

Universidad Autónoma de Baja California  
Facultad de Ciencias Marinas  
Instituto de Investigaciones Oceanológicas

Posgrado en Oceanografía Costera



**Ajuste, Modelación y Variabilidad de los Perfiles  
Verticales de Clorofila en la Región CALCOFI de  
la Corriente de California**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**PRESENTA**

**MAURICIO ALFREDO MUÑOZ ANDERSON**

**Ensenada, Baja California, México. Marzo 2016**

**UNIVERSIDAD AUTOMOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS  
EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**AJUSTE, MODELACIÓN Y VARIABILIDAD DE LOS PERFILES  
VERTICALES DE CLOROFILA EN LA REGIÓN CALCOFI DE LA  
CORRIENTE DE CALIFORNIA**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA:

**MAURICIO ALFREDO MUÑOZ ANDERSON**

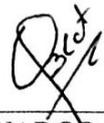
APROBADA POR:

  
DR. ROBERTO MILLÁN NÚÑEZ  
DIRECTOR DE TESIS

  
DR. EDUARDO SANTAMARIA DEL ANGEL  
SINODAL

  
DRA. ADRIANA GONZALEZ SILVERA  
SINODAL

  
DR. RAFAEL HERNÁNDEZ WALLS  
SINODAL

  
DR. SALVADOR GALINDO BECT  
SINODAL

## I. Agradecimientos

A Roberto Millán Núñez, ya que en más de 25 años ha estado presente en los momentos más significativos de mi vida, como maestro, guía y sobre todo amigo, gracias Profe, muchas gracias, y quedo en deuda con usted.

A Eduardo Santamaría del Ángel, Adriana González Silvera, Rafael Hernández Walls y Salvador Galindo, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, y estar siempre presentes cuando se le requirió. Eduardo gracias por estar presente en los momentos más difíciles. Profe. Adriana gracias porque cada vez que existió alguna duda siempre tuvo la respuesta correcta. Profe Rafa, gracias por su asesoría en temas un tanto cuanto difíciles para mí.

A CONACYT por la beca otorgada para la realización de mis estudios en el programa de Doctorado de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC.

A la MC Patricia Alvarado y la MC Karina Barba por su invaluable ayuda y asesoría al inicio y durante el desarrollo de esta tesis.

Un agradecimiento muy especial a José Mauricio Muñoz Diéguez, porque cuando me rebasó la tecnología, estuviste siempre ahí para resolverlo, gracias Totoy, gracias Mi Niño.

A la familia Fernández Cortes, muchas gracias por todo el apoyo, pero sobre todo muchas gracias por su amistad.

Al personal administrativo de la Facultad de Ciencias Marinas, en especial a Angélica Arce, por su buena disposición y atención al orientarme siempre en lo referente a los trámites administrativos.

## II. Dedicatoria

A **DIOS**, gracias Padre por permitir que llegara este momento, sin tu voluntad esto no sería posible.

A mi esposa Liz, chiquitita de mi vida, te dedico este trabajo y agradezco todo, todo el apoyo que siempre y para todo me has brindado, que Dios me permita seguir a tu lado mucho tiempo y seguir compartiendo lo mejor que tengo, que eres tú.

A mis hijos Mauricio y Annaliz, que son la motivación y motor que me da fuerzas para seguir adelante, y que siempre que me ven me reciben con los brazos abiertos y con una sonrisa.

A mi padre, donde quiera que estés... te quiero mucho.

A mis abuelos que en Paz Descansen, que ellos fueron parte vital y apoyo fundamental en los inicios de mi carrera, yo sé que están aquí conmigo.

A todos mis amigos y familiares que de alguna u otra manera apoyaron para llegar a este momento.

### III. Resumen

Se utilizaron datos de perfiles de clorofila del área CALCOFI del año 2000 al 2011 para ajustar, modelar y conocer la variabilidad de los perfiles verticales de clorofila *a* en diferentes regiones del área y épocas del año. La distribución vertical de clorofila *a* (Chla) en la zona eufótica se ha modelado mediante una curva gaussiana que representan los casos donde hay un máximo de clorofila *a* (superficial o subsuperficial). Esto ha llevado al rechazo de perfiles con más de un máximo de clorofila por no tener un buen ajuste y se ha eliminado hasta un 18% de los perfiles. Se propone una ecuación alternativa para ajustar perfiles verticales de Chla que incluya dos máximos en la zona eufótica. Se evaluaron de 315 perfiles verticales de Chla de cuatro cruceros CALCOFI en 2011. Los perfiles verticales de Chla presentan varias formas, por lo que se trabajó con cuatro modelos: una curva gaussiana (un máximo) con y sin gradiente y doble curva gaussiana (dos máximos) con y sin gradiente, que se ajustaron utilizando algoritmos genéticos. El mejor modelo de ajuste fue el de dos máximos con gradiente, que es el que presentó el menor error cuadrático medio (RMSE) con el cual fue posible ajustar casi la totalidad de perfiles verticales de Chla. Este modelo tiene la capacidad de ajustar perfiles verticales con uno o dos máximos incluyendo aquellos que presentan gradiente con la profundidad. Aunque los modelos fueron probados usando datos CALCOFI, se recomienda el uso de estos modelos en regiones donde existan dobles máximos de Chla. Con el propósito estimar el perfil vertical de Chla mediante el uso de la información de la clorofila superficial (Chls), se ajustaron 3395 perfiles entre los años 2000 y 2011 para la obtención de los parámetros de los perfiles, estos se agruparon por región y época. Se realizaron regresiones lineales entre la Chls y los parámetros gaussianos y se tomaron aquellas con  $R^2$  mayor a 0.55. Se realizó una comparación entre perfiles verticales de otros años y los perfiles estimados mediante el uso de la Chls y las ecuaciones de regresión, con resultados parecidos. La forma de los perfiles verticales en la Corriente de California varió mucho por región y época del año y para conocer esta variabilidad se estimaron perfiles verticales promedios por región, época y concentración de clorofila *a* superficial. Se realizaron series de tiempo de 12 años en algunas estaciones y transectos del área CALCOFI. Existe marcada diferencia en los perfiles de la zona norte entre la región costera y oceánica, relacionada con la variabilidad oceanográfica de la zona. La biomasa integrada se incrementa hacia la costa. En la región sur existe una mayor posibilidad de encontrar perfiles verticales de Chla con dos máximos en la época fría, región costera. Perfiles con un solo máximo son característicos del norte en la región oceánica y principalmente en la época caliente. Las concentraciones de clorofila máximas aumentan con la categoría, con valores mayores en la región sur. Los perfiles verticales de clorofila son muy variados debido a cambios físicos, químicos y biológicos que ocurren a lo largo del año de manera estacional en la Corriente de California y por fenómenos meteorológicos o climáticos.

## IV. Índice

I. Agradecimientos .....	iii
II. Dedicatoria .....	iv
III. Resumen .....	v
IV. Índice.....	vi
V. Lista de Figuras.....	vii
VI. Lista de Tablas .....	xiii
VII. Lista de ecuaciones .....	xiv
INTRODUCCION.....	0
Objetivos.....	7
Área de estudio.....	8
CAPITULO I.....	10
Ajuste a los perfiles verticales de clorofila mediante el uso de dos gaussianas.....	10
Introducción .....	10
Metodología.....	11
Resultados.....	16
Discusión y Conclusiones .....	27
CAPITULO II.....	29
Estimación del perfil vertical de clorofila, mediante el uso de la clorofila superficial y parámetros gaussianos, en la región CALCOFI en la Corriente de California. ....	29
Introducción .....	29
Metodología.....	31
Resultados.....	35
Discusión y Conclusiones .....	69
CAPITULO III .....	86
Variabilidad de los perfiles verticales de clorofila en la región CALCOFI de la Corriente de California, durante 2000 a 2011. ....	86
Introducción .....	86
Metodología.....	88
Resultados.....	90
Discusión y Conclusiones .....	119
Conclusiones Generales.....	123
Referencias .....	126

## V. Lista de Figuras

<b>Figura 1</b>	Distribución vertical de la clorofila a $B(z)$ representada por una curva Gaussiana con cuatro parámetros (Platt <i>et al.</i> , 1988.), Donde $B_0$ es la concentración del pigmento en la línea-base ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), H es la clorofila integrada bajo la curva Gaussiana ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ), S es el ancho del pico al máximo profundo de clorofila (m), $Z_m$ es la profundidad al máximo de clorofila (m). (b) Mismos parámetros de la figura anterior, incluyendo (a) como la concentración de clorofila en $Z_m$ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) arriba de la línea-base y la pendiente ( $\alpha$ ), el gradiente vertical de la concentración de (Tomado de Matsumara, y Shiomoto, 1993).	Página 3
<b>Figura 2</b>	Área de estudio y localización de las estaciones de muestreo para el crucero enero-febrero 2011. El número de estaciones muestreadas varía con la época del año. Tomado de CALCOFI REPORTS, 2011.	Página 9
<b>Figura 3</b>	Diagrama de flujo que muestra los pasos que utilizan los algoritmos genéticos en el ajuste de los perfiles verticales de clorofila.	Página 15
<b>Figura 4</b>	Comparación del valor de RMSE entre los modelos D y modelos A, B y C usados en el ajuste de perfiles verticales de Chla para cruceros CALCOFI en 2011. 4a: Modelos A y D. 4b: Modelos B and D. 4c: Modelos C y D.	Página 18
<b>Figura 5</b>	Total de perfiles verticales de Chla para cruceros CALCOFI en 2011. 1(invierno), 3 (primavera), 7(verano), 11(otoño). Número de perfiles con un máximo (abajo) y con dos máximos (arriba) para cada crucero.	Página 22
<b>Figura 6</b>	Perfil vertical de Chla ajustado con cuatro (a), (b), (c) y (d). Los puntos negros representan los datos <i>in situ</i> . También se incluye transecto, estación, día y hora de cada perfil.	Página 24
<b>Figura 7</b>	Perfiles verticales de Chla ajustados con los modelos C y D (a, b, c y d). Los puntos negros representan los datos <i>in situ</i> . También se incluye transecto, estación, día y hora del perfil.	Página 26
<b>Figura 8.</b>	Área de estudio y localización de las estaciones de muestreo para el crucero enero-febrero 2011. Las flechas representan las divisiones del área de estudio, Norte-Sur, Oceánica-Costera. Otra división que se consideró es la época Fría y Caliente. Tomado de CALCOFI REPORTS, 2011.	Página 34
<b>Figura 9</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros, a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana) y b) $B_0$ (concentración del pigmento en la línea-base) para la región y época Norte Costero Caliente (NCC).	Página 39
<b>Figura 10</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros, a) $S_1$ (ancho del máximo de Chla), b) $a_1$ (concentración en el máximo de Chla) y	Página 40

	c) $Zm_1$ (profundidad del máximo de $Chla$ ), para la región y época Norte Costero Caliente (NCC). c) $Zm_1$ (profundidad del máximo de $Chla$ ), para la región y época Norte Costero Caliente (NCC).	
<b>Figura 11</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $S_2$ (ancho del segundo máximo de $Chla$ ), b) $a_2$ (concentración del segundo máximo de $Chla$ ) y $Zm_2$ (profundidad del segundo máximo de $Chla$ ), para la región y época Norte Costero Caliente (NCC).	Página 41
<b>Figura 12</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $H$ ( $Chla$ integrada bajo la curva gaussiana), b) $B_0$ (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Norte Costero Frío (NCF).	Página 43
<b>Figura 13</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $S_1$ (ancho del máximo de $Chla$ ), b) $a_1$ (concentración en el máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_1$ (profundidad del máximo de $Chla$ ), para la región y época Norte Costero Frío (NCF).	Página 43
<b>Figura 14</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $S_2$ (ancho del segundo máximo de $Chla$ ), b) $a_2$ (concentración del segundo máximo de $Chla$ ) y $Zm_2$ (profundidad del segundo máximo de $Chla$ ), para la región y época Norte Costero Frío (NCF).	Página 44
<b>Figura 15</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $H$ ( $Chla$ integrada bajo la curva gaussiana) y b) $b_0$ (concentración de $Chla$ de referencia) para la región y época Norte Oceánico Caliente (NOC).	Página 45
<b>Figura 16</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $S_1$ (ancho del máximo de $Chla$ ), b) $a_1$ (concentración en el máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_1$ (profundidad del máximo de $Chla$ ), para la región y época Norte Oceánico Caliente (NOC).	Página 46
<b>Figura 17</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $H$ ( $Chla$ integrada bajo la curva gaussiana), b) $B_0$ (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Norte Oceánico Frío (NOF).	Página 47
<b>Figura 18</b>	Regresión entre los parámetros a) $a_1$ (concentración en el máximo de $Chla$ ) y b) $Zm_1$ (profundidad del máximo de $Chla$ ), para la región y época Norte Oceánico Frío (NOF).	Página 48
<b>Figura 19</b>	Regresión entre los parámetros a) $S_2$ (ancho del segundo máximo de $Chla$ ) y b) $a_2$ (concentración en el segundo máximo de $Chla$ ) para la región y época Norte Oceánico Frío (NOF).	Página 49
<b>Figura 20</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $H$ ( $Chla$ integrada bajo la curva gaussiana), b) $B_0$ (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Sur Costero Caliente (SCC).	Página 50
<b>Figura 21</b>	Regresión entre la $Chls$ y los parámetros a) $S_1$ (ancho del máximo de $Chla$ ), b) $a_1$ (concentración en el máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_1$ (profundidad del máximo de $Chla$ ), para la región y época Sur Costero Caliente (SCC).	Página 51
<b>Figura 22</b>	Regresión entre los parámetros a) $S_2$ (ancho del segundo máximo	Página

	de $Chla$ ), b) $a_2$ (concentración en el segundo máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_2$ (profundidad del segundo máximo de $Chla$ ), para la región y época Sur Costero Caliente (SCC).máximo de $Chla$ ), b) $a_1$ (concentración en el máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_1$ (profundidad del máximo de $Chla$ ), para la región y época Sur Costero Caliente (SCC).	52
<b>Figura 23</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros a) H ( $Chla$ integrada bajo la curva gaussiana), b) $b_0$ (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Sur Costero Frío (SCF).	Página 53
<b>Figura 24</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros a) $S_1$ (ancho del máximo de $Chla$ ), b) $a_1$ (concentración en el máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_1$ (profundidad del segundo máximo de $Chla$ ) para la región y época Sur Costero Frío (SCF).	Página 54
<b>Figura 25</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros a) $S_2$ (ancho del segundo máximo de $Chla$ ), b) $a_2$ (concentración en el segundo máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_2$ (profundidad del segundo máximo de $Chla$ ), para la región y época Sur Costero Frío (SCF).	Página 55
<b>Figura 26</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros a) H ( $Chla$ integrada bajo la curva gaussiana), b) $B_0$ (concentración del pigmento en la línea-base) y c) $S_1$ (ancho del máximo de $Chla$ ), para la región y época Sur Oceánico Caliente (SOC).	Página 56
<b>Figura 27</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros a) $a_1$ (concentración en el máximo de $Chla$ ), b) $a_2$ (concentración en segundo el máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_2$ (profundidad del segundo máximo de $Chla$ ), para la región y época Sur Oceánico Caliente (SOC).	Página 57
<b>Figura 28</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros a) H ( $Chla$ integrada bajo la curva gaussiana), b) $B_0$ (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Sur Oceánico Frío (SOF).	Página 58
<b>Figura 29</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros a) $S_1$ (ancho del máximo de $Chla$ ), b) $a_1$ (concentración en el máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_1$ (profundidad del máximo de $Chla$ ), para la región y época Sur Oceánico Frío (SOF).	Página 59
<b>Figura 30</b>	Regresión entre la Chls y los parámetros a) $S_2$ (ancho del segundo máximo de $Chla$ ), b) $a_2$ (concentración en el segundo máximo de $Chla$ ) y c) $Zm_2$ (profundidad del segundo máximo de $Chla$ ) para la región y época Sur Oceánico Frío (SOF).	Página 60
<b>Figura 31</b>	Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Norte Costera Caliente (NCC). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro del ajuste del perfil vertical. La ecuación se utilizó con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 $mg \cdot m^{-3}$ .	Página 62
<b>Figura 32</b>	Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Norte Costera Frío (NCF). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes	Página 63

- concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>.
- Figura 33** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Norte Oceánico Caliente (NOC). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>. En esta división solo se presentan concentraciones superficiales de clorofila a menores o iguales a 1 mg·m<sup>-3</sup>. Página 64
- Figura 34** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Norte Oceánico Frío (NOF). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>. En esta división solo se presentan concentraciones superficiales de clorofila a menores o iguales a 1 mg·m<sup>-3</sup>. Página 65
- Figura 35** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Sur Costero Caliente (SCC). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>. Página 66
- Figura 36** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Sur Costero Frío (SCF). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>. Página 67
- Figura 37** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Sur Oceánico Caliente (SOC). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>. Página 68
- Figura 38** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Sur Oceánico Frío (SOF). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>. Página 69
- Figura 39** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) NCF y b) NOC. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*. Página 74
- Figura 40** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) NOF y b) NOF. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*. Página 76
- Figura 41** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) NOC y b) SCC. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*. Página 78

<b>Figura 42</b>	Comparación de 3 perfiles <i>in situ</i> del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) SCC y b) SOC. T/E es el transecto y la estación de cada perfil <i>in situ</i> .	Página 80
<b>Figura 43</b>	Comparación de 3 perfiles <i>in situ</i> del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) SCF y b) SOC. T/E es el transecto y la estación de cada perfil <i>in situ</i> .	Página 82
<b>Figura 44</b>	Comparación de 3 perfiles <i>in situ</i> del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) SOF y b) SOF. T/E es el transecto y la estación de cada perfil <i>in situ</i> .	Página 84
<b>Figura 45</b>	Perfil obtenido a partir del promedio de los parámetros del perfil vertical de Chla para cada región y época.	Página 92
<b>Figura 46</b>	Diagramas de barra, promedio para los parámetros clorofila superficial, H es la concentración de Chla integrada, B <sub>0</sub> concentración del pigmento en la línea-base, y el gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana ( $\alpha$ ). NCC (Norte-Costero-Caliente, NCF (Norte-Costero-Frío), NOC (Norte-Oceánico-Caliente), NOF (Norte-Oceánico-Frío), SCC (Sur-Costero-Caliente, SCF (Sur-Costero-Frío), SOC (Sur-Oceánico-Caliente), SOF (Sur-Oceánico-Frío).	Página 94
<b>Figura 47</b>	Diagramas de barra, promedio para los parámetros Zm <sub>1</sub> profundidad del primer máximo de clorofila, Zm <sub>2</sub> profundidad del segundo máximo de clorofila, a <sub>1</sub> concentración máxima 1 y a <sub>2</sub> concentración máxima 2. NCC (Norte-Costero-Caliente, NCF (Norte-Costero-Frío), NOC (Norte-Oceánico-Caliente), NOF (Norte-Oceánico-Frío).). SCC (Sur-Costero-Caliente, SCF (Sur-Costero-Frío), SOC (Sur-Oceánico-Caliente), SOF (Sur-Oceánico-Frío).	Página 95
<b>Figura 48</b>	Diagramas de caja de bigotes, para los parámetros del perfil. H es la concentración de Chla integrada, Zm <sub>1</sub> y Zm <sub>1</sub> son la profundidad del máximo de clorofila, para las regiones a) NCC (Norte-Costero-Caliente, b) NCF (Norte-Costero-Frío), c) NOC (Norte-Oceánico-Caliente), d) NOF (Norte-Oceánico-Frío).	Página 97
<b>Figura 49</b>	Diagramas de caja de gato, para los parámetros del perfil. H es la concentración de Chla integrada, Zm <sub>1</sub> y Zm <sub>1</sub> son la profundidad del máximo de clorofila, para las regiones a) SCC (Sur-Costero-Caliente, b) SCF (Sur-Costero-Frío), c) SOC (Sur-Oceánico-Caliente), d) SOF (Sur-Oceánico-Frío).	Página 98
<b>Figura 50</b>	Perfil vertical promedio de clorofila a para la región norte y diferentes épocas y categorías para el área de CALCOFI en la Corriente de California. C1 $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C2 $> 0.1 \text{ y } \leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C3 $> 0.2 \text{ y } \leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C4 $> 0.5 \text{ y } \leq 1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C5 $> 1.0 \text{ y } \leq 2.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C6 $> 2.0 \text{ y } \leq 5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C7 $> 5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .	Página 101
<b>Figura 51</b>	Perfil vertical promedio de clorofila a para la región sur y diferentes épocas y categorías para el área de CALCOFI en la	Página 105

	Corriente de California. $C1 \leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $C2 > 0.1 \text{ y } \leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $C3 > 0.2 \text{ y } \leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $C4 > 0.5 \text{ y } \leq 1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $C5 > 1.0 \text{ y } \leq 2.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $C6 > 2.0 \text{ y } \leq 5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $C7 > 5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .	
<b>Figura 52</b>	Serie de tiempo para la biomasa integrada (H) en el transecto 90 con trece estaciones de muestreo del 2000 al 2011. Cuatro cruceros por año, invierno, primavera, verano y otoño.	Página 109
<b>Figura 53</b>	Serie de tiempo para la biomasa integrada (H) en el transecto 80 con ocho estaciones de muestreo del 2000 al 2011. Cuatro cruceros por año, invierno, primavera, verano y otoño.	Página 111
<b>Figura 54</b>	Serie de tiempo para $Zm_1$ y $Zm_2$ en el transecto 90 con catorce estaciones de muestreo del 2000 al 2011. Cuatro cruceros por año, invierno, primavera, verano y otoño.	Página 113
<b>Figura 55</b>	Serie de tiempo para $Zm_1$ y $Zm_2$ en el transecto 80 con ocho estaciones de muestreo del 2000 al 2011 Cuatro cruceros por año, invierno, primavera, verano y otoño.	Página 114
<b>Figura 56</b>	Serie de tiempo para $a_1$ y $a_2$ en el transecto 90 con catorce estaciones de muestreo, del año 2000 al 2011. Cuatro cruceros por año, invierno, primavera, verano y otoño.	Página 117
<b>Figura 57</b>	Serie de tiempo para $a_1$ y $a_2$ en el transecto 80 con ocho estaciones de muestreo, del 2000 al 2011. Cuatro cruceros por año, invierno, primavera, verano y otoño.	Página 118

## VI. Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b>	Modelo que obtuvo el menor RMSE obtenido después de cinco evaluaciones seguidas con 1250 iteraciones aplicadas a los modelos A, B C y D. Después de 1000 iteraciones el modelo que mostro el menor RMSE fue el modelo D. La representación D/C indica que los modelos C y D mostraron un valor de RMSE similar.	Página 17
<b>Tabla 2</b>	Algunos resultados de valores de RMSE de los modelos C y D y su diferencia en porcentaje (%DIF) para cruceros 2011-1. T = transecto, S= estación. %DIF = [100 x (RMSE modelo C – RMSE modelo D/ RMSE modelo D)].	Página 19
<b>Tabla 3</b>	Parámetros de los perfiles verticales de Chl $a$ con un solo máximo, obtenidos con los modelos A y D. T = transecto, S = Estación, M = modelo, RMSE = Error cuadrático medio residual, H = perfil integrado de Chl $a$ , NaN dato no disponible, %DIF = [100 * (RMSE del modelo A - RMSE modelo D / RMSE modelo D)].	Página 25
<b>Tabla 4</b>	División del área de estudio. Regiones Norte y Sur, División Costera y Oceánica, Época: Fría y Caliente y la abreviatura correspondiente de cada una de ellas.	Página 33
<b>Tabla 5</b>	R <sup>2</sup> de las regresiones para cada parámetro del perfil vertical de Chl $a$ con la Chls. NCC es la división Norte-Costero-Caliente, NCF es Norte-Costero-Frío, NOC es Norte-Oceánico-Caliente, NOF es Norte-Oceánico-Frío, SCC es Sur-Costero-Caliente, SCF es Sur-Costero-Frío, SOC es Sur-Oceánico-Caliente y SOF es Sur-Oceánico-Frío. El número o letra en el paréntesis indica el tipo de regresión que se aplicó. L es regresión lineal, ln es regresión logarítmica y el número al orden que se aplicó a la ecuación. H es la concentración de Chl $a$ integrada, B <sub>0</sub> es la concentración del pigmento en la línea-base, $\alpha$ el gradiente vertical de la curva de la concentración de clorofila, Z <sub>m1</sub> y Z <sub>m1</sub> es la profundidad del máximo de clorofila, S <sub>1</sub> y S <sub>2</sub> es una medida del ancho de la curva gaussiana, a <sub>1</sub> y a <sub>2</sub> es la concentración máxima de cada una de las curvas.	Página 36
<b>Tabla 6</b>	Ecuaciones para estimar los parámetros del perfil vertical mediante la Chls para cada zona geográfica y época del año. NCC es la división Norte-Costero-Caliente, NCF es Norte-Costero-Frío, NOC es Norte-Oceánico-Caliente, NOF es Norte-Oceánico-Frío, SCC es Sur-Costero-Caliente, SCF es Sur-Costero-Frío, SOC es Sur-Oceánico-Caliente y SOF es Sur-Oceánico-Frío.	Página 37
<b>Tabla 7</b>	Promedio de los parámetros para cada una de las divisiones (región, época). NOF (Norte-Oceánico-Frío),	Página 90

NOC (Norte-Oceánico-Caliente), NCF (Norte-Costero-Frío), NCC (Norte-Costero-Caliente). SOF (Sur-Oceánico-Frío), SOC (Sur-Oceánico-Caliente), SCF (Sur-Costero-Frío), SCC (Sur-Costero-Caliente).  $H$  es la concentración de  $Chla$  integrada,  $B_0$  es la concentración del pigmento en la línea-base,  $\alpha$  el gradiente vertical de la curva de la concentración de clorofila,  $Z_{m1}$  y  $Z_{m2}$  es la profundidad del máximo de clorofila de cada uno de los máximos,  $S_1$  y  $S_2$  es una medida del ancho de la curva gaussiana,  $a_1$  y  $a_2$  es la concentración máxima de cada una de las curvas

<b>Tabla 8</b>	Promedio de los parámetros para cada una de las divisiones (región, época y categoría). NOF (Norte-Oceánico-Frío), NOC (Norte-Oceánico-Caliente), NCF (Norte-Costero-Frío), NCC (Norte-Costero-Caliente). SOF (Sur-Oceánico-Frío), SOC (Sur-Oceánico-Caliente), SCF (Sur-Costero-Frío), SCC (Sur-Costero-Caliente). $H$ es la concentración de $Chla$ integrada, $B_0$ concentración del pigmento en la línea-base, $\alpha$ el gradiente vertical de la curva de la concentración de clorofila, $Z_{m1}$ y $Z_{m1}$ es la profundidad del máximo de clorofila de cada uno de los máximos, $S_1$ y $S_2$ es una medida del ancho de la curva gaussiana, $a_1$ y $a_2$ es la concentración máxima de cada una de las curvas.	Página 99
----------------	---	--------------

## VII. Lista de ecuaciones

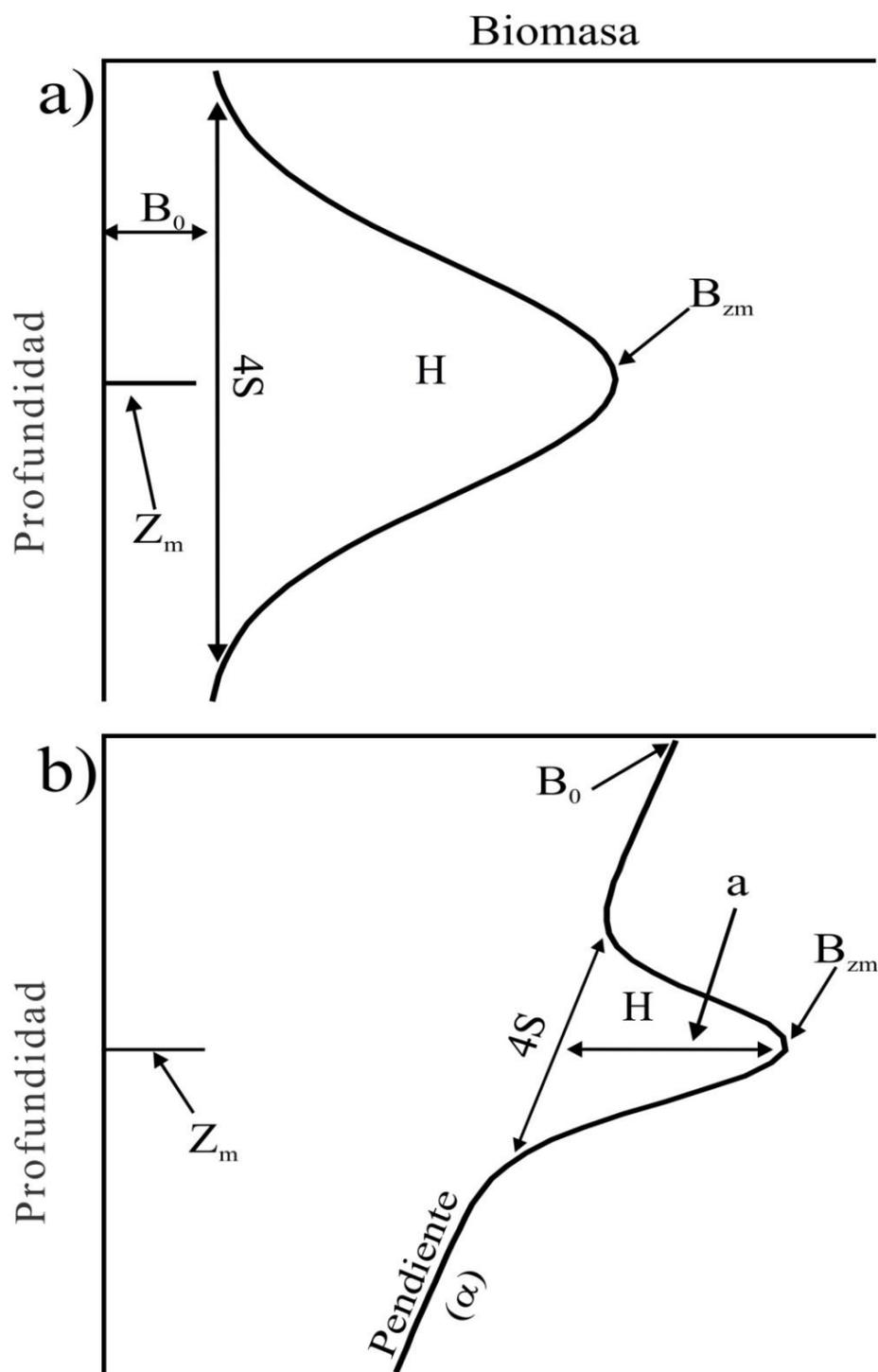
<b>Ecuación 1</b>	Modelo A	Página 12
<b>Ecuación 2</b>	Modelo B	Página 12
<b>Ecuación 3</b>	Modelo C	Página 13
<b>Ecuación 4</b>	Modelo D	Página 13
<b>Ecuación 5</b>	RMSE	Página 13

## INTRODUCCION

La concentración de clorofila a (Chla) se ha utilizado como indicador de la biomasa del fitoplancton en el océano (Cullen, 1982). La variación de la biomasa se debe a procesos fisiológicos del fitoplancton, así como a las condiciones del medio ambiente (Sathyendranath, *et al.*, 1995). Los distintos patrones de Chla en la zona eufótica mantienen información sobre los procesos que rigen la estructura vertical de la abundancia de fitoplancton, junto con otros aspectos dinámicos del ecosistema pelágico (Sarmiento y Bender, 1994). Conocer y caracterizar la forma del perfil de Chla en la columna de agua en cada región oceánica y durante una determinada época del año, es clave para calcular clorofila total por unidad de área de superficie del mar en la zona eufótica (Williamson *et al.*, 2011). Los valores de Chla en la zona eufótica también son necesarios como entrada en modelos utilizados para calcular la producción primaria fitoplanctónica (Platt *et al.*, 1988; Sathyendranath *et al.*, 1995; Millán-Núñez *et al.*, 1997; Demarq *et al.*, 2008). El suponer una distribución vertical de la Chla homogénea en columna de agua, implica que valores de biomasa pueden ser subestimados si hay uno o dos máximos subsuperficiales o sobrestimados si el máximo está en la superficie. Los sensores remotos del color del océano, han permitido estimar la concentración de Chla en la capa superficial, y se ha podido observar su variación a escala local y global (Platt *et al.*, 1995), así como su distribución irregular en forma de manchas, lengüetas o meandros, y un patrón de distribución con concentraciones mayores cercana a la costa y decreciendo hacia el mar abierto, con mayores concentraciones en las zonas de surgencia (Smith *et al.*, 1988; Platt *et al.*, 1988). Estos sensores utilizan las radianzas que emergen de la primera profundidad óptica (Smith, 1988), la productividad primaria

se lleva a cabo en la zona eufótica que corresponden a 4.6 profundidades ópticas (Kirk, 2011) y la distribución vertical de la *Chla* presenta generalmente un máximo profundo, que se ha reportado por debajo de la primera profundidad óptica (Platt *et al.*, 1986, Millán-Núñez *et al.*, 1997, Camacho, 2006; Xiu *et al.*, 2007).

Platt *et al.*, (1988) propone modelar la distribución vertical de la *Chla* por medio de un ajuste gaussiano que considera un máximo en la columna de agua. Este máximo está descrito por cuatro parámetros (Fig. 1a), donde  $B_0$  es la concentración del pigmento en la línea-base,  $H$  es la *Chla* integrada bajo la curva gaussiana,  $S$  es una medida de la anchura del máximo y  $Z_m$  es la profundidad del máximo. Luego, Matsumara y Shiomoto (1993) introdujeron un quinto parámetro para representar el gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana ( $\alpha$ ) (Fig. 1b). Otros como Mignot *et al.*, (2011) ajustan el perfil de clorofila del mediante una gaussiana superpuesta a una disminución exponencial.



**Figura. 1.** Distribución vertical de la clorofila a  $B(z)$  representada por una curva Gaussiana con cuatro parámetros (Platt *et al.*, 1988.). Donde  $B_0$  es la concentración del pigmento en la línea-base ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $H$  es la clorofila integrada bajo la curva Gaussiana ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $S$  es el ancho del pico al máximo profundo de clorofila (m),  $Z_m$  es la profundidad al máximo de clorofila (m). (b) Mismos parámetros de la figura anterior, incluyendo (a) como la concentración de clorofila en  $Z_m$  ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) arriba de la línea-base y la pendiente ( $\alpha$ ), el gradiente vertical de la concentración de (Tomado de Matsumara, y Shiomoto, 1993).

Se realizaron estudios en la Corriente de California (ej. Millán-Núñez *et al.*, 1997) que reportaron que entre 1978 y 1990 los perfiles verticales de Chla con más de un máximo representan hasta un 18% del total de los perfiles de Chla y por lo tanto fueron rechazados del análisis realizado ya que no cumplían con los requisitos del modelo de gaussiano que propone Platt *et al.*, (1988). Richardson *et al.*, (2003) rechazaron el 26.5% de los perfiles del Sistema de Benguela por que no coincidiera con la curva gaussiana. En el Golfo de México, Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2008) rechazaron más del 8% de los perfiles evaluados porque tenían más de un máximo de Chla. Perfiles de Chla con dos, e incluso algunos con tres, máximos se han reportado en diferentes áreas del océano (Cullen y Eppley, 1981; Cullen, 1982), y los reportes de máximos profundos de clorofila (MPC) no siempre presentan un máximo o son muy profundos, por lo tanto, en este trabajo vamos a referirnos a ellos como *Máximo de Clorofila en la Zona Eufótica* (MCZE).

De acuerdo a Venrick *et al.*, (1984) el MPC, varía con la región y con la época año y esta variación se da en profundidad y concentración. Este mecanismo se desarrolla arriba de la nutriclina y cerca o abajo del fondo de la zona eufótica, (Riley *et al.*, 1949; Jerlov, 1959; Steele y Yentsch, 1960), es decir, está localizado a una profundidad donde el fitoplancton crece y es altamente dependiente de la disponibilidad de la luz y nutrientes (Millán-Núñez, *et al.*, 1997). Algunos de los factores que producen esta variación son los mencionados por Jerlov (1959), el cual indica que el MPC se debe al hundimiento de las células. Anderson (1969) menciona que el MPC es formado a profundidades por fitoplancton adaptado a bajos niveles de irradiancia de luz, incrementando la concentración de clorofila por célula. Cullen

(1982) mencionó que el MPC está típicamente asociado con la nutriclina. Lorenzen (1967) y Hobson y Lorenzen (1972) determinan que el MPC es generado por factores como la diferencia de pastoreo en niveles de la columna de agua, la adaptación a la luz y el cambio de la composición taxonómica. Takahashi y Hori (1984) relacionaron el MPC con la tasa de hundimiento del fitoplancton en aguas ricas en nutrientes. Pingree *et al.*, (1978) explicaron el incremento de la abundancia del fitoplancton como resultado de la estabilidad de la columna de agua y de acuerdo a la profundidad de la termoclina, el fitoplancton que está arriba de la termoclina se encuentra bien mezclado, pero con un déficit de nutrientes, donde las condiciones son poco favorables para el crecimiento, aquellos organismos abajo de la termoclina están en un régimen turbulento y la irradiancia es muy baja para el crecimiento. La termoclina contiene altas concentraciones de nutrientes, permitiendo un crecimiento y una acumulación del fitoplancton debido a que el tiempo de mezcla del agua es mayor que el tiempo de generación del alga. Cullen (1982) ha reportado distintas formas en la distribución vertical de la *Chla* la cual se ha utilizado como indicador de la biomasa del fitoplancton en la zona eufótica: una columna homogénea; un máximo superficial decreciendo a medida que aumenta la profundidad; un máximo subsuperficial con valores bajos en superficie y en el fondo de la zona eufótica; el MPC, y algunas ocasiones perfiles con un doble máximo (subsuperficial y profundo), (Cullen, 1982; Morel y Berthon, 1989; Millan-Núñez, 1997; Muñoz-Anderson *et al.*, 2015).

Las estimaciones de la producción primaria son fundamentales para comprender el funcionamiento de los ecosistemas marinos, y por lo tanto los posibles impactos del

cambio climático sobre la cadena alimentaria marina; dichas estimaciones de la producción primaria en la escala regional se pueden obtener a partir de modelos de regresión que relaciona la producción directamente a la clorofila obtenidos por satélite (Smith, 1981; Eppley *et al.*, (1982); Millan-Nuñez, 1997). Estos modelos se limitan a un área y un tiempo específico, ya que no incorporan información sobre la fisiología de la fotosíntesis y de la distribución de la biomasa de fitoplancton a lo largo de la columna de agua. Muchos modelos actuales que estiman la producción primaria a gran escala están basados en algoritmos que describen el efecto de la luz en la fotosíntesis (Platt y Sathyendranath, 1988, Smith *et al.*, 1988). Estos modelos fotosintéticos locales se pueden extender a grandes áreas mediante la estimación de la biomasa superficial de fitoplancton, teniendo como herramienta los sensores remotos (color del océano). Sin embargo, los sensores remotos no permiten determinar la biomasa de fitoplancton más allá de la primera profundidad óptica y esta sólo se puede obtener a partir de mediciones en cruceros oceanográficos. Como ya se mencionó la distribución vertical en la zona eufótica no es homogénea (Cullen,1982), por lo tanto la concentración de *Chl a* en superficie no puede ser representativa de la columna de agua y esta variabilidad se debe a distintos factores tales como: físicos (turbulencia causada por el viento en la capa de mezcla, incremento de la velocidad horizontal etc.), químicos (nutrientes, metales como el hierro) y biológicos (estado fisiológico del fitoplancton, pastoreo) (Lorenzen, 1967; Morel y Berthon, 1989; Cullen y Eppley 1981).

La aplicación de modelos basados en información de sensores remotos que permitan posteriormente la estimación de la PP en grandes áreas requiere de la elección de variables claves (Platt *et al.*, 1995). Esta es la razón por lo que es necesario conocer

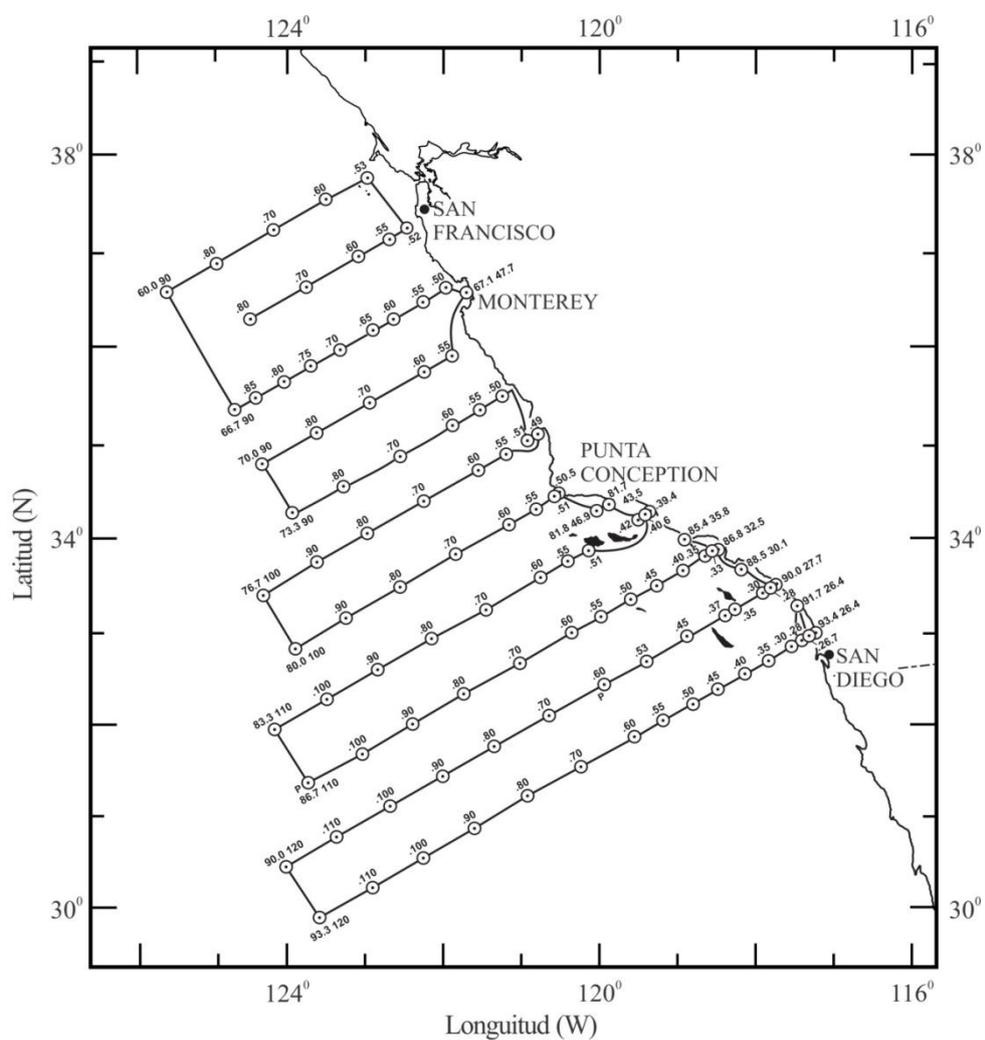
los parámetros que definen el perfil de  $Chl_a$ , ya que una de las limitaciones fundamentales de los datos de los sensores remotos es que no genera información sobre la estructura vertical de la biomasa del  $Chl_a$ . El uso de los valores derivados de sensores remotos para el cálculo de la productividad primaria en la zona eufótica, provoca una incertidumbre debido a que los datos de satélite, como ya se mencionó, solamente nos da información de la primera profundidad óptica (aproximadamente de seis a doce metros de profundidad dependiendo de la atenuación de la luz) (Kirk, 2011), por lo que en esta se plantean tres capítulos con los siguientes objetivos:

## **Objetivos**

1. Proponer una ecuación que permita un mejor ajuste a los perfiles verticales de clorofila mediante el uso de dos curvas gaussianas.
2. Estimar el perfil vertical de clorofila, mediante el uso de la concentración de clorofila superficial y parámetros gaussianos, en la región CALCOFI en la Corriente de California.
3. Conocer la variabilidad de los perfiles verticales de clorofila en la región CALCOFI de la Corriente de California.

## Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el Sistema de la Corriente de California (SCC), entre Punta Concepción (EUA) y  $34^{\circ}30'$  N, y el límite sur hasta la frontera con México (Fig. 2). En el SCC se han realizado muestreos oceanográficos periódicos (1951 hasta la fecha) los cuales han generado las series de tiempo oceanográficas más completas y extensas del mundo. Lynn y Simpson (1987) analizaron esta base de datos y definieron tres dominios: el oceánico, el costero y una zona de transición intermedia centrada de 200 a 300 km mar adentro. La Cuenca del Sur de California está localizada desde Punta Concepción hasta la frontera entre Estados Unidos y México, es una región costera relativamente productiva delimitada al norte y al este por la línea de costa de Norteamérica y al oeste por la Corriente de California. Es una región con una topografía de fondo compleja con islas y bancos a partir del talud continental hacia la costa y con un patrón de circulación ligeramente relacionado con el flujo principal de la Corriente de California (Smith *et al.*, 1988). Las condiciones eutróficas generalmente se limitan a una franja costera asociada con los eventos de surgencia especialmente durante los primeros meses del año (invierno y primavera) en la parte sur y a finales de primavera y verano en la parte norte (Millán-Núñez y Lara-Lara 1995). En la región sur de la Corriente de California (CC) frente a la Península de Baja California se da una fuerte variabilidad estacional e interanual en la biomasa del fitoplancton (Gaxiola-Castro *et al.*, 2008) forzada además por los ciclos El Niño-La Niña (Kahru y Mitchell 2002, Aguirre-Hernández *et al.*, 2004) y diversos procesos locales de mesoescala como surgencias costeras, remolinos, frentes y meandros (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004, Barocio-León *et al.*, 2007).



**Figura 2.** Área de estudio y localización de las estaciones de muestreo para el crucero enero-febrero 2011. El número de estaciones muestreadas varía con la época del año. Tomado de CALCOFI REPORTS, 2011.

## CAPITULO I

### **Ajuste a los perfiles verticales de clorofila mediante el uso de dos gaussianas.**

#### **Introducción**

Como se mencionó anteriormente, Platt *et al.*, (1988) propusieron modelar la distribución vertical de la Chla por medio de un ajuste gaussiano que considera un máximo en la columna de agua. Posteriormente Matsumara y Shiomoto (1993) introdujeron un quinto parámetro para representar el gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana ( $\alpha$ ) y Mignot *et al.*, (2011) ajustaron el perfil de clorofila mediante una gaussiana superpuesta a una disminución exponencial. En la Corriente de California Millán-Núñez *et al.*, (1997) reportaron entre 1978 y 1990 que los perfiles verticales de Chla con más de un máximo representan hasta un 18% del total de los perfiles de Chla y por lo tanto estos datos no se pudieron utilizar ya que no cumplían con los requisitos del modelo gaussiano que propone Platt *et al.*, (1988). En el Golfo de México Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2008) rechazaron más del 8% de los perfiles evaluados porque tenían más de un máximo de Chla. Richardson *et al.*, (2003) rechazaron el 26.5% de los perfiles del Sistema de Benguela por que no se podían ajustar con la curva Gaussiana. El objetivo de este capítulo es proponer una ecuación que permita el ajuste a los perfiles verticales de clorofila que tengan hasta dos máximos en la zona eufótica mediante el uso de una ecuación con dos curvas gaussianas.

## Metodología

Se utilizó un método basado en Algoritmos Genéticos (AG) como herramienta para el ajuste de la ecuación con dos curvas gaussianas a los perfiles verticales de clorofila. El AG es un método de búsqueda basado en probabilidad e inspirada en la evolución biológica y su base es genética molecular (Holland, 1975). Estos algoritmos son aplicables a la solución de una gran variedad de problemas de optimización basada en el comportamiento evolutivo de los sistemas biológicos donde cada iteración produce una gran población de soluciones potenciales, que son clasificados de acuerdo a la métrica darwiniana. Los Algoritmos Genéticos (AG) se implementan mediante la aplicación de ciertos operadores cíclicos en un sistema iterativo. La nomenclatura utilizada por lo general se refiere a conceptos ecológicos (Holland, 1975).

El conjunto que está siendo operado se llama población y cada elemento de la población se llama individuo. Cada individuo es una tupla y representa una posible solución al problema. La posición de cada elemento de la tupla se llama gen. El valor de un gen en un individuo en particular es un alelo. Los operadores más comúnmente utilizados en la AG son la selección, cruce y mutación. Dado que estos operadores modifican la población esta va cambiar (evoluciona) con el tiempo. El estado en el que una población existente al final de una iteración se llama generación (Alander, 1992).

La selección consiste en la evaluación de la aptitud de cada individuo. En este contexto, la aptitud es un valor cualitativo que describe la bondad de una solución.

La selección es el criterio utilizado para seleccionar los individuos a ser padres de la siguiente generación. El cruce es el mecanismo por el que los nuevos individuos se generan a partir de los individuos de la generación anterior. La mutación es capaz de cambiar alelos de una manera aleatoria. En este trabajo cada gen representa un parámetro del modelo ajustado y la selección es el inverso del error ajustado (Holland, 1975).

La aplicación de esta técnica de algoritmos genéticos se destaca por su simplicidad (Walsh *et al.*, 1966) y por su aplicación a una larga lista de fenómenos en diferentes campos científicos. Esta técnica se ha utilizado muy poco en oceanografía y sólo hay algunas referencias disponibles, tales como los trabajos de Zhai *et al.*, (2011) y Zhai *et al.*, (2012).

En este trabajo se utilizó la base datos de cuatro cruceros de CALCOFI realizados en el año 2011 (Fig.2). Se tomaron los perfiles de Chla hasta 150 m de profundidad debido a que el límite de la zona eufótica no pasa de esa profundidad (Millán-Núñez *et al.*, 1997). Los perfiles de Chla presentaron formas diferentes con uno o dos máximos en la zona eufótica, por lo que nos llevaron a proponer cuatro ajustes o modelos que a continuación se describen:

**Ecuación 1.** Modelo A (un máximo sin pendiente):

$$B_{(Z)} = B_0 + a \cdot \exp\left[-\frac{(Z - Z_m)^2}{2S^2}\right]$$

**Ecuación 2.** Modelo B (un máximo con pendiente):

$$B_{(Z)} = B_0 + \alpha Z + a \cdot \exp\left[-\frac{(Z - Z_m)^2}{2S^2}\right]$$

**Ecuación 3.** Modelo C (dos máximos sin pendiente):

$$B_{(z)} = B_0 + a_1 \cdot \exp\left[-\frac{(z-z_{m1})^2}{2S_1^2}\right] + a_2 \cdot \exp\left[-\frac{(z-z_{m2})^2}{2S_2^2}\right]$$

**Ecuación 4.** Modelo D (dos máximos con pendiente):

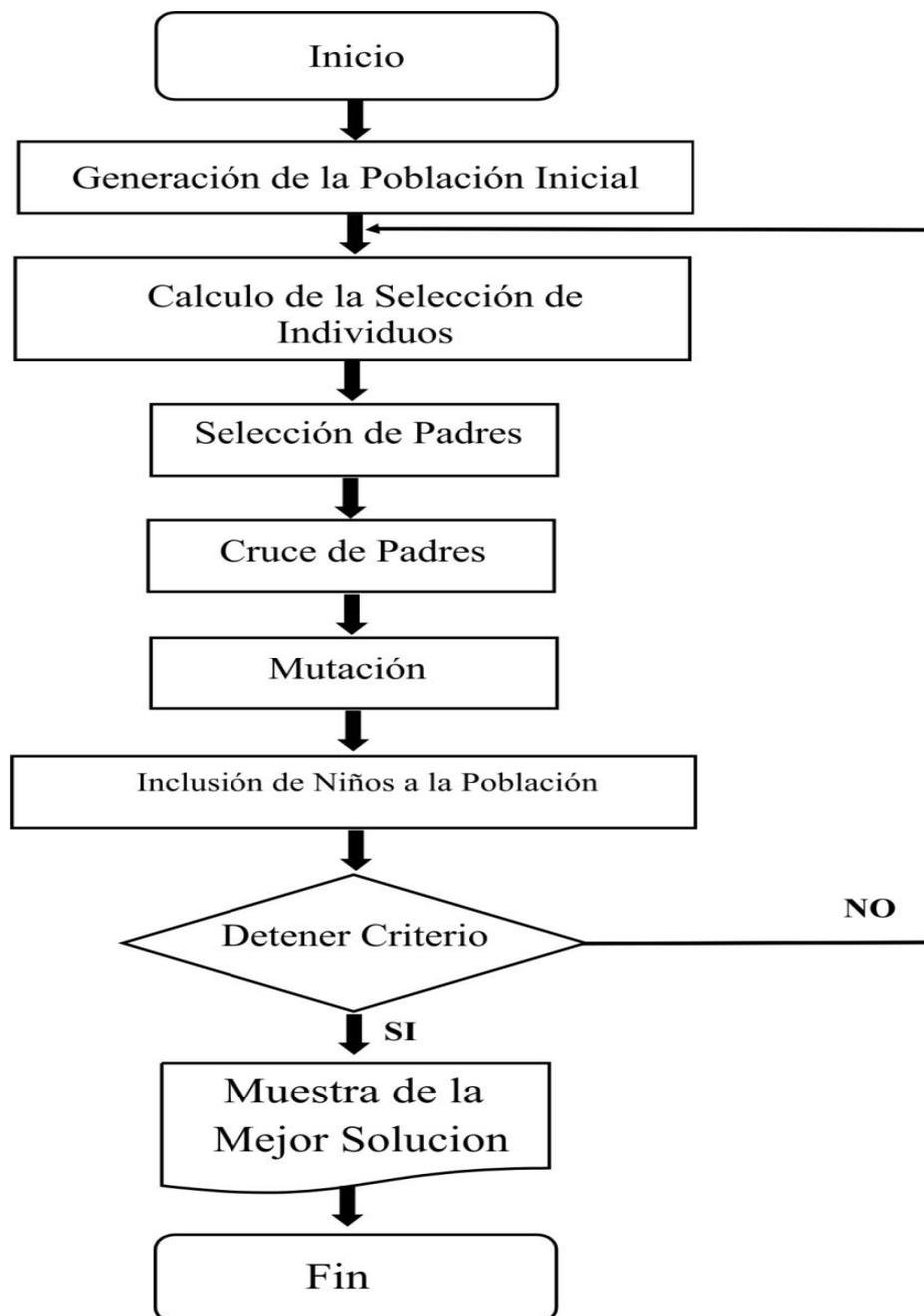
$$B_{(z)} = B_0 + \alpha Z + a_1 \cdot \exp\left[-\frac{(z-z_{m1})^2}{2S_1^2}\right] + a_2 \cdot \exp\left[-\frac{(z-z_{m2})^2}{2S_2^2}\right]$$

Dónde:  $B_{(z)}$  es la biomasa a profundidad  $z$ ,  $B_0$  es la concentración del pigmento en la línea-base,  $S_1$  y  $S_2$  es una medida del ancho de la curva,  $Z_m$  es la profundidad del máximo de clorofila,  $a_1$  y  $a_2$  son la máxima concentración de cada una de las curvas y  $\alpha$  es el gradiente vertical de la curva de la concentración de clorofila.

El número de iteraciones es muy importante en los AG ya que entre mayor sea este se encontrara una mejor solución a un problema, pero también requerirá mayor tiempo de cómputo. El tiempo de ajuste del perfil depende del tamaño de la memoria del ordenador que se está utilizando. Para determinar el número óptimo para el mejor ajuste, se evaluaron 106 perfiles para cruceros realizados en enero de 2011, mediante la implementación de los cuatro modelos con diferentes números de iteraciones: 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500 y 2000. El diagrama de flujo utilizado en el AG para la obtención de cada uno perfiles verticales de clorofila de ajuste se muestra en la figura 3. La población (número de individuos) y el número de iteraciones fueron manejados en la misma proporción (mismo número de genes y el número de iteraciones). La evaluación de cada perfil se realizó cinco veces para cada número de iteración para cada modelo. Los resultados del perfil de Chla apropiado se compararon por medio del error cuadrático medio expresado por la siguiente ecuación:

**Ecuación 5:**

donde  $y_i$  = valor pronosticado,  $x_i$ = valor observado  $N$  = número de valores observados es decir la medición de las diferencias en la media entre la predicción y los valores observados (Pielke, 2002). Valores RMSE entre los modelos mostraron que el modelo D (dos máximos con gradiente) con 1250 iteraciones dio el RMSE más bajo en la mayoría de las evaluaciones (Tabla 1). Una vez que se estableció el número óptimo de iteraciones como 1250 se buscó encontrar el modelo que mejor se ajusta a los datos del perfil de clorofila de los cuatro cruceros CALCOFI en 2011.



**Figura 3.** Diagrama de flujo que muestra los pasos que utilizan los algoritmos genéticos en el ajuste de los perfiles verticales de clorofila.

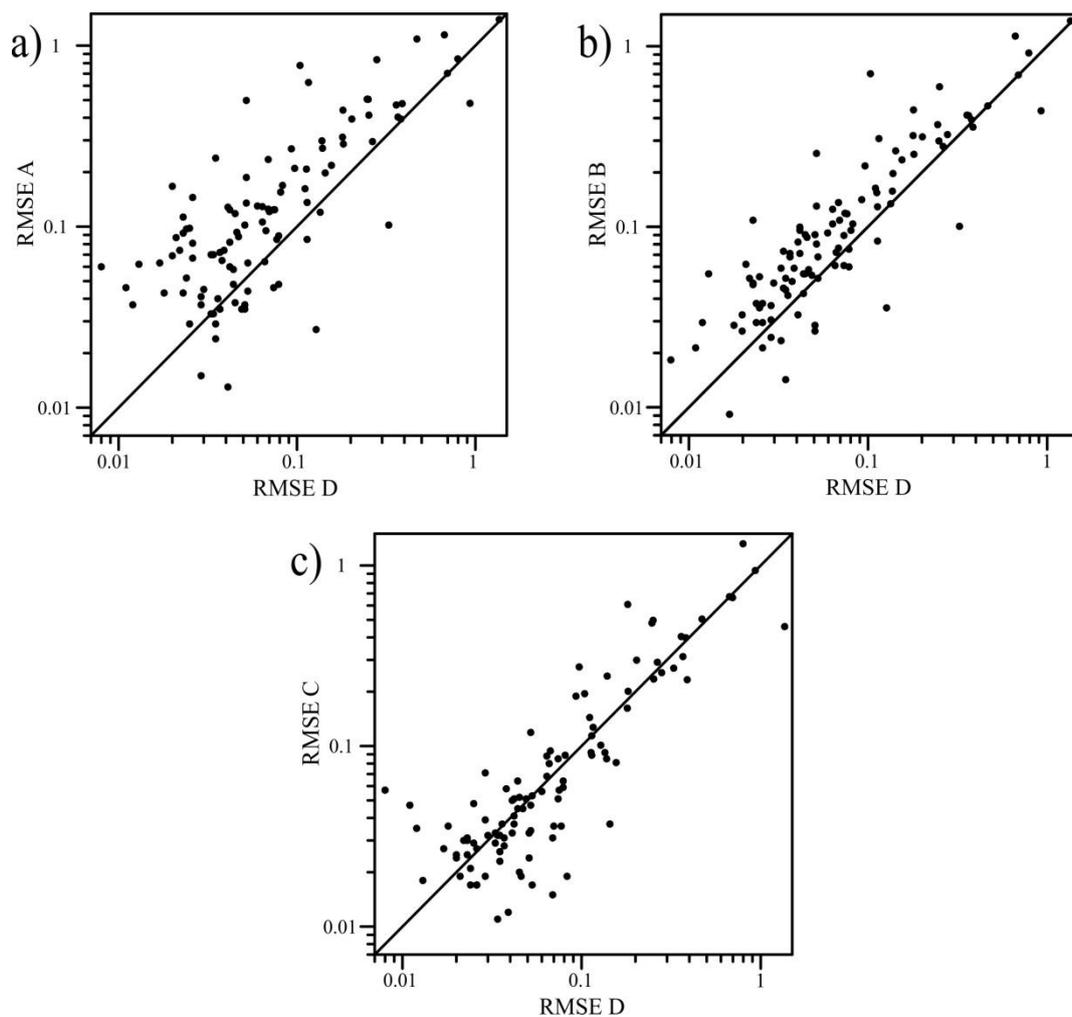
## Resultados

Se utilizaron 1250 iteraciones para comparar el ajuste de cada modelo a los datos *in situ*, tomando en cuenta el valor RMSE y utilizando como referencia el modelo D (Fig. 4), ya que este modelo es a la vez el más completo y el que considera las opciones más adecuadas. Los valores RMSE del modelo A son generalmente más altos y presentan datos más dispersos en comparación con el modelo D (Fig. 4a). La misma situación se presenta para el modelo B (Fig. 4b). Por otro lado el RMSE para el Modelo C fue similar al valor de RMSE del modelo de D (Fig. 4c). El 92% por ciento de los perfiles pueden ser ajustados con los modelos C y D ya que presentan el RMSE más bajo con un porcentaje de 33.96% para el modelo C y 66.04% para el modelo D.

Con el objetivo de elegir un modelo que ajuste el mayor número de perfiles se calcularon las diferencias entre los valores RMSE de los modelos C y D (Tabla 2). Siempre que el modelo C mostró un menor valor de RMSE fue muy similar al del modelo D. De un total de 106 perfiles el 72% del porcentaje de la diferencia de los valores RMSE entre modelos C y D se distribuyeron entre  $\pm 50\%$ . Se debe considerar que si el porcentaje de la diferencia es positiva el modelo D tiene el valor más bajo de RMSE. Además el 60% de los datos *in situ* mostró una disminución exponencial con la profundidad, lo que contribuyó para seleccionar Modelo D como el mejor modelo de ajuste.

**Tabla 1.** Modelo que obtuvo el menor RMSE obtenido después de cinco evaluaciones seguidas con 1250 iteraciones aplicadas a los modelos A, B C y D. Después de 1000 iteraciones el modelo que mostro el menor RMSE fue el modelo D. La representación D/C indica que los modelos C y D mostraron un valor de RMSE similar.

	<b>Modelo con menor RMSE</b>				
<b>Iteraciones</b>	<b>Evaluación 1</b>	<b>Evaluación 2</b>	<b>Evaluación 3</b>	<b>Evaluación 4</b>	<b>Evaluación 5</b>
<b>2000</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D/C</b>	<b>D/C</b>	<b>D</b>
<b>1500</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D/C</b>
<b>1250</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>D</b>
<b>1000</b>	<b>D</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>D</b>
<b>750</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>500</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>250</b>	<b>A</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>



**Figura 4.** Comparación del valor de RMSE entre los modelos D y modelos A, B y C usados en el ajuste de perfiles verticales de Chl $a$  para cruceros CALCOFI en 2011. 4a: Modelos A y D. 4b: Modelos B and D. 4c: Modelos C y D.

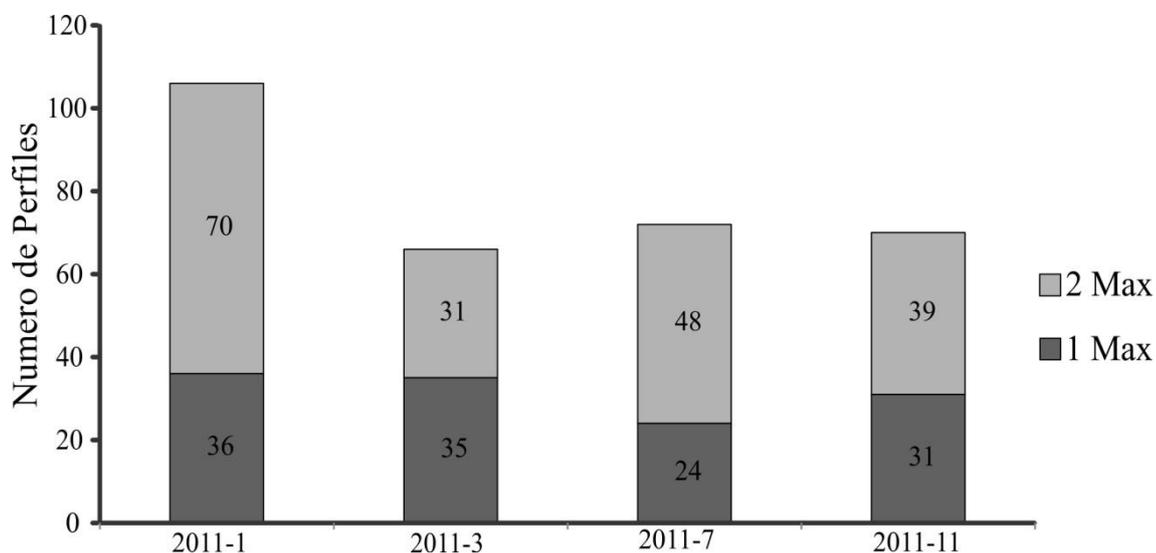
**Tabla 2.** Algunos resultados de valores de RMSE de los modelos C y D y su diferencia en porcentaje (%DIF) para cruceros 2011-1. T = transecto, S= estación. %DIF = [100 x (RMSE modelo C – RMSE modelo D/ RMSE modelo D)].

T	S	RMSE D	RMSE C	%DIF	T	S	RMSE D	RMSE C	%DIF
93.4	26.4	0.093	0.189	103.23	90	100	0.011	0.047	327.27
93.3	26.7	0.060	0.056	-6.67	90	90	0.012	0.035	191.67
91.7	26.4	0.066	0.080	21.21	90	80	0.026	0.017	-34.62
93.3	28	0.034	0.032	-5.88	90	70	0.022	0.030	36.36
93.3	30	0.025	0.029	16.00	90	60	0.052	0.119	128.85
93.3	35	0.036	0.037	2.78	90	53	0.052	0.047	-9.62
93.3	40	0.021	0.019	-9.52	90	45	0.064	0.068	6.25
93.3	45	0.104	0.195	87.50	90	37	0.135	0.092	-31.85
93.3	50	0.180	0.162	-10.00	90	35	0.139	0.244	75.54
93.3	55	0.029	0.019	-34.48	90	30	0.114	0.089	-21.93
93.3	60	0.083	0.019	-77.11	90	28	0.670	0.672	0.30
93.3	70	0.042	0.041	-2.38	90	27.7	0.470	0.505	7.45
93.3	80	0.074	0.051	-31.08	88.5	30.1	0.114	0.114	0.00
93.3	90	0.026	0.017	-34.62	86.8	32.5	0.280	0.255	-8.93
93.3	100	0.051	0.033	-35.29	86.7	33	0.265	0.291	9.81
93.3	110	0.051	0.024	-52.94	85.4	35.8	0.181	0.609	236.46
93.3	120	0.029	0.039	34.48	86.7	35	0.203	0.299	47.29
90	120	0.033	0.033	0.00	86.7	40	0.368	0.313	-14.95
90	110	0.008	0.057	612.50	86.7	45	0.070	0.036	-48.57

T	S	RMSE D	RMSE C	%DIF	T	S	RMSE D	RMSE C	%DIF
86.7	50	0.253	0.235	-7.11	80	50.5	0.064	0.088	37.50
86.7	55	0.075	0.057	-24.00	80	51	0.111	0.144	2973
86.7	60	0.037	0.028	-24.32	80	55	0.360	0.404	12.22
86.7	70	0.024	0.017	-29.17	80	60	0.933	0.939	0.64
86.7	80	0.023	0.025	8.70	80	70	0.069	0.015	-78.26
86.7	90	0.013	0.018	38.46	80	80	0.079	0.064	-18.99
86.7	100	0.017	0.027	58.82	80	90	0.033	0.029	-12.12
86.7	110	0.035	0.026	-25.71	80	100	0.044	0.064	45.45
83.3	110	0.026	0.027	3.85	76.7	100	0.035	0.032	-8.57
83.3	100	0.023	0.030	30.43	76.7	90	0.045	0.052	15.56
83.3	90	0.045	0.020	-55.56	76.7	80	0.039	0.012	-69.23
83.3	80	0.020	0.024	20.00	76.7	70	0.144	0.037	-74.31
83.3	70	0.049	0.051	4.08	76.7	60	0.138	0.085	-38.41
83.3	60	0.113	0.092	-18.58	76.7	55	0.182	0.201	10.44
83.3	55	0.327	0.270	-17.43	76.7	49	0.389	0.233	-40.10
83.3	51	0.030	0.032	6.67	76.7	51	0.247	0.480	94.33
83.3	42	0.251	0.497	98.01	73.3	50	0.037	0.031	-16.22
83.3	40.6	0.382	0.398	4.19	73.3	55	0.053	0.017	-67.92
83.3	39.4	0.042	0.037	-11.90	73.3	60	0.051	0.033	-35.29
81.7	43.5	0.116	0.127	9.48	73.3	70	0.046	0.019	-58.70
81.8	46.9	0.156	0.081	-48.08	73.3	80	0.034	0.011	-67.65

T	S	RMSE D	RMSE C	%DIF	T	S	RMSE D	RMSE C	%DIF
73.3	90	0.025	0.048	92.00	60	90	0.047	0.045	-4.26
70	90	0.024	0.021	-12.50	60	80	0.041	0.050	21.95
70	80	0.018	0.036	100.00	60	70	0.023	0.031	34.78
70	70	0.097	0.274	182.47	60	60	0.069	0.031	-55.07
70	60	0.053	0.053	0.00	60	53	0.697	0.664	-4.73
70	55	0.041	0.033	-19.51	63.3	52	0.797	1.646	106.52
67.1	47.7	1.361	0.459	-66.27	63.3	55	0.081	0.089	9.88
66.7	50	0.044	0.045	2.27	63.3	60	0.074	0.085	14.86
66.7	55	0.038	0.058	52.63	63.3	70	0.029	0.071	144.83
66.7	60	0.042	0.051	21.43	63.3	80	0.052	0.034	-34.62
66.7	65	0.128	0.101	-21.09	63.3	52	0.797	1.646	106.52
66.7	70	0.067	0.094	40.30	63.3	55	0.081	0.089	9.88
66.7	75	0.079	0.059	-25.32	63.3	60	0.074	0.085	14.86
66.7	80	0.035	0.023	-34.29	63.3	70	0.029	0.071	144.83
66.7	85	0.077	0.036	-53.25	63.3	80	0.052	0.034	-34.62

Se analizaron datos *in situ* de un total de 315 perfiles provenientes de 4 cruceros CALCOFI realizados en 2011 (invierno, primavera, verano y otoño), para determinar si los perfiles verticales de Chla presentaban uno o dos máximos. La decisión se basó en la observación individual de cada uno de los perfiles siendo clasificados en una de las dos categorías (uno o dos máximos). Del total de los 315 perfiles evaluados, el porcentaje de perfiles con dos máximos de Chla por crucero fue de 66, 47, 67, y 56% respectivamente (Fig. 5). Una vez que el modelo D fue definido como el más apto para el ajuste de perfiles verticales en la zona de estudio con un número óptimo de 1250 iteraciones se ajustaron el resto de los datos *in situ* de los cruceros CALCOFI realizados en 2011. Todos los perfiles fueron evaluados cinco veces con el modelo D obteniendo el mismo RMSE después de la tercera evaluación.



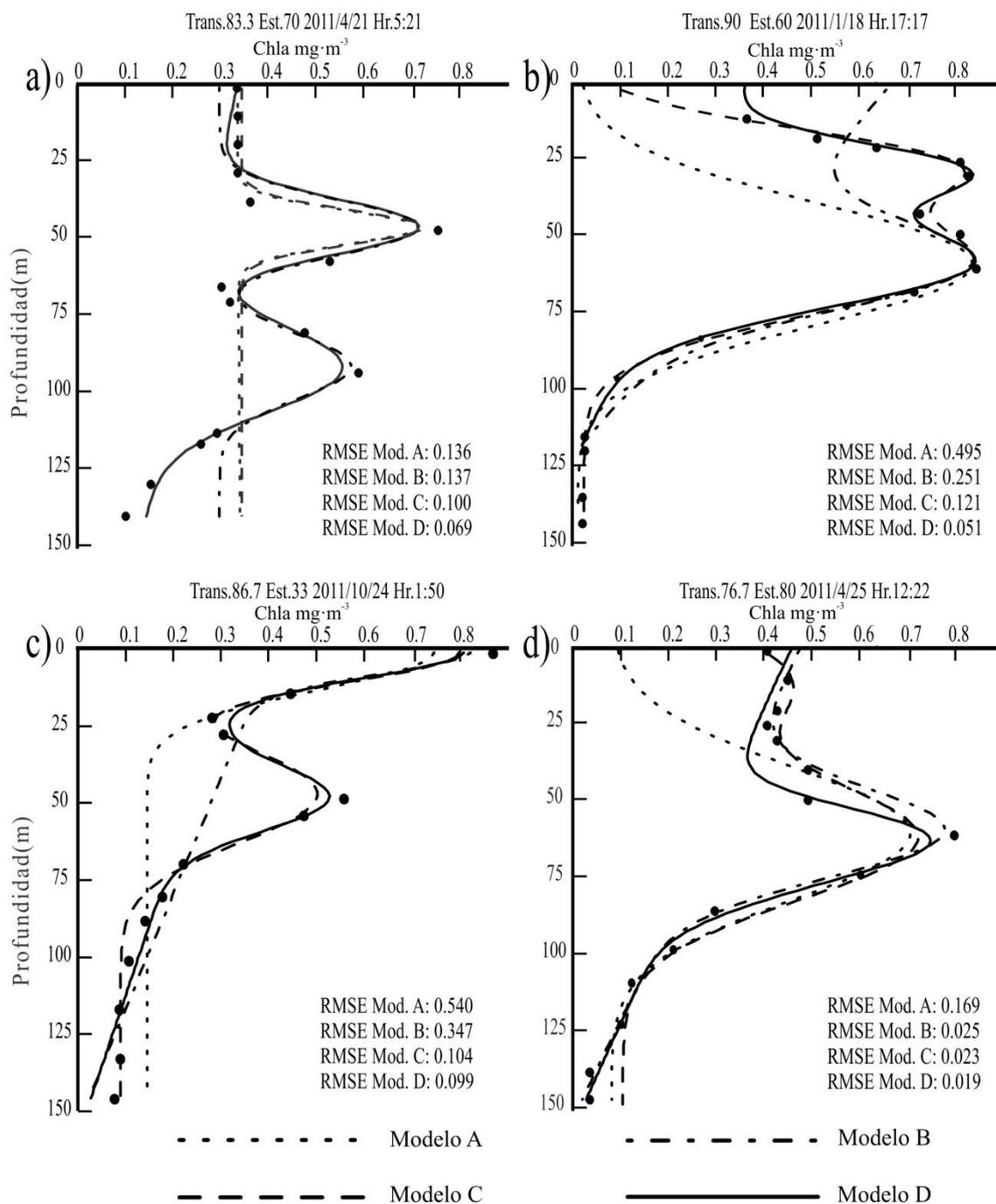
**Figura 5.** Total de perfiles verticales de Chla para cruceros CALCOFI en 2011. 1(invierno), 3 (primavera), 7(verano), 11(otoño). Número de perfiles con un máximo (abajo) y con dos máximos (arriba) para cada crucero.

La figura 6 (a-d) muestra algunos perfiles verticales de Chla *in situ* y el resultado del ajuste con los cuatro modelos. La Figura 6a muestra que el modelo D fue el que mejor se ajustó al perfil *in situ*, con un bajo valor RMSE seguido por el modelo C. Los modelos A y B ajustan bien para el primer máximo pero no consideran el segundo máximo. En la figura 6b se presenta otro ejemplo de un perfil con un doble máximo y el modelo D fue el que presentó el RMSE más bajo. El modelo C muestra el segundo mejor RMSE con los valores bajos superficiales probablemente porque este modelo no incluye la pendiente ( $\alpha$ ), que a su vez ayuda al modelo D como el que mejor se evalúa el perfil (RMSE más bajo). En la figura 6c se muestra un perfil con una máximo Chla en superficie y un segundo máximo a 50 m. Los cuatro modelos presentan un buen ajuste para los valores de superficie pero los modelos A y B no ajustan el segundo máximo. La figura 6d muestra un perfil con la disminución en los valores de Chla con la profundidad pero con una concentración máxima alrededor de 60 m. Es interesante notar que el Modelo A reproduce bastante bien el máximo subsuperficial pero el valor de superficie es muy bajo.

Comparando el modelo D y el modelo A cuando el perfil muestra un solo máximo de Chla la diferencia en los valores de RMSE es pequeña, el valor de la Chla integrada es muy similar, el valor de  $Z_m$  es casi el mismo, en general la suma de los valores de  $a_1$  y  $a_2$  en el modelo D corresponden al valor de  $a_1$  en el modelo A, con un error de  $\pm 10\%$ , mientras que los valores de  $B_0$  y  $S$  muestran mayores diferencias (tabla 3).

Las figura 7 a-d, muestra ajustes de perfiles verticales con los modelos C y D. En los dos primeros perfiles (fig. 7a y 7b) el mejor ajuste lo presenta el modelo D, mientras que el modelo C presenta un mejor ajuste en las dos últimas figuras (Fig. 7c y 7d). Ambos modelos presentan valores bajos de RMSE y la diferencia entre ellos puede

estar asociada con la leve diferencia en la pendiente de los perfiles. Debido al proceso iterativo de algoritmos genéticos se recomienda ejecutar el modelo D a los

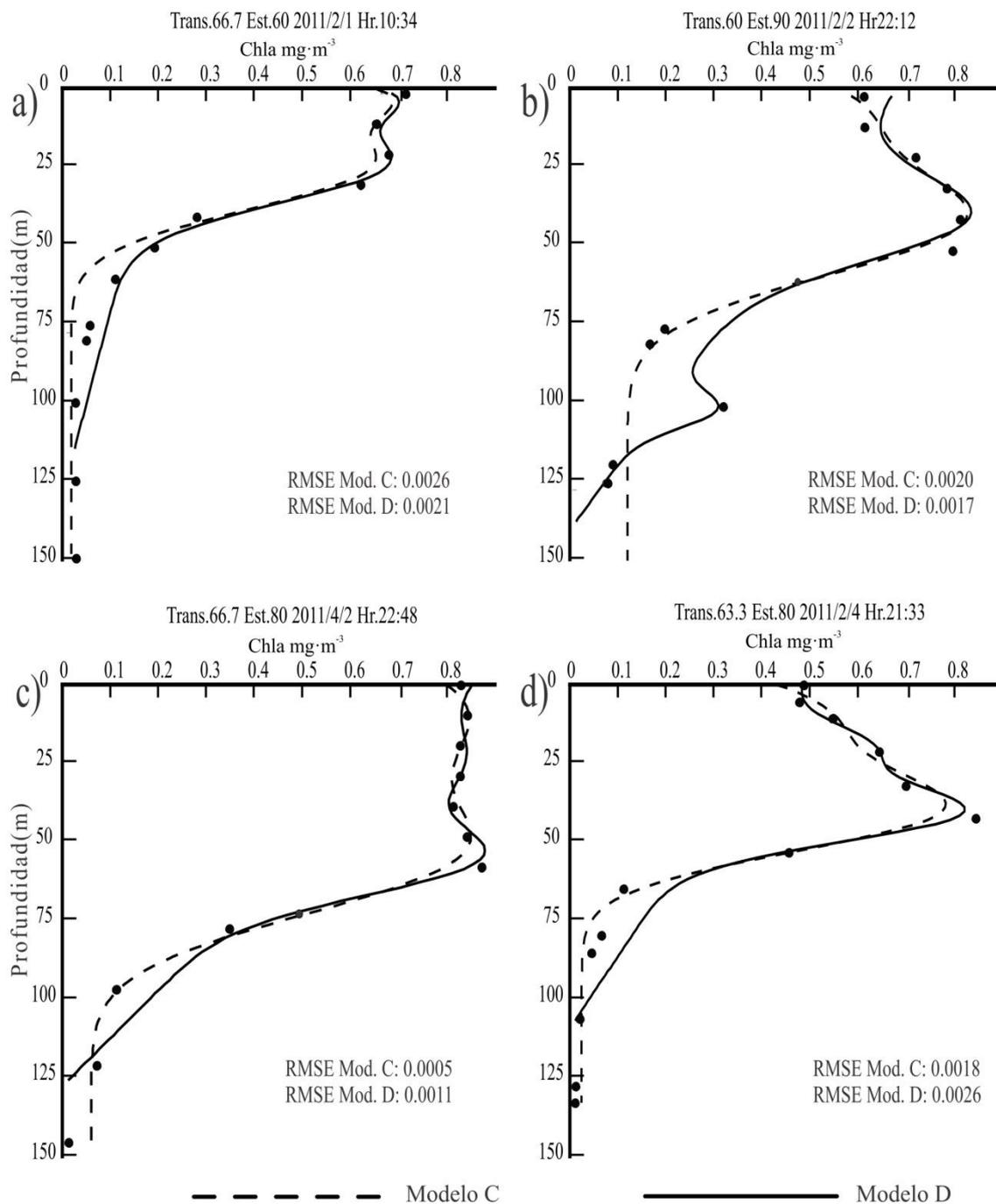


**Figura 6.** Perfil vertical de Chla ajustado con cuatro (a), (b), (c) y (d). Los puntos negros representan los datos *in situ*. También se incluye transecto, estación, día y hora de cada perfil.

datos de clorofila *in situ* al menos 3 veces para obtener el ajuste con el RMSE más bajo. En nuestro caso con una PC con 8 GB de memoria RAM y 3.4 GHz de procesador Intel, el tiempo de computadora fue de 5 minutos para cada perfil. Corrimos 5 veces cada perfil produciendo resultados RMSE sin cambios después de la tercera ejecución. Utilizando la técnica de algoritmos genéticos se abre la posibilidad de evaluar casi todos los perfiles verticales de Chla en la Corriente de California ya que entre el 30 y el 60% de estos perfiles tenía más de un máximo Chla.

**Tabla 3.** Parámetros de los perfiles verticales de Chla con un solo máximo, obtenidos con los modelos A y D. T = transecto, S = Estación, M = modelo, RMSE = Error cuadrático medio residual, H = perfil integrado de Chla, NaN dato no disponible, %DIF =  $[100 * (\text{RMSE del modelo A} - \text{RMSE modelo D} / \text{RMSE modelo D})]$ .

T	S	M	RMSE	H	$b_0$	$\alpha$	$Z_{m1}$	$Z_{m2}$	$S_1$	$S_2$	$a_1$	$a_2$	%DIF
83.3	42	D	0.25	155.61	1.42	-0.01	20.41	20.02	4.94	11.12	1.78	1.78	100.00
		A	0.50	142.83	0.35	NaN	20.41	NaN	10.31	NaN	3.91	NaN	
70	60	D	0.05	49.57	0.15	0.00	9.18	7.66	13.60	19.83	0.73	0.73	20.00
		A	0.06	49.04	0.01	NaN	9.18	NaN	17.57	NaN	1.54	NaN	
90	39.4	D	0.67	179.99	0.60	-0.01	5.30	2.39	7.3	6.0	6.67	6.75	71.64
		A	1.15	191.51	0.16	NaN	5.30	NaN	6.2	NaN	14.4	NaN	
85	40	D	0.18	119.29	3.31	-0.06	10.04	18.42	3.18	4.83	1.53	1.78	144.44
		A	0.44	121.65	0.96	NaN	10.04	NaN	10.97	NaN	3.65	NaN	
83	30	D	0.25	155.61	1.41	-0.01	20.40	20.02	4.97	11.12	1.78	1.78	104.00
		A	0.51	142.84	0.35	NaN	20.40	NaN	10.32	NaN	3.91	NaN	
81	70	D	0.12	37.20	1.67	0.00	4.89	0.05	2.20	2.29	1.37	1.29	425.00
		A	0.63	34.55	1.77	NaN	4.89	NaN	2.14	NaN	2.50	NaN	
70	120	D	0.05	49.57	0.14	-0.01	9.18	7.66	13.6	19.83	0.72	0.73	20.00
		A	0.06	49.04	0.01	NaN	9.18	NaN	17.57	NaN	1.54	NaN	



**Figura 7.** Perfiles verticales de Chla ajustados con los modelos C y D (a, b, c y d). Los puntos negros representan los datos *in situ*. También se incluye transecto, estación, día y hora del perfil.

