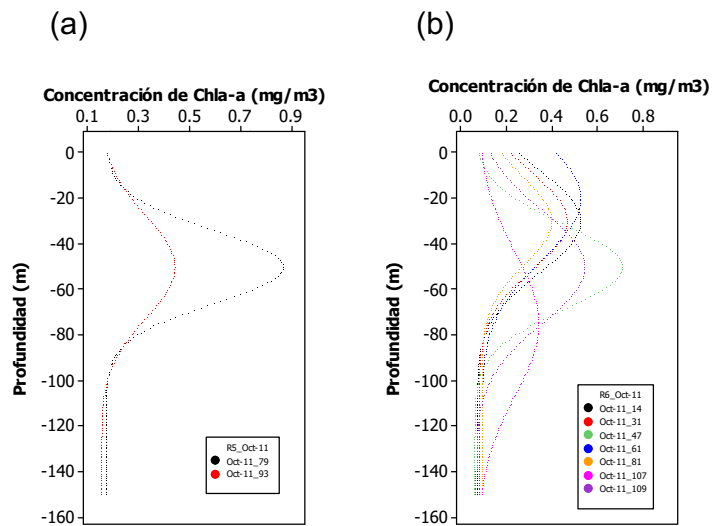


**Figura 40.** Distribución vertical de las estaciones del crucero de octubre de 2010, según la RBG descrita. a) **R5**, b) **R6** y c) **R10**

En el crucero ERFEN 51 (octubre de 2011), de los 15 perfiles modelados, se obtuvieron nueve perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las cuatro RBGs definidas para el crucero (Fig. 41), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 79 y 93; en la **R6** se encuentran las estaciones 14, 31, 47, 61, 81, 107 y 109; en la **R7** y **R8** no se tomaron estaciones. La distribución vertical de estos perfiles, al igual que en los cruceros de octubre de 2009 y 2010, describió un **Zm** común a 30m y 50m, en las regiones **R5** y **R6** (Fig. 42).



**Figura 41.** Bioregionalización dinámica para octubre de 2011, en la Cuenca Pacífica Colombiana.



**Figura 42.** Distribución vertical de las estaciones del crucero de octubre de 2011, según la RBG descrita. a) R5 y b) R6.

### Cruceros tomados en el mes de Noviembre:

Los cuatro parámetros gaussianos ( $B_0$ ,  $z_m$ ,  $\sigma$  y  $h$ ), la clorofila-a integrada a la profundidad del máximo de clorofila-a y la clorofila-a integrada total del perfil, calculados para los perfiles modelados estadísticamente significativos, de los cruceros de noviembre de 2000 y 2011 se presentan respectivamente en las Tablas 35 y 36.

**Tabla 35.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de noviembre de 2000.

Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
2	2000	NOV	0.055	0	49.064	74.950	0.664	0.664	2.554
4	2000	NOV	0.100	0	26.793	35.455	0.628	0.628	1.852
24	2000	NOV	0.100	0	19.192	128.048	2.762	2.762	4.838
61	2000	NOV	0.007	-50	30.099	49.850	0.668	1.432	2.511

**Tabla 36.** Parámetros gaussianos correspondientes a cada perfil modelado de clorofila-a, para tomados en el mes de noviembre de 2011.

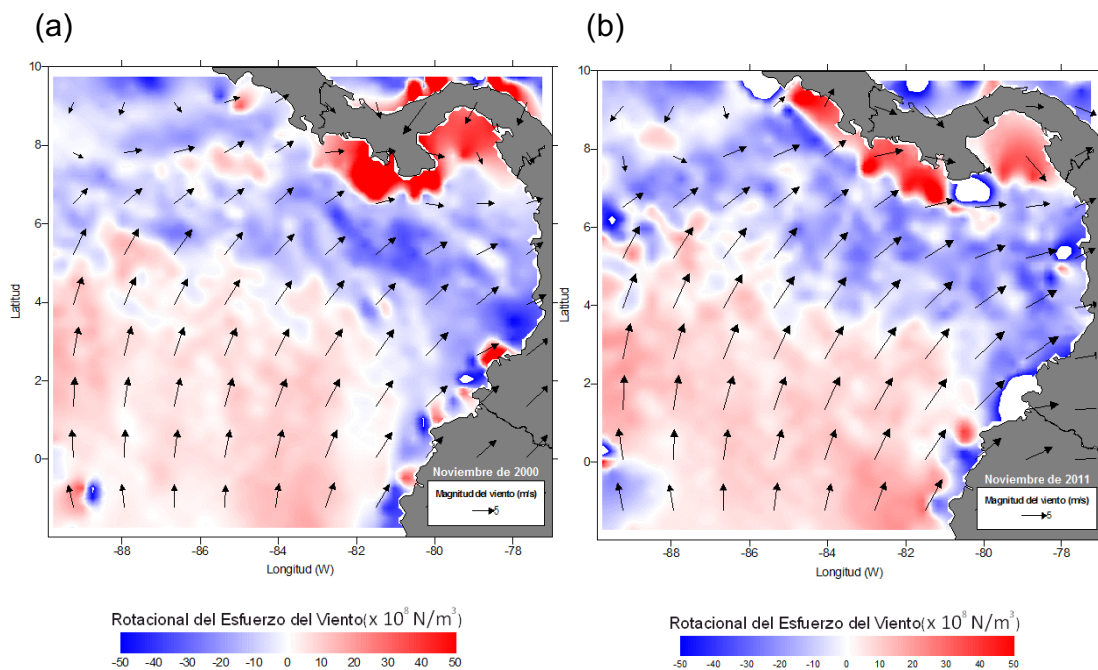
Est	Año	Mes	$B_0$	Zmax ( $z_m$ )	Sigma ( $\sigma$ )	h	[ ] máxima de Clorofila-a en el Perfil	Clorofila-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
1	2011	NOV	0.061	-20	11.531	15.256	0.589	1.238	2.159
12	2011	NOV	0.109	-30	8.968	6.889	0.415	1.076	1.355
75	2011	NOV	0.126	-50	18.380	21.566	0.594	2.102	2.450
77	2011	NOV	0.066	0	23.001	37.737	0.721	0.721	2.977

El mes de noviembre corresponde a la época de transición entre el final de la época de lluvias y el inicio de la época seca y al igual que octubre, este mes es un periodo de máximas precipitaciones, con predominancia de los vientos Alisios del



Sureste y la Zona de Convergencia Intertropical-ZCIT continua su desplazamiento hacia el Sur de la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC).

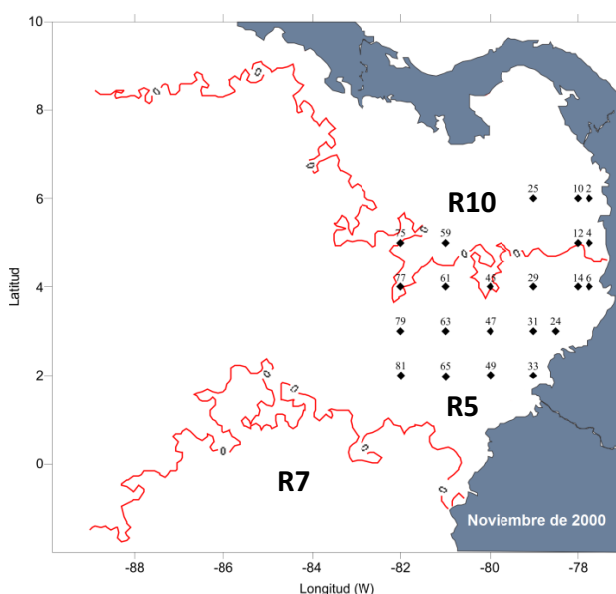
Aunque el patrón de vientos responde a la época de lluvias, se identificó un núcleo de surgencia en la costa Pacífica de Panamá que lo diferencia de los otros meses pertenecientes al mismo periodo climático. En la Figura 43a y 43b, se puede observar la zona surgencia, que se asocia con la RBG identificada para estos cruceros.



**Figura 43.** . Campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento, para: a) noviembre de 2000 y b) noviembre de 2011 en la Cuenca Pacífica Colombiana.

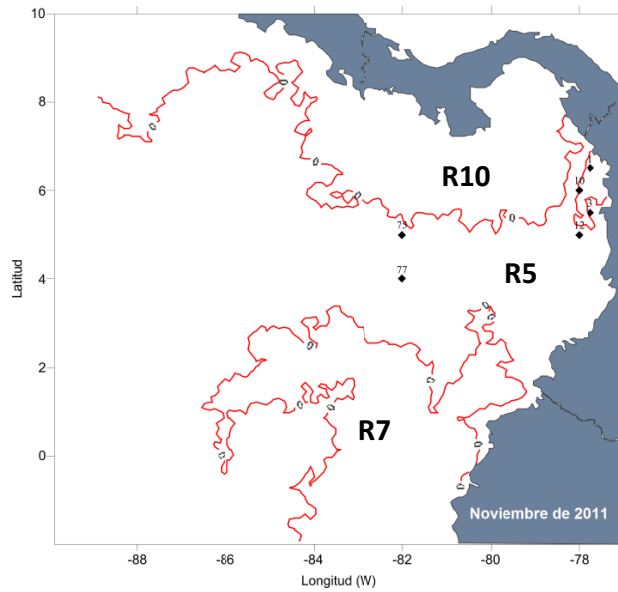
Los mapas de RBGs, determinados para los dos cruceros levantados en el mes de noviembre, evidencian tres regiones con las mismas características descritas en los cruceros anteriores, denominadas **R5** o Región cálida pacífico colombiana, **R7** o Región fría ecuatorial y **R10** o Región costera de Panamá.

En el crucero ERFEN 31 (noviembre de 2000), de los 22 perfiles modelados, se obtuvieron cuatro perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las tres RBGs definidas para el crucero (Fig. 44), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 24 y 61; en la **R7** no se tomaron estaciones; y en la **R10** se encuentran las estaciones 2 y 4. No se evidencia un patrón en la distribución vertical de los perfiles de clorofila-a, asociada a las regiones.



**Figura 44.** Bioregionalización dinámica para noviembre de 2000, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

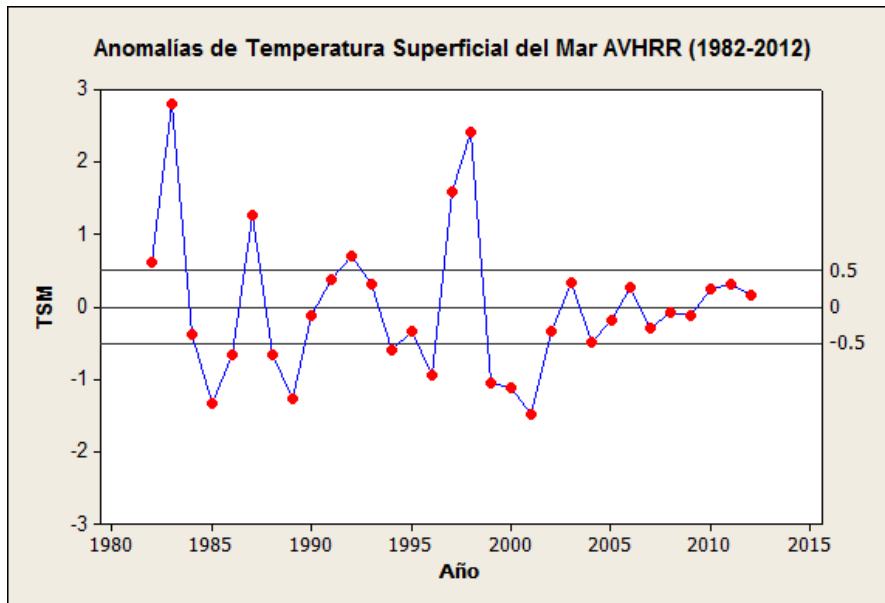
En el crucero ERFEN 52 (noviembre de 2011), de los seis perfiles modelados, se obtuvieron cuatro perfiles modelados estadísticamente significativos. Estos perfiles, se pueden identificar en las tres RBGs definidas para el crucero (Fig. 45), es decir, en la **R5** se encuentran las estaciones 1, 12, 75 y 77; y en la **R7** y **R10** no se tomaron estaciones. No se evidencia un patrón en la distribución vertical de los perfiles de clorofila-a, asociada a las regiones.



**Figura 45.** Bioregionalización dinámica para noviembre de 2011, en la Cuenca Pacífica Colombiana.

### 5.3 VARIABILIDAD ESTACIONAL

A partir de la serie de tiempo de Temperatura Superficial del Mar de 1982 a 2012 (Fig. 46), extraída del AVHRR para la estación de Tumaco (Nariño), se distribuyeron los cruceros analizados, en tres categorías de variabilidad estacional: años fríos, cálidos y promedios (Tabla 37). Como resultado de esta categorización, se calculó el promedio aritmético de los parámetros gaussianos de las estaciones respectivas (Tabla 38).



**Figura 46.** Serie de Tiempo de anomalías de TSM (Temperatura Superficial del Mar) extraída del AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) para la estación de Tumaco (Nariño), coordenadas 2°N y -79°W.

**Tabla 37.** Categorización de cada uno de los cruceros ERFEN, según el escenario de variabilidad estacional al que pertenecen por el año en el que fueron muestreados.

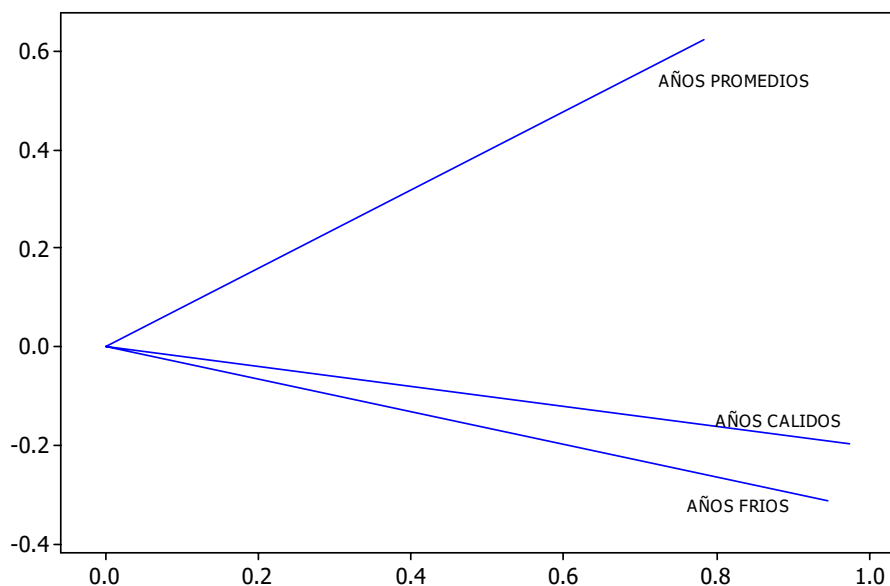
<b>AÑO CÁLIDO</b>	<b>AÑO FRÍO</b>	<b>AÑO PROMEDIO</b>	
		MAR-02	SEP-08
	JUN-96	SEP-02	SEP-09
	OCT-96	SEP-03	OCT-09
MAY-97	MAY-99	SEP-04	SEP-10
MAY-98	MAY-00	OCT-04	OCT-10
OCT-98	NOV-00	SEP-05	OCT-11
	JUN-01	MAR-06	NOV-11
	AGO-01	SEP-06	SEP-12
		SEP-07	

**Tabla 38.** Promedios de los parámetros gaussianos, de las estaciones correspondientes a cada categoría de variabilidad estacional.