## Discusión y Conclusiones

La distribución vertical de la *Chla* en la zona eufótica se ha reportado de diferentes formas como: una distribución homogénea; un máximo subsuperficial disminuyendo gradualmente con la profundidad; un máximo sub-superficial a media profundidad y en la parte inferior de la zona eufótica; un máximo profundo de *Chla* y; en algunas ocasiones, un doble máximo (Cullen y Eppley, 1981; Platt *et al.*, 1988; Millán-Núñez, *et al.*, 1997; Espinoza-Carreón *et al.*, 2001, Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2008, Muñoz-Anderson *et al.*, 2015), lo que hace muy difícil el utilizar un modelo apropiado para una sola gaussiana en todos los perfiles (Platt *et al.*, 1988; Matsumara y Shiomoto, 1993).

En este trabajo se comparó la biomasa integrada estimada por el modelo A y el modelo D de los datos de la figura 6. En todos los casos con el modelo A se obtuvieron valores más bajos que con los obtenidos con el modelo D, en esencia 5.3% (Fig. 6a), 23.1% (Fig. 6b), 25.5% (Fig. 6c), y 5.0% (Fig. 6d) más bajos, lo que indica que el no tener en cuenta el segundo máximo puede llevar a una importante subestimación de la biomasa integrada en la zona eufótica. Tal vez el segundo máximo no es importante en sí mismo pero la posibilidad de incluir un segundo máximo permite la disminución en el RMSE alrededor del perfil vertical (Tabla 2). Es importante considerar si los dos máximos para un perfil son a la vez de una magnitud significativa. Para decirlo de otra manera el segundo máximo puede ser insignificante en términos de biomasa de fitoplancton.

El modelo D, dos gaussianas con pendiente se presenta como la mejor opción de ajuste en el modelado de los perfiles verticales de *Chla* ya que presenta el RMSE

más bajo en la mayoría de los ajustes en comparación con otros tres modelos. Además los parámetros de modelo D incluyen los otros tres modelos es decir, que puede adaptarse a cualquier tipo de perfil vertical con uno o dos máximos con o sin gradiente. Este modelo fue capaz de adaptarse a casi todos los perfiles de  $Chl a$  en la zona CALCOFI. Este modelo tiene la capacidad para adaptarse a los perfiles verticales de clorofila con uno o dos máximos incluyendo aquellos que se producen con un gradiente con la profundidad lo que lo hace útil para cualquier situación. Aunque los modelos fueron probados con datos de la Corriente de California se recomienda utilizar el modelo en otras regiones oceánicas donde se producen los máximos dobles de clorofila.

## CAPITULO II

### **Estimación del perfil vertical de clorofila, mediante el uso de la clorofila superficial y parámetros gaussianos, en la región CALCOFI en la Corriente de California.**

#### **Introducción**

La concentración de clorofila *a* (Chl*a*) se ha utilizado como indicador de la biomasa del fitoplancton en el océano (Cullen, 1982). Las distintas formas de distribución vertical de la Chl*a* en la zona eufótica se ha reportado de diferentes maneras: una distribución homogénea; un máximo superficial decreciendo a medida que aumenta la profundidad; un máximo subsuperficial con valores bajos en superficie y en el fondo de la zona eufótica; un máximo profundo de clorofila (MPC) y en algunas ocasiones un doble máximo (subsuperficial y profundo) entre otros perfiles (Cullen, 1982; Morel y Berthon, 1989; Millan-Nuñez, 1997; Muñoz-Anderson *et al.*, 2015).

Se ha propuesto el uso de sensores remotos para estimar la productividad primaria fitoplanctónica (Platt *et al.*, 1995) a partir de modelos de regresión que relaciona la producción primaria directamente con los datos de Chl*a* obtenidos por el sensor del satélite (Smith *et al.*, 1982). Estos modelos sin embargo se limitan a un área y un tiempo específico ya que no incorporan información sobre la fisiología de la fotosíntesis y la distribución de la biomasa a lo largo de la columna de agua (Platt *et al.*, 1988). Esto requiere el uso de modelos analíticos donde se deben introducir los valores de Chl*a* en cada profundidad. Esta es la razón por lo que es necesario conocer el perfil vertical ya que es una de las limitaciones fundamentales de los datos del sensor del satélite, ya que no genera información sobre la estructura vertical de la

Chla. El uso de los valores obtenidos por los sensores para el cálculo de la productividad primaria en la zona eufótica provoca una incertidumbre debido a que estos datos solamente nos dan información de la primera profundidad óptica (Kirk, 2011). En especial en el sur de la Corriente de California la primera profundidad óptica se encuentra entre seis y doce metros de profundidad (Millan-Nuñez, *et al.*, 1997).

Platt y Sathyendranath (1988) estimaron la productividad primaria en el Atlántico Norte, por lo que dividieron en regiones limitadas por la batimetría y tres zonas latitudinales (ecuatorial, subtropical y transicional) con un total de nueve regiones y obtuvieron los valores promedios de los parámetros de los perfiles por épocas del año. Por otro lado Platt *et al.* (1991) dividieron el Atlántico Norte en 12 regiones incluyendo una región latitudinal más (subártico). Estos autores concluyeron que se debe de reducir el área en provincias para poder obtener mejores resultados, tomando como provincia el área geográfica en que las características fisicoquímicas del agua se mantienen de una manera casi constante o sin cambios bruscos en un periodo dado. Sathyendranath *et al.*, (1995). Estos autores dividieron el océano Atlántico en cuatro dominios biogeográficos con características físicas únicas que dominan la ecología del fitoplancton. Cada dominio se subdividió en varias provincias biogeográficas como un componente del sistema global.

Millan-Nuñez (1996) trabajó con la caracterización de perfiles verticales de Chla en la región CALCOFI, ajustando a una sola curva gaussiana cada perfil, calculando parámetros como la concentración del pigmento en la línea-base ( $B_0$ ); la profundidad

del máximo de clorofila ( $Z_m$ ); la concentración del máximo de clorofila ( $S$ ) y la biomasa integrada ( $H$ ). En ese trabajo la región de estudio se dividió en ocho provincias y los perfiles también fueron separados temporalmente en los meses fríos y calientes. Todos los perfiles verticales fueron agrupados en siete categorías considerando intervalos de concentración de clorofila superficial.

Por lo anterior el objetivo de este trabajo es estimar la relación de la clorofila  $a$  superficial ( $Chl_s$ ) con los parámetros gaussianos del perfil vertical de clorofila  $a$ , obtenidos mediante el modelo de doble gaussiana (Modelo D, Capítulo I). Esto permitirá estimar el perfil vertical de  $Chl_a$  mediante el uso de la información de sensores remotos para mejorar las estimaciones de producción primaria

## **Metodología**

Se utilizó la base de datos de  $Chl_a$  CALCOFI de 2000 a 2011 (Fig. 2) con un total de 3395 perfiles verticales a los cuales se les ajustó el modelo D descrito en el capítulo anterior (publicado en Muñoz Anderson *et al.*, 2015). Con este procedimiento fue posible estimar los parámetros que describen cada perfil.

Una vez obtenidos los parámetros de cada perfil vertical de  $Chl_a$  de los diferentes cruceros de cada época y años éstos se agruparon en espacio y tiempo y por concentración de clorofila superficial (categorías) de acuerdo a lo establecido por Millan-Núñez *et al.*, (1997). Esto es, los perfiles fueron clasificados de acuerdo a:

- División por Región: Norte y Sur, Oceánico y Costera
- División por Época: Caliente y Fría
- División por Categoría (Concentración de Chl*a* superficial):
  - C1  $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
  - C2  $> 0.1 \text{ y } \leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
  - C3  $> 0.2 \text{ y } \leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
  - C4  $> 0.5 \text{ y } \leq 1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
  - C5  $> 1.0 \text{ y } \leq 2.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
  - C6  $> 2.0 \text{ y } \leq 5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
  - C7  $> 5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

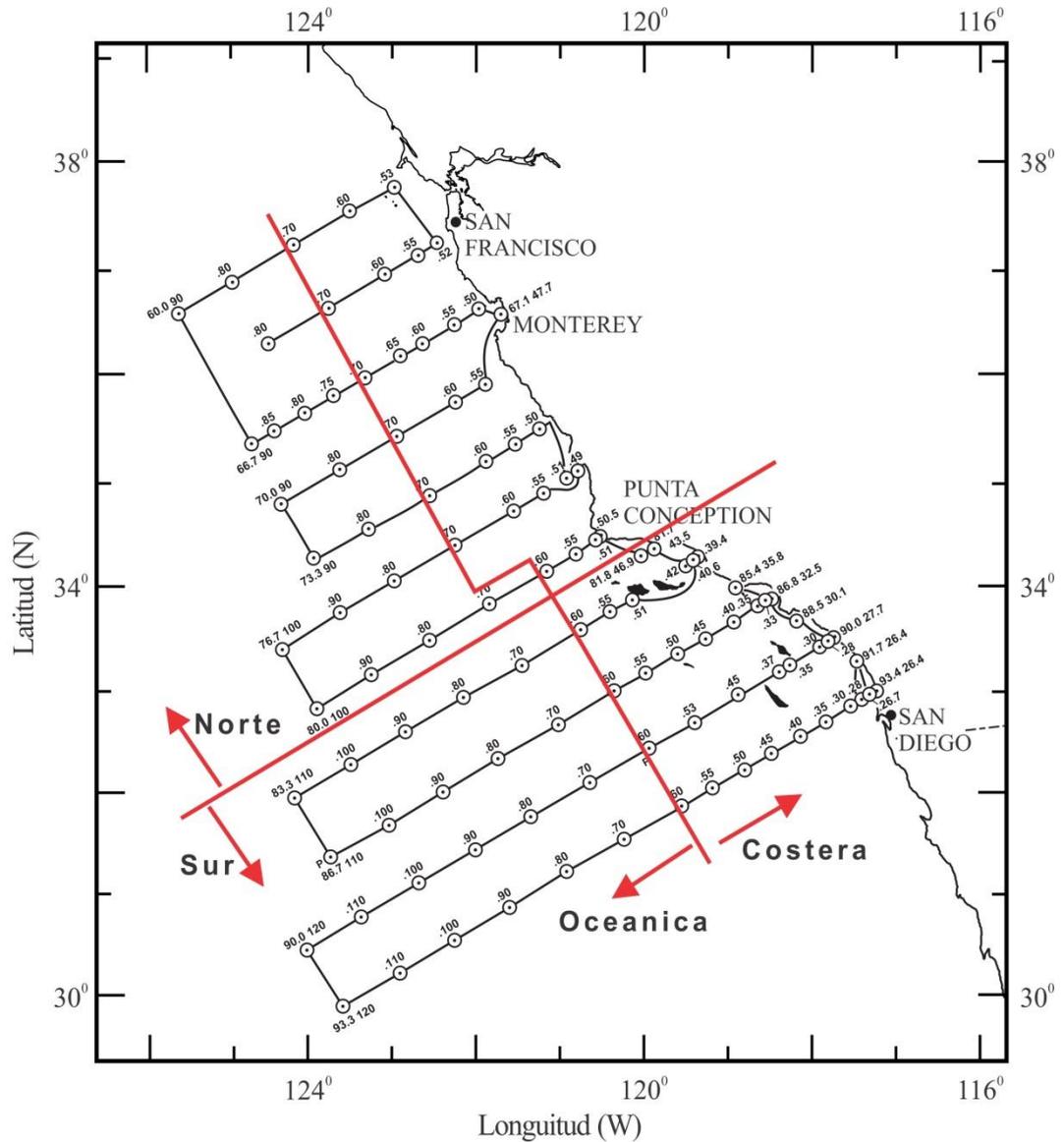
La división Norte se consideró a partir del transecto 80 al 60 y la región Sur del transecto 83 al 93 de la zona CALCOFI (Fig.8). La división Costera se consideró para la región norte a partir de la línea 70 hacia la costa y división oceánica hacia el océano. En la región sur la zona costera se consideró a partir de la línea 60 hacia la costa y hacia el océano se consideró como zona oceánica (Fig. 8), por otra parte se agruparon por época del año frío (enero a mayo) y caliente (junio a diciembre). Las ocho divisiones están indicadas en la Tabla 4, son:

**Tabla 4.** División del área de estudio. Regiones Norte y Sur, División Costera y Oceánica, Época: Fría y Caliente y la abreviatura correspondiente de cada una de ellas.

Región	División	Época	Abreviatura
Norte	Costera	Caliente	(NCC)
Norte	Costera	Fría	(NCF)
Norte	Oceánica	Caliente	(NOC)
Norte	Oceánica	Fría	(NOF)
Sur	Costera	Caliente	(SCC)
Sur	Costera	Fría	(SCF)
Sur	Oceánica	Caliente	(SOC)
Sur	Oceánica	Fría	(SOF)

Cada uno de los parámetros obtenidos en el ajuste de los perfiles fue agrupado en cada zona y época. Se realizó una regresión lineal teniendo como variable independiente la Chl*a* superficial (Chl*s*) obtenida de la base de datos CALCOFI, y como variables dependientes los ocho parámetros obtenidos del ajuste del perfil

vertical de clorofila. Se utilizaron los datos promedio para cada variable. No todos los resultados arrojaron coeficientes de determinación altos ( $R^2$  con valores mayores a 0.55), para algunos parámetros se aplicó una regresión una vez transformados los datos con un algoritmo natural, o de regresión de segundo o tercer orden según se requirió. (Las regresiones se observan en las figuras de la 8 a la 31). Con las ecuaciones obtenidas para cada división espacial y época se aplicaron a cada una de las categorías de  $Chla$ , y con esto se pudo obtener un perfil con base a los promedios superficiales de cada categoría.



**Figura 8.** Área de estudio y localización de las estaciones de muestreo para el crucero enero-febrero 2011. Las flechas representan las divisiones del área de estudio, Norte-Sur, Oceánica-Costera. Otra división que se consideró es la época Fría y Caliente. Tomado de CALCOFI REPORTS, 2011.

## Resultados

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos al aplicar una regresión a los datos para cada zona geográfica y época del año donde la variable independiente es la Clorofila superficial (Chls) y los valores de los parámetros gaussianos obtenidos en el ajuste. Se aplicaron 3 tipos de regresión lineal, logarítmica (natural) y de distinto orden, según fue el caso para poder obtener valores de  $R^2$  mayores de 0.50. Con estos valores de  $R^2$  se presentan las ecuaciones para cada uno de los parámetros obtenidos con el modelo D. Las regresiones con valores de  $R^2$  mayores a 0.50 se presentan en las ecuaciones en la tabla 5.

Se describen los resultados por región iniciando con la NCC. Se comparó la  $R^2$  resultante de la regresión lineal entre la Chls y los parámetros que componen el perfil vertical de Chla por región y época del año. Las  $R^2$  con valores más altos se dieron con parámetro H (clorofila integrada) y  $a_1$  (concentración máxima) con valores mayores a 0.92 aplicando regresión lineal. Para esta región al parámetro alfa se le aplicó una regresión de segundo orden y al parámetro  $Z_{m1}$  una regresión logarítmica para poder obtener una valor de  $R^2$  mayor a 0.50 (Tabla 5). Los demás parámetros presentaron valores de  $R^2$  entre 0.70 y 0.73 en regresión lineal.

Para la región y época NCF los valores de  $R^2$  con valores mayores de 0.90 se dieron en los parámetros H, alfa y  $a_2$  con una regresión lineal y se aplicó regresión logarítmica a los parámetros  $Z_{m1}$  para obtener un valor de 0.78 y  $a_1$  con un valor de 0.85. En la región y época NOC se obtuvo valores de  $R^2$  mayores de 0.55 en seis de

los nueve parámetros. A los parámetros que se les aplicó regresión logarítmica fue para  $a_1$  y de tercer grado para  $Zm_2$  (Tabla 5).

**Tabla 5.**  $R^2$  de las regresiones para cada parámetro del perfil vertical de Chla con la Chls. NCC es la división Norte-Costero-Caliente, NCF es Norte-Costero-Frío, NOC es Norte-Oceánico-Caliente, NOF es Norte-Oceánico-Frío, SCC es Sur-Costero-Caliente, SCF es Sur-Costero-Frío, SOC es Sur-Oceánico-Caliente y SOF es Sur-Oceánico-Frío. El número o letra en el paréntesis indica el tipo de regresión que se aplicó. L es regresión lineal, ln es regresión logarítmica y el número al orden que se aplicó a la ecuación. H es la concentración de Chla integrada,  $B_0$  es la concentración del pigmento en la línea-base,  $\alpha$  el gradiente vertical de la curva de la concentración de clorofila,  $Zm_1$  y  $Zm_2$  es la profundidad del máximo de clorofila,  $S_1$  y  $S_2$  es una medida del ancho de la curva gaussiana,  $a_1$  y  $a_2$  es la concentración máxima de cada una de las curvas.

	H	$B_0$	$\alpha$	$Zm_1$	$Zm_2$	$S_1$	$S_2$	$a_1$	$a_2$
NCC	0.920 (L)	0.784 (L)	0.835 (2)	0.755 (ln)	0.776 (L)	0.707 (L)	0.724 (L)	0.987 (L)	0.824 (L)
NCF	0.962 (L)	0.540 (L)	0.966 (L)	0.782 (ln)	0.644 (L)	0.890 (2)	0.642 (L)	0.855 (ln)	0.995 (L)
NOC	0.928 (L)	0.970 (2)	0.925 (L)	0.794 (L)	0.750 (3)	0.990 (3)	0.940 (3)	0.814 (ln)	0.978 (L)
NOF	0.989 (L)	0.911 (L)	0.981 (L)	0.786 (L)	0.990 (3)	0.930 (3)	0.907 (L)	0.972 (L)	0.984 (L)
SCC	0.696 (L)	0.895 (L)	0.712 (L)	0.581 (L)	0.914 (L)	0.624 (2)	0.854 (L)	0.974 (L)	0.973 (L)
SCF	0.956 (L)	0.856 (L)	0.869 (L)	0.689 (3)	0.606 (L)	0.696 (3)	0.810 (2)	0.741 (L)	0.731 (L)
SOC	0.979 (L)	0.644 (2)	0.913 (3)	0.874 (ln)	0.817 (L)	0.617 (L)	0.803 (2)	0.954 (L)	0.980 (L)
SOF	0.980 (2)	0.980 (2)	0.986 (2)	0.829 (ln)	0.920 (ln)	0.599 (L)	0.821 (2)	0.974 (L)	0.986 (L)

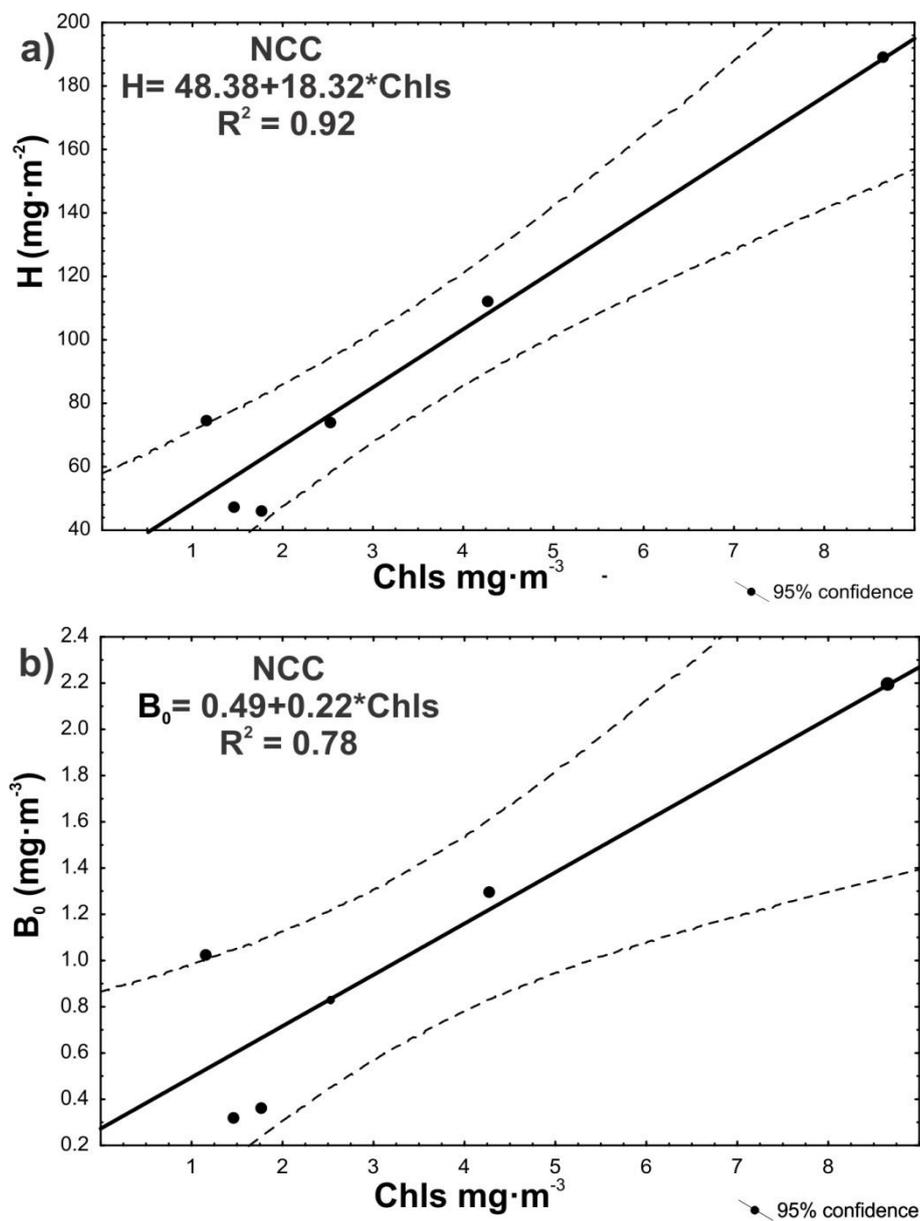
Para la región y época NOF se observó que más parámetros presentaron valores mayores a 0.90 el único parámetro que presentó un valor de 0.78 fue el  $Zm_1$ . La región y época SCC presentó la  $R^2$  más baja para el parámetro H con un valor de 0.69 y el valor más bajo para  $Zm_1$  con 0.58. La  $R^2$  para  $a_1$  y  $a_2$  fueron las que presentaron los valores más altos con 0.974 y 0.973 respectivamente. Para SCF el único valor de  $R^2$  mayor de 0.90 se da en el parámetro H y fue la región en donde se aplicó

regresión de tercer orden en  $Z_{m1}$ ,  $S_1$  y de segundo orden en  $S_2$ . Para la región y época SOC los valores en  $R^2$  más altos se dieron en H (0.97) y el más bajo se presentó en  $S_1$  (0.61). En la región y época SOF es otra de las regiones en donde se registraron  $R^2$  altas (valores mayores 0.90), pero en 6 de los parámetros se aplicó regresión que no fue lineal (logarítmica y de segundo orden).

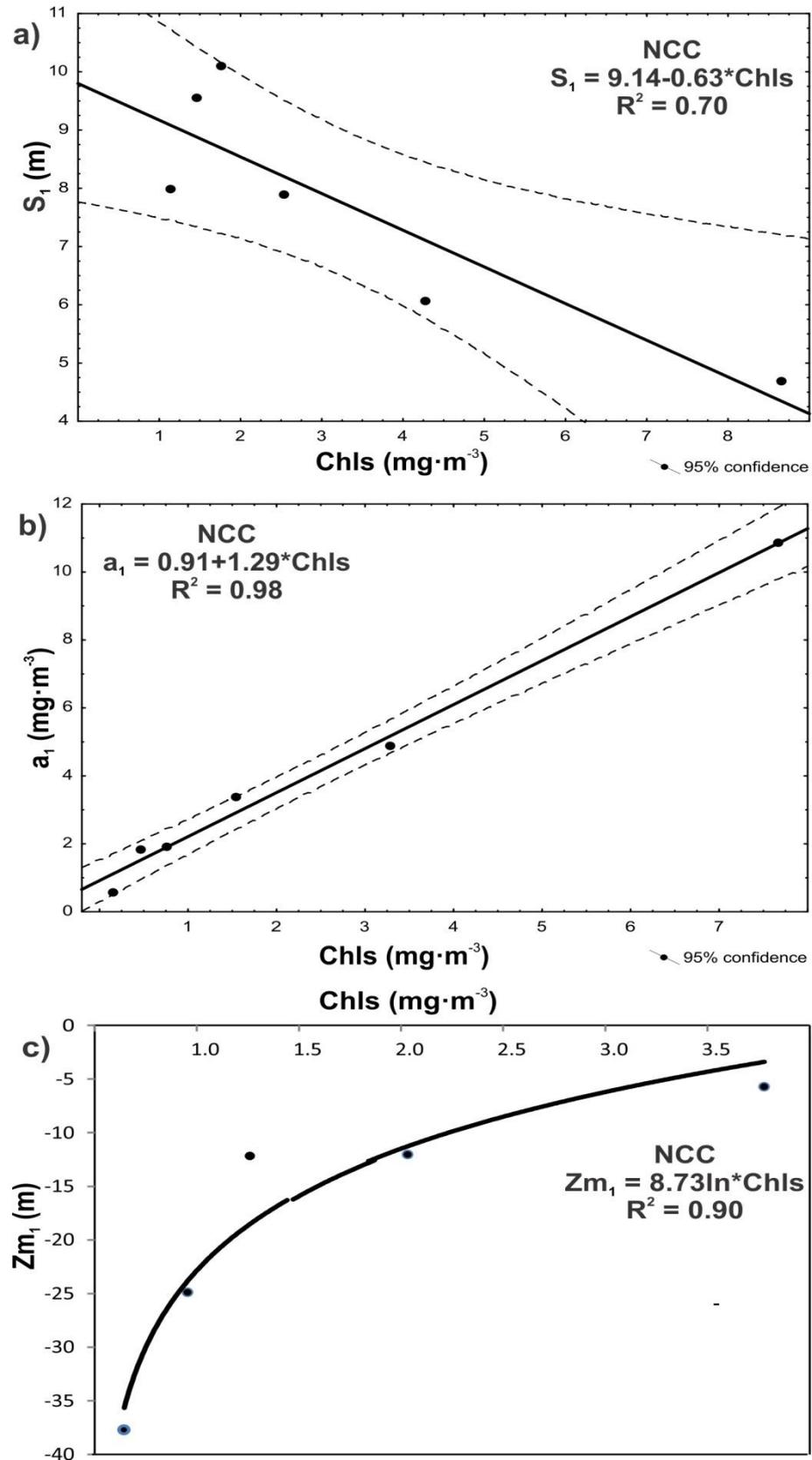
**Tabla 6.** Ecuaciones para estimar los parámetros del perfil vertical mediante la Chls para cada zona geográfica y época del año. NCC es la división Norte-Costero-Caliente, NCF es Norte-Costero-Frío, NOC es Norte-Oceánico-Caliente, NOF es Norte-Oceánico-Frío, SCC es Sur-Costero-Caliente, SCF es Sur-Costero-Frío, SOC es Sur-Oceánico-Caliente y SOF es Sur-Oceánico-Frío.

División	Variable	$R^2$	Ecuación
NCC	H	0.92	$H = 48.3859 + 18.3215 \text{ Chls}$
NCC	$B_0$	0.78	$B_0 = 0.4944 + 0.2218 \text{ Chls}$
NCC	Alfa	0.83	$\alpha = 0.0006 \text{ Chls}^3 - 0.0068 \text{ Chls}^2 + 0.0166 \text{ Chls} - 0.0131$
NCC	$Z_{m1}$	0.90	$Z_{m1} = 8.7307 \ln(\text{Chls}) - 16.917$
NCC	$S_1$	0.70	$S_1 = 9.1701 - 0.63 \text{ Chls}$
NCC	$a_1$	0.98	$a_1 = 0.9172 + 1.2949 \text{ Chls}$
NCC	$Z_{m2}$	0.77	$Z_{m2} = -57.1664 + 6.1532 \text{ Chls}$
NCC	$S_2$	0.72	$S_2 = 13.3756 - 1.0464 \text{ Chls}$
NCC	$a_2$	0.82	$a_2 = 0.5414 + 0.4827 \text{ Chls}$
NCF	H	0.96	$H = 31.7249 + 28.9366 \text{ Chls}$
NCF	$B_0$	0.64	$B_0 = 0.5619 + 0.1889 \text{ Chls}$
NCF	Alfa	0.96	$\alpha = -0.003 - 0.0024 \text{ Chls}$
NCF	$Z_{m1}$	0.78	$Z_{m1} = 7.4191 \ln(\text{Chls}) - 17.029$
NCF	$S_1$	0.89	$S_1 = 0.2159 \text{ Chls}^2 - 2.1331 \text{ Chls} + 11.415$
NCF	$a_1$	0.85	$a_1 = 1.6519 \ln(\text{Chls}) + 2.3584$
NCF	$Z_{m2}$	0.64	$Z_{m2} = -67.1604 + 6.1302 \text{ Chls}$
NCF	$S_2$	0.64	$S_2 = 13.7646 - 0.837 \text{ Chls}$
NCF	$a_2$	0.99	$a_2 = 0.0417 + 0.5228 \text{ Chls}$
NOC	H	0.92	$H = 27.6607 + 17.0456 \text{ Chls}$
NOC	$B_0$	0.97	$B_0 = -0.5038 \text{ Chls}^2 + 0.9077 \text{ Chls} + 0.0658$
NOC	alfa	0.92	$\alpha = -0.0007 - 0.0044 \text{ Chls}$
NOC	$Z_{m1}$	0.79	$Z_{m1} = -58.0579 + 44.0057 \text{ Chls}$
NOC	$S_1$	0.99	$S_1 = -9.7705 \text{ Chls}^3 + 23.716 \text{ Chls}^2 - 15.491 \text{ Chls} + 12.699$
NOC	$a_1$	0.81	$a_1 = 0.3798 \ln(\text{Chls}) + 1.6124$
NOC	$Z_{m2}$	0.75	$Z_{m2} = 58.576 \text{ Chls}^3 - 107.61 \text{ Chls}^2 + 59.36 \text{ Chls} - 83.405$
NOC	$S_2$	0.94	$S_2 = -22.701 \text{ Chls}^3 + 44.57 \text{ Chls}^2 - 19.679 \text{ Chls} + 15.042$
NOC	$a_2$	0.97	$a_2 = 0.1237 + 0.5667 \text{ Chls}$
NOF	H	0.98	$H = 26.9716 + 25.6721 \text{ Chls}$
NOF	$B_0$	0.91	$B_0 = 0.1675 + 0.4058 \text{ Chls}$

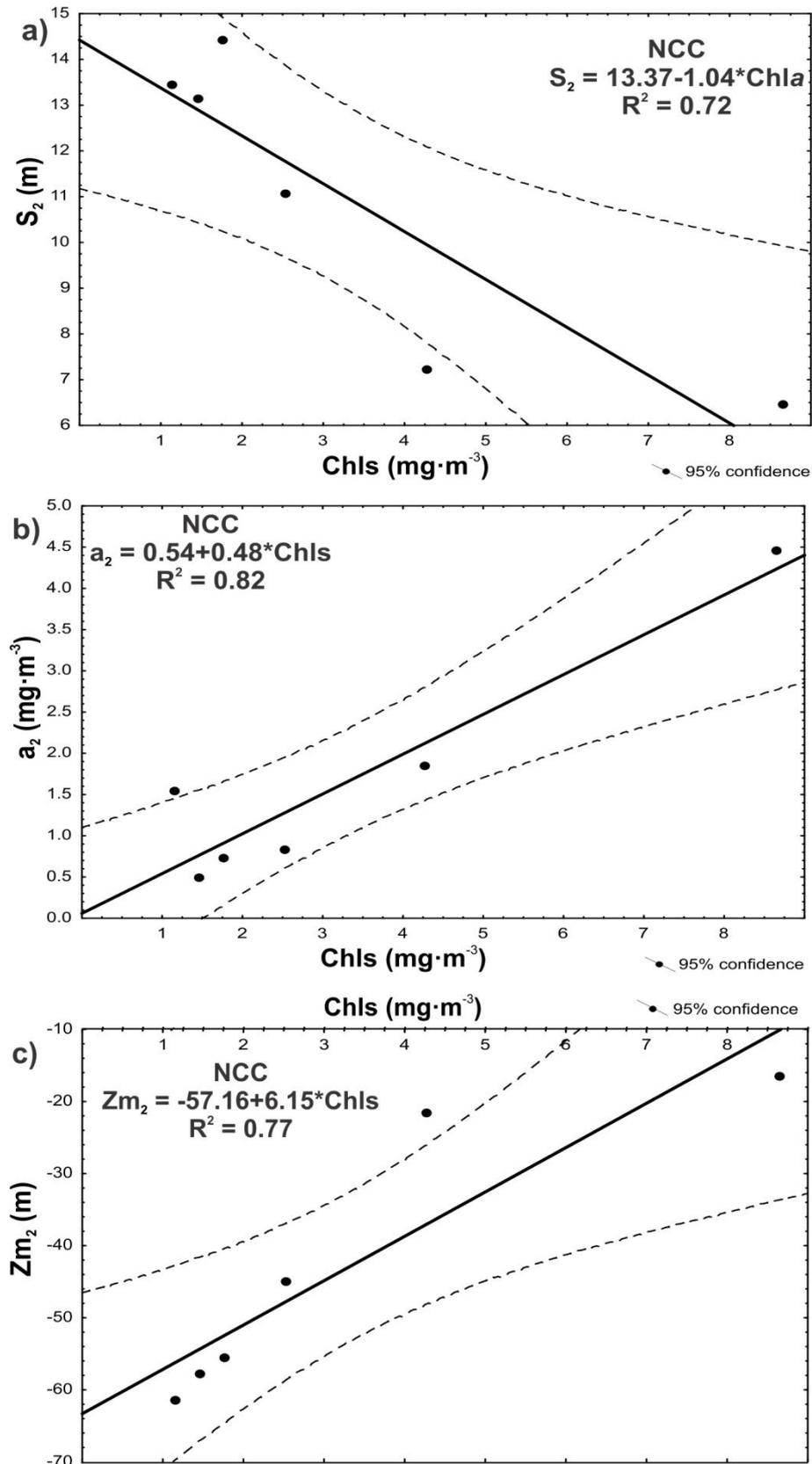
NOF	alfa	0.98	$\text{alfa} = -0.0006 - 0.0053\text{Chls}$
NOF	$Zm_1$	0.78	$Zm_1 = -63.7058 + 48.7161\text{Chls}$
NOF	$S_1$	0.93	$S = -58.503\text{Chls}^3 + 132.04\text{Chls}^2 - 78.188\text{Chls} + 23.187$
NOF	$a_1$	0.97	$a_1 = 0.3907 + 1.1196\text{Chls}$
NOF	$Zm_2$	0.99	$Zm_2 = 228.43\text{Chls}^3 - 471.62\text{Chls}^2 + 256.33\text{Chls} - 113.68$
NOF	$S_2$	0.90	$S_2 = 10.6878 + 8.6982\text{Chls}$
NOF	$a_2$	0.98	$a_2 = 0.114 + 0.3713\text{Chls}$
SCC	H	0.69	$H = 44.1971 + 8.3262\text{Chls}$
SCC	$B_0$	0.89	$B_0 = 0.4258 + 0.2903\text{Chls}$
SCC	alfa	0.71	$\text{alfa} = 0.0022 - 0.0048\text{Chls}$
SCC	$Zm_1$	0.58	$Zm_1 = -24.3043 + 4.0589\text{Chls}$
SCC	$S_1$	0.62	$S_1 = -0.0348\text{Chls}^2 - 0.3062\text{Chls} + 7.0269$
SCC	$a_1$	0.97	$a_1 = 1.6012 + 1.0825\text{Chls}$
SCC	$Zm_2$	0.91	$Zm_2 = -55.9317 + 9.3675\text{Chls}$
SCC	$S_2$	0.85	$S_2 = 10.6058 - 0.9089\text{Chls}$
SCC	$a_2$	0.97	$a_2 = 0.426 + 0.4171\text{Chls}$
SCF	H	0.95	$H = 39.927 + 20.7087\text{Chls}$
SCF	$B_0$	0.85	$B_0 = 0.532 + 0.2927\text{Chls}$
SCF	alfa	0.86	$\text{alfa} = -0.0015 - 0.0015\text{Chls}$
SCF	$Zm_1$	0.68	$Zm_1 = 0.3516\text{Chls}^3 - 4.8469\text{Chls}^2 + 19.545\text{Chls} - 32.235$
SCF	$S_1$	0.69	$S_1 = 0.1033\text{Chls}^3 - 1.0722\text{Chls}^2 + 1.8447\text{Chls} + 7.6279$
SCF	$a_1$	0.74	$a_1 = 2.1763 + 0.9695\text{Chls}$
SCF	$Zm_2$	0.60	$Zm_2 = -62.0073 + 6.4479\text{Chls}$
SCF	$S_2$	0.81	$S_2 = 0.2513\text{Chls}^2 - 2.75\text{Chls} + 13.123$
SCF	$a_2$	0.73	$a_2 = 0.5363 + 0.4032\text{Chls}$
SOC	H	0.97	$H = 29.3683 + 17.7006\text{Chls}$
SOC	$B_0$	0.64	$B_0 = -0.0277\text{Chls}^2 + 0.2344\text{Chls} + 0.2127$
SOC	alfa	0.91	$\text{alfa} = -0.0004\text{Chls}^3 + 0.0042\text{Chls}^2 - 0.0095\text{Chls} + 0.0008$
SOC	$Zm_1$	0.87	$Zm_1 = 12.386\ln(\text{Chls}) - 27.318$
SOC	$S_1$	0.61	$S_1 = 11.5585 - 0.7267\text{Chls}$
SOC	$a_1$	0.95	$a_1 = 0.3888 + 1.254\text{Chls}$
SOC	$Zm_2$	0.81	$Zm_2 = -77.4029 + 8.6725\text{Chls}$
SOC	$S_2$	0.80	$S_2 = 0.1896\text{Chls}^2 - 2.1989\text{Chls} + 13.64$
SOC	$a_2$	0.98	$a_2 = 0.0236 + 0.5666\text{Chls}$
SOF	H	0.98	$H = -4.85\text{Chls}^2 + 68.627\text{Chls} + 16.109$
SOF	$B_0$	0.98	$B_0 = -0.0661\text{Chls}^2 + 0.8107\text{Chls} + 0.0723$
SOF	alfa	0.98	$\text{alfa} = 0.0006\text{Chls}^2 - 0.007\text{Chls} - 0.0002$
SOF	$Zm_1$	0.82	$Zm_1 = 13.38\ln(\text{Chls}) - 29.326$
SOF	$S_1$	0.59	$S_1 = 11.4833 - 0.4953\text{Chls}$
SOF	$a_1$	0.97	$a_1 = 0.8644 + 0.8548\text{Chls}$
SOF	$Zm_2$	0.92	$Zm_2 = 14.606\ln(\text{Chls}) - 63.179$
SOF	$S_2$	0.82	$S_2 = -0.1177\text{Chls}^2 + 1.0212\text{Chls} + 13.361$
SOF	$a_2$	0.98	$a_2 = 0.2372 + 0.3398\text{Chls}$



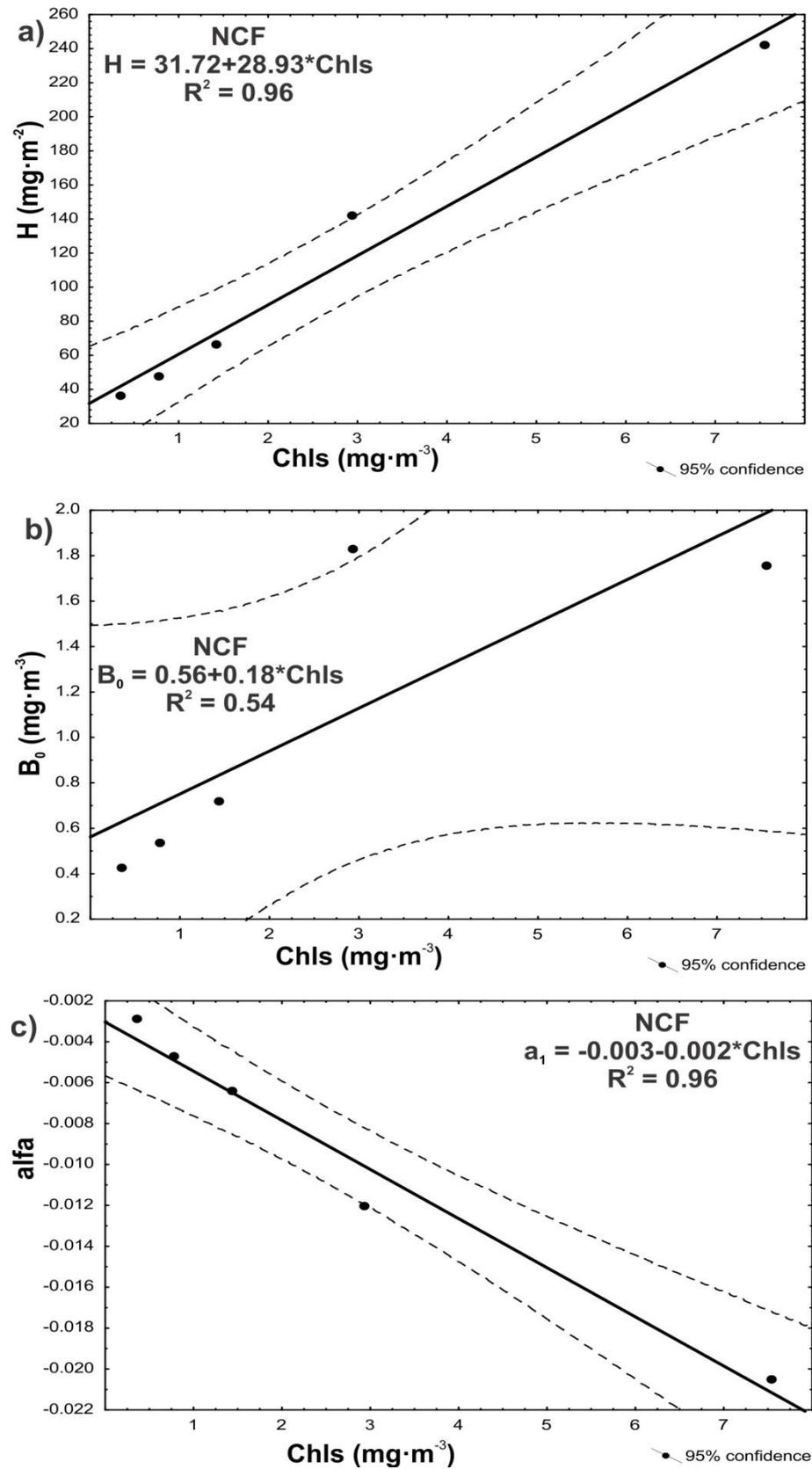
**Figura 9.** Regresión entre la Chls y los parámetros, a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana) y b)  $B_0$  (concentración del pigmento en la línea-base) para la región y época Norte Costero Caliente (NCC).