PERIODO	Bo	Z <sub>max</sub>	Sigma	h	[ ] máxima de Chl-a en el Perfil	Chl-a integrada al Z <sub>max</sub>	Chl-a Integrada
AÑOS FRIOS (1996, 1999, 2000, 2001)	<b>0.699</b>	19	<b>28.552</b>	<b>218.730</b>	<b>4.631</b>	<b>6.644</b>	<b>11.510</b>
AÑOS CALIDOS (1997, 1998)	0.165	13	21.929	63.077	1.617	1.753	3.163
AÑOS PROMEDIOS (2002-2012)	0.122	44	14.939	33.911	1.188	2.208	2.922

Los valores promedio más altos, se resaltan en rojo

Los valores promedios de los parámetros gaussianos de los cruceros muestreados en años fríos, fueron superiores a los años cálidos y promedios, lo cual corresponde con las condiciones descritas en la CPC (Camacho, 1998; CCCP, 2002; Devis-Morales, 2003; Giraldo *et al.*, 2008; Rodríguez-Rubio *et al.*, 2003). Sin embargo, esta respuesta no es muy clara para los otros periodos, por ello se aplicó un análisis de factor con base en componentes principales, obteniéndose que los años fríos y cálidos formaron un grupo y los años promedio otro grupo (Fig. 47).



**Figura 47.** Análisis de factor para las categorías de variabilidad estacional: años fríos, años cálidos y años promedio de la CPC.

Para identificar, asociaciones al interior de cada categoría de variabilidad estacional, es decir en las regiones determinadas en los mapas de RBGs, se calculó el promedio de cada parámetro gaussiano de las estaciones presentes en cada región en año frío, cálido y promedio (Tabla 39).

Los valores promedios más altos de **Bo** estuvieron asociados a las regiones **R5**, **R6** y **R7** de los años fríos, así como los mayores valores de la concentración de clorofila integrada en el perfil, estuvieron asociados a las mismas regiones de años fríos, excepto por la región **R7**, que presentó el valor promedio más bajo.

**Tabla 39.** Promedios de los parámetros gaussianos, de las estaciones correspondientes a cada región de cada categoría de variabilidad estacional.

Categorías	Bo	Z <sub>max</sub>	Sigma	h	[ ] máx. Chla-a en el Perfil	Chla-a integrada al Z <sub>max</sub>	Chla-a Integrada
R1-Año Promedio	0.160	29	10.69	49.47	2.35	<b>3.70</b>	4.88
R5-Año Cálido	0.166	14	20.76	67.33	1.77	1.95	3.36
R5-Año Frio	<b>0.444</b>	15	28.81	<b>191.55</b>	<b>3.11</b>	<b>3.42</b>	<b>8.95</b>
R5-Año Promedio	0.125	44	14.93	36.48	1.14	2.11	2.80
R6-Año Frio	<b>0.435</b>	2	<b>36.80</b>	<b>173.01</b>	2.29	2.73	<b>8.31</b>
R6-Año Promedio	0.112	51	17.30	34.21	1.09	2.00	2.60
R7-Año Frio	<b>0.410</b>	<b>75</b>	22.73	70.39	1.61	1.94	3.69
R7-Año Promedio	0.071	44	12.47	10.73	0.41	1.06	1.27
R10-Año Frio	0.077	0	<b>37.93</b>	55.20	0.65	0.65	2.20
R11-Año Promedio	0.194	46	11.54	27.73	1.24	2.65	3.49

Los valores promedio más altos, de cada parámetro, se resaltan en rojo

Como se ilustró en capítulos anteriores, esta base de datos, no presenta series continuas y periodos monotónicos de muestreo, por tanto, los promedios calculados están integrados por estaciones muestreadas en meses diferentes y no todas las estaciones tuvieron representatividad en la totalidad de las regiones y periodos estacionales (Tabla 40). Dadas estas consideraciones, se tomó la región **R5** para análisis, a razón de ser la única en presentar estaciones en los tres periodos establecidos, por tanto, sobre dicha región se analizó la variabilidad estacional de los perfiles verticales de clorofila-a.









### 5.3.1 Región 5 en Años cálidos

Durante los años cálidos 1997 y 1998, esta región fue identificada en los cruceros de mayo de 1997, mayo de 1998 y octubre de 1998, pero solo en los dos primeros hubo presencia de estaciones muestreadas, por tanto, los parámetros gaussianos que se presentan en la Tabla 41, corresponden a dichos cruceros.

**Tabla 41.** Parámetros gaussianos determinados para las estaciones de la **R5** presente en los cruceros de años cálidos.

Est	Bo	Zmax	sigma	h	[ ] máx. de Chla-a en el Perfil	Chla-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
May-97_33	0.190	-100	11.50	312.49	11.03	13.86	13.86
May-97_61	0.500	-100	22.71	19.36	0.84	2.70	3.28
May-97_74	0.190	-75	15.66	90.65	2.50	2.89	4.49
May-98_04	0.030	0	26.79	49.70	0.77	0.77	1.89
May-98_06	0.090	0	41.75	82.67	0.88	0.88	3.01
May-98_24	0.080	0	26.79	100.07	1.57	1.57	3.99
May-98_27	0.290	0	19.19	135.18	3.10	3.10	6.32
May-98_29	0.130	0	23.00	58.81	1.15	1.15	2.88
May-98_33	0.150	0	19.19	15.88	0.48	0.48	1.34
May-98_45	0.190	0	11.54	16.48	0.76	0.76	1.50
May-98_47	0.070	0	30.57	19.92	0.33	0.33	1.02
May-98_50	0.050	0	26.79	22.83	0.39	0.39	1.09
May-98_59	0.160	0	19.19	68.31	1.58	1.58	3.16
May-98_63	0.220	0	11.54	81.27	3.03	3.03	4.19
May-98_66	0.110	0	19.19	30.79	0.75	0.75	1.58
May-98_69	0.240	0	11.54	9.83	0.58	0.58	1.86
May-98_75	0.110	0	19.19	28.87	0.71	0.71	1.55
May-98_77	0.110	0	19.19	58.21	1.32	1.32	2.75
May-98_79	0.240	0	19.19	77.94	1.86	1.86	4.00
<b>Promedio</b>	<b>0.166</b>	<b>14</b>	<b>20.76</b>	<b>67.33</b>	<b>1.77</b>	<b>1.95</b>	<b>3.36</b>

En los 19 perfiles verticales de concentración de clorofila-a, que integran la **R5** en Años Cálidos, no se evidencia un patrón de distribución vertical representativo de la región y periodo estacional y, que con la aplicación de análisis de asociación de

igual forma no pudieron identificarse, lo cual puede indicar que existen procesos estacionales de menor escala espacial y temporal, que definen las características de la masa de agua en la vertical.

### 5.3.2 Región 5 en Años Fríos

Durante los años fríos 1996, 1999, 2000 y 2001, esta región fue identificada en los cruceros de may-99, may00, nov-00, jun-01 y ago-01 (Tabla 42).

**Tabla 42.** Parámetros gaussianos determinados para las estaciones de la **R5** presente en los cruceros de años fríos.

Est	Bo	Zmax	sigma	h	[ ] máx. de Chla-a en el Perfil	Chla-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
May-99_04	0.622	0	34.32	343.91	4.62	4.62	15.23
May-99_12	0.641	0	38.05	377.57	4.60	4.60	15.38
May-99_14	0.339	0	34.32	320.96	4.07	4.07	12.20
May-99_16	0.843	0	38.05	358.32	4.60	4.60	16.15
May-99_24	0.925	0	34.32	304.07	4.46	4.46	15.65
May-99_27	0.768	0	45.42	440.85	4.64	4.64	17.57
May-99_31	0.686	0	38.05	341.82	4.27	4.27	15.20
May-99_33	0.931	0	38.05	363.31	4.74	4.74	16.92
May-99_49	0.453	0	49.06	532.14	4.78	4.78	18.03
May-99_59	0.931	0	23.00	228.81	4.90	4.90	13.07
May-99_61	0.781	0	30.57	268.08	4.28	4.28	13.93
May-99_69	0.106	0	26.79	316.63	4.82	4.82	11.90
May-99_75	0.402	0	26.79	294.05	4.78	4.78	12.08
May-00_02	0.021	0	26.79	29.87	0.47	0.47	1.09
May-00_04	0.081	0	23.00	20.27	0.43	0.43	1.06
May-00_06	0.677	0	30.57	80.95	1.73	1.73	6.60

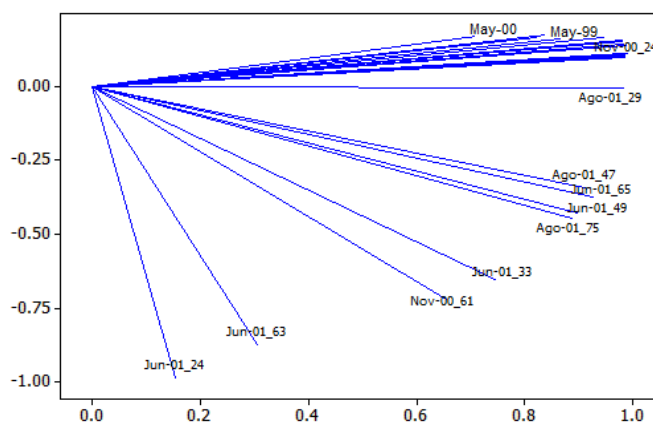
**Continuación Tabla 42.** Parámetros gaussianos determinados para las estaciones de la **R5** presente en los cruceros de años fríos. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros.

Est	Bo	Zmax	sigma	h	[ ] máx. de Chla-a en el Perfil	Chla-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
May-00_10	0.236	0	41.75	49.46	0.71	0.71	2.89
May-00_24	1.041	0	34.32	95.67	2.15	2.15	9.37
May-00_25	0.016	0	38.05	48.79	0.53	0.53	1.61
May-00_27	0.191	0	19.19	52.59	1.28	1.28	2.99
May-00_29	0.907	0	59.78	111.63	1.65	1.65	8.48
May-00_33	0.112	0	15.37	182.17	4.84	4.84	7.40
May-00_91	0.124	0	15.37	49.78	1.42	1.42	2.56
Nov-00_24	0.100	0	19.19	128.05	2.76	2.76	4.84
Nov-00_61	0.007	-50	30.10	49.85	0.67	1.43	2.51
Jun-01_24	0.433	-75	15.66	25.40	1.08	2.90	3.47
Jun-01_33	0.611	-50	12.27	62.08	2.63	4.00	6.31
Jun-01_49	0.047	-100	35.08	199.59	2.32	4.73	4.73
Jun-01_63	0.283	-25	15.36	12.70	0.61	0.97	2.10
Jun-01_65	0.225	-25	14.41	53.42	1.70	2.42	4.03
Ago-01_29	0.423	-25	17.56	243.26	5.95		11.28
Ago-01_47	0.533	-100	13.40	240.86	7.71	12.74	12.74
Ago-01_75	0.163	-50	16.68	94.33	2.42	4.17	5.99
Promedio	0.444	15	28.81	191.55	3.11	3.42	8.95

En los 33 perfiles verticales de concentración de clorofila-a, que integran la **R5** en Años Fríos, no se evidencia un patrón de distribución vertical representativo de la región durante el periodo frío.

Sin embargo, en los perfiles de los cruceros de mayo de 1999 y 2000, se identificó un patrón vertical, que para el caso del crucero de may-99, puede ser representativo del Fenómeno de la Niña reportado para la región (Camacho, 1998; Villegas, 1997) y cuyo Zm estuvo a nivel superficial con un valor promedio de concentración de clorofila-a de  $4.412 \text{ mg/m}^3$ . Los perfiles del crucero de may-00, al igual que el crucero de 1999, presentaron el Zm en superficie, pero con un valor promedio de concentración superficial de clorofila-a, inferior, de  $1.521 \text{ mg/m}^3$ .

En los demás perfiles, esta respuesta no fue muy clara, por ello se aplicó un análisis de factor con base en componentes principales (Fig. 48), obteniéndose un grupo principal integrado por los perfiles de may-99, may-00 y la estación 24 del crucero de nov-00. Los otros grupos secundarios se integraron por los demás perfiles, lo cual puede indicar que existen procesos estacionales de menor escala temporal, que definen las características de la masa de agua en la vertical.



**Figura 48.** Análisis de factor con base en componentes principales para la región 5 en años fríos.

### 5.3.3 Región 5 en Años Promedios

Durante los años fríos 2002 a 2012, esta región fue identificada en los cruceros de septiembre de 2002 a 2010 y 2012, octubre de 2004 y 2009 a 2011, noviembre de 2011, pero en el crucero de oct-04 y sep-12 los perfiles modelados para las estaciones muestreadas fueron no significativos, por tanto, los parámetros gaussianos que se presentan en la Tabla 43 no incluyen información de dichos cruceros.

**Tabla 43.** Parámetros gaussianos determinados para las estaciones de la R5 presentes en los cruceros de años promedios. Casilla sombreada indica que perfil real no tomó muestra a cero metros.