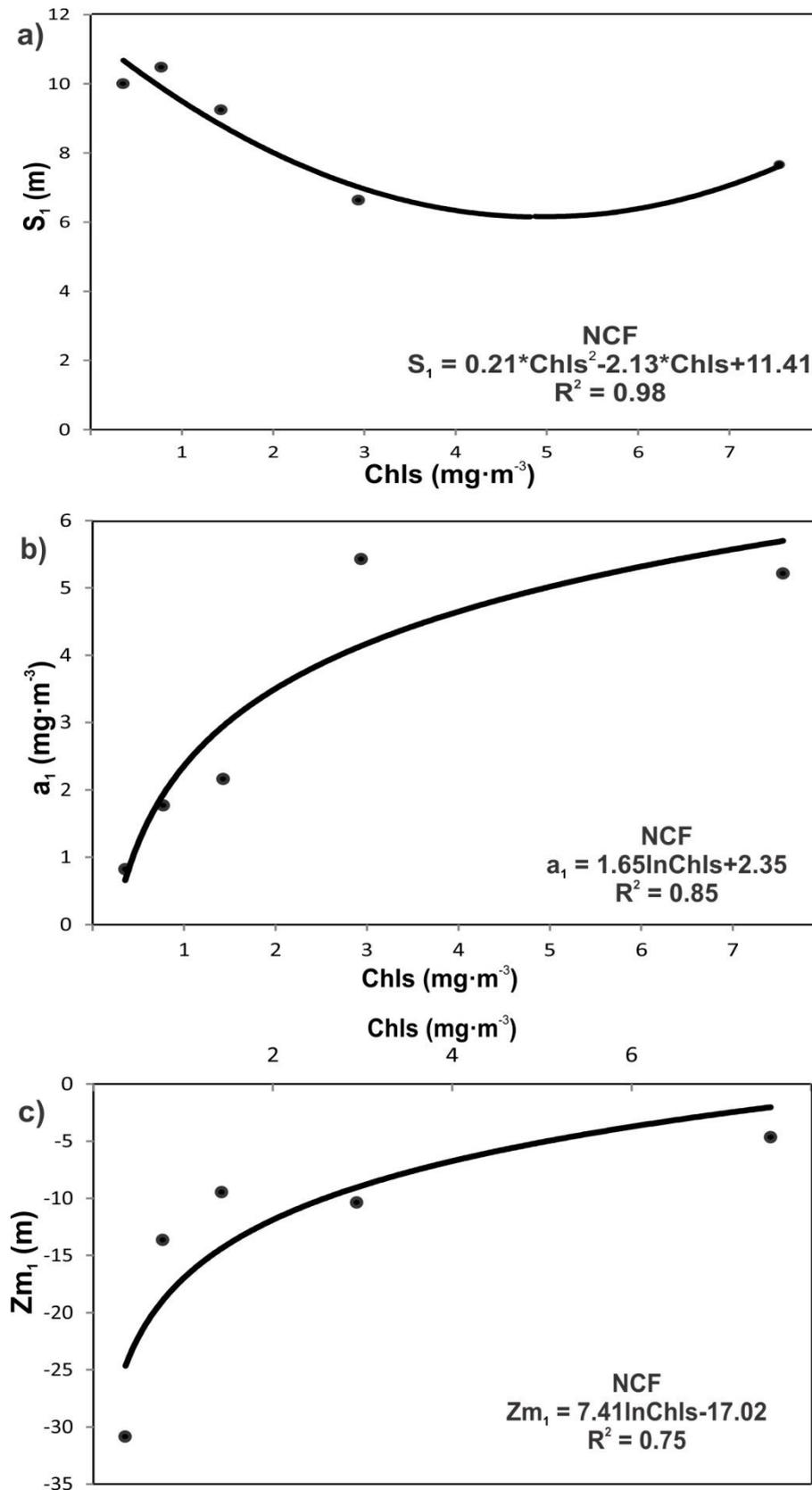
**Figura 10.** Regresión entre la Chls y los parámetros, a)  $S_1$  (ancho del máximo de Chla), b)  $a_1$  (concentración en el máximo de Chla) y c)  $Z_{m_1}$  (profundidad del máximo de Chla), para la región y época Norte Costero Caliente (NCC).



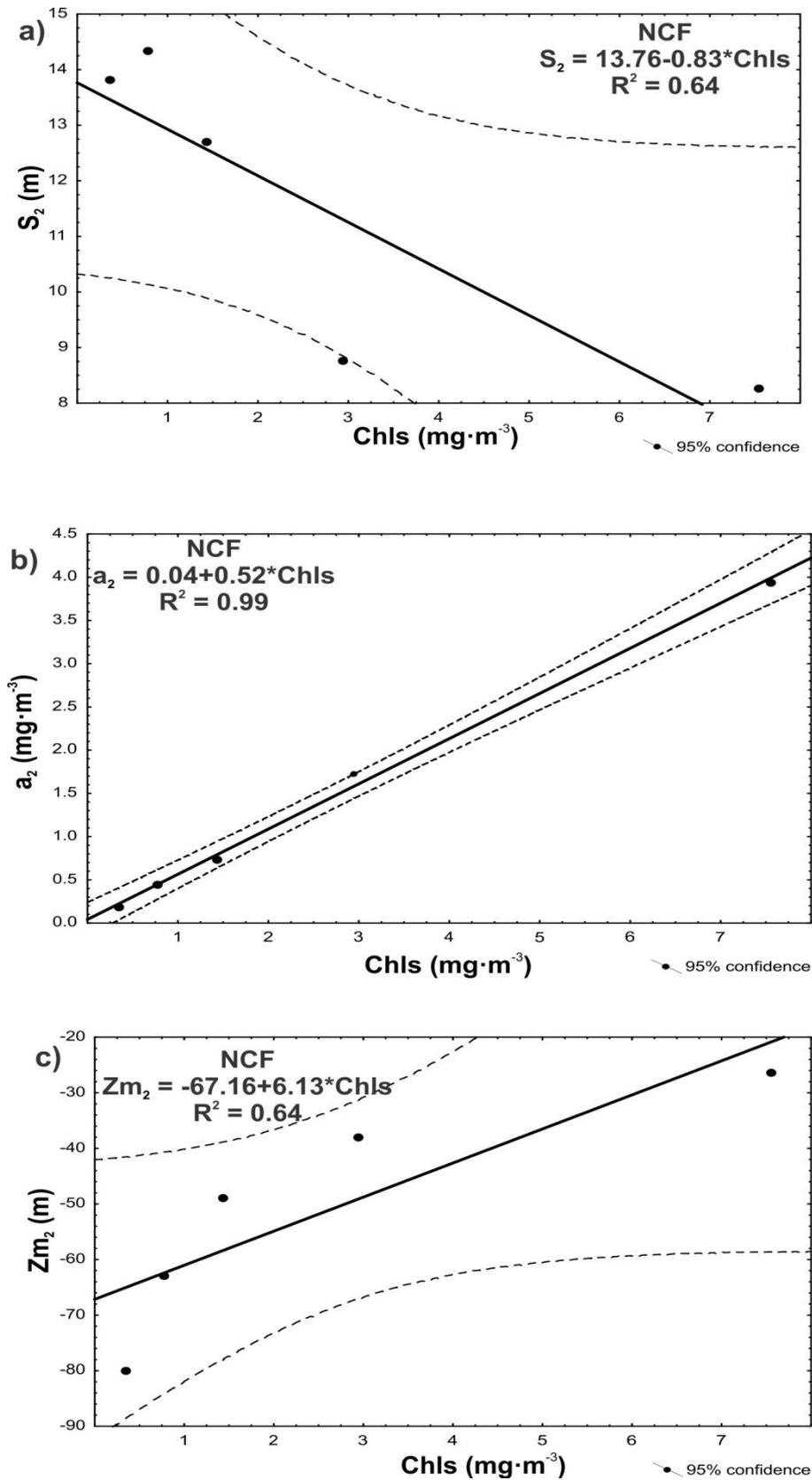
**Figura 11.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_2$  (ancho del segundo máximo de Chla), b)  $a_2$  (concentración del segundo máximo de Chla) y  $Z_{m_2}$  (profundidad del segundo máximo de Chla), para la región y época Norte Costero Caliente (NCC).



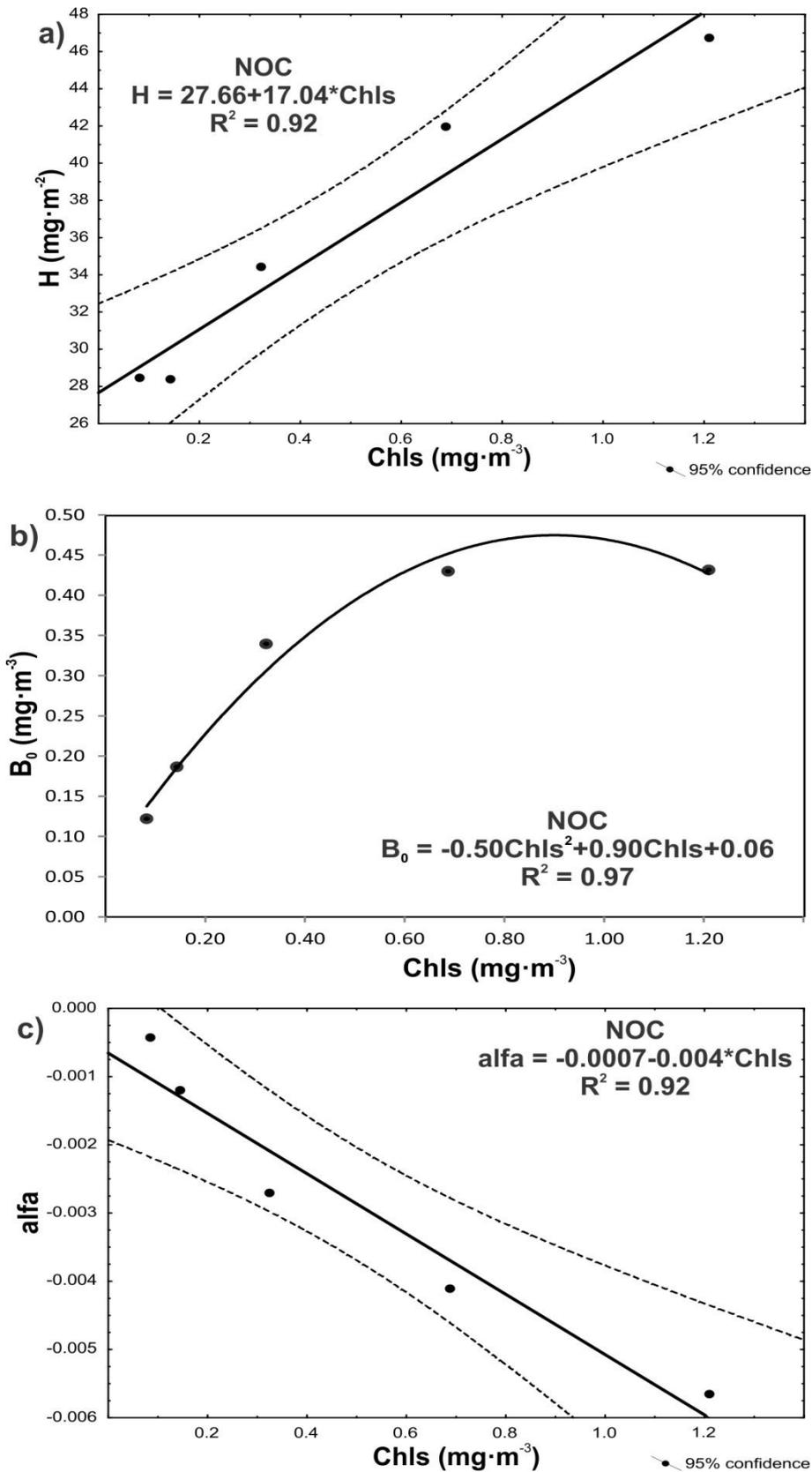
**Figura 12.** Regresión entre la Chls y los parámetros a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana), b)  $B_0$  (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Norte Costero Frío (NCF).



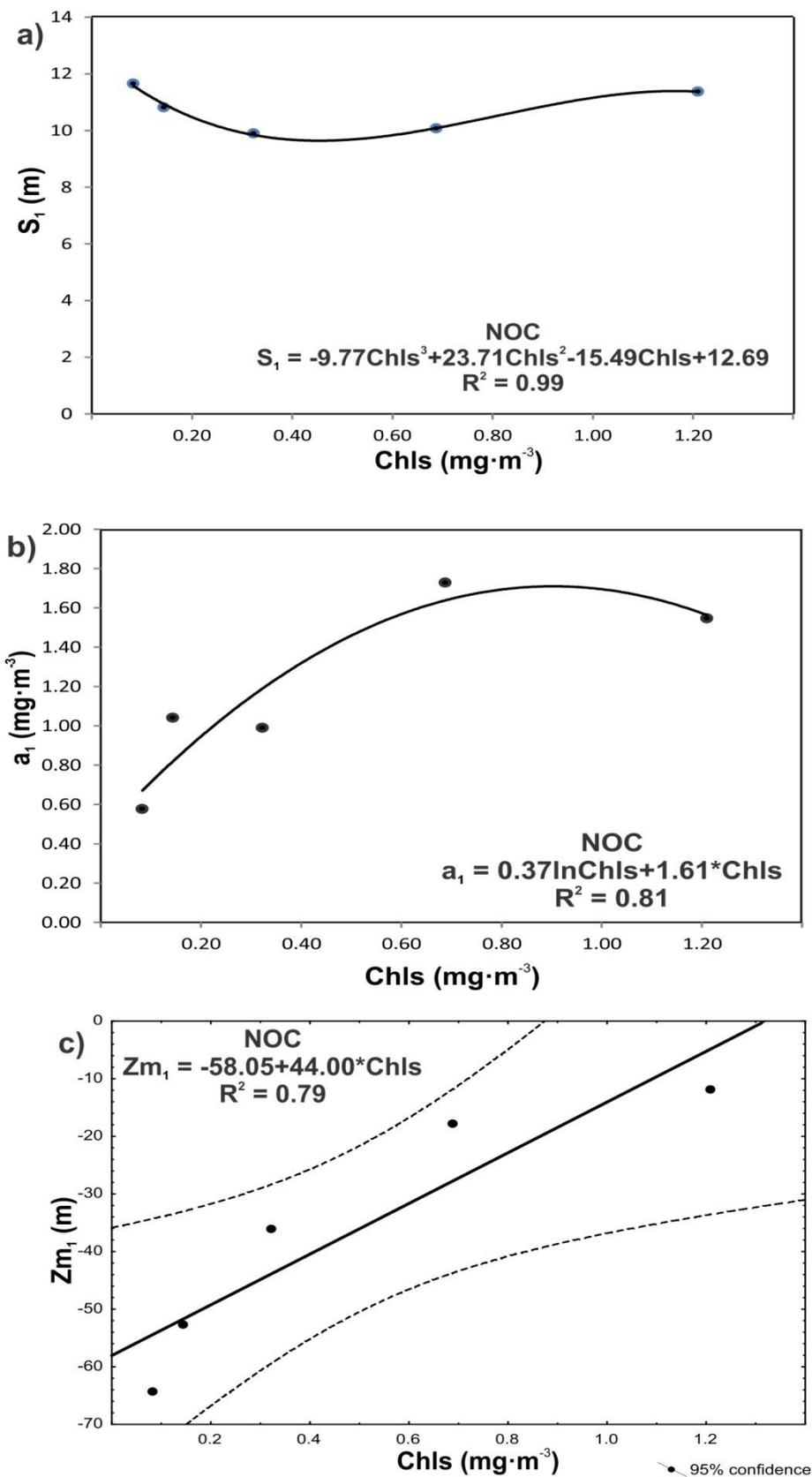
**Figura 13.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_1$  (ancho del máximo de Chla), b)  $a_1$  (concentración en el máximo de Chla) y c)  $Z_{m_1}$  (profundidad del máximo de Chla), para la región y época Norte Costero Frío (NCF).



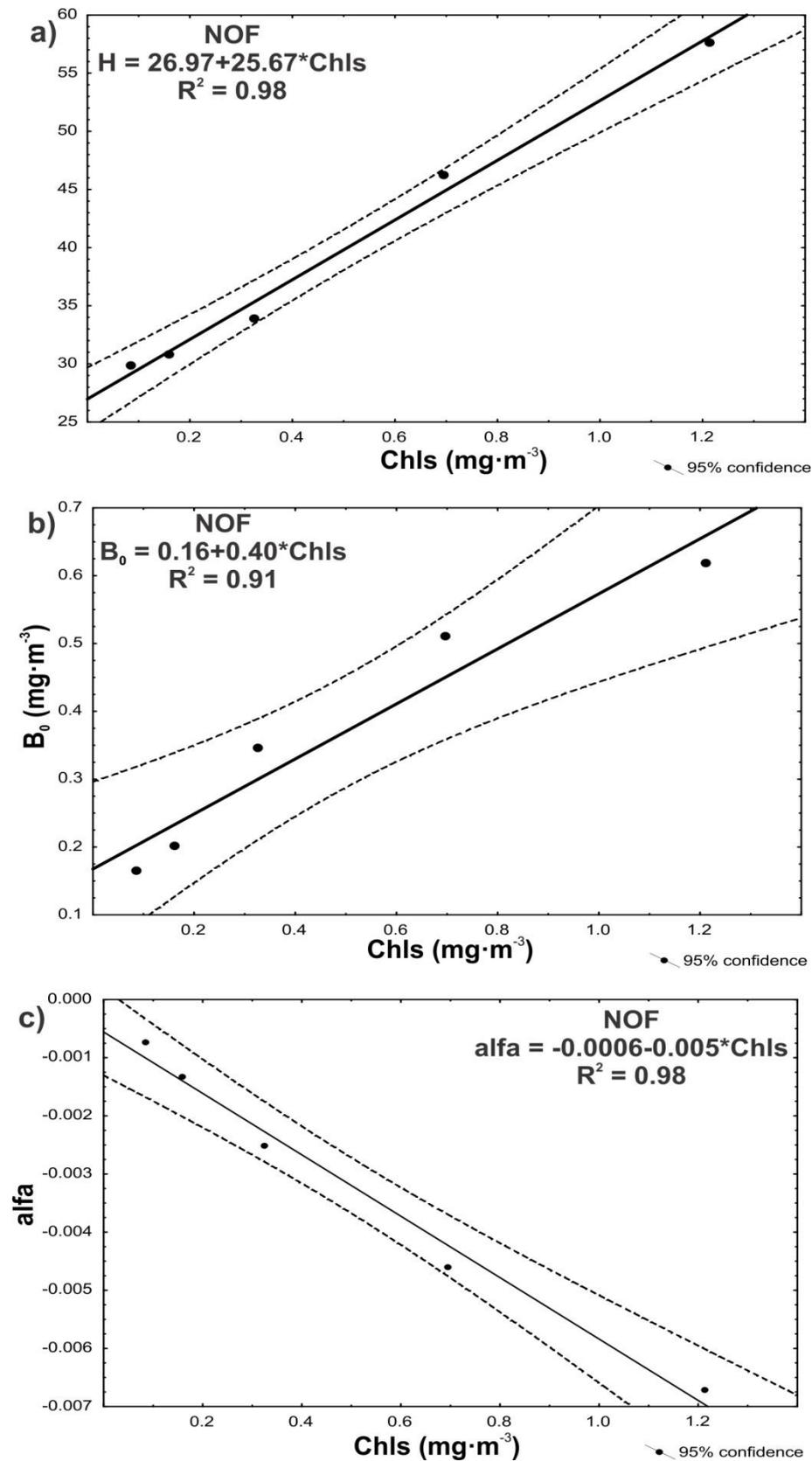
**Figura 14.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_2$  (ancho del segundo máximo de Chla), b)  $a_2$  (concentración del segundo máximo de Chla) y  $Zm_2$  (profundidad del segundo máximo de Chla), para la región y época Norte Costero Frío (NCF).



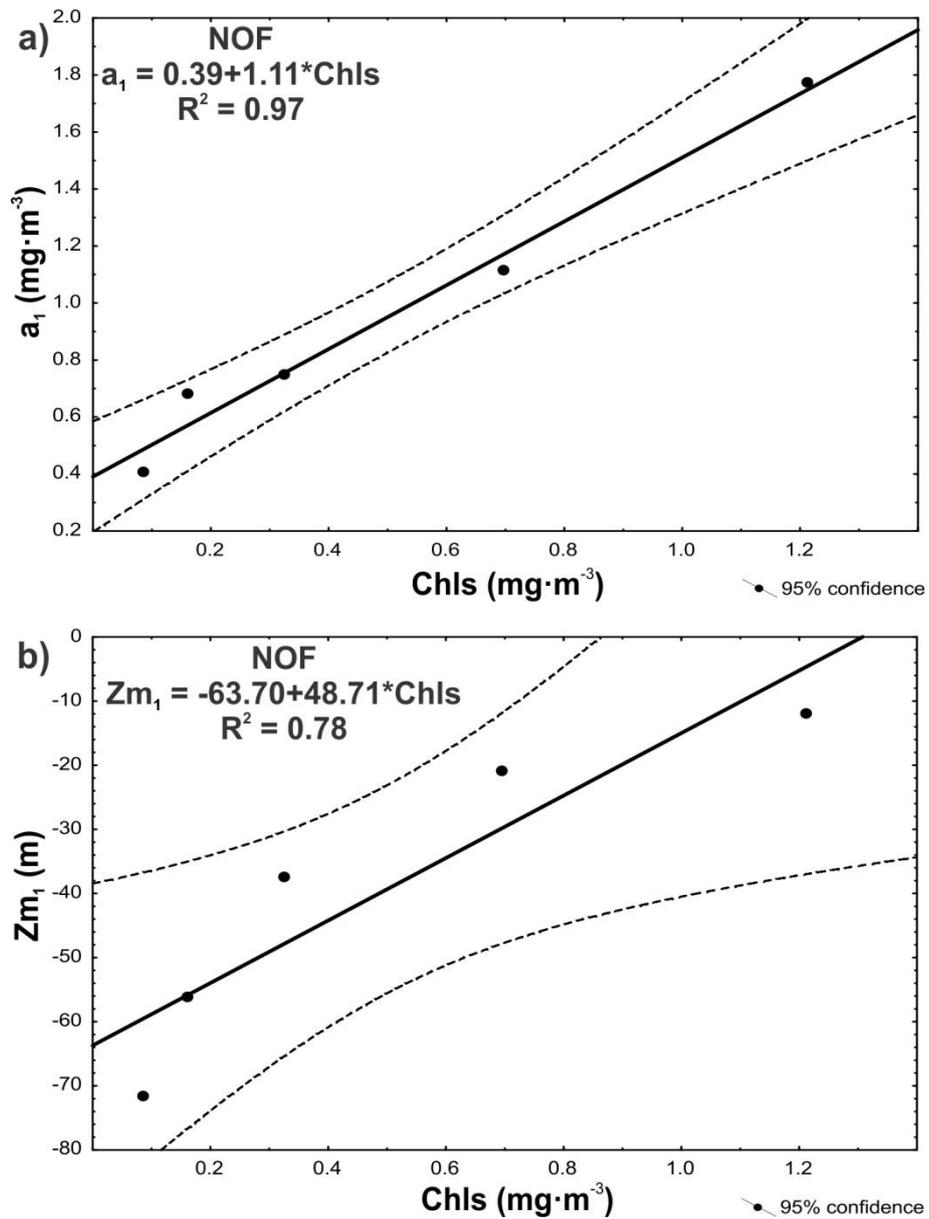
**Figura 15.** Regresión entre la Chls y los parámetros a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana), b) B<sub>0</sub> (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana) para la región y época Norte Oceánico Caliente (NOC).



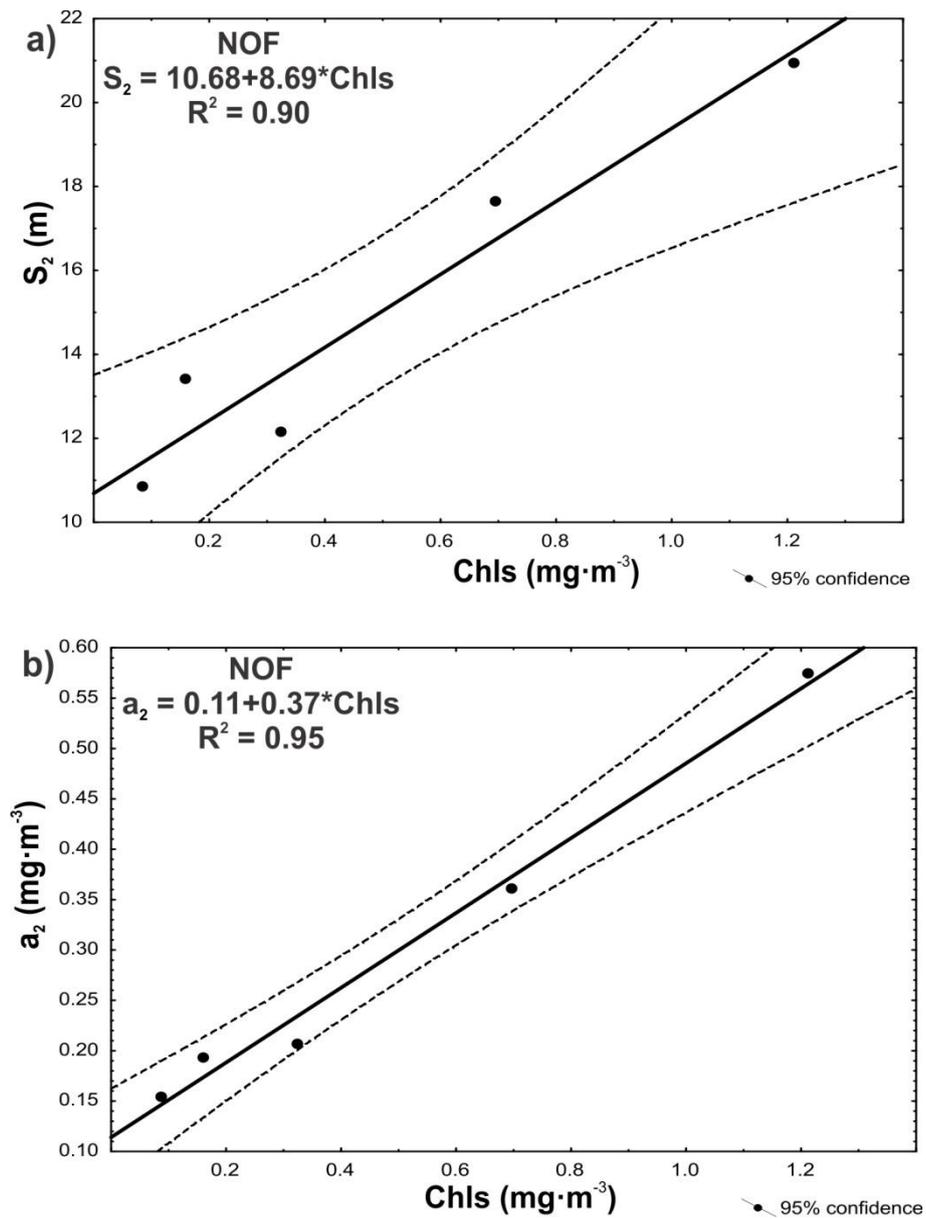
**Figura 16.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_1$  (ancho del máximo de Chla), b)  $a_1$  (concentración en el máximo de Chla) y c)  $Z_{m_1}$  (profundidad del máximo de Chla), para la región y época Norte Oceánico Caliente (NOC).



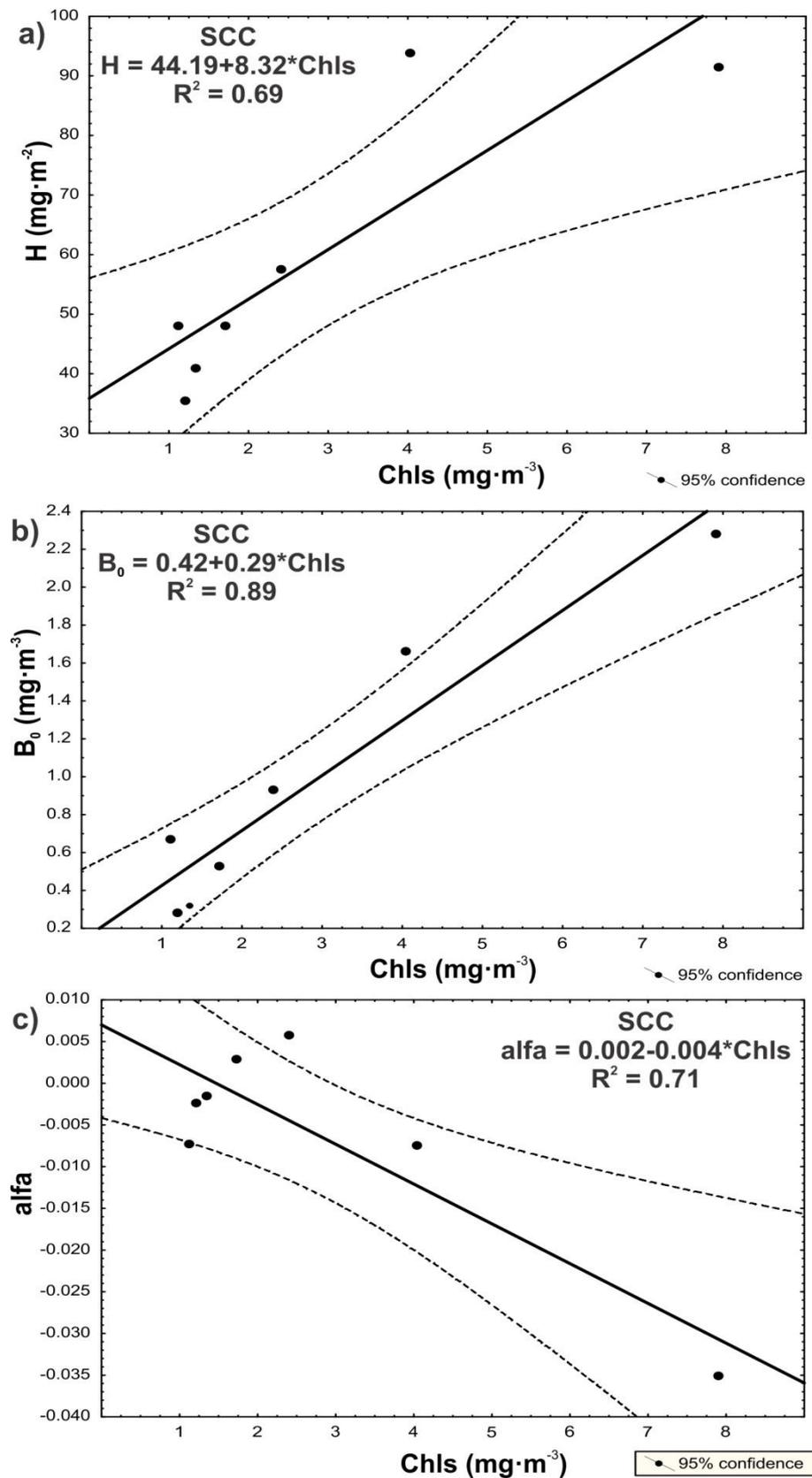
**Figura 17.** Regresión entre la Chls y los parámetros a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana), b)  $B_0$  (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Norte Oceánico Frío (NOF).



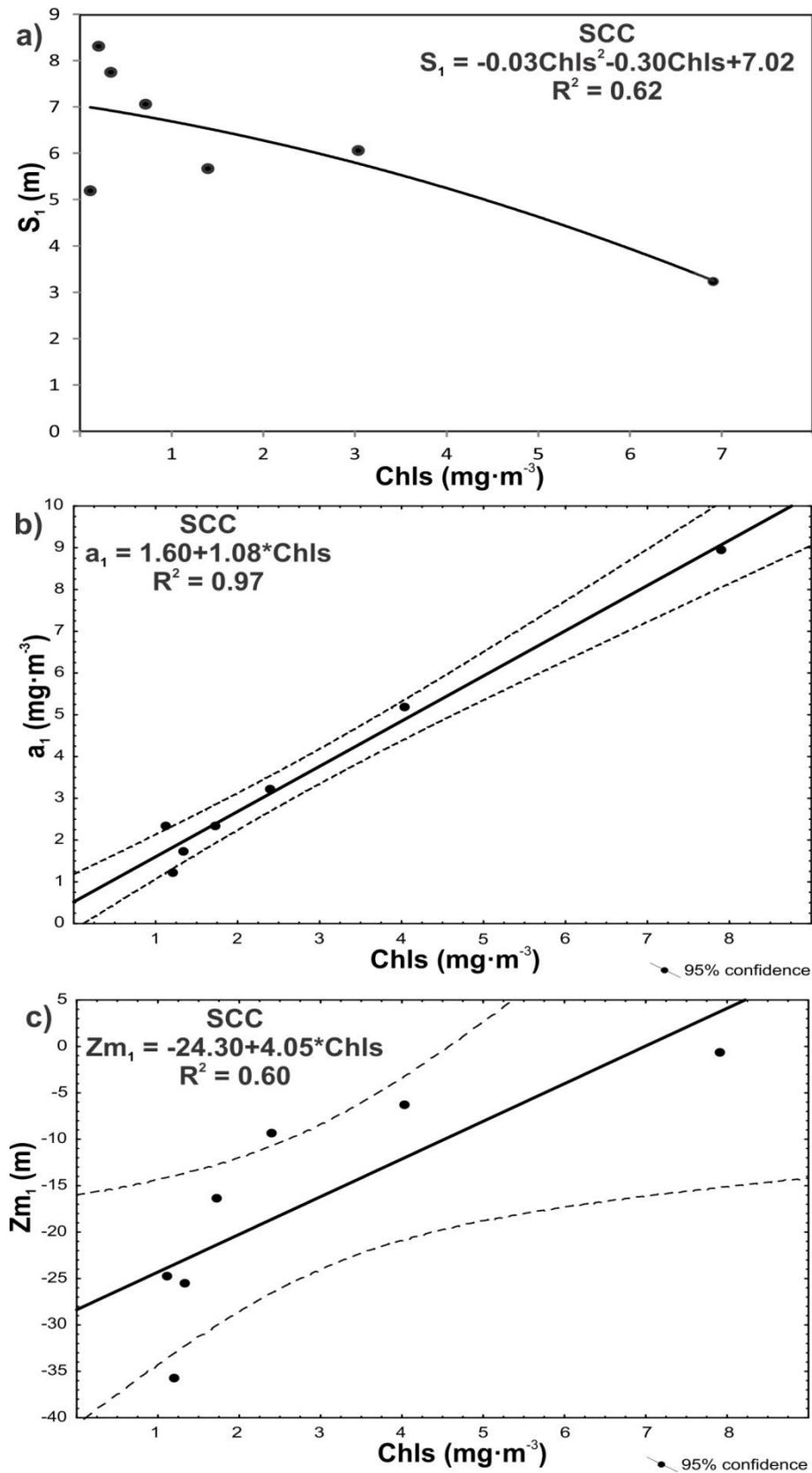
**Figura 18.** Regresión entre los parámetros a)  $a_1$  (concentración en el máximo de  $\text{Chl}a$ ) y b)  $Z_{m_1}$  (profundidad del máximo de  $\text{Chl}a$ ), para la región y época Norte Oceánico Frío (NOF).



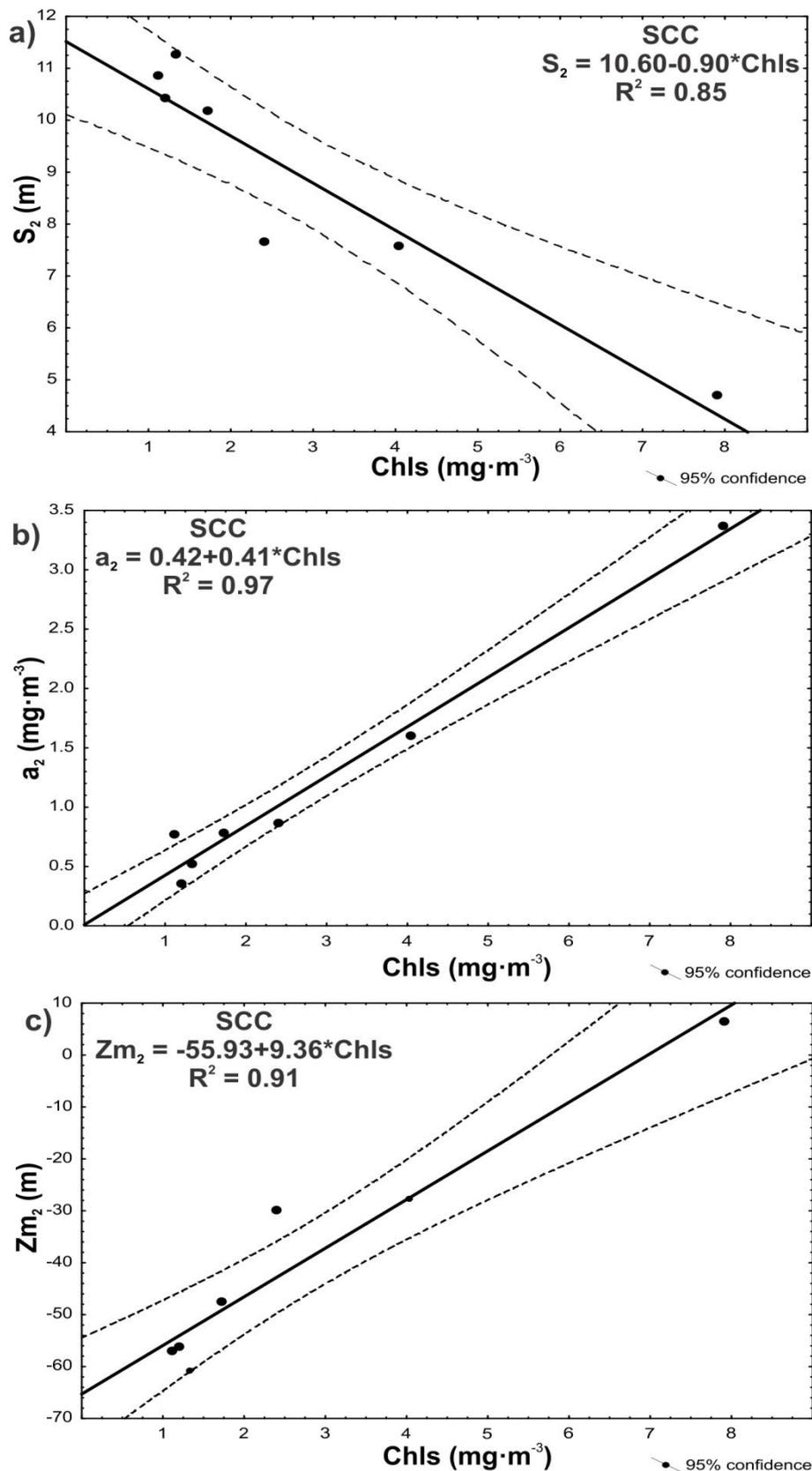
**Figura 19.** Regresión entre los parámetros a)  $S_2$  (ancho del segundo máximo de Chla) y b)  $a_2$  (concentración en el segundo máximo de Chla) para la región y época Norte Oceánico Frío (NOF)



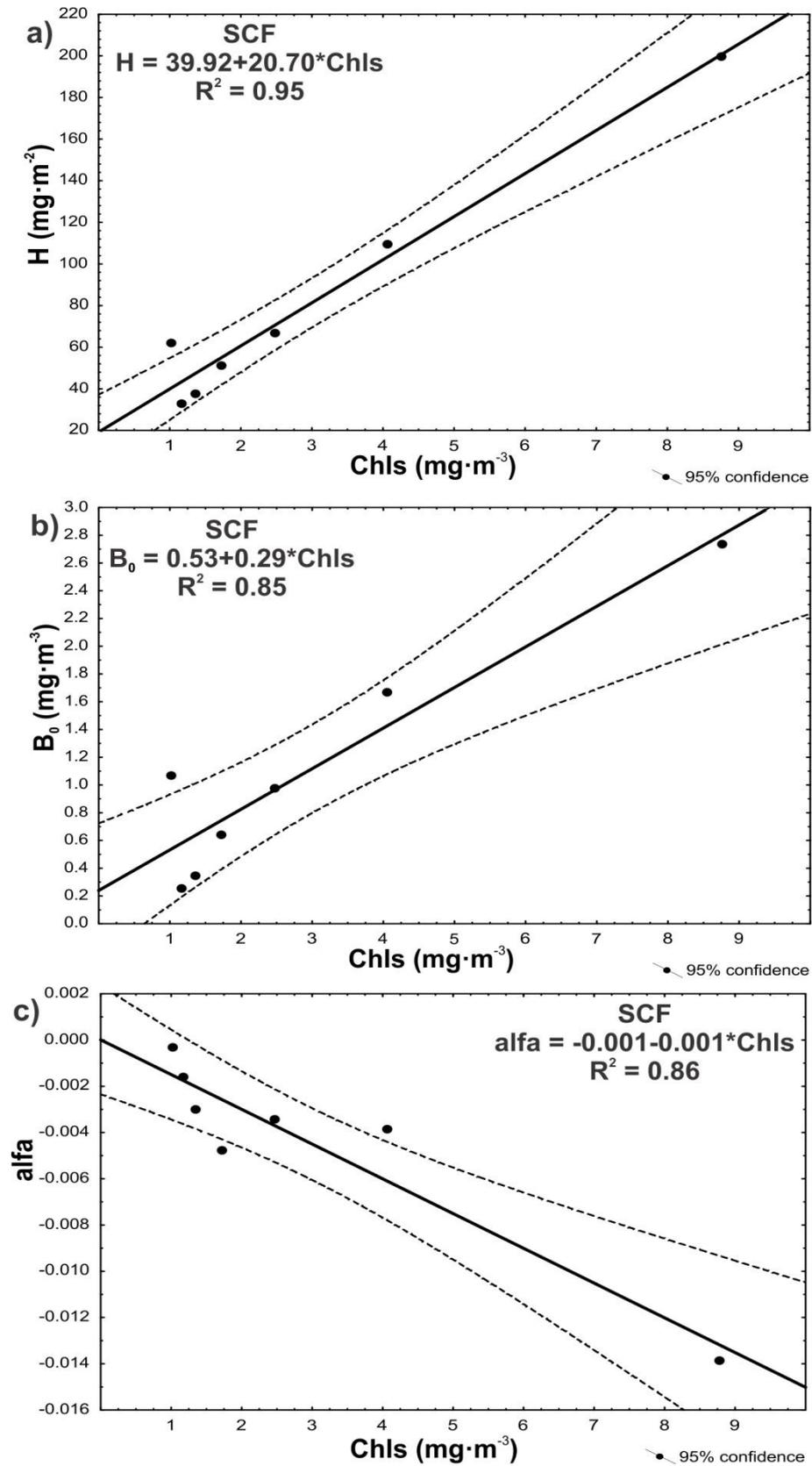
**Figura 20.** Regresión entre la Chls y los parámetros a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana), b)  $B_0$  (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Sur Costero Caliente (SCC).