Est	Bo	Zmax	sigma	h	[ ] máx. de Chla-a en el Perfil	Chla-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
Sep-02_01	0.151	-75	11.46	115.47	4.17	6.83	7.37
Sep-02_12	0.085	0	11.54	106.70	3.77	3.77	5.32
Sep-02_14	0.239	0	11.54	91.59	3.41	3.41	5.31
Sep-02_25	0.176	-25	15.95	66.69	1.84	2.61	4.65
Sep-02_107	0.145	-150	17.25	446.77	10.48	12.06	12.06
Sep-03_03	0.022	-30	8.44	9.38	0.47	1.50	1.52
Sep-03_107	0.044	-50	14.06	7.92	0.27	0.79	0.94
Sep-03_12	0.032	-20	6.33	6.02	0.41	0.58	1.34
Sep-03_14	0.046	-50	8.58	7.20	0.38	0.68	0.76
Sep-03_16	0.109	-20	4.17	3.80	0.47	0.79	1.30
Sep-03_27	0.017	-75	17.03	6.13	0.16	0.43	0.49
Sep-04_05	0.207	-150	36.80	75.61	1.03	2.95	2.95
Sep-04_12	0.095	-30	24.49	39.96	0.75	1.86	3.40
Sep-04_16	0.504	-10	3.84	2.16	0.73	1.29	2.34
Sep-04_25	0.286	-100	24.53	45.91	1.03	3.24	3.89
Sep-05_03	0.015	-150	42.19	48.07	0.47	0.75	0.75
Sep-05_05	0.072	-20	4.91	20.40	1.73	2.25	3.26
Sep-05_14	0.072	-30	5.15	13.50	1.12	1.34	1.91
Sep-05_43	0.205	-75	11.46	14.21	0.70	1.55	1.97
Sep-06_49	0.119	-50	16.68	27.09	0.77	2.40	2.96
Sep-07_25	0.260	-30	7.90	3.37	0.43	1.34	1.61
Sep-08_03	0.060	-30	14.80	17.81	0.54	1.48	2.13
Sep-08_10	0.100	-30	12.98	14.64	0.55	1.46	2.26
Sep-08_12	0.110	-50	12.27	13.53	0.55	1.32	1.69
Sep-08_14	0.060	-30	18.79	15.54	0.39	1.10	1.87
Sep-09_07	0.200	-30	11.03	18.80	0.88	2.51	3.14
Sep-09_14	0.160	-30	27.61	22.15	0.48	1.82	2.94
Sep-10_14	0.076	-30	17.30	20.42	0.55	1.65	2.48
Sep-10_29	0.090	-30	13.91	16.48	0.56		2.09
Sep-10_45	0.118	-30	10.01	11.78	0.59	1.33	2.15

**Continuación Tabla 43.** Parámetros gaussianos determinados para las estaciones de la R5 presentes en los cruceros de años promedios.

Est	Bo	Zmax	sigma	h	[ ] máx. de Chla-a en el Perfil	Chla-a integrada al Zmax	Clorofila-a Integrada
Sep-10_49	0.095	-30	19.82	36.92	0.84	2.81	3.99
Sep-10_77	0.059	-50	15.82	39.18	1.05	1.97	2.55
Sep-10_81	0.145	-50	11.36	55.71	2.10	3.99	4.97
Sep-10_111	0.102	-50	20.03	28.38	0.67	2.06	2.93
Oct-09_10	0.220	-75	25.03	16.94	0.49	2.04	2.04
Oct-09_12	0.100	-30	8.44	13.11	0.72	1.49	2.08
Oct-09_27	0.160	-30	14.80	8.16	0.38	1.16	1.91
Oct-09_43	0.160	-30	16.09	13.31	0.49	1.66	2.21
Oct-09_75	0.110	-50	17.54	21.54	0.60	1.97	2.40
Oct-10_27	0.055	-20	5.98	23.15	1.60	2.04	3.52
Oct-11_79	0.175	-50	11.36	19.80	0.87	1.93	2.37
Oct-11_93	0.156	-50	15.82	11.43	0.44	1.57	1.95
Nov-11_01	0.061	-20	11.53	15.26	0.59	1.24	2.16
Nov-11_12	0.109	-30	8.97	6.89	0.42	1.08	1.35
Nov-11_75	0.126	-50	18.38	21.57	0.59	2.10	2.45
Nov-11_77	0.066	0	23.00	37.74	0.72	0.72	2.98
<b>Promedio</b>	<b>0.125</b>	<b>44</b>	<b>14.93</b>	<b>36.48</b>	<b>1.14</b>	<b>2.11</b>	<b>2.80</b>

En los 46 perfiles verticales de concentración de clorofila-a, que integran la R5 en Años, no se evidencia un patrón de distribución vertical representativo de la región y periodo estacional y, que con la aplicación de análisis de asociación de igual forma no pudieron identificarse, lo cual puede indicar que existen procesos estacionales de menor escala espacial y temporal, que definen las características de la masa de agua en la vertical.



## 6.DISCUSIÓN

A pesar, de la existencia de un programa de monitoreo continuo en la CPC (más de 16 años), se identificó que la irregularidad de los periodos de muestreo y de la retícula analizada, interrumpen las series de tiempo de cada estación, lo cual, es un factor influyente para la definición de un máximo de clorofila profunda (DCM) en la Cuenca Pacifica Colombiana (CPC).

Lo anterior, se suma a la irregularidad de los perfiles verticales tomados a lo largo de los cruceros. Para este tipo de monitoreos, la toma de muestras en la vertical de clorofila-a, dependen de las características ópticas de la masa de agua, pero esta base de datos no contó con datos que permitieran valorar las propiedades ópticas, por tanto la diversidad de profundidades tomadas en los perfiles se asoció a criterios del director de crucero, condiciones oceanoatmosféricas o novedades técnicas propias del proceso de toma de muestras, de allí la presencia de perfiles integrados por 3 profundidades hasta perfiles integrados por 9 profundidades.

Para la aplicación del modelo de la gaussiana desfasada definido por Platt *et al.* (1988), el número de datos que integran un perfil es determinante para la definición de la estructura vertical de clorofila-a. Sin embargo, no todas las bases de datos existentes cuentan con registros completos.

Por ejemplo, bases de datos como la retícula CALCOFI del Sistema de Corriente de California, integrada por 4160 perfiles (Millán-Núñez *et al.*, 1997) o la retícula del noroeste del Océano Pacífico, integrada por 6983 perfiles (Osawa *et al.*, 2010), no son la regla. Sistemas de monitoreo como los cruceros ERFEN, integrados por 459 perfiles con un numero de profundidades entre 4 y 9 datos, aportó información significativa para la descripción de la estructura vertical de clorofila-a.

De lo anterior se destaca en los resultados obtenidos, un 5.3% de perfiles descartados por tener menos de 4 datos en la vertical o por tener dos o más picos de clorofila-a, en contraste con el 18% de perfiles descartados en la retícula CALCOFI (Millán-Núñez *et al.*, 1997). Así mismo, el 53% de los perfiles modelados, fueron estadísticamente significativos, es decir, 231 nuevos perfiles son aportados no solo para la descripción en la vertical de la clorofila-a, sino como fuente para el desarrollo de investigaciones que contribuyan con el entendimiento de la productividad primaria de la CPC.

De igual forma, aunque se reconoce que para el análisis de “match-up” la toma de decisiones se hace más robusta con un mayor número de datos, los resultados obtenidos por el presente estudio, con base en el número de profundidades (“n”) por perfil (Tabla 12), indican que la relación directa no fue concluyente, y otros elementos relacionados con las características ópticas del perfil deben considerarse, porque el “n” sería determinante, si los perfiles fueran monotónicos y esto no es la constante en los perfiles que integran esta base de datos analizada.

Aunque no fue posible determinar un perfil prototipo de clorofila-a en la CPC, si se identificaron algunas asociaciones de los parámetros gaussianos determinados con las condiciones descritas por otros autores. Por ejemplo, en el crucero de junio de 1996, se registraron los más altos valores de concentración máxima de clorofila-a de toda la base de datos analizada, con un promedio de 16.038 mg/m<sup>3</sup> y valor mínimo y máximo de 2.673 mg/m<sup>3</sup> y 33.947 mg/m<sup>3</sup> respectivamente, los cuales se asociaron con un evento frío de poca intensidad, descrito para el mismo periodo de tiempo en la CPC (Camacho, 1998; Villegas, 1997).

En la descripción de los parámetros gaussianos según crucero analizado, si bien se identificaron asociaciones de alguno de los parámetros con características descritas para la zona de estudio y periodo de monitoreo, esto no fue determinante

para la estructura vertical del perfil, pues los perfiles modelados (Tabla 14 a 37), no describen un patrón concluyente.

Con los mapas de RBGs, se clasificaron las estaciones según la región determinada para cada crucero. Dichas regiones confirman patrones descritos por otros autores en la CPC, por ejemplo, los mapas de Bioregionalización de los cruceros de marzo de 2002 y marzo de 2006 describieron tres RBGs (Fig. 13 y 14), las cuales responden a la época seca caracterizada por la predominancia de los vientos Alisios del Noreste y la ubicación más Sur en la CPC de la Zona de Convergencia Intertropical-ZCIT (Fig. 11). En este periodo, la presencia del jet de Panamá, produce mezcla y surgencias, que aportan aguas frías sub-superficiales menores a 20°C, salinidades mayores a 34.5 y aguas productivas en la región, con alta biomasa de fitoplancton y zooplancton (Valencia *et al.*, 2013).

Los mapas de campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento fueron determinantes para la descripción de las bioregiones descritas en cada crucero. Ello permitió describir para las regiones **R1**, **R2** y **R3** (Fig. 13 y 14) características de masas de agua frías y productivas, frente a las demás regiones, que describieron un patrón de viento propio de la época de lluvias (Fig. 12), en la cual, los vientos alisios del sudeste se intensifican y la ZCIT migra hacia el norte, ya no se observa el Jet Panamá y la cuenca se caracteriza por aguas cálidas mayores a 20°C, aguas con salinidades menores a 34.5 y aguas poco productivas (Valencia *et al.*, 2013).

La extensión de las RBGs en cada crucero, se asocia a la variabilidad estacional de la CPC que además se refleja en el campo de viento, el cual se intensifica o debilita según las condiciones atmosféricas que afecten la región. Ello se evidenció en los mapas de rotacional del esfuerzo del viento, determinados para mayo de 1999 y 2000, que indican mayor intensidad en la magnitud de los vientos Alisios del Sureste en toda la CPC (Fig. Fig 15c 15d), en comparación con la

magnitud de los vientos de los cruceros de 1997 y 1998 (Fig. 15a y 15b), lo cual según Devis-Morales (2003), se debió al efecto de debilitamiento que sufren los vientos Alisios durante un evento El Niño.

En cuanto al patrón vertical de la clorofila-a, la asociación entre los parámetros gaussianos respecto a la región y variabilidad estacional de la CPC, indican que los periodos fríos presentan cierto grado de asociación. Por ejemplo, los promedios de los parámetros Gaussianos de todas las estaciones presentes en los cruceros de años fríos (Tabla 39) registraron los valores más altos, lo cual corresponde con las condiciones descritas en la CPC (Camacho, 1998; CCCP, 2002; Devis-Morales, 2003; Giraldo *et al.*, 2008; Rodríguez-Rubio *et al.*, 2003).

El patrón anterior, fue identificado en los valores promedios más altos de **Bo** para las regiones **R5**, **R6** y **R7** de los años fríos (Fig. 40), así como los mayores valores de la concentración de clorofila-a integrada en el perfil, asociados a las mismas regiones de años fríos, excepto por la región **R7**, que presentó el valor promedio más bajo.

No obstante el patrón anterior, los análisis de asociación aplicados, no permiten establecer una conclusión estadísticamente significativa de la asociación de los parámetros con los periodos fríos, lo cual puede deberse a que los promedios calculados están integrados por estaciones muestreadas en meses diferentes y no todas las estaciones tuvieron representatividad en la totalidad de las regiones y periodos estacionales (Tabla 41).

Los perfiles de clorofila-a de mayo de 1999, evidencian un máximo de clorofila-a superficial y una distribución vertical homogénea, no asociada a la RBGs del crucero. Por tanto, se infiere que ante la ocurrencia de fenómenos como La Niña registrados en este crucero (Camacho, 1998; CCCP, 2002; Devis-Morales, 2003),

la cuenca se impacta en su totalidad, independiente de la distribución espacial de la CPC.

Un aspecto adicional para entender el patrón vertical de clorofila-a, está relacionado con la característica de cuenca cerrada de la CPC. Esta característica, genera que las aguas oceánicas de la CPC estén limitadas por la cordillera de Cocos y cordillera de Carnegie, previniendo el intercambio de aguas profundas con el Pacífico Central. Por tanto, el intercambio de calor, salinidad y movimiento de aguas ocurre solo por encima de los 200 m (Rodríguez-Rubio y Stuardo, 2002).

Por otro lado, el análisis de asociación no permitió evidenciar un patrón del **Zm** en los cruceros de septiembre de 2008, 2009 y 2010 y cruceros de octubre de 2010 y 2011. En estos cruceros, el **Zm** estuvo entre 30m y 50m, pero las publicaciones disponibles del área de estudio, no registraron ningún tipo de patrón que pudiese asociarse con esta condición. Lo único, particularizado para estos cruceros, fue la presencia de RBGs no homogéneas, que indican un alto dinamismo en la CPC.

Como resultado del análisis de asociación de los parámetros gaussianos según periodo y región, se identificó, que los eventos fríos en la CPC tienen mayor impacto en la vertical, lo cual puede ser debido a la alta influencia que ejercen los cruceros monitoreados en periodos en los cuales se registró la presencia del fenómeno de la Niña.

## 7. CONCLUSIONES

Se comprobó que la función de distribución Gaussiana propuesta por Platt *et al.* (1988) es aplicable como herramienta de reconstitución de perfiles verticales de concentración de clorofila-a, para las mediciones *in situ* tomadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) en la Cuenca Pacífica Colombiana (CPC).

Se encontró que las 44 estaciones definidas por el CCCP para la retícula de muestreo en la CPC, nunca han sido muestreadas en su totalidad, identificándose un promedio de 20 estaciones monitoreadas por crucero, dentro del cual, solo hubo un crucero con una retícula de 28 estaciones. Las estaciones con mayor representatividad en los 23 cruceros analizados, fueron la 27, 29, 31, 33, 45, 47, 49, 77 y 79 (Recuadros azules de Fig. 7), lo cual se recomienda sea considerado para la continuidad en las series de tiempo.

Se determinaron 231 perfiles modelados, ajustados a los perfiles reales de clorofila-a, es decir, el 53% de dichos perfiles fue estadísticamente significativo, superando a los porcentajes (25-27%) obtenidos por otros estudios (Platt y Sathyendranath, 2007).

No se encontró una relación concluyente entre la dependencia de la significancia estadística de los perfiles modelados respecto al número de registros del perfil ("n"), por tanto, se infieren otros elementos relacionados con las características ópticas del perfil, porque el "n" sería determinante si los perfiles fueran monotónicos y esto no es la constante en los perfiles que integran la base de datos analizada.

La SFEO de las  $Rrs_{412}$  (410 de VIIRS y 413 de MERIS) y  $Rrs_{490}$  (488 de MODIS y 486 de VIIRS), permitió definir Regiones Biogeográficas Dinámicas en la CPC. Lo

cual indica, que el análisis multisensor es una buena aproximación, para la definición de áreas en una cuenca oceanográfica como la CPC, que se caracteriza por una alta cobertura de nubes y vacíos en las series disponibles.

Se identificó una asociación entre las RBGs identificadas en cada uno de los cruceros, con los mapas de campo de viento y rotacional del esfuerzo del viento, lo cual indica, que este tipo de variables físicas pueden integrarse como apoyo para la definición de Regiones Biogeográficas Dinámicas en la CPC.

El parámetro  $B_0$  describió un elevado valor promedio en los cruceros pertenecientes a los años fríos, en comparación con los otros periodos, lo cual, es una asociación que responde a las condiciones de alta productividad reportadas durante eventos fríos en la CPC.