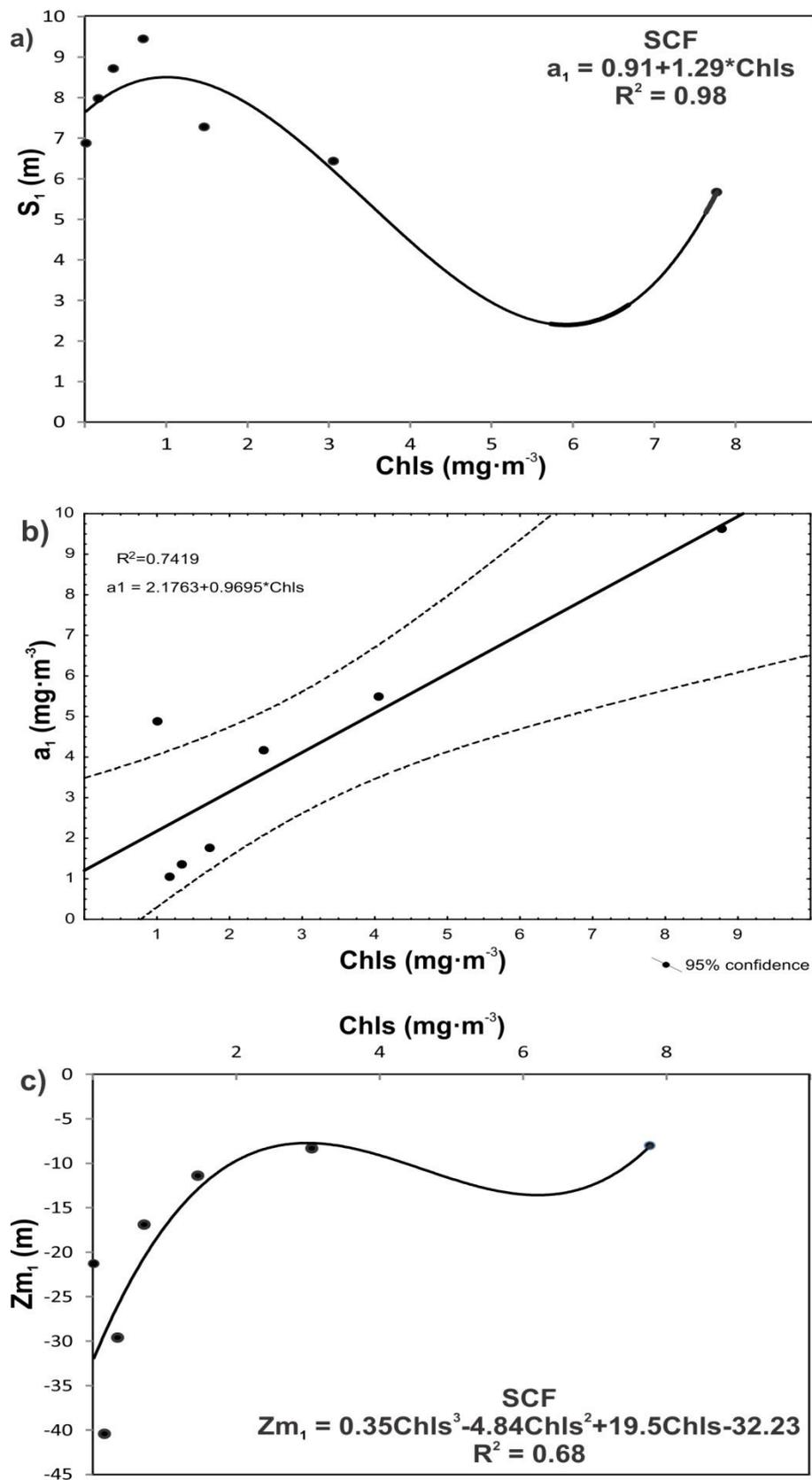
**Figura 21.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_1$  (ancho del máximo de Chla), b)  $a_1$  (concentración en el máximo de Chla) y c)  $Z_{m_1}$  (profundidad del máximo de Chla), para la región y época Sur Costero Caliente (SCC)



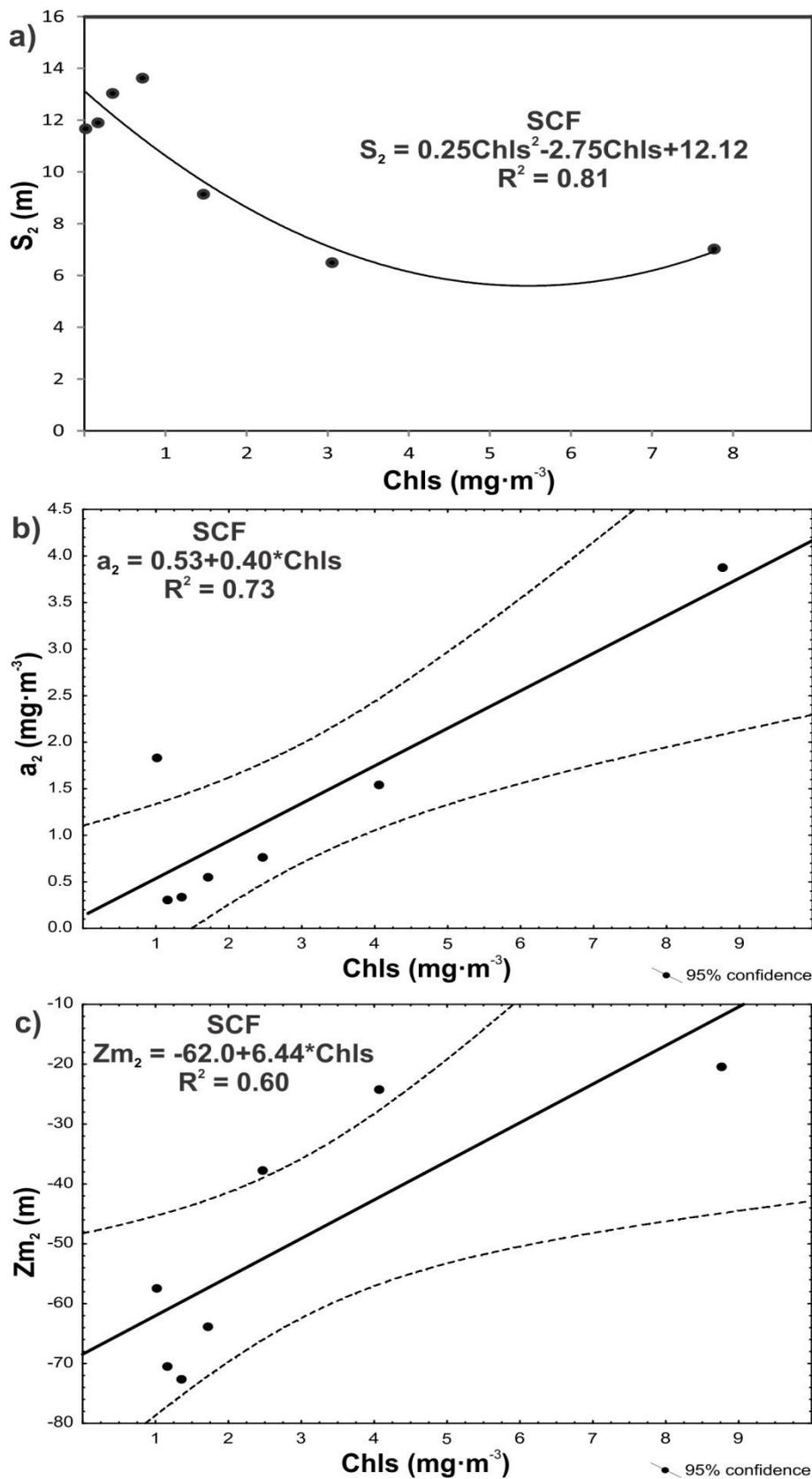
**Figura 22.** Regresión entre los parámetros a)  $S_2$  (ancho del segundo máximo de Chl*a*), b)  $a_2$  (concentración en el segundo máximo de Chl*a*) y c)  $Zm_2$  (profundidad del segundo máximo de Chl*a*), para la región y época Sur Costero Caliente (SCC).



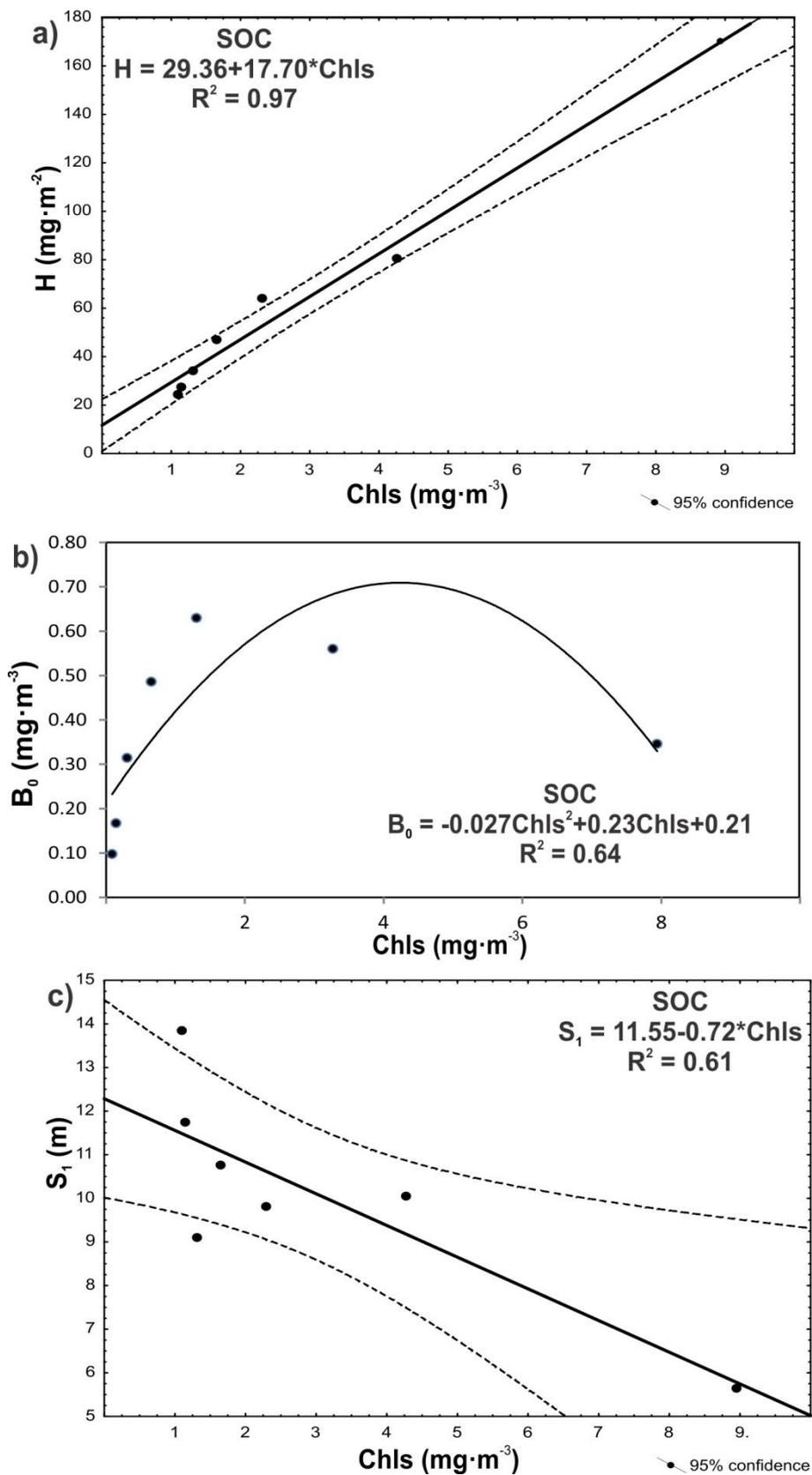
**Figura 23.** Regresión entre la Chls y los parámetros a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana), b)  $b_0$  (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Sur Costero Frío (SCF).



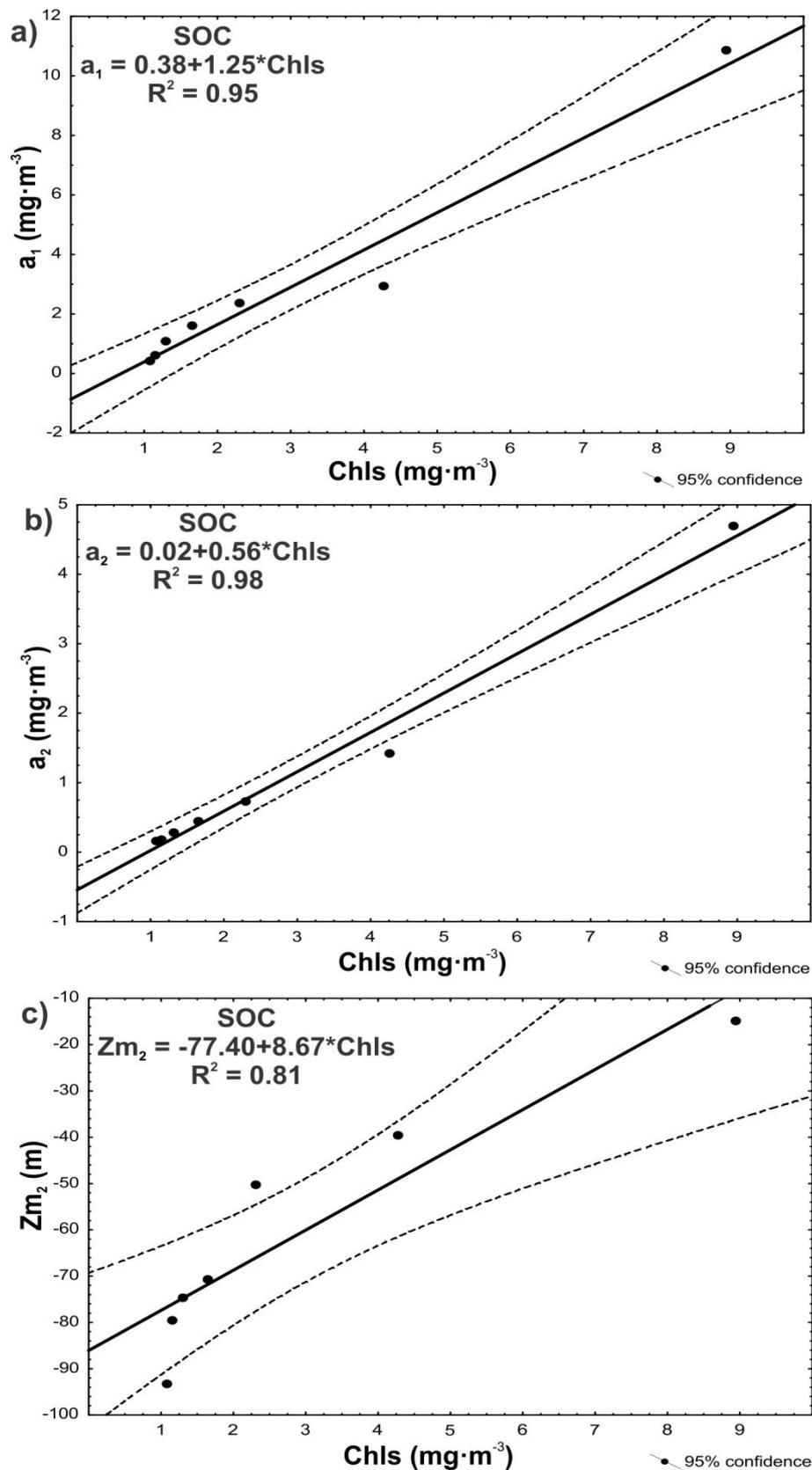
**Figura 24.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_1$  (ancho del máximo de Chla), b)  $a_1$  (concentración en el máximo de Chla) y c)  $Z_{m_1}$  (profundidad del segundo máximo de Chla) para la región y época Sur Costero Frío (SCF).



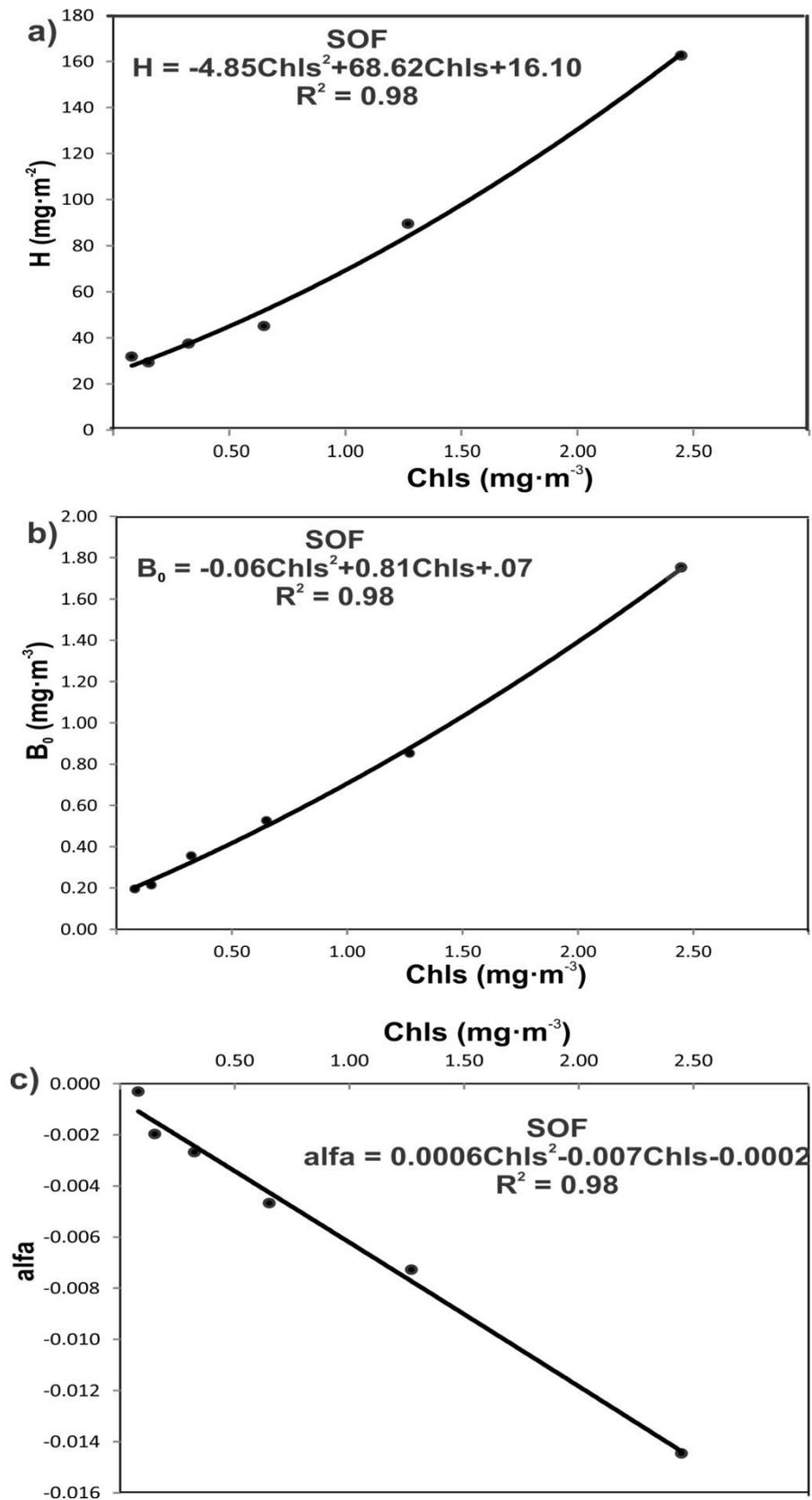
**Figura 25.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_2$  (ancho del segundo máximo de Chla), b)  $a_2$  (concentración en el segundo máximo de Chla) y c)  $Zm_2$  (profundidad del segundo máximo de Chla), para la región y época Sur Costero Frío (SCF).



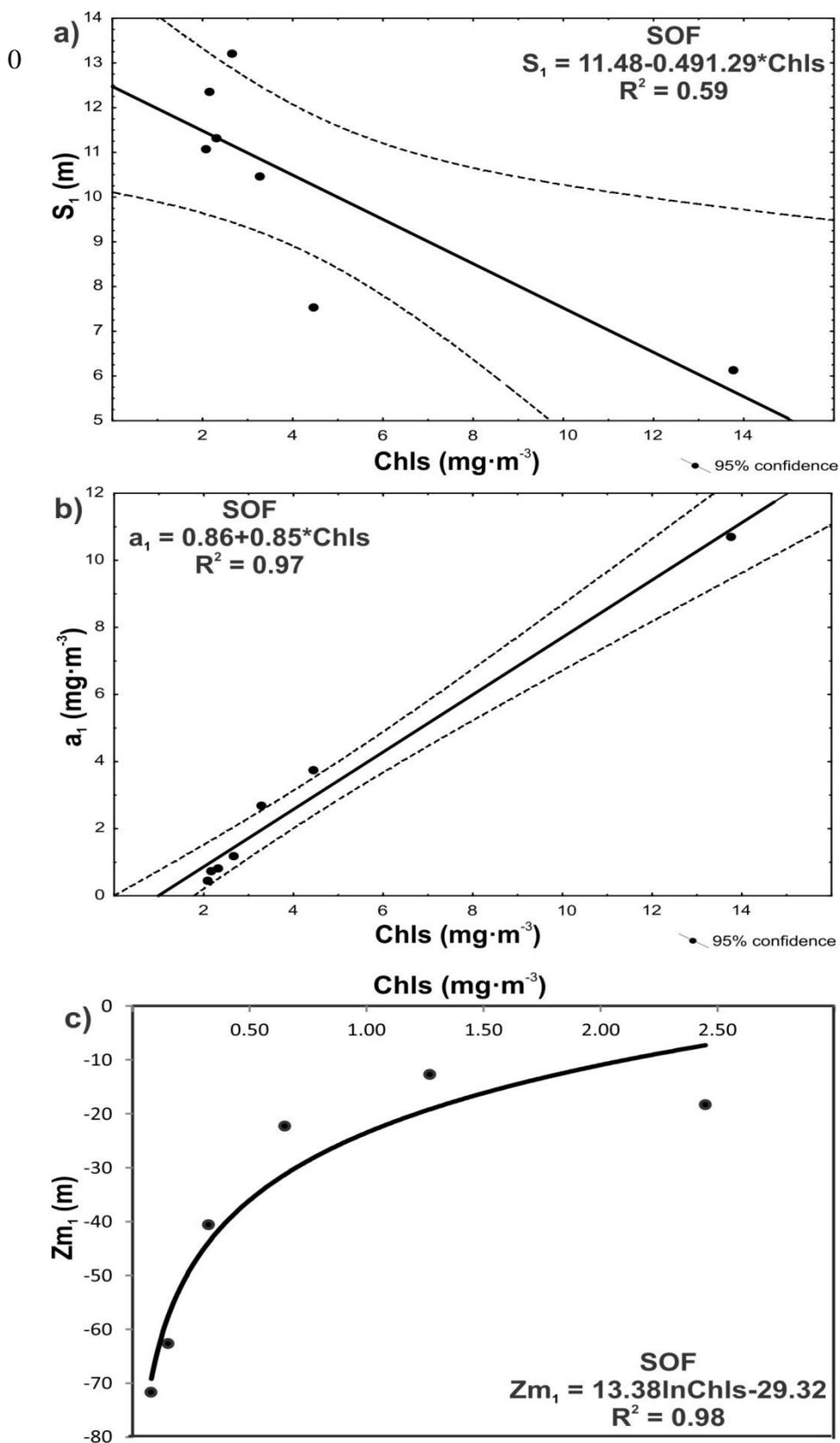
**Figura 26.** Regresión entre la Chls y los parámetros a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana), b)  $B_0$  (concentración del pigmento en la línea-base) y c)  $S_1$  (ancho del máximo de Chla), para la región y época Sur Océánico Caliente (SOC).



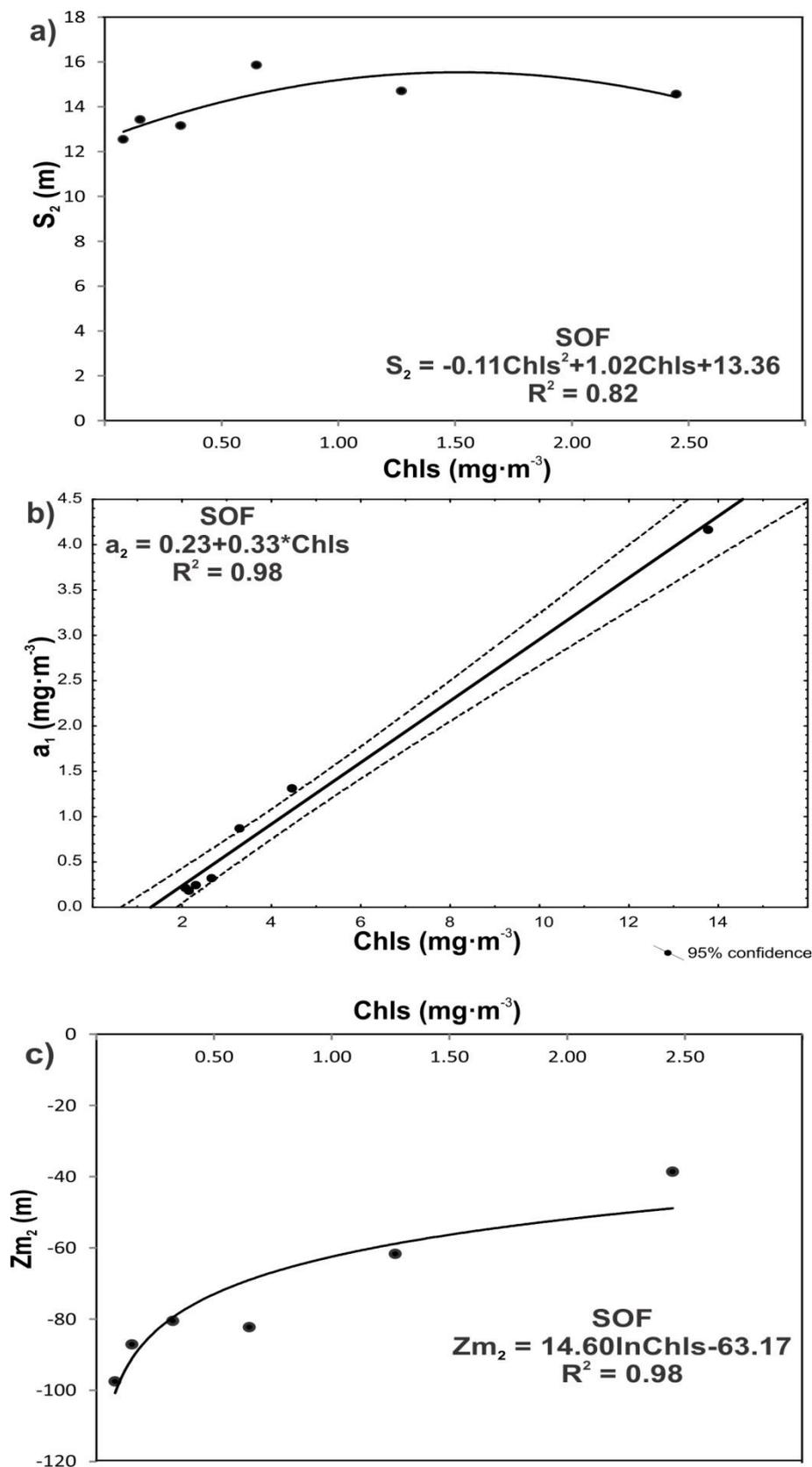
**Figura 27.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $a_1$  (concentración en el máximo de Chla), b)  $a_2$  (concentración en segundo el máximo de Chla) y c)  $Zm_2$  (profundidad del segundo máximo de Chla), para la región y época Sur Océánico Caliente (SOC).



**Figura 28.** Regresión entre la Chls y los parámetros a) H (Chla integrada bajo la curva gaussiana), b)  $B_0$  (concentración del pigmento en la línea-base) y c) alfa (gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana), para la región y época Sur Océánico Frío (SOF).



**Figura 29.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_1$  (ancho del máximo de Chla), b)  $a_1$  (concentración en el máximo de Chla) y c)  $Zm_1$  (profundidad del máximo de Chla), para la región y época Sur Océánico Frío (SOF).

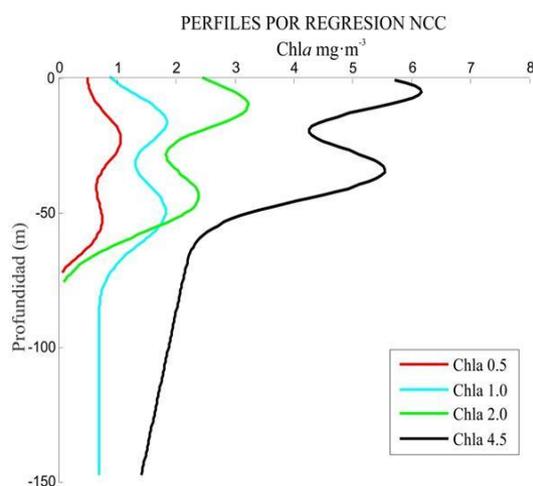


**Figura 30.** Regresión entre la Chls y los parámetros a)  $S_2$  (ancho del segundo máximo de Chla), b)  $a_2$  (concentración en el segundo máximo de Chla) y c)  $Zm_2$  (profundidad del segundo máximo de Chla) para la región y época Sur Oceánico Frío (SOF).

El objetivo planteado en este capítulo es poder inferir el perfil vertical promedio de *Chla* para las diferentes regiones y épocas del año de la región CALCOFI a partir de valores de concentración de *Chla* superficial (Chls). Con las ecuaciones listadas en la tabla 6 se aplicó la ecuación correspondiente para cada región y época y se generó un perfil para cuatro diferentes concentraciones de Chls (0.5, 1 2 y 4.5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

La figura 31 representa los perfiles verticales para la región y época NCC. Las concentraciones de Chls menores de 1  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  presentan perfiles verticales de *Chla* con dos máximos con concentraciones máximas pequeñas ( $a_1$  y  $a_2$ ) sin embargo esta característica de perfiles verticales con dos máximos se da en las cuatro concentraciones que se utilizaron para inferir el tipo de perfil esperado por región y época; por ejemplo concentraciones de Chls mayores de 1 y menores de 2  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  se presentan perfiles verticales de *Chla* con dos máximos bien definidos sin gradiente vertical (pendiente). Con concentraciones mayores de 2  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  se presentan perfiles verticales de *Chla* con dos máximos con pendiente menores a los 100 metros de profundidad. Concentraciones mayores de 4  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  se presentan perfiles verticales de *Chla* con dos máximos bien definidos con pendiente vertical.

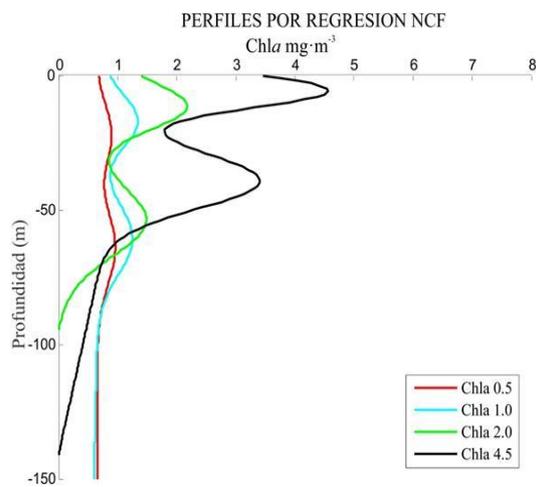
		Chls mg·m <sup>-3</sup>				
		0.5	1	2	4.5	
NCC	$H = 48.3859 + 18.3215 * Chla$	H	33.35	66.71	133.41	300.18
NCC	$B_0 = 0.4944 + 0.2218 * Chla$	B <sub>0</sub>	0.36	0.82	2.43	5.62
NCC	$\alpha = 0.0006 * Chla^3 - 0.0068 * Chla^2 + 0.0166 * Chla - 0.0131$	$\alpha$	-0.01	0.00	0.02	0.10
NCC	$Z_{m1} = 8.7307 \ln(Chla) - 16.917$	Z <sub>m1</sub>	-22.97	-16.92	-10.87	-3.79
NCC	$S_1 = 9.1701 - 0.63 * Chla$	S <sub>1</sub>	9.39	9.07	8.44	6.87
NCC	$a_1 = 0.4489 + 0.5592 * Chla$	a <sub>1</sub>	0.73	1.01	1.57	2.97
NCC	$Z_{m2} = -57.1664 + 6.1532 * Chla$	Z <sub>m2</sub>	-54.09	-51.01	-44.86	-39.48
NCC	$S_2 = 13.3756 - 1.0464 * Chla$	S <sub>2</sub>	12.85	12.33	11.28	8.67
NCC	$a_2 = 0.5414 + 0.4827 * Chla$	a <sub>2</sub>	0.68	1.02	1.51	2.71



**Figura 31** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Norte Costera Caliente (NCC). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro del ajuste del perfil vertical. La ecuación se utilizó con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>.

La figura 32 representa los perfiles verticales de Chla para la región y época NCF. Para esta zona las concentraciones menores de 1 mg·m<sup>-3</sup> se relacionan a perfiles verticales con dos máximos poco definidos sin pendiente vertical. Los perfiles que presentan dos máximos se manifiestan a profundidades menores a los 50 metros. Concentraciones mayores a 1, 2 y 4 mg·m<sup>-3</sup> en esta zona van generar perfiles verticales de Chla bien definidos con pendiente vertical, excepto para concentraciones de Chls mayores de 1 mg·m<sup>-3</sup> en donde no se presenta pendiente.

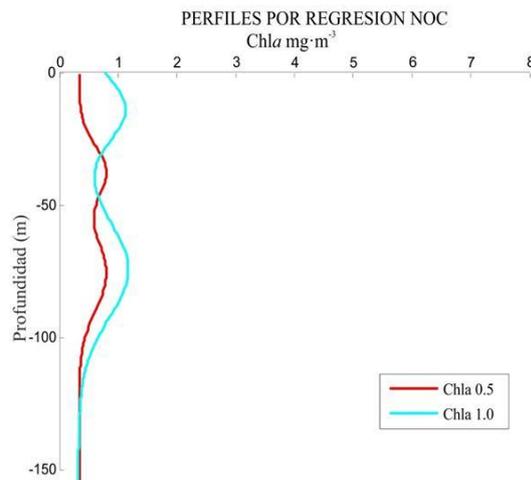
		Chls $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$				
		0.5	1	2	4.5	
NCF	$H = 31.7249 + 28.9366 \cdot \text{Chla}$	H	46.19	60.66	89.60	161.94
NCF	$B_0 = 0.5619 + 0.1889 \cdot \text{Chla}$	$B_0$	0.66	0.75	1.54	3.41
NCF	$\alpha = -0.003 - 0.0024 \cdot \text{Chla}$	$\alpha$	0.00	-0.01	-0.01	-0.01
NCF	$Z_{m1} = 7.4191 \ln(\text{Chla}) - 17.029$	$Z_{m1}$	-22.17	-17.03	-11.89	-5.87
NCF	$S_1 = 0.2159 \text{Chla}^2 - 2.1331 \text{Chla} + 11.415$	$S_1$	10.40	9.50	8.01	6.19
NCF	$a_1 = -0.1256 + 0.7403 \cdot \text{Chla}$	$a_1$	0.24	0.61	1.36	3.21
NCF	$Z_{m2} = -67.1604 + 6.1302 \cdot \text{Chla}$	$Z_{m2}$	-64.10	-61.03	-54.90	-39.57
NCF	$s_2 = 13.7646 - 0.837 \cdot \text{Chla}$	$S_2$	13.35	12.93	12.09	10.00
NCF	$a_2 = 0.0417 + 0.5228 \cdot \text{Chla}$	$a_2$	0.30	0.56	1.09	2.39



**Figura 32.** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Norte Costera Frío (NCF). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

La figura 33 representa los perfiles que se pueden esperar a partir del modelo propuesto para la región y época NOC, una particularidad de esta zona es que solo se presentan concentraciones promedio superficiales de Chla menores o iguales a 1  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , condición similar presentada en la NOF para concentraciones menores a 1  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Para NOC concentraciones superficiales menores a 0.5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  los perfiles verticales serán con máximo de Chla sin pendiente vertical. Para concentraciones mayores a 1  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  los perfiles serán de dos máximos y sin pendiente vertical.

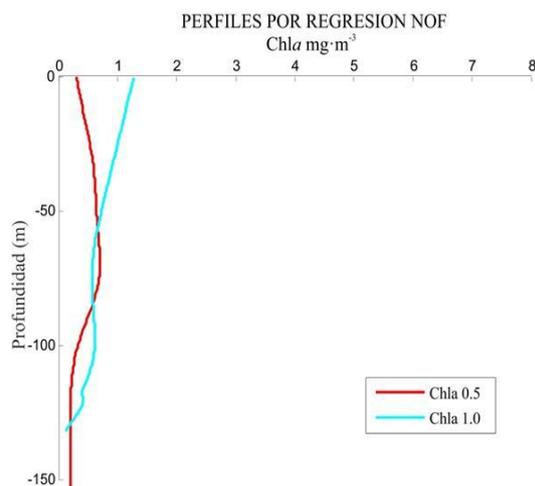
		Chls mg·m <sup>-3</sup>				
		0.5	1	2	4.5	
NOC	H = 27.6607+17.0456* Chla	H	36.18	44.71	NaN	NaN
NOC	B <sub>0</sub> = -0.5038 Chla <sup>2</sup> + 0.9077Chla + 0.0658	B <sub>0</sub>	0.39	0.67	NaN	NaN
NOC	α = -0.0007-0.0044* Chla	α	0.00	-0.01	NaN	NaN
NOC	Zm <sub>1</sub> = -58.0579+44.0057* Chla	Zm <sub>1</sub>	-36.06	-14.05	NaN	NaN
NOC	S <sub>1</sub> = -9.7705*Chla <sup>3</sup> + 23.716*Chla <sup>2</sup> -15.491*Chla+12.699	S <sub>1</sub>	9.66	11.15	NaN	NaN
NOC	a <sub>1</sub> = 0.2048+0.3862* Chla	a <sub>1</sub>	0.40	0.59	NaN	NaN
NOC	Zm <sub>2</sub> = 58.576*Chla <sup>3</sup> - 107.61*Chla <sup>2</sup> + 59.36*Chla - 83.405	Zm <sub>2</sub>	-73.31	-70.08	NaN	NaN
NOC	S <sub>2</sub> = -22.701*Chla <sup>3</sup> + 44.57*Chla <sup>2</sup> - 19.679*Chla + 15.042	S <sub>2</sub>	13.51	17.23	NaN	NaN
NOC	a <sub>2</sub> = 0.1237+0.5667 * Chla	a <sub>2</sub>	0.41	0.69	NaN	NaN



**Figura 33.** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Norte Oceánico Caliente (NOC). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>. En esta división solo se presentan concentraciones superficiales de clorofila a menores o iguales a 1 mg·m<sup>-3</sup>.

La figura 34 representa los perfiles verticales para la región y época NOF. En esta zona se presenta la misma condición que en NOC, es decir solo se van a presentar perfiles con concentraciones superficiales de Chla menores o iguales a 1 mg·m<sup>-3</sup>. En este caso los perfiles que se obtendrán en concentraciones menores a 0.5 mg·m<sup>-3</sup> con un máximo sin pendiente. Se puede considerar, que en promedio los perfiles verticales de Chla obtenidos a partir de concentraciones mayores a 1 mg·m<sup>-3</sup> presentarán un máximo con pendiente.