Lo anterior, es un patrón que podría concluir que el parámetro  $B_0$ , pueden ser usado como indicador de eventos fríos, a pesar de que el análisis de asociación aplicado a todas las regiones según periodo estacional, no evidenciara grupos que permitan identificar patrones estacionales o regionales en esta cuenca.

El resultado del análisis de asociación aplicado a la  $R5$  según año frío, cálido y promedio, indica que para esta serie de datos no existe un patrón de la distribución vertical de clorofila-a, que este asociado a la región o periodo estacional, salvo por los resultados de la  $R5$  en año frío, que para las estaciones de los cruceros de Mayo de 1999 y 2000, indican que si hay un patrón vertical.

En términos generales, el modelo de distribución gaussiana permitió reconstruir perfiles verticales de clorofila-a que describieron algunos patrones de asociación con la variabilidad estacional y las RBGs en la CPC. Sin embargo, estas asociaciones no fueron estadísticamente significativas, por lo que se infiere que elementos relacionados con la irregularidad de los periodos de muestreo, la

irregularidad de la retícula de muestreo y a los criterios aplicados para la toma de datos en la vertical, pueden ser la razón por la cual, las asociaciones no respondan a un patrón específico.

La presente investigación ha contribuido con la base de datos de los cruceros ERFEN, mediante la reconstrucción de 231 perfiles modelados de clorofila-a, que pueden ser utilizados como base para la descripción de la productividad primaria en la CPC. Para ello, se espera que a partir de la identificación de las estaciones con mayor número de registros y la sugerencia de incluir parámetros que permitan medir las características ópticas de la masa de agua, se fortalezca el sistema de monitoreo y se apliquen estas metodologías hasta lograr identificar perfiles prototipo que puedan ser asociados con la información dada por los sensores remotos de color del océano.



## **8. RECOMENDACIONES**

Se identificaron tres esquemas de muestreo de cada estación en la CPC, para la toma de muestras de clorofila-a, los cuales no corresponden a profundidades monotónicas; por tanto, se recomienda que al diseñar los esquemas de muestreo las profundidades cumplan esta condición, sobre todo cuando no se cuenta con un equipo que permita medir perfiles continuos y se deban aplicar monitores discretos, como es el caso de la presente base de datos.

Se recomienda hacer un análisis de la retícula de muestreo para toma de parámetros bioquímicos, considerando las estaciones con mayor representatividad en la base de datos de los cruceros ERFEN, de manera que se optimicen recursos y se propenda por la continuidad de las series de tiempo.

Tomar registros de disco secchi e incluir variables que permitan describir las características ópticas de la masa de agua. De esta manera, se podrán desarrollar investigaciones en la zona que contribuyan con la descripción oceanográfica de la CPC y del Océano Pacífico Tropical.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALVAIN, S., L. Duforêt-Gaurier, and H. Loisel. (2011). Observation of Ocean Colour Beyond Chlorophyll-a: From Particulate Organic Carbon Content and Size Distribution to Phytoplankton Functional Groups. Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Marine Applications.
- AMADOR, J.A., E. J. Alfaron, O. G. Lizano, and V. O. Magaña. (2006). Atmospheric forcing of the Eastern tropical Pacific: a review. Prog. Oceanogr. 69, 101–142.
- ANDRÉ, J. M. (1992). Ocean color remote-sensing and the subsurface vertical structure of phytoplankton pigments. Deep-Sea Research I. 39: 763-779.
- BALCH, W., R. Evans, J. Brown, G. Feldman, C. McClain, and W. Esaias. (1992). The remote sensing of ocean primary productivity: Use of a new data compilation to test satellite algorithms. Journal of Geophysical Research: Oceans, 97(C2), 2279–2293.
- BETANCUR, M. J., and I. Martínez. (2003). Recent benthonic foraminifera in deep-sea sediments of the panama basin (Colombian Pacific), as indicators of productivity and oxygenation. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, 32(1), 93–123.
- CALLIARI, D. (2007). Short-term changes in the concentration and vertical distribution of chlorophyll and in the structure of the microplankton assemblage due to a storm. Original Scientific Photographs, 2(1), 13–22.
- CAMACHO, G. A. (1998). Seguimiento a la evolución de los eventos La Niña-El Niño-La Niña durante el periodo Oct/96-Oct/98 mediante la variación térmica de las masas de agua en la Cuenca del Pacífico Colombiano (CPC). Boletín Científico del CCCP.
- CCCP. (2002). Compilación oceanográfica de la cuenca pacífica colombiana. Centro Control Contaminación del Pacífico-CCCP DIMAR Tumaco.
- CARMELO, T. (1995). Identifying marine diatoms and dinoflagellates. Academic Press, Inc. San Diego, USA, 598 p.
- DEVIS-MORALES, A. (2003). Evolución del evento El Niño 2002-2003 y efectos sobre la cuenca del pacífico colombiano y la Bahía de Tumaco. Boletín Científico del CCCP, 10, 12–32.
- DEVIS-MORALES, A., W. Schneider, R. A. Montoya-Sanchez, E. Rodríguez-Rubio. (2008). Monsoon-like winds reverse oceanic circulation in the Panama Bight. Geophys. Res. Lett. 35, L20607, <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL035172>.
- EOS (Earth Observation System), (1989). Ocean color. Availability of the global data set. Transactions, Amer. Geophys. Union Vol. 70(23);63435- 64041.
- FERNÁNDEZ-ÁLAMO, M.A. and J. Färber-Lorda. (2006). Zooplankton and the oceanography of the Eastern tropical Pacific: a review. Prog. Oceanogr. 69, 318–359.

- GARCÍA-HANSEN, I. (2001). Efectos de los fenómenos “El Niño” y “La Niña” sobre las comunidades de fitoplancton en la Ensenada de Tumaco, 1997-2000. *Boletín Científico CCCP*, No. 8, 15–21.
- GARCÍA-HANSEN, I., y I. Málikov. (2002). Comportamiento de diatomeas y dinoflagelados en la Ensenada de Tumaco bajo la influencia de las épocas climáticas durante el período 1995-2000. *Boletín Científico CCCP*, No. 9, 19–28.
- GILL, A. E. (1982). *Atmosphere-ocean Dynamics*. Academic Press.
- GIRALDO, A., E. Rodríguez-Rubio, y F. Zapata. (2008). Condiciones oceanográficas en isla Gorgona, Pacífico oriental tropical de Colombia. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 36(1), 121–128.
- GONZALEZ-SILVERA, A., E. Santamaria-del-Angel, R. Millán-Nuñez, and H. Manzo-Monroy. (2004). Satellite observations of mesoscale eddies in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6–9), 587–600.
- GORDON, H. R. (1992). Diffuse reflectance of the ocean: Influence of non-uniform phytoplankton pigment profile. *Applied Optics*. 31: 2116-2129.
- HENSE, I., and A. Beckmann. (2008). Revisiting subsurface chlorophyll and phytoplankton distributions. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(9), 1193–1199.
- HEY, R. 1977. Tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88:1404-1420.
- KARLIN, L., and N. Villegas. (2005). Simulation of Near-Surface Layer of the Colombian Pacific Ocean. *Earth Sciences Research Journal*, 9(2), 110–122.
- LONSDALE, P., and K. D. Klitgord. (1978). Structure and tectonic history of the eastern Panama Basin. *Geol. Soc. Am. Bull.* 89: 981-999.
- MACKAS, D.L., K.L. Denman and M.R. Abbott. (1985). Plankton patchiness: Biology in the physical vernacular. *Bull.Mar.Sci.* 37:652
- MÁLIKOV, I., y N. L. Villegas-Bolaños. (2005). Construcción de series de tiempo de temperatura superficial del mar de las zonas homogéneas del Océano Pacífico Colombiano. *Boletín Científico del CCCP*, 12, 79–93.
- MÁLIKOV, I., N. L. Villegas, y J. L. Moreno. (2010). Identificación de masas de agua horizontales y verticales como base para la localización de estaciones de monitoreo océano-atmosférico en la cuenca del pacífico colombiano. *Revista Institucional de La Universidad Tecnológica Del Chocó, Investigación, Biodiversidad Y Desarrollo*, (29).
- MALONE T.F. and J.G. Roederer. (1985) *Global Change*. Cambridge Uni. Press. N.Y.
- MARTÍNEZ-AGUILAR, T. I., A. Giraldo, y E. Rodríguez-Rubio. (2010). Ictioplancton en la zona costera del Pacífico colombiano durante la fase terminal de El Niño 2006-2007. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 38(1), 151–166.
- MAYORGA-LANDINES, J. A. (2007). Reconstrucción de la historia de los cruceros oceanográficos en el pacífico colombiano durante el periodo (1970-2004). Retrieved from [repositorio.uis.edu.co:80/jspui/handle/123456789/8841](http://repositorio.uis.edu.co:80/jspui/handle/123456789/8841)