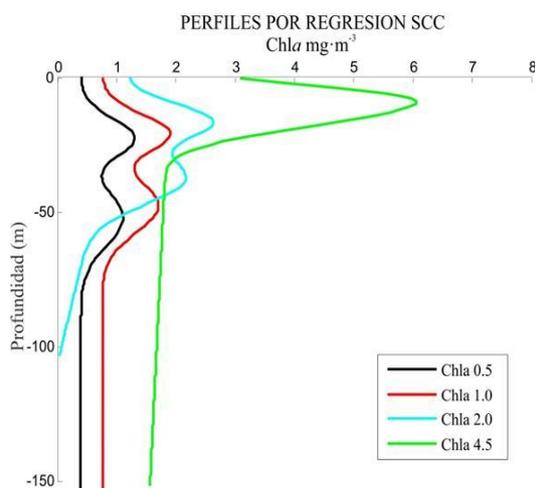
		Chls mg·m <sup>-3</sup>				
		0.5	1	2	4.5	
NOF	$H = 26.9716 + 25.6721 \cdot \text{Chla}$	H	39.81	52.64	NaN	NaN
NOF	$B_0 = 0.1675 + 0.4058 \cdot \text{Chla}$	B <sub>0</sub>	0.37	1.37	NaN	NaN
NOF	$\alpha = -0.0006 - 0.0053 \cdot \text{Chla}$	$\alpha$	0.00	-0.01	NaN	NaN
NOF	$Z_{m1} = -63.7058 + 48.7161 \cdot \text{Chla}$	Z <sub>m1</sub>	-39.35	-14.99	NaN	NaN
NOF	$S_1 = -58.503 \cdot \text{Chla}^3 + 132.04 \cdot \text{Chla}^2 - 78.188 \cdot \text{Chla} + 23.187$	S <sub>1</sub>	24.42	135.54	NaN	NaN
NOF	$a_1 = 0.1557 + 0.4177 \cdot \text{Chla}$	a <sub>1</sub>	0.36	0.57	NaN	NaN
NOF	$Z_{m2} = 228.43 \cdot \text{Chla}^3 - 471.62 \cdot \text{Chla}^2 + 256.33 \cdot \text{Chla} - 113.68$	Z <sub>m2</sub>	-74.87	-100.54	NaN	NaN
NOF	$s_2 = 10.6878 + 8.6982 \cdot \text{Chla}$	S <sub>2</sub>	15.04	19.39	NaN	NaN
NOF	$a_2 = 0.114 + 0.3713 \cdot \text{Chla}$	a <sub>2</sub>	0.30	0.49	NaN	NaN



**Figura 34.** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Norte Oceánico Frío (NOF). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>. En esta división solo se presentan concentraciones superficiales de clorofila a menores o iguales a 1 mg·m<sup>-3</sup>.

Para la región SCC (Fig.35) todos los perfiles propuestos a partir de las diferentes concentraciones de Chls (0.5, 1, 2 y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>) van a generar perfiles verticales con dos máximos bien definidos sin pendiente vertical, excepto para el perfil obtenido con una concentración de Chls mayor de 2 mg·m<sup>-3</sup> ya que este sí presenta pendiente.

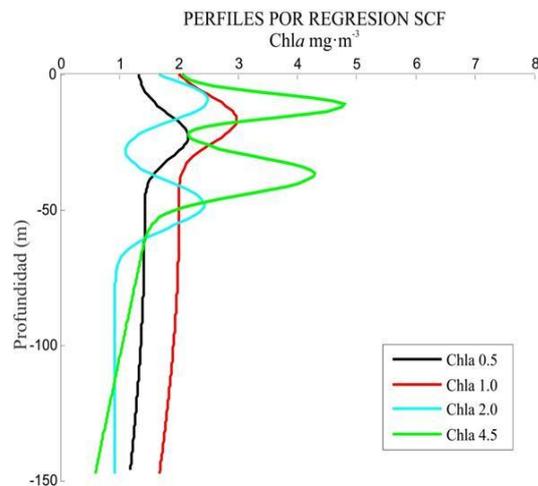
		Chls mg·m <sup>-3</sup>				
		0.5	1	2	4.5	
SCC	$H = 44.1971 + 8.3262 \cdot \text{Chla}$	H	48.36	52.52	60.85	81.67
SCC	$B_0 = 0.4258 + 0.2903 \cdot \text{Chla}$	B <sub>0</sub>	0.57	0.72	1.01	3.03
SCC	$\text{alfa} = 0.0022 - 0.0048 \cdot \text{Chla}$	alfa	0.00	0.00	-0.01	-0.02
SCC	$Z_{m1} = -24.3043 + 4.0589 \cdot \text{Chla}$	Z <sub>m1</sub>	-22.27	-20.25	-16.19	-6.04
SCC	$S_1 = -0.0348 \cdot \text{Chla}^2 - 0.3062 \cdot \text{Chla} + 7.0269$	S <sub>1</sub>	6.87	6.69	6.28	4.94
SCC	$a_1 = 0.5979 + 0.4008 \cdot \text{Chla}$	a <sub>1</sub>	0.80	1.00	1.40	2.40
SCC	$Z_{m2} = -55.9317 + 9.3675 \cdot \text{Chla}$	Z <sub>m2</sub>	-51.25	-46.56	-37.20	-13.78
SCC	$s_2 = 10.6058 - 0.9089 \cdot \text{Chla}$	S <sub>2</sub>	10.15	9.70	8.79	6.52
SCC	$a_2 = 0.426 + 0.4171 \cdot \text{Chla}$	a <sub>2</sub>	0.63	0.84	1.26	2.30



**Figura 35.** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Sur Costero Caliente (SCC). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>.

La figura 36 presenta una marcada diferencia en los perfiles verticales dependiendo de la Chls con la que se esté trabajando. Esta figura representa la región y época SCF en donde se observa que a concentraciones menores de 2 mg·m<sup>-3</sup> se presentan perfiles verticales con un máximo sin pendiente. Para concentraciones mayores de 2 mg·m<sup>-3</sup> los perfiles serán con dos máximos sin pendiente vertical.

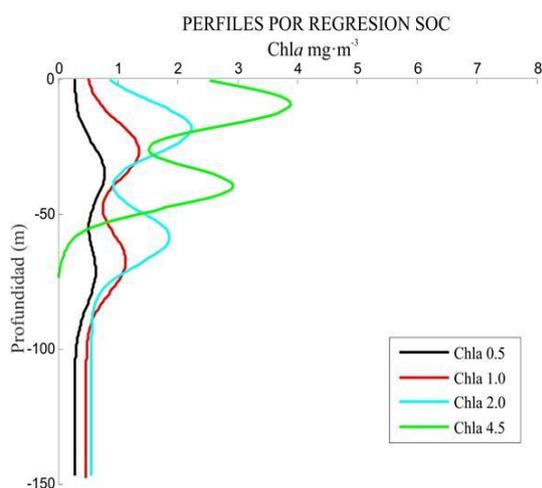
		Chls $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$				
		0.5	1	2	4.5	
SCF	$H = 39.927 + 20.7087 \cdot \text{Chla}$	H	50.28	60.64	81.34	133.12
SCF	$B_0 = 0.532 + 0.2927 \cdot \text{Chla}$	$B_0$	1.35	1.65	2.04	2.06
SCF	$\text{alfa} = -0.0015 - 0.0015 \cdot \text{Chla}$	alfa	0.00	0.00	0.00	-0.01
SCF	$Z_{m1} = 0.3516 \cdot \text{Chla}^3 - 4.8469 \cdot \text{Chla}^2 + 19.545 \cdot \text{Chla} - 32.235$	$Z_{m1}$	-23.63	-17.19	-9.72	-10.39
SCF	$S_1 = 0.1033 \cdot \text{Chla}^3 - 1.0722 \cdot \text{Chla}^2 + 1.8447 \cdot \text{Chla} + 7.6279$	$S_1$	8.30	8.50	7.85	3.63
SCF	$a_1 = 0.4569 + 0.4728 \cdot \text{Chla}$	$a_1$	0.69	0.93	1.40	2.58
SCF	$Z_{m2} = -62.0073 + 6.4479 \cdot \text{Chla}$	$Z_{m2}$	-58.78	-58.56	-49.11	-32.99
SCF	$S_2 = 0.2513 \cdot \text{Chla}^2 - 2.75 \cdot \text{Chla} + 13.123$	$S_2$	11.81	10.62	8.63	5.84
SCF	$a_2 = 0.5363 + 0.4032 \cdot \text{Chla}$	$a_2$	0.74	0.94	1.34	2.35



**Figura 36.** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Sur Costero Frío (SCF). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

La figura 37 representa la zona SOC en donde las concentraciones menores de 0.5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  van a generar perfiles con un máximo sin pendiente vertical, las concentraciones mayores de 1 y 2  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  van a generar perfiles con dos máximos bien definidos sin pendiente y para la concentraciones mayores de 4.5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  los perfiles verticales de Chla será con dos máximos y con pendiente vertical.

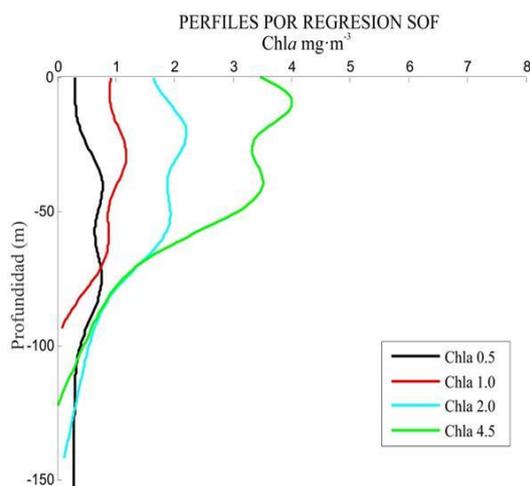
		Chls mg·m <sup>-3</sup>				
		0.5	1	2	4.5	
SOC	$H = 29.3683 + 17.7006 \cdot \text{Chla}$	H	38.22	47.07	64.77	109.02
SOC	$B_0 = -0.0277 \cdot \text{Chla}^2 + 0.2344 \cdot \text{Chla} + 0.2127$	B <sub>0</sub>	0.32	0.42	0.97	2.71
SOC	$\text{alfa} = -0.0004 \cdot \text{Chla}^3 + 0.0042 \cdot \text{Chla}^2 - 0.0095 \cdot \text{Chla} + 0.0008$	alfa	0.00	0.00	0.00	0.01
SOC	$Z_{m1} = 12.386 \ln(\text{Chla}) - 27.318$	Z <sub>m1</sub>	-35.90	-27.32	-18.73	-8.69
SOC	$s_1 = 11.5585 - 0.7267 \cdot \text{Chla}$	S <sub>1</sub>	11.20	10.83	10.11	8.29
SOC	$a_1 = 0.086 + 0.7014 \cdot \text{Chla}$	a <sub>1</sub>	0.44	0.79	1.49	3.24
SOC	$Z_{m2} = -77.4029 + 8.6725 \cdot \text{Chla}$	Z <sub>m2</sub>	-73.07	-68.73	-60.06	-38.38
SOC	$S_2 = 0.1896 \cdot \text{Chla}^2 - 2.1989 \cdot \text{Chla} + 13.64$	S <sub>2</sub>	12.59	11.63	10.00	7.58
SOC	$a_2 = 0.0236 + 0.5666 \cdot \text{Chla}$	a <sub>2</sub>	0.31	0.59	1.16	2.57



**Figura 37.** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Sur Oceánico Caliente (SOC). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>.

La figura 38 muestra los perfiles verticales de Chla que se pueden obtener para región y época Sur Oceánica Fría en donde con superficiales concentraciones menores a 0.5 mg·m<sup>-3</sup> se van a presentar perfiles verticales con un máximo sin pendiente. Las concentraciones mayores a 1 mg·m<sup>-3</sup> van a generar perfiles verticales de Chla con un máximo con pendiente. A concentraciones mayores a 2 mg·m<sup>-3</sup> los perfiles verticales tendrán dos máximos con pendiente.

		Chls mg·m <sup>-3</sup>				
		0.5	1	2	4.5	
SOF	$H = -4.85 \cdot \text{Chla}^2 + 68.627 \cdot \text{Chla} + 16.109$	H	49.21	79.89	133.96	226.72
SOF	$B_0 = -0.0661 \cdot \text{Chla}^2 + 0.8107 \cdot \text{Chla} + 0.0723$	B <sub>0</sub>	0.46	0.82	1.43	3.38
SOF	$\text{alfa} = 0.0006 \cdot \text{Chla}^2 - 0.007 \cdot \text{Chla} - 0.0002$	alfa	0.00	-0.01	-0.01	-0.02
SOF	$Z_{m1} = 13.38 \ln(\text{Chla}) - 29.326$	Z <sub>m1</sub>	-38.60	-29.33	-20.05	-9.20
SOF	$s_1 = 11.4833 - 0.4953 \cdot \text{Chla}$	S <sub>1</sub>	11.24	10.99	10.49	9.25
SOF	$a_1 = 0.2705 + 0.2696 \cdot \text{Chla}$	a <sub>1</sub>	0.41	0.54	0.81	1.48
SOF	$Z_{m2} = 14.606 \ln(\text{Chla}) - 63.179$	Z <sub>m2</sub>	-73.30	-63.18	-53.05	-49.21
SOF	$S_2 = -0.1177 \text{Chla}^2 + 1.0212 \cdot \text{Chla} + 13.361$	S <sub>2</sub>	13.84	14.26	14.93	15.57
SOF	$a_2 = 0.2372 + 0.3398 \cdot \text{Chla}$	a <sub>2</sub>	0.41	0.58	0.92	1.77



**Figura 38.** Perfil obtenido a partir de las ecuaciones propuestas para la división Sur Oceánico Frío (SOF). La segunda columna describe la ecuación para cada parámetro que conforma el perfil vertical. La ecuación se desarrolla con 4 diferentes concentraciones de clorofila superficial, 0.5, 1, 2, y 4.5 mg·m<sup>-3</sup>.

## Discusión y Conclusiones

La estimación de la producción primaria a través de grandes áreas del océano requiere información sobre la forma de los perfiles verticales de Chla (Platt *et al.* 1988, Millan-Núñez *et al.*, 1997). En este estudio se desarrolla un enfoque cuantitativo para describir la variación continua de la forma del perfil vertical de Chla de cada una de las regiones y épocas establecidas en este trabajo. Se describe la forma del perfil vertical mediante el establecimiento de ecuaciones que incluyen los cuatro parámetros el modelo gaussiano, Platt *et al.*, (1988), pero con la innovación de incluir ecuaciones que cuantifiquen un segundo máximo subsuperficial y así poder

evaluar perfiles verticales de Chla con más de un máximo y no descartarlos como se realizó en algunos trabajos anteriores a este, (Cullen y Eppley, 1981; Cullen, 1982; Millán-Núñez *et al.*, 1997; Platt *et al.*, 1988; Richardson *et al.*, 2003; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2008.)

Las figuras 31 a la 38 representan los distintos perfiles que pueden ser inferidos en las épocas y regiones en las cuales se dividió en área de estudio del presente trabajo. Por ejemplo que en la región NCC (Fig. 31) se presentan perfiles con dos máximos muy bien definidos cuando la concentración superficial sea mayor a  $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  debido a la cercanía de la costa y a las surgencias, aunque de menor intensidad que se presentan en esa época del año (Durazo, 2009). La región NCF (Fig. 32), presenta perfiles verticales mejor definidos que en la región NCC, es decir perfiles con dos máximos con mayores concentraciones máximas debido a que son perfiles cercanos a la costa (Millan-Nuñez, 1996) y que en la época fría la surgencias son más intensas (Durazo, 2009).

Al comparar la misma región en diferente época, NOC (Fig. 33) con la región NOF (Fig. 34), los perfiles con dos máximos se presentarán en condiciones de mayor temperatura. La clorofila integrada (H) presenta valores muy similares para las dos concentraciones superficiales propuestas lo que es indicativo de la poca variabilidad que se presenta en la zona oceánica de zona de estudio, resultados que coinciden con lo obtenido por Millan-Nuñez *et al.*, (1997).

Al comparar la región NOF (Fig. 34) con la región SOF (Fig. 38), existe variación significativa ya que en NOF solo se presentan concentraciones superficiales menores o iguales a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Al comparar la H entre las dos zonas en SOF fue mayor que en NOF en las concentraciones con las que se puede comparar. Perfiles con dos máximos solo se presentarían en la región SOF cuando se tengan concentraciones superficiales a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Estos resultados difieren un lo obtenido por Millan-Nuñez *et al.*, (1997) ya que estos autores determinan que hay muy poca variabilidad en entre la región Norte-Sur en la época fría.

Para la región SCC (Fig. 35) en donde se presentan perfiles con dos máximos con las cuatro concentraciones superficiales se atribuye este comportamiento debido a las condiciones costeras de la zona siendo más productiva que su contraparte oceánica (Platt, *et. al* 1998, Millan-Nuñez, 1997).

De manera general al comparar la región costera Norte-Sur en la época fría (Fig. 32 y 36) se puede determinar que hay poca variación en el tipo de perfiles obtenidos, resultado similar a lo que obtuvo Millan-Nuñez *et. al.*, (1997). Al comparar esta región (SCF), con la región oceánica (SOC), hay una diferencia notable en el tipo de perfil que se presenta a concentraciones mayores de  $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ya que la región oceánica presenta perfiles verticales con dos máximos pequeños en comparación con los máximos que se presentan en la región costera con perfiles con dos máximos muy bien definidos.

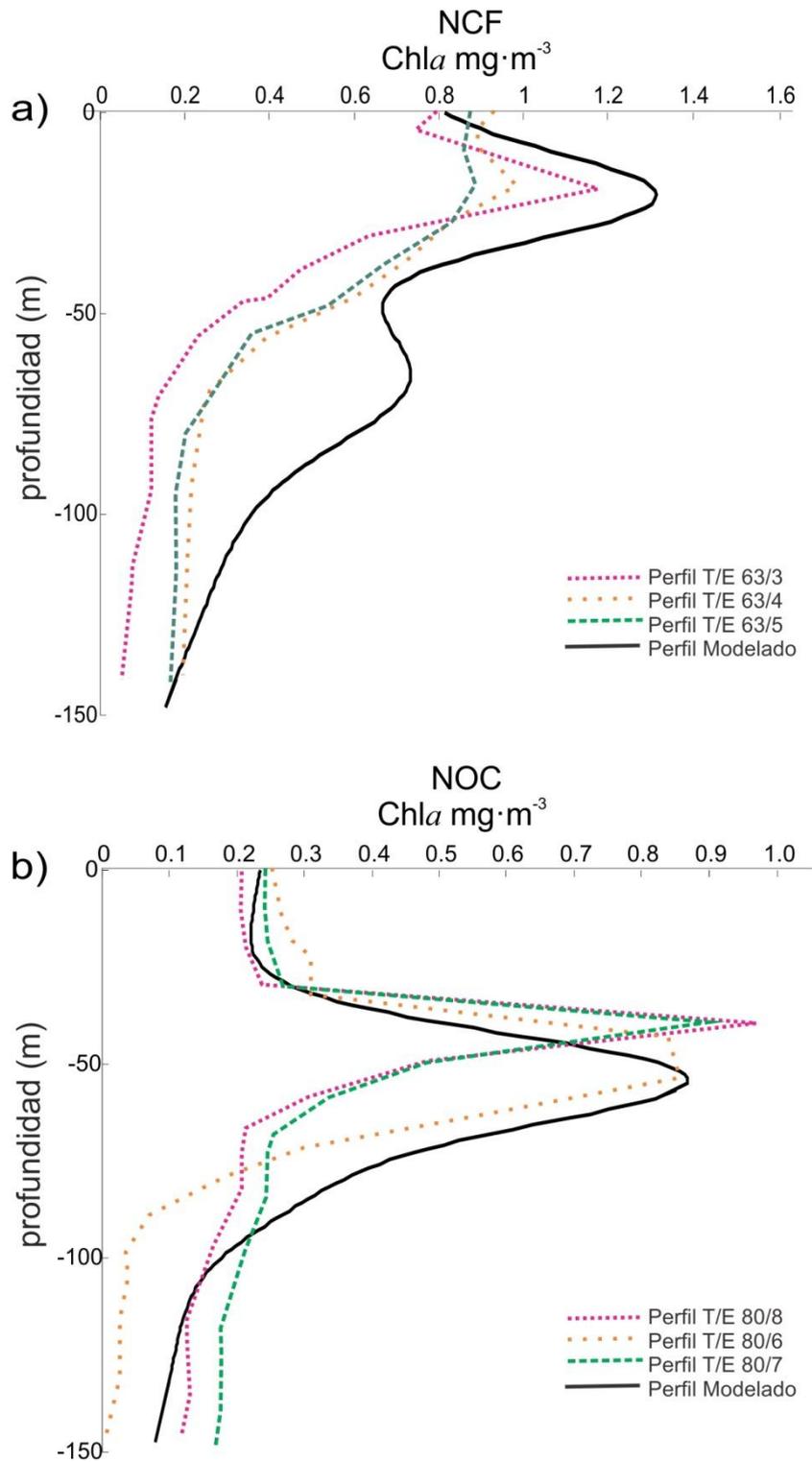
Las regiones SOF y SOC con concentraciones superficiales menores o iguales a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  se presentarán perfiles con 1 máximo, tal vez se puede considerar dos máximos pequeños provocando una diferencia en los valores de H. Esta condición se puede atribuir a que en la época fría la región CALCOFI tiene presencia de las surgencias más fuertes del año (Millán-Núñez y Lara-Lara 1995; Durazo 2009).

Para probar que es posible inferir el perfil vertical de  $\text{Chla}$  promedio en la región CALCOFI mediante la concentración  $\text{Chls}$ , se realizó una comparación entre perfiles *in situ* de la zona y el perfil calculado mediante las ecuaciones propuestas en la tabla 6. Esta comparación se realizó en 12 zonas (al azar) por época y región del año 2012 y en cada una de ellas se comparó 3 perfiles *in situ* contra el perfil estimado (Fig. 39 a 44).

En la figura 39a se muestran tres perfiles verticales de la región y época Norte Costero Caliente del transecto 63 en el mes de febrero, el perfil 63/5 presenta un solo máximo de  $\text{Chla}$  con pendiente vertical, los perfiles T/E 63/3 y 63/4 presentan un solo máximo entre los 0 y 50 metros; los tres perfiles presentan una  $\text{Chls}$  entre 0.6 y  $0.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . El perfil modelado presenta dos máximos con pendiente. La diferencia más notable entre el perfil modelado y los perfiles *in situ* es que en el perfil modelado el primer máximo se dan entre los 0 y 50 metros de profundidad y el segundo máximo alrededor de los 75 metros de profundidad. Otra diferencia se da en la máxima concentración ( $a_1$  y  $a_2$ ) siendo mayor para ambos casos en el perfil promedio. De manera general se considera una buena aproximación de este perfil promedio modelado con los perfiles *in situ* para el primer máximo ya que todos los

perfiles *in situ* presentan un solo máximo y el perfil vertical modelado presentan dos máximos.

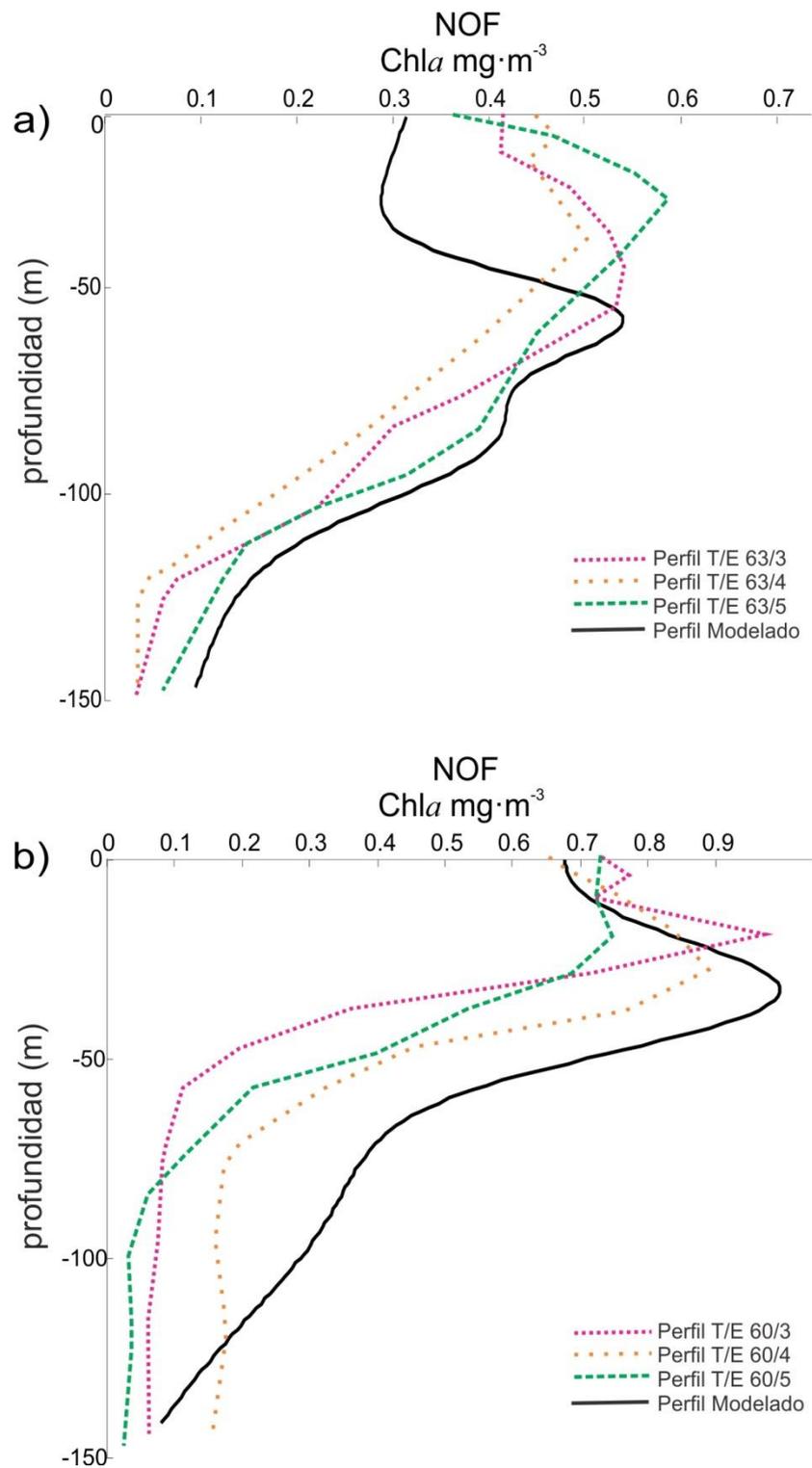
La Fig. 39b representa perfiles *in situ* para la región y época Norte Oceánico Caliente para el mes de octubre de 2012, en el transecto 80. Los tres perfiles *in situ* muestran un solo máximo con pendiente vertical. El perfil modelado para esta región presenta características similares a los perfiles *in situ*, con un solo máximo de  $Chla$  pendiente vertical y una  $Chls$  que se encuentra entre  $0.1$  y  $0.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  para los 4 perfiles. Esta aproximación la consideramos cercana a lo que se puede esperar en la zona de estudio, ya que en promedio en esta zona y región a concentraciones menores a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  se van a presentar perfiles con un solo máximo alrededor de los 50 metros de profundidad partiendo de una  $Chls$  superficial entre  $0.1$  y  $0.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y con máxima concentración de clorofila entre  $0.7$  y  $0.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , lo cual coincide con lo obtenido para el perfil modelado.



**Figura 39.** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) NCF y b) NOC. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*.

La Fig. 40a muestra perfiles verticales de *Chla* de la región y época Norte Oceánico Fría para el mes de febrero en el transecto 60. Los tres perfiles *in situ* tienen un solo máximo de *Chla*, presentan pendiente vertical y la *Chls* se encuentra entre 0.37 y 0.41  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . El perfil modelado presenta concentraciones superficiales de *Chla* menores (0.31  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a los perfiles *in situ*. La concentración máxima de clorofila en el perfil modelado se encuentra por debajo de los 50 metros de profundidad, en los perfiles *in situ* se encuentra entre los 25 y 50 metros. Después de los 50 metros de profundidad los 4 perfiles presentan ciertas similitudes en cuanto a la pendiente vertical y una tendencia a disminuir la concentración de *Chla* conforme aumenta la profundidad. En este caso la aproximación se considera parcial para estos tres perfiles *in situ*.

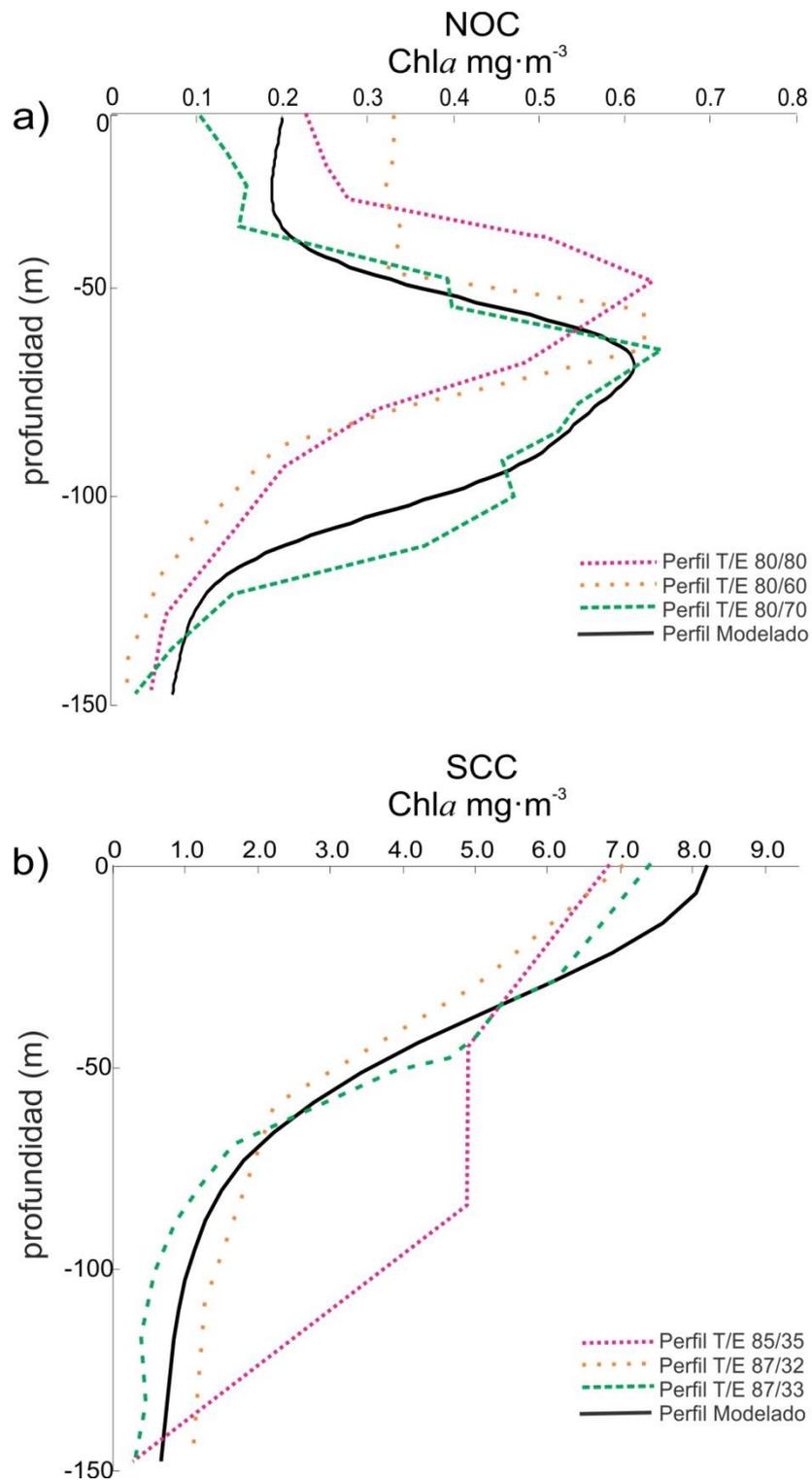
La fig. 40b muestra perfiles verticales de *Chla* para el mes de enero en la región y época Norte Oceánico Frío en el transecto 60. Uno de los perfiles T/E (60/3) muestra dos máximos, el primer máximo es muy somero antes de los 20 metros de profundidad y el segundo máximo aparece alrededor de los 50 metros. El resto de los perfiles incluido el modelado presenta un solo máximo y los 4 perfiles presentan pendiente vertical. Para esta región y época el perfil modelado se considera una buena aproximación a los perfiles *in situ* considerando que el primer máximo se va a presentar antes de los 50 metros de profundidad, la *Chla* superficial para los tres perfiles *in situ* y el modelado esta entre los 0.59 y 0.62  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . En ningún caso se presentan dobles máximos después de los 50 metros de profundidad.



**Figura 40.** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) NOF y b) NOF. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*.

La figura 41 a muestra perfiles *in situ* de la región y época Norte Oceánico Caliente para el mes de agosto en el transecto 80, estaciones 80, 60 y 70. Los tres perfiles *in situ* y el modelado muestran un solo máximo de Chla con pendiente vertical y con una Chls entre 0.1 y 0.3 mg·m<sup>-3</sup>. El perfil modelado representa una buena aproximación a lo esperado en la realidad basándonos en el hecho de que para esta región oceánica en la época caliente en la región CALCOFI se reportan perfiles con un máximo de Chla menores a 1 mg·m<sup>-3</sup> (Millan-Nuñez, *et al.*, 1997).

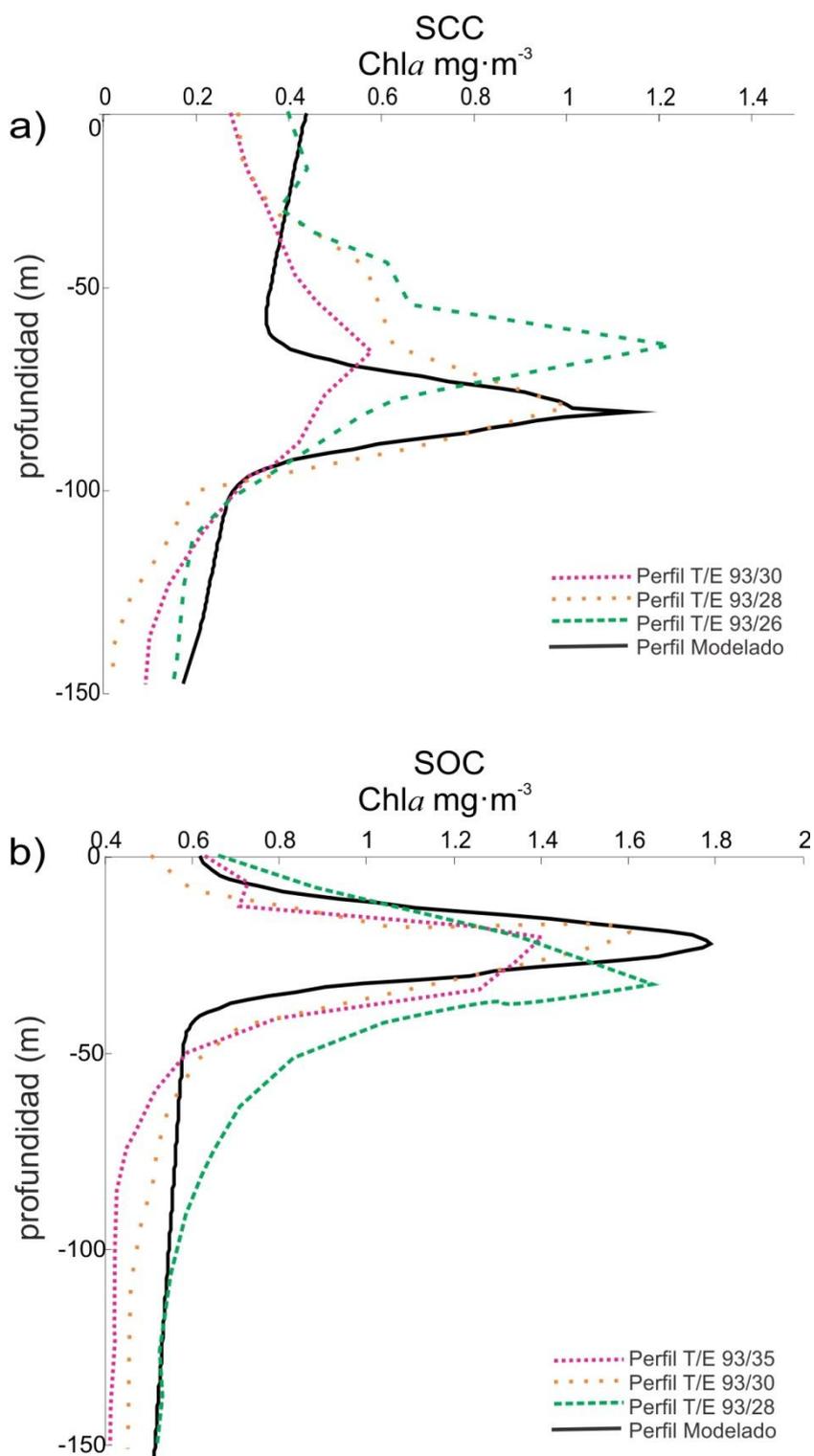
La figura 41b representa perfiles de clorofila *in situ* para la zona Sur Costero Caliente en el mes de octubre para el transecto 85, estaciones 35, 32 y 33. El perfil 85/35 es el único de esta serie de perfiles que presenta características distintas a los otros dos perfiles *in situ* y al perfil modelado con un máximo superficial de aproximadamente 6 mg·m<sup>-3</sup> y un segundo máximo alrededor de los 4 mg·m<sup>-3</sup>, a diferencia de los otros dos perfiles *in situ* y el modelado que solo presentan un máximo superficial entre los 6 y 7 mg·m<sup>-3</sup>, decreciendo la Chla conforme se da el aumento en profundidad. Estas concentraciones son las más altas registradas en la región y época.



**Figura 41.** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) NOC y b) SCC. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*.

La figura 42a presenta perfiles verticales de clorofila *in situ* con un solo máximo para la región y época Sur Costero Caliente en el mes de julio para el transecto 93, estaciones 30, 28 y 26. Para este transecto los perfiles verticales de cada una de las estaciones de Chla *in situ* presentan variabilidad en relación a la concentración máxima ( $a_1$ ) ya que el perfil 93/30 tiene una máxima concentración de  $0.21 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  a diferencia del perfil 93/26 con un máxima concentración de  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . El perfil modelado presenta características similares a los perfiles *in situ* en cuanto a la forma de los mismos y con el perfil 93/28 presenta una concentración máxima prácticamente igual ( $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), sin embargo la concentración máxima en el perfil modelado y el de la estación 28 se da cerca de los 90 metros a diferencia de los otros dos perfiles *in situ* que la máxima concentración se da antes de los 70 metros de profundidad.

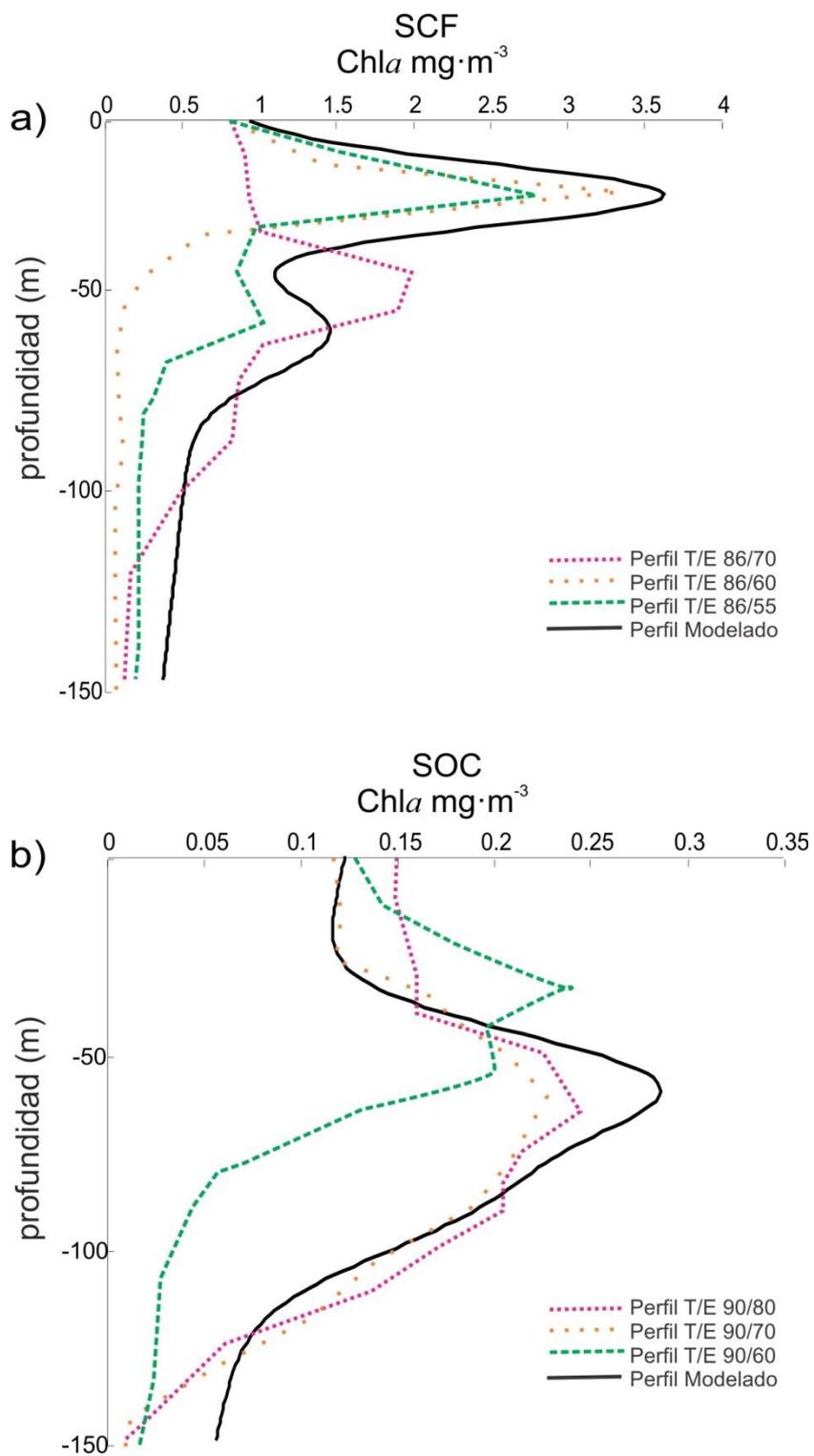
La figura 42b representa perfiles verticales de Chla de la región y época Sur Costero Caliente. Para estos transectos el perfil modelado es una buena aproximación para esta época y región ya que presenta características similares a los perfiles *in situ*, perfiles con un máximo de Chla con una máxima concentración alrededor de los 25 metros de profundidad y sin pendiente vertical. La concentración máxima en los cuatro perfiles se presenta entre los  $1.4$  y  $1.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , concentraciones que coinciden con lo reportado en la literatura para la región y época del año, (Millan-Núñez *et al.*, 1997).



**Figura 42.** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) SCC y b) SOC. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*.