- MEDINA-CAMPOS, L. (1997). Composición y comportamiento del fitoplancton en el área del Pacífico colombiano, años 1995-1997. *Boletín Científico CCCP*, No. 6, 95–108.
- MESCHEDE, M., U. Barckhausen, and H. U. Worm. (1998). Extinct spreading on the Cocos Ridge. *Terra Nova*, 10:211-216.
- MILLÁN-NÚÑEZ, R., S. Alvarez-Borrego, and C. C. Trees. (1997). Modeling the vertical distribution of chlorophyll in the California Current System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C4), 8587–8595.
- MOREL, A., and J. F. Berthon. (1989). Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote sensing applications. *Limnology and Oceanography*. 34: 1545-1562.
- ORTEGA-LARA, A., J. S. Usma, P. A. Bonilla, y N. L. Santos. (2006). Peces de la cuenca del río Patía, Vertiente del Pacífico colombiano. *Biota Colombiana*, 7(2), 179–190.
- OSAWA, T., C. Fang-Zhao, I. W. Nuarsa, I. K. Swardika, and Y. Sugimori. (2010). Vertical distribution of Chlorophyll-a based on Neural Network. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 2. Retrieved from <http://www.jurnal.lapan.go.id/index.php/ijreses/article/view/1353>
- PALACIOS, D. M., and s. J. Bograd. (2005). A census of Tehuantepec and Papagayo eddies in the northeastern tropical Pacific. *Geophysical Research Letters*, 32(23), n/a–n/a.
- PENNINGTON, J. T., K.L. Mahoney, V. S. Kuwahara, D. D. Kolber, R. Calienes, and F. P. Chavez. (2006). Primary production in the Eastern Tropical Pacific: a review. *Prog. Oceanogr.* 69, 285–317.
- PLATT, T., and S. Sathyendranath. (1988). Oceanic Primary Production: Estimation by Remote Sensing at Local and Regional Scales. *Science*, 241(4873), 1613–1620.
- PLATT, T., and S. Sathyendranath. (2007). Modelling primary production - XI. June 6, 2007. 89-97.
- PLATT, T., C. Caverhill, and S. Sathyendranath. (1991). Basin-scale estimates of oceanic primary production by remote sensing: The North Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C8), 15147–15159.
- PLATT, T., S. Sathyendranath, C. M. Caverhill, and M. R. Lewis. (1988). Ocean primary production and available light: further algorithms for remote sensing. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 35(6), 855–879.
- RAMIREZ, D. G., y A. Giraldo. (2006). Estructura comunitaria del fitoplancton en la cuenca Pacífico colombiana durante la campaña oceanográfica Pacífico XXXIX–ERFEN XXXVII. *Boletín Científico del CCCP*, 65–84.
- RODRIGUEZ-RUBIO, E., and J. Stuardo. (2002). Variability of photosynthetic pigments in the Colombian Pacific Ocean and its relationship with the wind field using ADEOS-I data. *Journal of Earth System Science*, 111(3), 227–236.

- RODRÍGUEZ-RUBIO, E., W. Schneider, and R. Abarca-del-Río. (2003). On the seasonal circulation within the Panama Bight derived from satellite observations of wind, altimetry and sea surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 30(7), n/a–n/a.
- SANTAMARÍA-DEL-ÁNGEL, E., A. González-Silvera, R. Millán-Núñez, M. E. Callejas-Jiménez, and R. Cajal-Medrano. (2011). Determining Dynamic Biogeographic Regions using Remote Sensing Data. Retrieved from [http://www.ioccg.org/handbook/casestudy19\\_angel\\_etal.pdf](http://www.ioccg.org/handbook/casestudy19_angel_etal.pdf)
- SANTAMARIA-DEL-ANGEL, E., R. Millán-Nuñez, A. Gonzalez-Silvera, and R. Cajal-Medrano. (2011). Comparison of In Situ and Remotely-Sensed Chl-a Concentrations: A Statistical Examination of the Match-up Approach. *Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Marine Applications, Cases study 17*. Retrieved from [http://www.ioccg.org/handbook/casestudy17\\_angel\\_etal.pdf](http://www.ioccg.org/handbook/casestudy17_angel_etal.pdf)
- SATHYENDRANATH, S., T. Platt, C. M. Caverhill, R. E. Warnock, and m. R. Lewis. (1989). Remote sensing of oceanic primary production: Computations using a spectral model. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 36(3), 431–453.
- TCHANTSEV, V., y E. Cabrera-Luna. (1998). Algunos aspectos de investigación de la formación del régimen oceanográfico en el Pacífico colombiano. *Boletín Científico del CCCP*.
- VALENCIA, B., B. Lavaniegos, A. Giraldo, and E. Rodríguez-Rubio. (2013). Temporal and spatial variation of hyperiid amphipod assemblages in response to hydrographic processes in the Panama Bight, eastern tropical Pacific. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967063712002294>
- VILLEGAS, N. (1997). Movimiento vertical de las masas de agua en el Pacífico Colombiano durante junio y octubre de 1996. *Boletín Científico CCCP*, No.6, 81–93.
- VILLEGAS, N. L. (2004). Fine thermohaline structure of the colombian pacific ocean. Retrieved from <http://www.ciencias.unal.edu.co/unciencias/data-file/ESRJ/pdf/v8n1/06%20Nancy%20Villegas.pdf>
- VILLEGAS-BOLAÑOS, N. L. (2003a). Estabilidad de las aguas del pacífico colombiano - mayo 2000. *Boletín Científico del CCCP*, 10, 1–11.
- VILLEGAS-BOLAÑOS, N. L. (2003b). Variación anual del contenido de calor de la capa activa del pacífico colombiano. *Boletín Científico del CCCP*, 10, 33–46.
- WANG, C., and P. C. Fiedler. (2006). ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2–4), 239–266. doi:10.1016/j.pocean.2006.03.004
- WILCHES-CHAUX, G. y A. Velásquez. (1993). La costa brava: catástrofes naturales, vulnerabilidad y desastres en la costa del Pacífico:488-495. En: P. de Leyva (Ed.). *Status of coral reefs of the world*. Australian Ins. Mar. Sci., Townsville.