La figura 43a muestra perfiles verticales de Chla para la región y época Sur Costero Frío para el mes de abril en el transecto 86, estaciones 70, 60 y 55 con valores altos en la máxima concentración entre 2 y 3.5 mg·m<sup>-3</sup>. Con excepción el perfil T/E 86/60 el resto de los perfiles incluyendo el modelado presentan dos máximos de Chla, valores muy similares en la concentración máxima entre los perfiles 86/60, 86/55 y el perfil modelado. El perfil T/E 86/70 presenta dos máximos pero con un desfase en relación a los otros tres perfiles ya que el primer máximo se da a los 50 metros de profundidad y el segundo casi a los 80 metros. Se considera el perfil modelado como una buena aproximación para el primer máximo en esta época y región, ya que la concentración máxima coincide en tres de los perfiles con la profundidad del máximo de clorofila. Para el segundo máximo, aunque se presentan en los tres perfiles *in situ*, estos no coinciden en profundidad con el del perfil modelado, ya que es este caso el segundo máximo es más profundo.

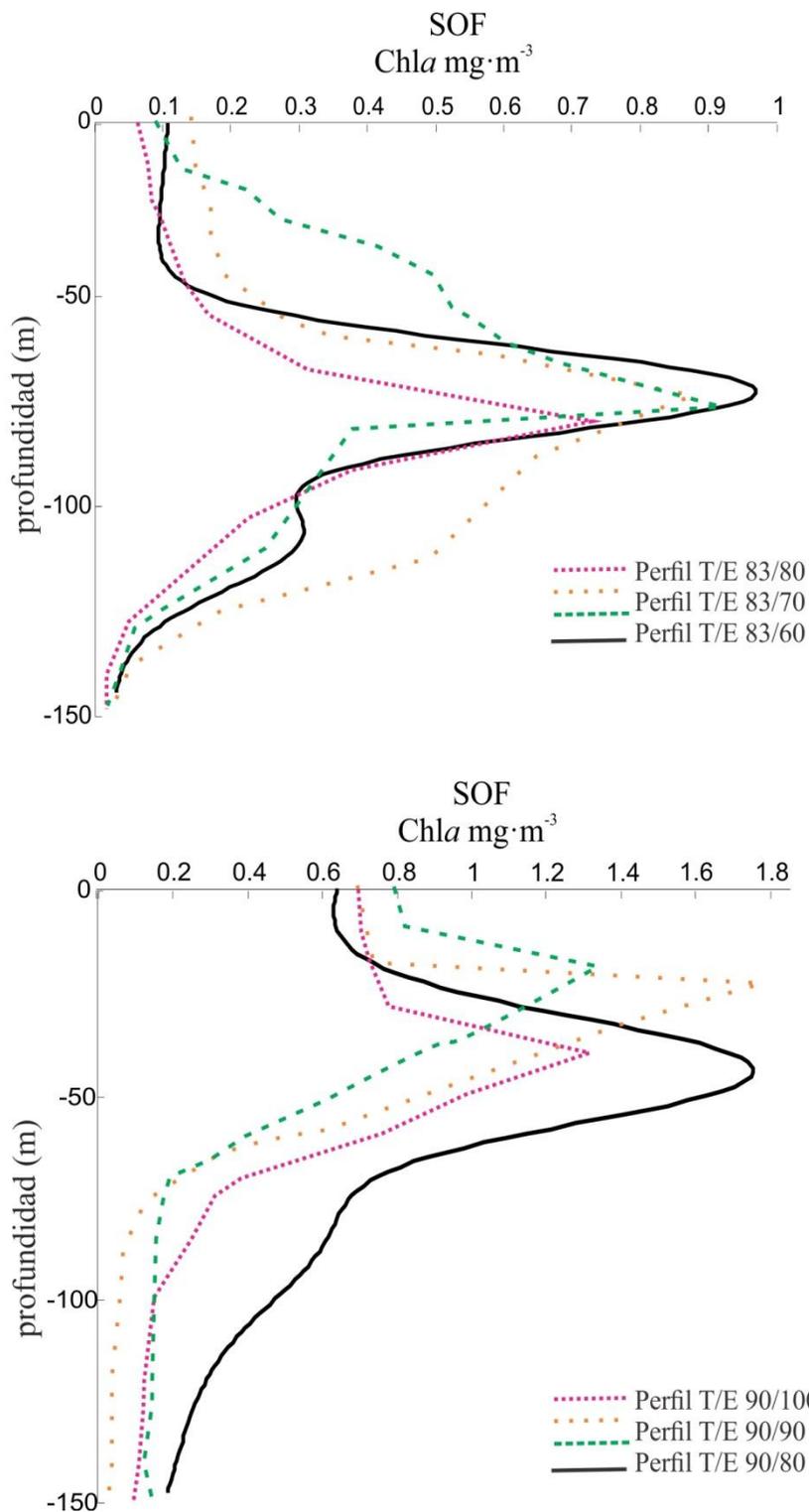
La figura 43b muestra perfiles para la región y época Sur Oceánico Caliente en el mes de octubre con un perfil *in situ* con dos máximos de Chla (90/60), el perfil T/E 90 /80 y 70 presentan un solo máximo con características similares en el perfil 80 al perfil modelado, en ambos perfiles se presenta una pendiente vertical y la profundidad del máximo de clorofila se da en ambos alrededor de los 70 metros de profundidad.



**Figura 43.** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) SCF y b) SOC. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*.

La figura 44a presenta perfiles verticales de Chla *in situ* para la región y época Sur Oceánica Fría para el mes de abril en el transecto 83. En los cuatro perfiles los tres *in situ*, presentan un solo máximo de Chla, Chls superficial entre 0.09 y 0.12 mg·m<sup>-3</sup> y el perfil modelado presenta características similares en el valor de la concentración máxima entre 0.7 y 0.9 mg·m<sup>-3</sup> sin embargo, este perfil modelado presenta un segundo máximo profundo (después de los 100 m), perfil que no se presenta en los tres perfiles *in situ*. En términos generales podemos decir que la aproximación no es muy buena si se toma en cuenta el segundo máximo de perfil modelado, sin embargo hay similitudes en la profundidad y concentración del máximo de clorofila.

La figura 44b presenta perfiles verticales de Chla *in situ* para la región y época Sur Oceánica Fría para el mes de enero en el transecto 90. Estos tres perfiles y el perfil modelado presentan un solo máximo. El perfil *in situ* más oceánico (90/100) y el perfil modelado presentan la máxima concentración de clorofila a la misma profundidad, alrededor de los 45 metros. Los dos perfiles menos oceánicos también presenta un solo máximo pero a profundidades de entre 25 y 30 metros. Ningún perfil presentó un segundo máximo y los cuatro perfiles presentaron pendiente vertical. De la comparación entre el perfil de clorofila modelado y los perfiles *in situ* se considera que el perfil promedio modelado, en algunos de casos representa una buena aproximación a los perfiles *in situ*, considerando que los valores de la máxima concentración son similares, además que la profundidad a la que se da esta concentración es cercana; sin embargo cuando no se da esta similitud, se debe considerar que el perfil de clorofila modelado es producto de una regresión entre la



**Figura 44.** Comparación de 3 perfiles *in situ* del año 2012 y el perfil estimado con las ecuaciones de la tabla 6, para la región y época a) SOF y b) SOF. T/E es el transecto y la estación de cada perfil *in situ*.

Chls y los parámetros promedio de los datos obtenidos por época y región y que en ocasiones tienen un intervalo grande de variación (Millan-Nuñez, *et al.*, 1997), además de entre otros factores a el proceso iterativo del modelo (Holland, 1975) que utiliza algoritmos genéticos como herramienta de evaluación, por lo tanto para evitar esta variabilidad y tener una mejor y mayor aproximación o inferencia al perfil esperado se debe de realizar la comparación del perfil evaluado con un mayor número de perfiles *in situ* para la misma región y época.

## CAPITULO III

### **Variabilidad de los perfiles verticales de clorofila en la región CALCOFI de la Corriente de California, durante 2000 a 2011.**

#### **Introducción**

La forma de los perfiles verticales en la Corriente de California varía mucho de región en región y de época del año debido a las condiciones hidrográficas, climatológicas, y los diferentes cambios en las condiciones físicas, químicas y biológicas como el pastoreo y hundimiento del plancton de agua de mar (Lynn y Simpson 1987; Millan-Núñez *et al.*, 1997). Específicamente el patrón de circulación de la Corriente de California cambia espacial y estacionalmente debido a la topografía, al calentamiento por la radiación solar, a eventos de surgencias; por lo que la abundancia y distribución de la biomasa fitoplanctónica es variable en el tiempo y espacio (Steele, 1978; Esaias, 1981). Smith *et al.*, (1988) mencionaron que esta variabilidad a escalas mayores de 100 km está controlada por las corrientes oceánicas. A escalas intermedias entre 10-100 km los fenómenos físicos de mesoescala como las surgencias tienen un papel importante, mientras que a escalas pequeñas menores a 10 km los fenómenos biológicos como el crecimiento y el pastoreo son los dominantes.

Por ejemplo la biomasa integrada del perfil vertical de clorofila presenta una clara diferencia entre regiones cercanas y alejadas de la costa con valores mayores cercanos a la costa. También presenta diferencias entre épocas siendo mayor en época fría, y con un incremento hacia el norte (Capítulo I y Muñoz-Anderson *et al.*, 2015). La profundidad del máximo de clorofila ( $Z_m$ ) presentó diferencias entre el

norte y el sur y entre la zona costera y la oceánica. La profundidad de máximo de clorofila fue mayor en la parte norte e incrementándose hacia mar abierto (Capítulo II).

Para estimar la producción primaria en la columna de agua es imprescindible conocer la distribución vertical de *Chla* (Taguchi, 1984, Kirk, 2011). Los perfiles verticales de *Chla* a menudo tienen un máximo sub-superficial (Cullen, 1982) y en algunos casos presentan más de un máximo sub-superficial (Cullen, 1983; Millán-Núñez *et al.*, 1997; Richardson, *et al.*, 2003; Muñoz-Anderson *et al.*, 2015). El suponer una distribución vertical de la *Chla* homogénea en columna de agua implica que valores de biomasa pueden ser subestimados si hay uno o dos máximos subsuperficiales o sobrestimados si el máximo está en la superficie. La variación de los perfiles verticales de *Chla* para cada categoría, región y época del año del área de estudio, nos indican que no se debe suponer una distribución homogénea con la profundidad en la Corriente de California (Platt, *et al.*, 1988)

Como ya se mencionó en el medio marino la forma del perfil vertical para cada región y época es un atributo del fitoplancton (productores primarios) (Smith *et al.*, 1988, Richardson *et al.*, 2003) y que varía de región en región y estas regiones requieren de límites dinámicos y las variables que conforman el perfil vertical de *Chla* presentan cierta constancia por temporada y una continuidad predecible dentro de cada región (Platt y Sathyendranath, 1998).

La forma del perfil vertical de Chla se ha modelado usando funciones gaussianas y está definido por los distintos parámetros que lo conforman (Capítulo I de esta tesis) y un cambio en cualquiera de ellos nos dará como resultado un perfil con forma diferente. Los perfiles se agruparon en las regiones oceánicas en áreas más pequeñas para que su comportamiento a ciertas variables permanezca con poca variación y poder inferir un perfil característico para cada zona geográfica y época del año (Millan-Nuñez *et al.*, 1997). Previos análisis de la variación del perfil vertical de clorofila en la Corriente de California han mostrado una diferencia entre región y época (Millan-Nuñez 1996). La profundidad del máximo de clorofila se incrementa a medida que la concentración en superficie es menor. Debido a la gran variabilidad de los perfiles de clorofila en la Corriente de California se plantea el objetivo de estimar el perfil vertical promedio de clorofila por región y época y poder conocer la variabilidad en el área CALCOFI de la Corriente de California durante los años 2000-2011.

## **Metodología**

Para este trabajo se utilizó una base de datos de 12 años del área CALCOFI (2000-2011). Se obtuvieron los parámetros de cada perfil vertical de Chla de los diferentes cruceros de cada época y años, mediante el uso de modelos descritos en el Capítulo I y Muñoz-Anderson *et al.*, (2015). Los perfiles fueron agrupados por región (norte-sur), época (frío-caliente) y por categoría, es decir tomando la clorofila superficial del perfil vertical de acuerdo a lo establecido por Millan-Nuñez *et al.*, (1997).

- División por Región: Norte y Sur, Oceánico y Costera
- División por Época: Caliente y Fría
- División por Categoría (Concentración de Chl*a* superficial):
  - C1  $\leq 0.1 \text{ mg m}^{-3}$
  - C2  $> 0.1 \text{ y } \leq 0.2 \text{ mg m}^{-3}$
  - C3  $> 0.2 \text{ y } \leq 0.5 \text{ mg m}^{-3}$
  - C4  $> 0.5 \text{ y } \leq 1.0 \text{ mg m}^{-3}$
  - C5  $> 1.0 \text{ y } \leq 2.0 \text{ mg m}^{-3}$
  - C6  $> 2.0 \text{ y } \leq 5.0 \text{ mg m}^{-3}$
  - C7  $> 5.0 \text{ mg m}^{-3}$

Se calcularon los promedios de cada parámetro para cada región y época y posteriormente por región, época y categoría. Con estos promedios se generó un perfil vertical de clorofila promedio para la región Norte y otro para la región Sur, en cada región se obtuvo un perfil por zona oceánica y costera y por época del año fría y caliente. Se realizó un análisis de series de tiempo de los 12 años de datos en cada una de las estaciones, en cada uno de los transectos que conforman el área de estudio, para los parámetros que componen el perfil vertical de clorofila y la clorofila integrada (H). Cabe mencionar que no todos los cruceros de CALCOFI (4 por año) presentan las mismas estaciones de muestreo. En algunos años hay más transectos que en otros así como estaciones en el transecto. A partir del año 2010 se agregaron dos transectos de muestreo, la malla se extendió del transecto 67 al 93 y a partir del año 2011 se agregó el transecto 60. De acuerdo a la división que se está manejando en el presente estudio se presentan las series de tiempo del transecto 90 para representar la región sur, la estación 120 como la estación oceánica y la estación 35 como costera. Para la región norte se tomó el transecto 80, donde la estación 100 es la oceánica y la estación 55 la costera.

## Resultados

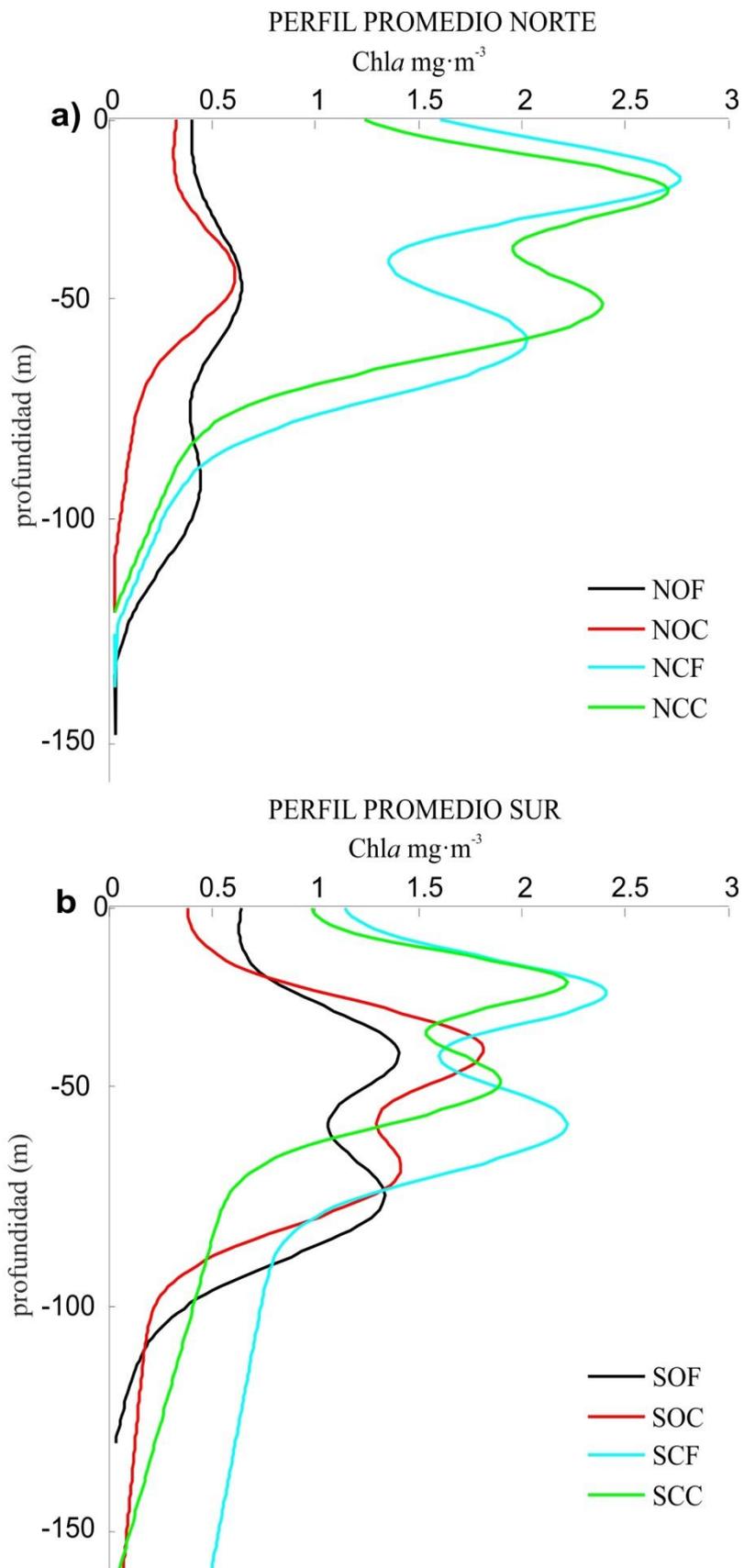
La tabla 7 presenta el promedio de los parámetros para cada una de las divisiones, la figura 45 los perfiles que se derivan de estos promedios para cada una de las regiones y las figuras 46 y 47 los diagramas de barra para los 9 parámetros que conforman el perfil vertical de *Chla*.

Tabla 7. Promedio de los parámetros para cada una de las divisiones (región, época). NOF (Norte-Oceánico-Frío), NOC (Norte-Oceánico-Caliente), NCF (Norte-Costero-Frío), NCC (Norte-Costero-Caliente). SOF (Sur-Oceánico-Frío), SOC (Sur-Oceánico-Caliente), SCF (Sur-Costero-Frío), SCC (Sur-Costero-Caliente). H es la concentración de *Chla* integrada,  $b_0$  es la concentración del pigmento en la línea-base, alfa el gradiente vertical de la curva de la concentración de clorofila,  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  es la profundidad del máximo de clorofila de cada uno de los máximos,  $S_1$  y  $S_2$  es una medida del ancho de la curva gaussiana,  $a_1$  y  $a_2$  es la concentración máxima de cada una de las curvas

REGION EPOCA	Chls	H	$b_0$	alfa	$Z_{m_1}$	$S_1$	$a_1$	$Z_{m_2}$	$S_2$	$a_2$
NCC	2.30	90.62	1.00	-0.009	-15.95	7.71	1.73	-42.97	10.96	1.65
NCF	2.61	107.24	1.05	-0.009	-13.80	8.80	1.80	-51.16	11.58	2.08
NOC	0.48	36.00	0.30	-0.003	-36.51	10.76	0.39	-73.87	14.16	0.40
NOF	0.49	39.70	0.36	-0.003	-39.55	14.43	0.36	-85.38	15.00	0.29
SCC	1.81	59.33	0.95	-0.006	-16.92	6.17	1.32	-38.90	8.95	1.18
SCF	1.93	80.04	1.09	-0.004	-19.44	7.48	1.37	-49.51	10.40	1.31
SOC	1.95	64.01	0.37	-0.002	-31.69	10.13	1.45	-60.42	11.39	1.13
SOF	2.38	78.23	0.62	-0.005	-33.83	10.30	0.91	-68.09	13.33	1.04

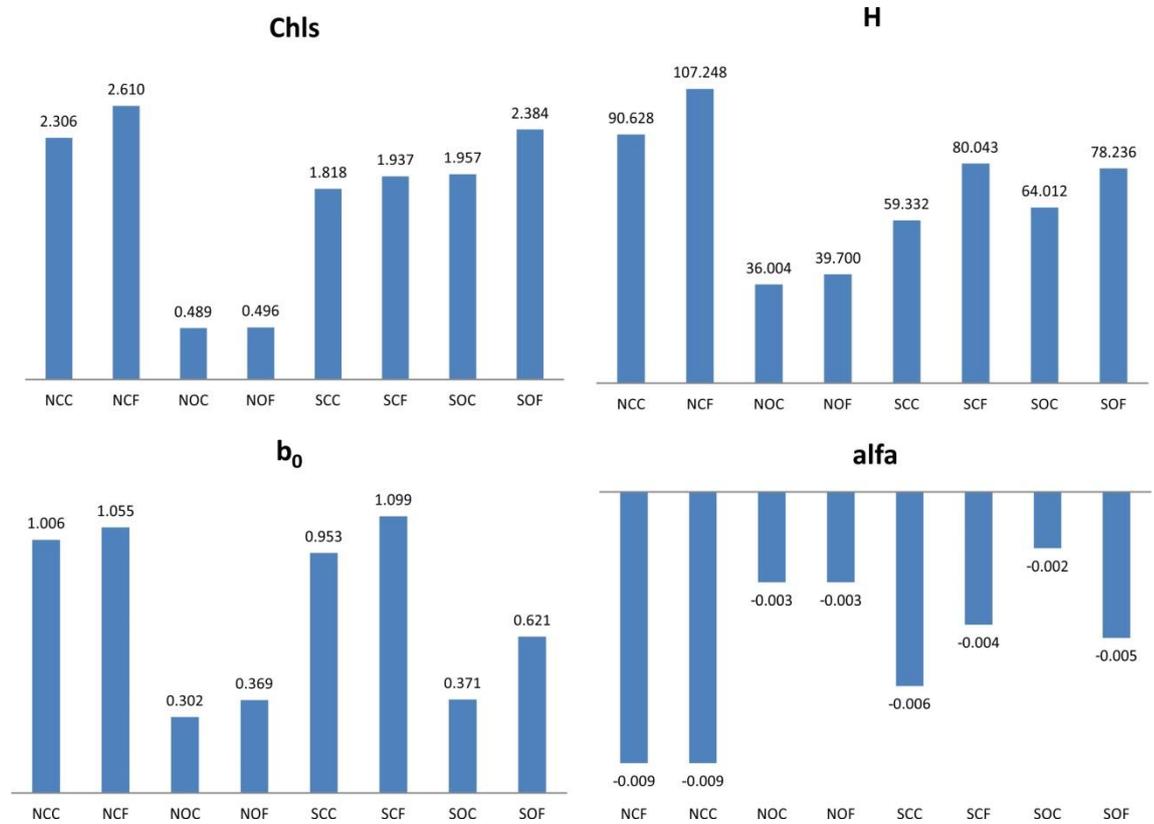
La división NOF presentó perfiles con un máximo con valores de H de  $39.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , y una concentración en el MPC de  $0.36 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . La región NOC también presentó perfiles con un solo máximo, con un valor de H de  $36.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  y valores similares en la concentración de clorofila máxima. La zona costera presentó valores de H de  $107.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  para la NCF y  $90.62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  NCC (Fig. 45a y 46). Los valores de concentración máxima son muy similares para las dos épocas, 1.8 y  $1.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente (Fig. 45a y 47). La región sur presentó mayor variabilidad en los

perfiles evaluados donde SOF presentó valores de  $2.38 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  para *Chla* superficial, casi 5 veces mayor concentración que en el norte (NOF) valores de H de  $78.23 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  más del doble que NOF, los valores de  $a_1$  y  $a_2$  fueron de  $0.913$  y  $1.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  tres veces mayor que NOF. La región SOC presentó valores de  $1.95 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  para *Chla* superficial, casi 4 veces mayores que la región norte (NOC) con valores de H de  $64.01 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Los valores de  $a_1$  y  $a_2$  fueron de  $1.45$  y  $1.13 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , casi 4 veces mayores que NOC (Fig. 45b y 47). El SCF presentó valores de  $1.93 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  para *Chla* superficial, valor más grande que NCF, H con un valor de  $80.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , menor que NCF, los valores de  $a_1$  y  $a_2$  fueron de  $1.37$  y  $1.31 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente, siendo estos menores que el NCF.

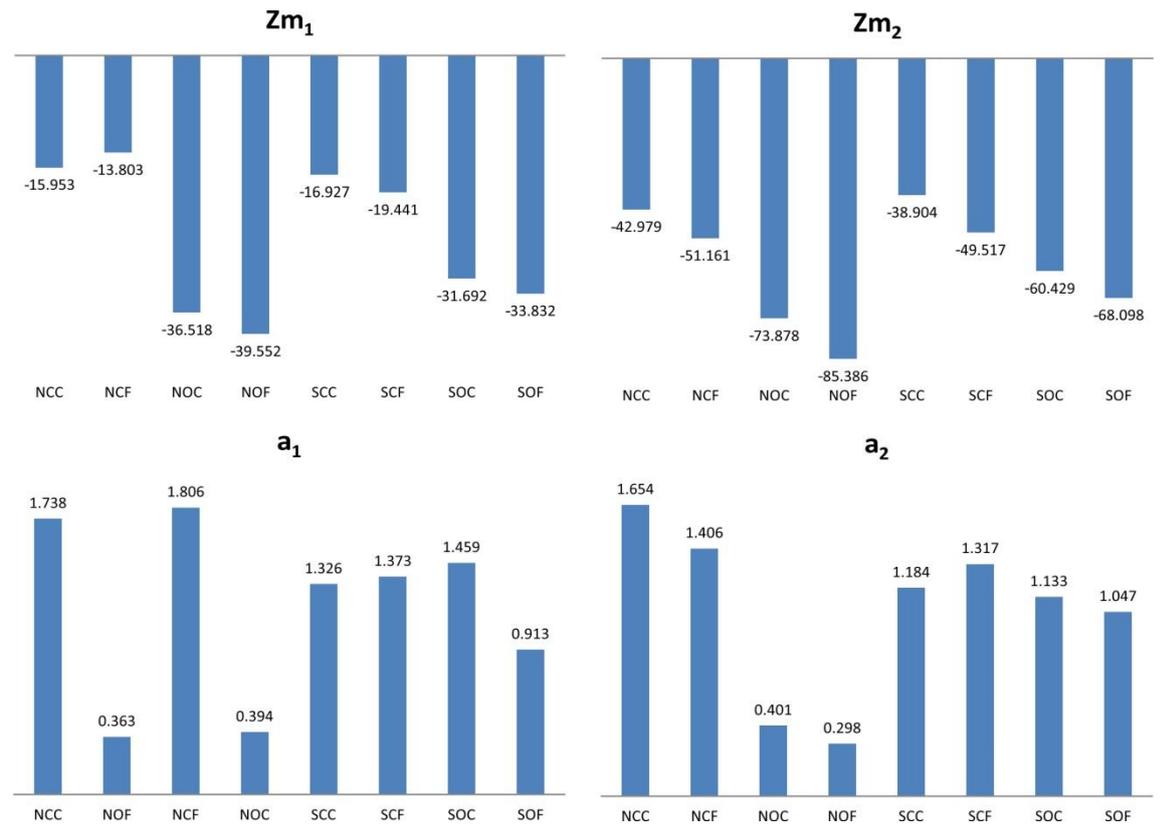


**Figura 45** Perfil obtenido a partir del promedio de los parámetros del perfil vertical de Chl *a* para cada región y época.

El SCC presentó valores de  $1.81 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  para Chla superficial mayor que en NCC, una H con valor de  $59.33 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , menor que NCC. Los valores de  $a_1$  y  $a_2$  fueron de  $1.32$  y  $1.18 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente, siendo menores que en la NCC (Fig. 45b y 47). Los valores de  $Z_{m_1}$  en el NOC presentó valores de  $36.5$  m, y de  $39.5$  en el NOF, la región costera para las misma zonas presentó valores de  $15.9$  y  $13.8$  m respectivamente (Fig. 45a y 47). La zona sur presentó una  $Z_{m_1}$  más somera tanto en SOC y SOF con profundidades de  $31.6$  y  $33.8$  m. Para la  $Z_{m_2}$  los valores para la zona norte costera caliente presentó valores de  $42.9$  m mientras que en el NCF fue de  $51.1$  m y para la región oceánica fueron mayores con  $73.8$  en NOC y  $85.3$  en NOF. La región sur presentó valores menos profundos en todas la zonas, regiones y épocas, por ejemplo la SCC  $38.9$ , la SCF  $49.5$ , la SOC  $60.4$  y finalmente la SOF  $68.09$  m (Fig. 47).



**Figura 46.** Diagramas de barra, promedio para los parámetros clorofila superficial, H es la concentración de Chla integrada, B<sub>0</sub> concentración del pigmento en la línea-base, y el gradiente vertical o pendiente de la curva gaussiana ( $\alpha$ ). NCC (Norte-Costero-Caliente, NCF (Norte-Costero-Frío), NOC (Norte-Oceánico-Caliente), NOF (Norte-Oceánico-Frío), SCC (Sur-Costero-Caliente, SCF (Sur-Costero-Frío), SOC (Sur-Oceánico-Caliente), SOF (Sur-Oceánico-Frío).

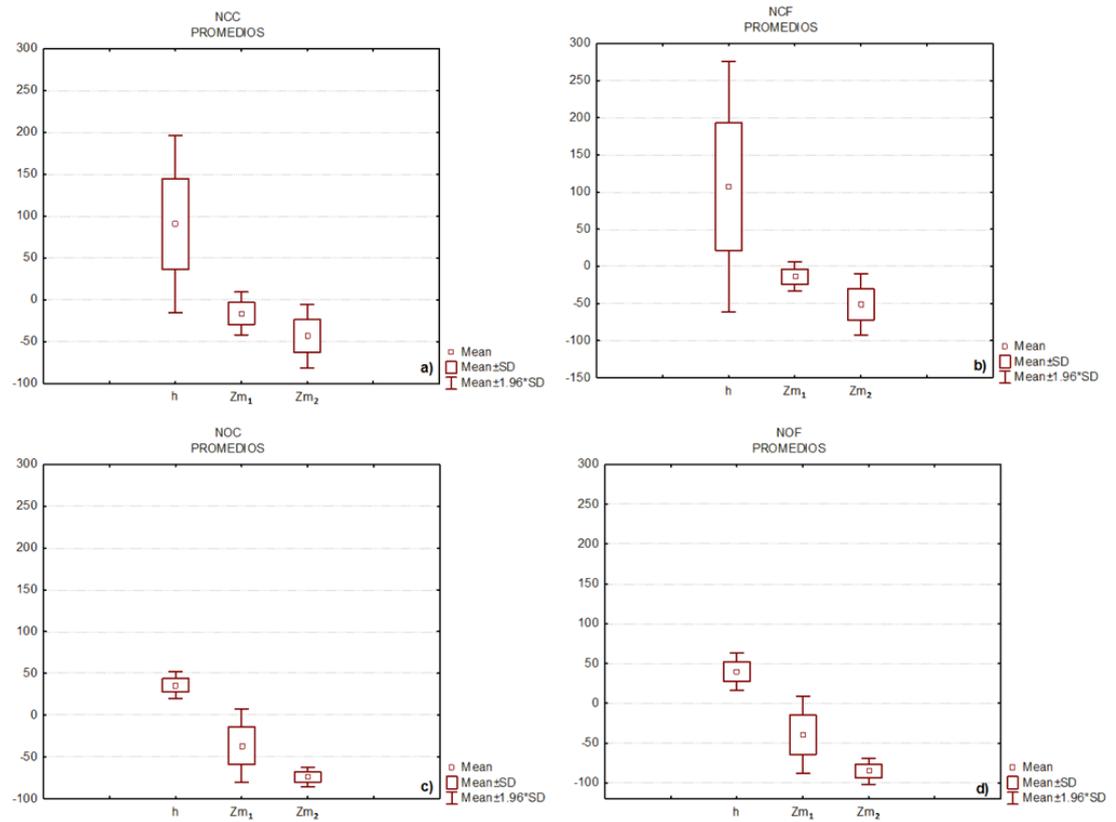


**Figura 47.** Diagramas de barra, promedio para los parámetros  $Zm_1$  profundidad del primer máximo de clorofila,  $Zm_2$  profundidad del segundo máximo de clorofila,  $a_1$  concentración máxima 1 y  $a_2$  concentración máxima 2. NCC (Norte-Costero-Caliente, NCF (Norte-Costero-Frío), NOC (Norte-Oceánico-Caliente), NOF (Norte-Oceánico-Frío).). SCC (Sur-Costero-Caliente, SCF (Sur-Costero-Frío), SOC (Sur-Oceánico-Caliente), SOF (Sur-Oceánico-Frío).

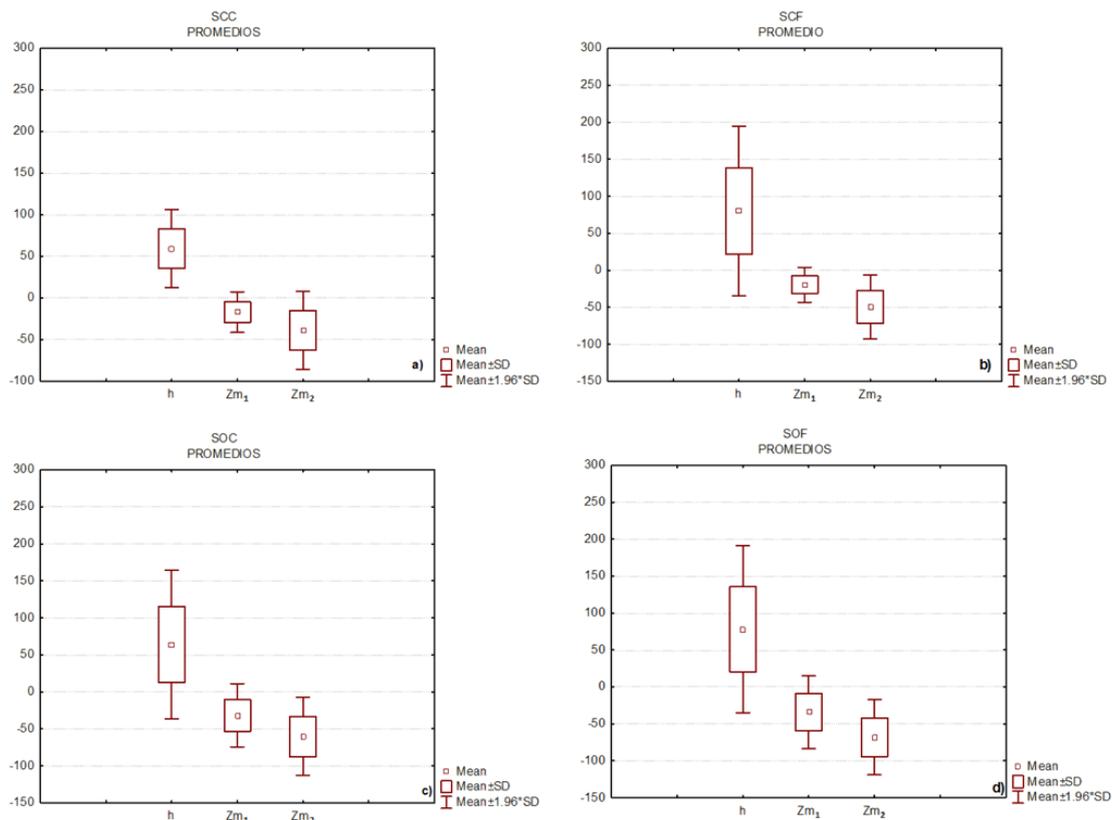
Las figuras 48 y 49 muestran el comportamiento de los parámetros H,  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  expresada en forma de “caja de bigotes” o *box and whiskers* para la región Norte, Sur, Oceánica, Costera y para la época fría y caliente. Este tipo de gráficos son usados para resumir un conjunto de datos numéricos. La caja representa la parte en la que caerán la mayoría de los datos y los bigotes marcan el rango (máximos, mínimos, desviación estándar, promedio) de los datos.

La región NCC presentó valores de H con menor dispersión en los datos comparados con los valores en NCF, con valores promedio entre 90 y 100  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$  (Figs. 48a y 48b). Para la región oceánica los valores de H disminuyen considerablemente, además de presentar menor dispersión, con valores promedio entre 38 y 40  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Para  $Z_{m_1}$  los valores tanto en NCC y NCF, son muy similares con valores promedio entre 13 y 16 m de profundidad y para la región NOC y NOF con valores promedio entre 36 y 40 m con mayor dispersión en la región oceánica (Figs. 48c y 48d). Los valores promedio de  $Z_{m_2}$  en NCC y NCF fueron entre los 42 y 52 m respectivamente con mayor dispersión en NCC.

Para la región Sur el parámetro H presentó promedios en SCC y SCF (Figs. 49a y 49b) entre 59 y 80  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$  respectivamente, con una mayor dispersión en SCF, los valores de  $Z_{m_1}$  fueron entre 16 y 20 m en promedio, con una mayor dispersión en SCC. Los valores de  $Z_{m_2}$  para SCC y SCF, fueron entre 38 y 50 m en promedio presentando una mayor dispersión los valores en SCF. Para SOC y SOF los valores promedio de H fueron entre 35 y 40  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$  con una mayor dispersión en el SOF (Figs. 49c y 49d).



**Figura 48.** Diagramas de caja de bigotes, para los parámetros del perfil. H es la concentración de Chla integrada,  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  son la profundidad del máximo de clorofila, para las regiones a) NCC (Norte-Costero-Caliente), b) NCF (Norte-Costero-Frío), c) NOC (Norte-Oceánico-Caliente), d) NOF (Norte-Oceánico-Frío).



**Figura 49.** Diagramas de caja de gato, para los parámetros del perfil. H es la concentración de Chla integrada,  $Z_{m1}$  y  $Z_{m2}$  son la profundidad del máximo de clorofila, para las regiones a) SCC (Sur-Costero-Caliente), b) SCF (Sur-Costero-Frío), c) SOC (Sur-Oceánico-Caliente), d) SOF (Sur-Oceánico-Frío).

Dado que existe una marcada variabilidad en los resultados de los perfiles verticales, se graficaron los perfiles promedio para cada región y época del año incluyendo los promedios de las 7 categorías (Tabla 8) para así caracterizar 8 perfiles en total 4 para el norte y 4 el sur (Figs. 50 y 51).

La figura 50a muestra los perfiles verticales para región Norte-Oceánico-Caliente (NOC). Una de las características que presenta esta zona es que las categorías 6 y 7 (C6 y C7) no se detectaron. Las C1 y C2 presentan perfiles con un solo máximo con concentraciones superficiales promedio de Chla de  $0.08$  y  $0.14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente.

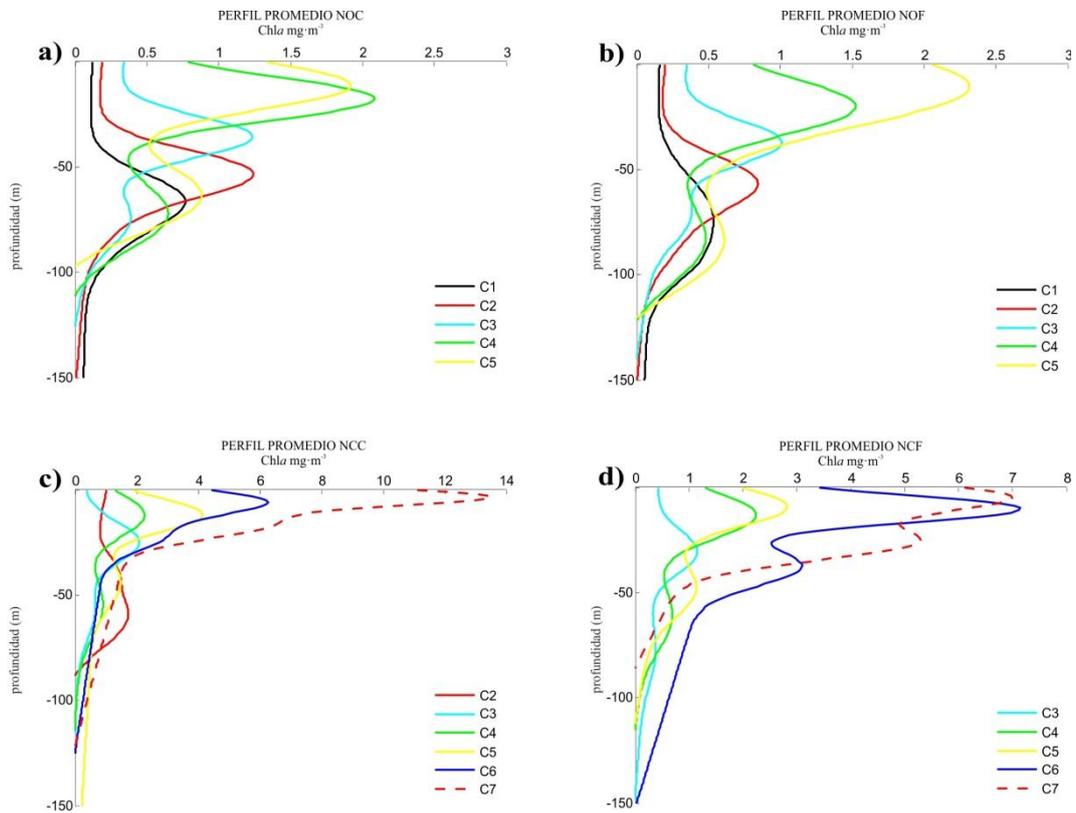
Tabla 8. Promedio de los parámetros para cada una de las divisiones (región, época y categoría). NOF (Norte-Oceánico-Frío), NOC (Norte-Oceánico-Caliente), NCF (Norte-Costero-Frío), NCC (Norte-Costero-Caliente). SOF (Sur-Oceánico-Frío), SOC (Sur-Oceánico-Caliente), SCF (Sur-Costero-Frío), SCC (Sur-Costero-Caliente). H es la concentración de Chla integrada,  $B_0$  concentración del pigmento en la línea-base,  $\alpha$  el gradiente vertical de la curva de la concentración de clorofila,  $Z_{m1}$  y  $Z_{m2}$  es la profundidad del máximo de clorofila de cada uno de los máximos,  $S_1$  y  $S_2$  es una medida del ancho de la curva gaussiana,  $a_1$  y  $a_2$  es la concentración máxima de cada una de las curvas.

Región Época	Categoría	Chls	H	$B_0$	$\alpha$	$Z_{m1}$	$Z_{m2}$	$S_1$	$S_2$	$a_2$	$a_1$
NOF	C1	0.09	29.86	0.16	0.00	-71.65	-95.51	18.19	10.85	0.15	0.41
NOF	C2	0.16	30.85	0.20	0.00	-56.18	-82.88	12.43	13.41	0.19	0.69
NOF	C3	0.33	33.94	0.35	0.00	-37.42	-72.83	10.45	12.16	0.21	0.75
NOF	C4	0.70	46.20	0.51	0.00	-20.72	-86.59	12.84	17.65	0.36	1.11
NOF	C5	1.21	57.65	0.62	-0.01	-11.79	-89.12	18.24	20.94	0.57	1.77
NOF	C6	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
NOF	C7	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
NOC	C1	0.08	28.47	0.12	0.00	-64.31	-82.18	11.65	13.34	0.21	0.58
NOC	C2	0.14	28.39	0.19	0.00	-52.67	-72.22	10.81	13.64	0.21	1.04
NOC	C3	0.32	34.46	0.34	0.00	-35.97	-75.62	9.90	12.31	0.25	0.99
NOC	C4	0.69	41.99	0.43	0.00	-17.88	-73.95	10.07	15.26	0.52	1.73
NOC	C5	1.21	46.70	0.43	-0.01	-11.75	-65.42	11.37	16.26	0.82	1.55
NOC	C6	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
NOC	C7	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
NCF	C1	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
NCF	C2	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
NCF	C3	0.36	36.74	0.43	0.00	-30.85	-79.89	10.00	13.82	0.18	0.82
NCF	C4	0.77	48.06	0.54	0.00	-13.65	-62.81	10.48	14.35	0.44	1.77
NCF	C5	1.43	66.70	0.72	-0.01	-9.47	-48.87	9.24	12.71	0.73	2.16
NCF	C6	2.94	142.46	1.83	-0.01	-10.37	-37.94	6.63	8.76	1.72	5.43
NCF	C7	7.55	242.27	1.76	-0.02	-4.67	-26.30	7.66	8.26	3.94	5.21
NCC	C1	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN
NCC	C2	0.15	74.50	1.03	-0.01	-37.72	-61.40	8.00	13.46	1.55	0.58
NCC	C3	0.46	47.14	0.32	0.00	-24.92	-57.78	9.54	13.13	0.50	1.82
NCC	C4	0.76	46.19	0.36	0.00	-12.20	-55.58	10.11	14.42	0.73	1.93
NCC	C5	1.53	74.30	0.83	0.00	-12.06	-44.97	7.90	11.07	0.84	3.36
NCC	C6	3.28	112.48	1.29	-0.01	-5.74	-21.57	6.06	7.23	1.85	4.87
NCC	C7	7.66	189.17	2.20	-0.02	-3.09	-16.58	4.69	6.46	4.46	10.86
SOF	C1	0.08	31.85	0.19	0.00	-71.71	-97.57	11.06	12.54	0.21	0.46
SOF	C2	0.15	29.34	0.21	0.00	-62.67	-87.18	12.37	13.42	0.19	0.73
SOF	C3	0.33	37.43	0.36	0.00	-40.62	-80.55	11.31	13.15	0.25	0.82
SOF	C4	0.65	45.01	0.53	0.00	-22.31	-82.33	13.22	15.86	0.32	1.18
SOF	C5	1.27	89.40	0.85	-0.01	-12.73	-61.75	10.47	14.70	0.88	2.67
SOF	C6	2.45	162.41	1.75	-0.01	-18.37	-38.68	7.55	14.56	1.31	3.76
SOF	C7	11.76	152.20	0.46	0.00	-8.41	-28.63	6.14	9.11	4.17	10.70
SOC	C1	0.09	24.55	0.10	0.00	-65.38	-93.18	13.84	12.59	0.16	0.41
SOC	C2	0.15	27.24	0.17	0.00	-53.58	-79.51	11.74	13.85	0.19	0.60
SOC	C3	0.30	34.25	0.31	0.00	-37.12	-74.72	9.09	12.78	0.28	1.08

Región Época	Categoría	Chls	H	B <sub>0</sub>	$\alpha$	Zm <sub>1</sub>	Zm <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>
SOC	C4	0.65	47.01	0.49	0.00	-22.99	-70.79	10.78	14.14	0.44	1.61
SOC	C5	1.30	63.88	0.63	-0.01	-16.40	-50.30	9.81	9.42	0.72	2.37
SOC	C6	3.27	80.79	0.56	0.00	-23.32	-39.67	10.05	8.88	1.43	2.94
SOC	C7	7.94	170.37	0.35	0.00	-3.06	-14.84	5.64	8.10	4.70	10.88
SCF	C1	0.02	62.10	1.06	0.00	-21.31	-57.36	6.87	11.66	1.84	4.89
SCF	C2	0.17	33.12	0.26	0.00	-40.44	-70.44	7.97	11.89	0.31	1.04
SCF	C3	0.35	37.36	0.35	0.00	-29.61	-72.69	8.71	13.02	0.34	1.37
SCF	C4	0.72	51.46	0.64	0.00	-16.92	-63.78	9.44	13.61	0.56	1.78
SCF	C5	1.47	66.72	0.98	0.00	-11.42	-37.66	7.27	9.13	0.76	4.17
SCF	C6	3.06	109.50	1.67	0.00	-8.35	-24.28	6.43	6.48	1.54	5.49
SCF	C7	7.77	200.04	2.74	-0.01	-8.03	-20.42	5.66	7.01	3.87	9.64
SCC	C1	0.11	48.07	0.67	-0.01	-24.80	-56.87	5.18	10.85	0.77	2.34
SCC	C2	0.21	35.47	0.28	0.00	-35.68	-56.20	8.30	10.43	0.36	1.22
SCC	C3	0.34	40.86	0.32	0.00	-25.43	-60.76	7.74	11.27	0.53	1.72
SCC	C4	0.72	48.07	0.53	0.00	-16.38	-47.54	7.05	10.18	0.79	2.35
SCC	C5	1.40	57.61	0.93	0.01	-9.26	-29.93	5.66	7.65	0.87	3.22
SCC	C6	3.04	93.76	1.66	-0.01	-6.23	-27.59	6.05	7.59	1.61	5.18
SCC	C7	6.91	91.49	2.28	-0.04	-0.70	6.56	3.23	4.70	3.37	8.96

La C3 presentó un perfil con un máximo bien definido, con concentraciones superficiales promedio de Chla de  $0.32 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Las C4 y C5 presentan perfiles verticales con dos máximos bien definidos. Las concentraciones promedio de Chla superficial para C4 fue de 0.69 y 1.21  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en C5. La figura 50b, muestra los perfiles del Norte-Océánico-Frío (NOF), al igual que en la zona NOC las categorías C6 y C7 no se detectaron. Las C1 y C2 presentan perfiles con un solo máximo con concentraciones superficiales de Chla de 0.09 y 0.16  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente. La C3 presenta un perfil con dos máximos y concentraciones promedio de Chla de 0.33  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Las C4 y C5 presentan perfiles verticales con dos máximos bien definidos, la C5 presenta el primer máximo más somero que C4. Otra característica importante de los perfiles de estas dos zonas (NOC y NOF) es que en las dos regiones presentaron una pendiente vertical con valores bajos (valores de alfa de 0.001). Podemos decir que para esta zona NOF, se podrán encontrar perfiles verticales de Chla con un máximo cuando la concentración de Chla superficial sea de categoría

C3 o menor y perfiles con dos máximos cuando la concentración superficial de *Chla* de categoría C4 o mayor.



**Figura 50.** Perfil vertical promedio de clorofila *a* para la región norte y diferentes épocas y categorías para el área de CALCOFI en la Corriente de California.  $C1 \leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $C2 > 0.1 \text{ y } \leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $C3 > 0.2 \text{ y } \leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $C4 > 0.5 \text{ y } \leq 1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $C5 > 1.0 \text{ y } \leq 2.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $C6 > 2.0 \text{ y } \leq 5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $C7 > 5.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

La figura 50c muestra los perfiles promedio de clorofila en la región Norte-Costero-Caliente (NCC) en esta región no se detectó la C1. La C2 presentó un máximo con concentraciones superficiales promedio de  $Chla$  de  $0.14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , con valores promedios de  $Zm$  y concentración máxima de  $61.4 \text{ m}$  y  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente. La C3 presentó un perfil con dos máximos con pendiente concentraciones promedio de  $Chla$  superficial de  $0.45 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Los valores de  $H$  fue menores que en C2 con un valor de  $47.14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Las concentraciones máximas presentaron valores  $1.82$  y  $0.50$  y  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , siendo mayor en el máximo cercano a la superficie. La C4 presentó un perfil con dos máximos con pendiente concentraciones promedio de  $Chla$  en superficie de  $0.76 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . El valor de  $H$  es de  $46.18 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , las concentraciones máximas fueron de  $2.1$  y  $0.73$  y  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y los valores de  $Zm$  fueron de  $12.20$  y  $55.58$  m respectivamente. La C5 presentó perfiles con dos máximos bien definidos, una concentración máxima somera de  $4.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y la más profunda fue de  $0.84 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . La  $Zm_2$  se presentó a los  $44.96$  m y la  $Zm_1$  se presentó a los  $12.06$  m. La C6 presentó valores de  $H$  de  $112.47 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , una concentración máxima de  $6.24 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , la  $Zm_2$  fue a los  $21.57$  m y la  $Zm_1$  fue a los  $5.73$  m. La C7 presentó perfiles con dos máximos muy someros, los valores de  $H$  fueron de  $189.16 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Las concentraciones del máximo de clorofila fueron diferentes, la más somera fue de  $13.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y la más profunda fue de  $6.30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . La  $Zm_2$  se presentó a los  $16.58$  m y la  $Zm_1$  a los  $3.08$  m. Con referencia a la  $Zm$  se reporta que a mayor categoría las  $Zm$  fueron menores, es decir a C7 el máximo de clorofila se presentó a menor profundidad que en las otras categorías y la concentración del máximo fue mayor al aumentar la categoría. Sin considerar la C2 podemos decir que para la región NCC, se podrán encontrar perfiles verticales de  $Chla$  con un máximo cuando la

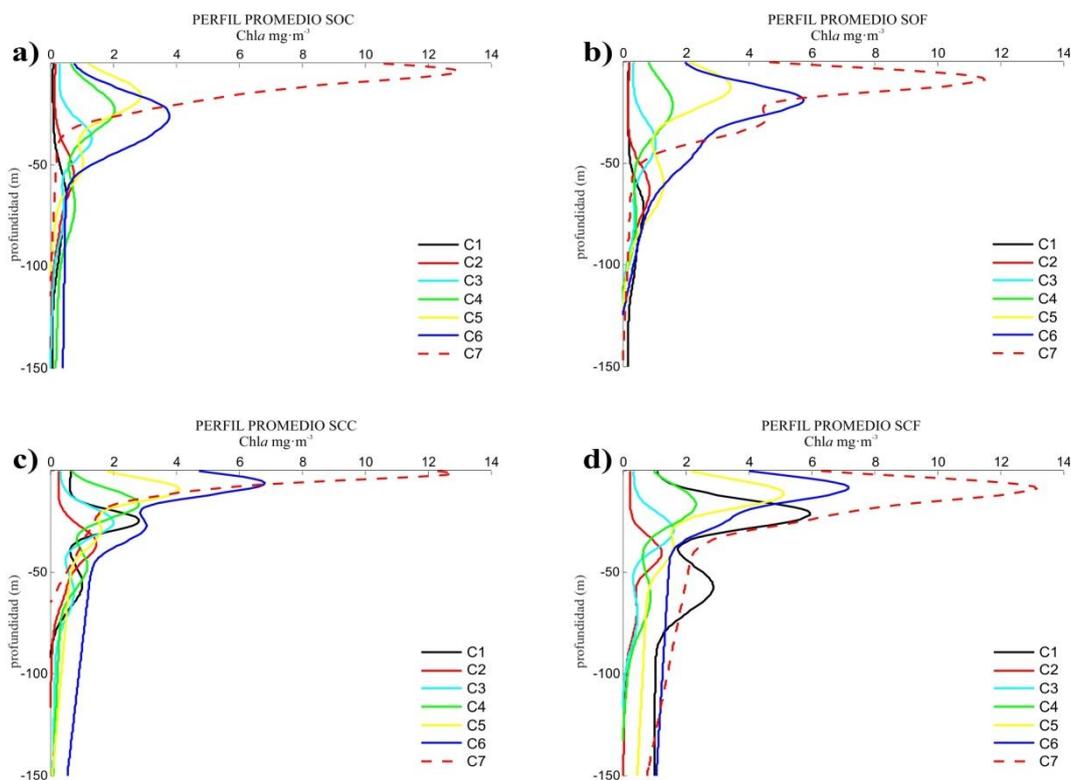
concentración de *Chla* superficial esté en la Categoría 1 y 2 y perfiles con dos máximos cuando la concentración superficial de *Chla* esté en las categorías 3, 4 y 5.

La figura 50d muestra los perfiles verticales promedio en la región Norte-Costero-Frío (NCF). En esta región no se detectaron las C1 y C2. La C3 presentó perfiles de un máximo con valores de clorofila integrada de  $36.74 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , el valor de  $a_1$  es de  $1.18 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y una  $Z_{m_1}$  de 30.85 m. La C4 también presentó perfiles con un máximo, con valores de H de  $48.06 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , valores de  $2.21 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  para  $a_1$ . La C5 presentó perfiles con dos máximos bien definidos, valores de clorofila integrada de  $67.60 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , valores de concentración máxima de 2.89 y  $1.43 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y valores de  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  de 9.47 y 48.87 m respectivamente. Para la C6 se presentan perfiles con dos máximos bien definidos, valores de H de  $142.46 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , valores de  $a_1$  y  $a_2$  de 7.05 y  $3.05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y con valores para  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  de 10.37 y 37.94 m. La C7 presentó perfiles verticales con dos máximos con valores de H de  $242.27 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  y concentraciones en los máximos de 7.15 y  $5.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y con valores de  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  de 4.67 y 26.30 m, siendo las más someras de las siete categorías. La mayoría de las variables aumentaron su valor con el aumento de la categoría, con excepción de sigma, es decir el valor de  $S_1$  más superficial aumento conforme aumenta la categoría, situación inversa para  $S_2$ , es decir a mayor categoría menor valor de sigma.

La figura 51 representa los perfiles verticales promedio que se registraron para la región Sur, oceánica, costera, épocas fría y caliente. La figura 51a corresponde a la región Sur-Oceánico-Caliente (SOC). Las C1 y C2 presentan perfiles con un solo máximo con concentraciones superficiales promedios de *Chla* de 0.08 y  $0.14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

respectivamente. Valores de clorofila integrada similares para ambas categorías, 24.55 y 27.24  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en C1 y C2. La C3 presenta un perfil con máximo, y concentraciones superficiales promedio de Chla de 0.30  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Valores de H de 34.25  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , concentraciones en los máximos de clorofila de 1.08  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Los valores de  $Z_m$  son de 37.12 y 74.72 m. Las C4 y C5 presentaron perfiles verticales con dos máximos bien definidos, el segundo máximo en el perfil de C4 es más profundo que el que se presenta en C5. Las concentraciones superficial promedio de Chla son de 0.65 y 1.30  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente. C6 con perfiles de un máximo muy bien definido con concentraciones de Chla de 3.27  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , el comportamiento para C7 muestra un perfil muy amplio de un máximo y concentraciones de Chla con una concentración máxima de 13.0  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

La concentración de clorofila integrada (H) presentó una tendencia a aumentar conforme aumenta la categoría. Para C1 los valores fueron de 24.55  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$  y para C7 de 170.36  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Para  $Z_{m1}$  y  $Z_{m2}$  la tendencia fue a disminuir conforme aumenta la categoría. El valor más profundo de  $Z_{m1}$  fue de 65.37 m para C1 y el más somero fue de 3.06 m para C7. Las concentraciones máximas aumentaron conforme aumentó la categoría. El valor mínimo que se presentó para  $a_1$  fue de 0.40 en C1 y el mayor de 13.01 en C7. Para  $a_2$  presentó la misma tendencia de aumentar conforme aumenta categoría, con valores máximos en C7 con 4.70  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Para  $S_1$  hay una ligera tendencia a disminuir su tamaño al aumentar la categoría. El valor máximo en  $S_1$  se presentó en C1 con un tamaño de 13.83 m y el menor en C7 con 5.64 m. Para  $S_2$  el máximo fue en C2 con 13.85 m (en C1 es de 12.58 m) y el mínimo fue de 8.09 m en C7.



**Figura 51.** Perfil vertical promedio de clorofila a para la región sur y diferentes épocas y categorías para el área de CALCOFI en la Corriente de California. C1  $\leq 0.1$   $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C2  $> 0.1$  y  $\leq 0.2$   $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C3  $> 0.2$  y  $\leq 0.5$   $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C4  $> 0.5$  y  $\leq 1.0$   $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C5  $> 1.0$  y  $\leq 2.0$   $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C6  $> 2.0$  y  $\leq 5.0$   $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , C7  $> 5.0$   $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

La figura 51b, corresponde a la división Sur-Oceánico-Frío (SOF). Para esta división se presentan perfiles con un solo máximo de C1 a C4, con mejor definición en C3 y C4. Para C5 y C7 se muestran perfiles con dos máximos bien definidos; C6 presenta perfiles promedio con un máximo. Los valores de Chla superficial para esta división presentaron el valor más bajo en C1 con un valor de  $0.08 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y el valor mayor en C7 con  $11.70 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Los valores integrados de Chla (H) muestran una tendencia de incrementar conforme aumenta la categoría. El valor mínimo de H en C1 fue de  $31.85 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  y el máximo de  $162.4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  en C6. Para la  $Z_{m1}$  y  $Z_{m2}$ , hay que

considerar que solo se presentan perfiles con dos máximos en C5 y C7. Para  $Z_{m1}$  los valores más profundos fueron de 71.70 m en C1 y los más someros de 8.41 en C7. La concentración máxima ( $a_1$ ) muestra una tendencia de incrementar con la categoría.

La figura 51c corresponde a la división Sur-Costero-Caliente (SCC). En esta categoría se presentan perfiles con un solo máximo para las categorías 2 y 7 el resto de las categorías presentaron perfiles con dos máximos muy bien definidos. La *Chla* superficial presentó el valor más bajo en la C1 de  $0.113 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y se incrementó conforme a mayor categoría con el valor máximo en la C7 de  $12.3.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Los valores de H presentaron valores similares en las C1 y C4 ( $48.06 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ), para C2 disminuye a  $35.46 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , para incrementar conforme la categoría hasta la C6 con el valor más alto de  $93.75 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , y para C7 con un valor de  $91.49 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Los valores de  $Z_{m1}$  presentan una profundidad de 24.80 m en C1, con aumento en C2 de 35.68 m y a partir de esta categoría el valor de la profundidad fue disminuyendo conforme aumentó la categoría con un valor mínimo en C7 de 0.69 m. Los valores de  $a_1$  y  $a_2$  se incrementaron con las categorías mayores.

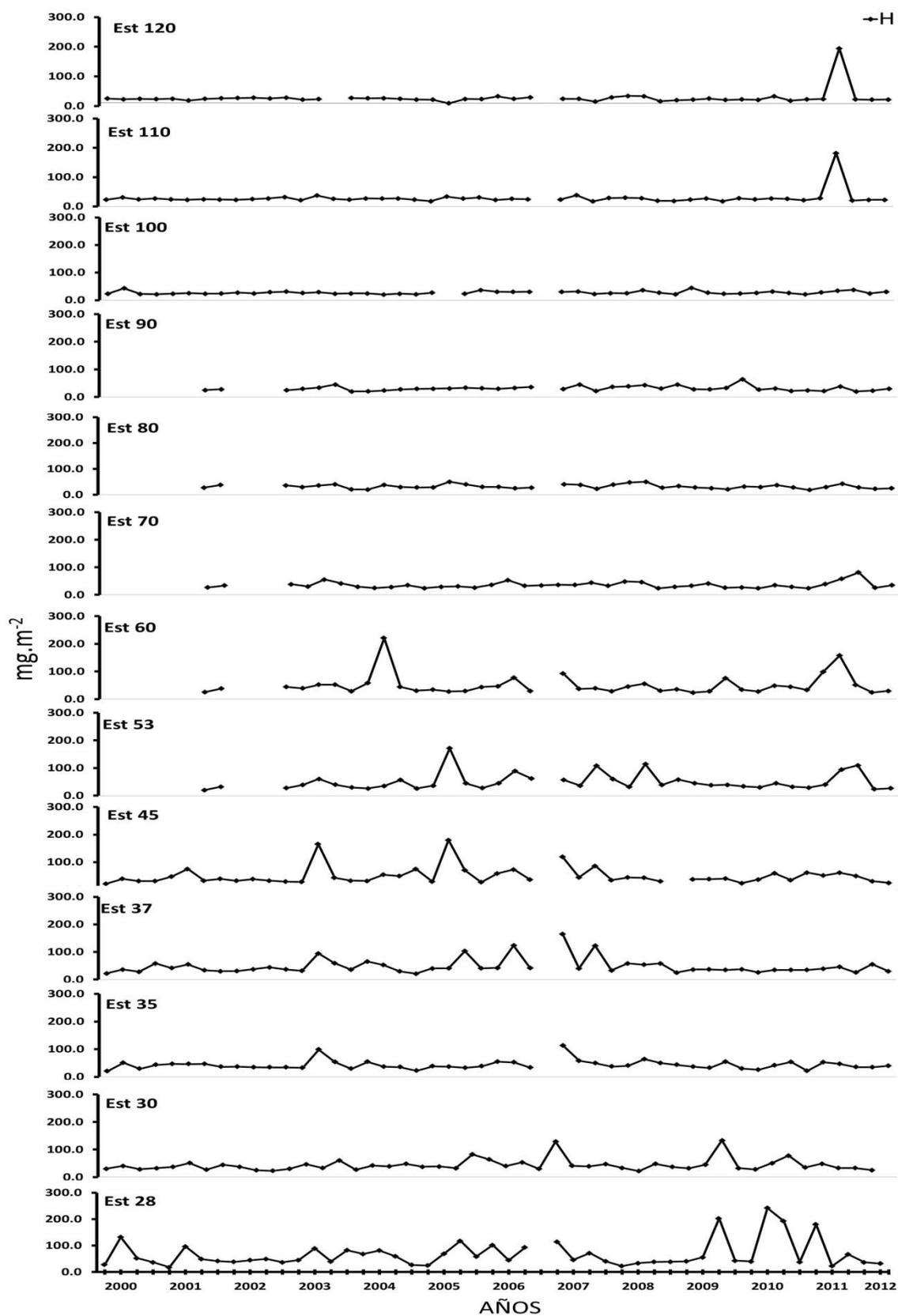
La figura 51d corresponde a la división Sur-Costero-Frío (SCF). Esta división presentó perfiles con dos máximos en la C1 muy bien definidos a diferencia de las otras divisiones de la zona sur, las categorías 2, 3 y 7 presentan perfiles con un solo máximo situación que no se presentó en las otras divisiones. La C6 presentó perfiles con 2 máximos sin embargo el máximo más profundo no está bien definido. Perfiles con dos máximos bien definidos se presentaron en las categorías 3, 4 y 5. La *Chla* superficial para esta división presentó un comportamiento similar a las otras divisiones de la parte sur es decir un aumento en la al incrementar las categorías,

valores bajos de  $0.017 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en C1, hasta valores de  $7.77 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Los valores de H se incrementaron a partir de C2 con un valor de  $33.12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  hasta la C7 con un valor de  $200.03 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Cabe mencionar que la C1 presentó un valor más alto ( $62.09 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) que C2, C3 y C4. Para  $Z_{m1}$  la profundidad en C1 fue de 21.30 m, para C2 fue de 40.44 m, a partir de esta categoría se presentó una tendencia a incrementar con la categoría, con una profundidad de 8.03 m en C7. La  $Z_{m2}$  presentó profundidades de 57.35 m en C1, aumentó hacia C3 con 72.68 m y a partir de esta categoría se presenta una tendencia a disminuir hasta un valor de 20.42 en C7. La  $a_1$  presentó un valor de  $4.89 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en C1 disminuye en C2 a  $1.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y a partir de esta categoría hay una tendencia a aumentar hasta un valor máximo de  $9.64 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en C7. Una tendencia similar se presentó en los valores de  $a_2$ , es decir un valor más alto en C1 con  $1.84 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  que disminuyó en C2 a  $0.31 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , con un valor máximo de  $3.87 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en C7.

Para conocer los cambios en los perfiles verticales de clorofila que ocurren a lo largo de los años, se realizaron series de tiempo de los parámetros H,  $Z_m$  y concentración máxima ( $a$ ) de los perfiles verticales de clorofila. Como representativo de la región sur se tomó el transecto 90 incluyendo la región costera y oceánica durante los 12 años de muestreo. Para el parámetro H (clorofila integrada), en la estación 120 y hasta la estación 70, se nota un comportamiento con poca variación, con un valor promedio de  $40 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  durante todos los cruceros (Fig. 52), sin embargo en la estación 120 y 110 en el crucero de primavera 2011 hay un incremento de cerca de  $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . A partir de la estación 60 se observan incrementos en H que van de los  $40 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  a los  $230 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  en el crucero de verano de 2004. Un valor de  $80 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  desde el crucero de primavera de 2007 hasta los  $120 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  en el crucero de

primavera de 2011. A partir de la estación 45 se observan un mayor número de fluctuaciones de H a lo largo de toda la serie, con incrementos en el crucero de invierno de 2003, en los cruceros de verano, otoño de 2005 e invierno de 2007. La estación 28 se considera como la más costera, y presentó cambios marcados en todos los años de la serie de tiempo, los años que no presentaron cambios marcados fueron el crucero de verano de 2001 hasta el crucero de invierno de 2003. Tampoco hay mucha variación del crucero de otoño de 2008, hasta el crucero de verano de 2009. En el crucero de primavera de 2010 es donde se reporta el valor más alto de H en todo el transecto (Fig. 52).

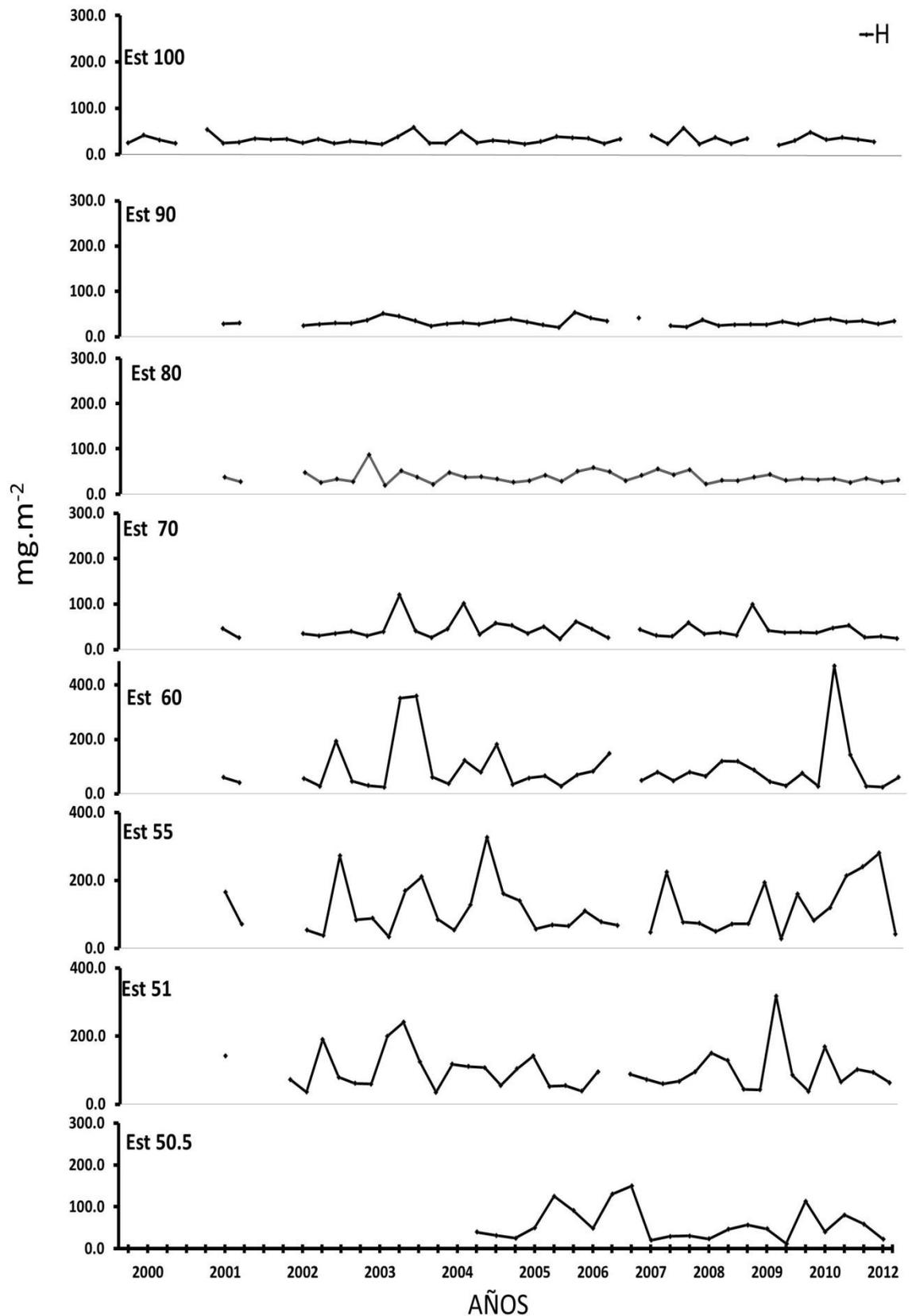
Para la región Norte se describe el transecto 80. La biomasa integrada (H) presentó desde la estación 100 (la más oceánica) hasta la estación 80 un comportamiento sin mucha variación a lo largo de los 12 años de muestreo, con valores entre los 10 y 120  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$  (Fig. 53). De la estación 55 que se considera como la frontera entre la región oceánica y costera en la región norte presentó cambios muy marcados a todo lo largo de la serie de tiempo. Por ejemplo en la estación 60 en el año 2001 y hasta el primer crucero (invierno) de 2003 presenta valores de H entre 20 y 60  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , el segundo crucero de 2003 (primavera) hay un incremento hasta 180  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , en los cruceros de verano y otoño de 2004 llegaron a 360  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , decreciendo hasta valores de 50  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$  en los cruceros de invierno y primavera del 2005 y este comportamiento se mantuvo hasta el crucero de otoño del 2007 con un incremento a un valor de 180  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ .



**Figura 52.** Serie de tiempo para la biomasa integrada (H) en el transecto 90 con trece estaciones de muestreo del 2000 al 2011. Cuatro cruces por año, invierno, primavera, verano y otoño.

El crucero de invierno de 2011 se presentó el valor más alto de H de toda la serie de tiempo en el transecto, con un valor de  $480 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  (Fig. 53).

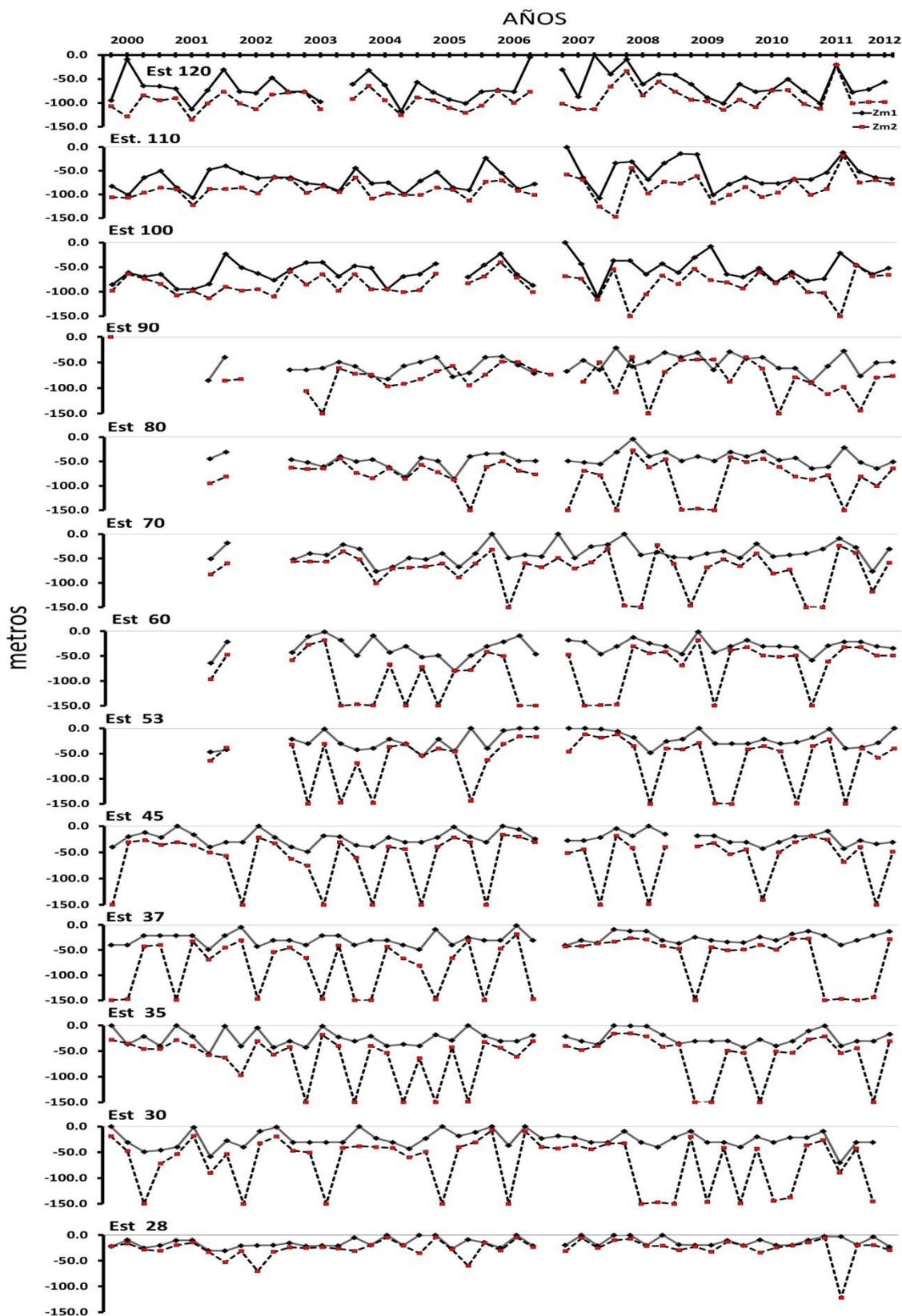
Para la profundidad de  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  en el transecto 90, estación 120 (la más oceánica) durante el crucero de invierno del 2000 los valores para  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  se presentaron entre los 90 y 100 m de profundidad. Para el crucero de primavera el  $Z_{m_1}$  se presentó a menos de 10 m de profundidad y el  $Z_{m_2}$  a más de 125 m, lo que nos indican perfiles verticales de *Chla* con dos máximos. Del crucero de verano del año 2000 hasta el crucero de primavera de 2006 se presentan valores de  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  con poca diferencia entre un valor y otro. Los valores mayores de  $Z_m$  se dan el crucero de primavera de 2001 y en el crucero de verano de 2004, con valores de 125 metros de profundidad en promedio. Del crucero de verano de 2006 al crucero de otoño de 2007, las diferencias entre  $Z_{m_1}$  y  $Z_{m_2}$  son mucho mayores que en los años anteriores, por ejemplo en el crucero de verano de 2006 el  $Z_{m_1}$  se presentó a menos de 5 m de profundidad y el  $Z_{m_2}$  a los 75 m de profundidad y para el crucero de verano de 2007 el  $Z_{m_1}$  se da a menos de 5 m de profundidad y el  $Z_{m_2}$  a más de 120 m. Del crucero de otoño de 2007 al crucero de otoño de 2011 se presentaron valores de  $Z_m$  muy similares entre sí, considerando a estos perfiles verticales de *Chla* con un máximo. La estación 110 presentó en el verano y otoño de 2000 valores 50 y 100 m de profundidad, respectivamente, lo cual nos indica perfiles verticales con dos máximos de *Chla*, (Fig. 55). Al igual que los otros parámetros las concentraciones máximas de clorofila se van a describir en el transecto 90 como la región sur del área de muestreo. La estación 120 considerada la más oceánica presentó durante los



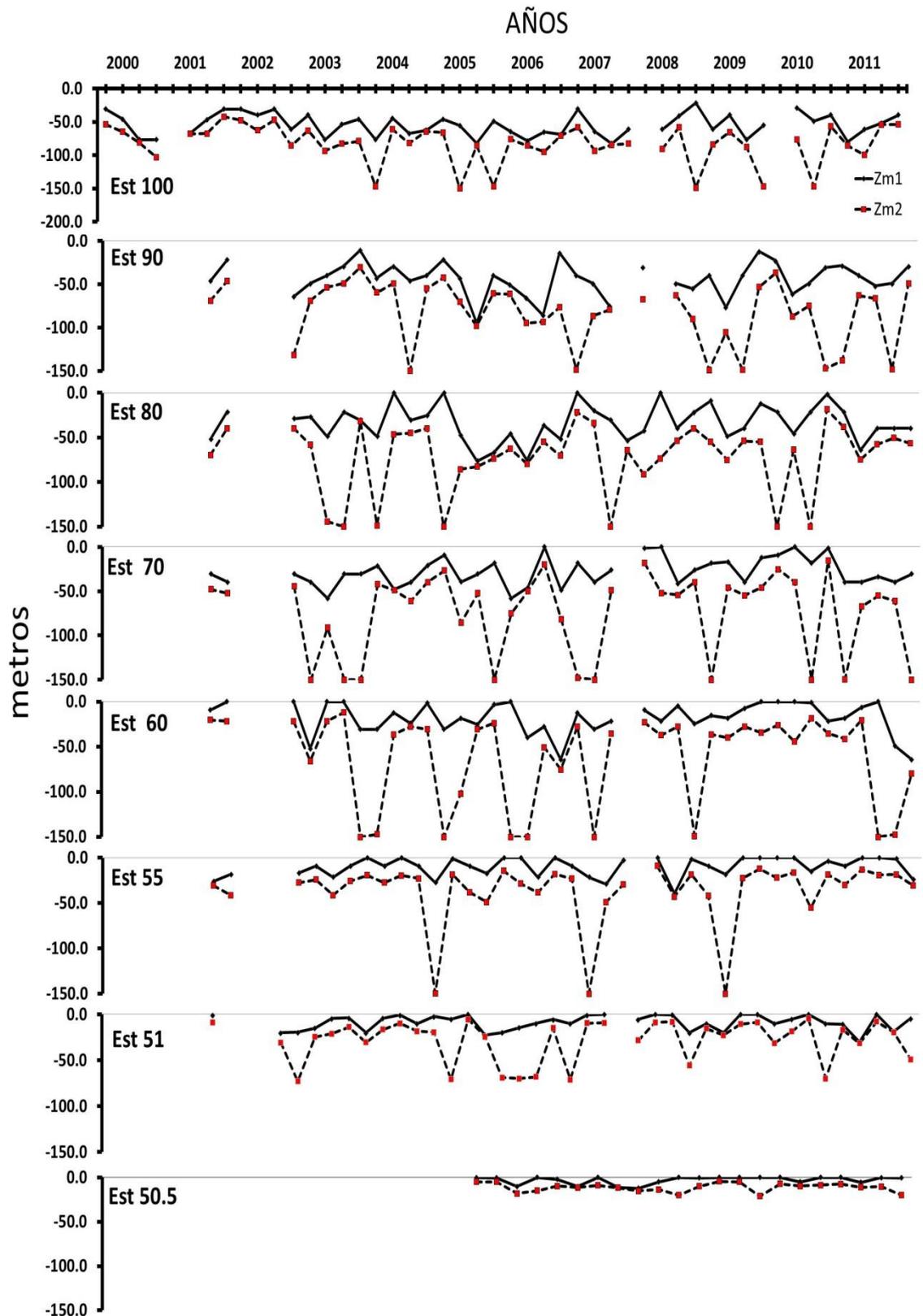
**Figura 53.** Serie de tiempo para la biomasa integrada (H) en el transecto 80 con ocho estaciones de muestreo del 2000 al 2011. Cuatro cruceros por año, invierno, primavera, verano y otoño.

cruceros del 2000 hasta el segundo crucero de 2011 concentraciones muy similares. En el crucero de primavera del 2011 se presentó un cambio muy notable en  $a_1$ . De la estación 100 a la estación 70 se observó que las concentraciones máximas de clorofila fueron similares durante casi toda la serie tiempo sólo se presentó un pequeño cambio en el mismo crucero de primavera del 2011 sobre todo en la  $a_1$ . En la estación 60 el crucero de primavera del 2004 presentó una concentración mayor a  $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y a partir del crucero de verano del 2004 y hasta el crucero de primavera del 2010 se presentó un comportamiento muy similar con valores cercanos a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . En el crucero de primavera de 2011 se presentó un incremento de hasta  $4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en ambas concentraciones máximas ( $a_1$  y  $a_2$ ).

La estación 53 presentó con pocos cambios en la concentraciones máximas con valores cercanos a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , hasta el crucero de verano de 2005 en donde la  $a_1$  presentó una concentración máxima de  $3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . En el crucero de verano en 2007  $a_1$  y  $a_2$  presentaron una concentración de  $4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , a partir del crucero de otoño de 2007 y hasta el crucero de primavera de 2011, el comportamiento en este parámetro no presentó cambios significativos, solo un pequeño incremento en el crucero de otoño de 2011 en  $a_1$ . La estación 37 considerada como estación costera, presentó cambios más continuos a partir del crucero de primavera de 2003 con valores hasta de  $4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , un comportamiento sin cambios marcados desde el crucero de verano de 2003 hasta el crucero de primavera de 2005. Desde aquí hay cambios en la concentración siendo el más notable en el crucero de verano de 2007 con una concentración de  $6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . El resto de la serie de tiempo presentó concentraciones



**Figura 54.** Serie de tiempo para  $Zm_1$  y  $Zm_2$  en el transecto 90 con catorce estaciones de muestreo del 2000 al 2011. Cuatro cruces por año, invierno, primavera, verano y otoño.

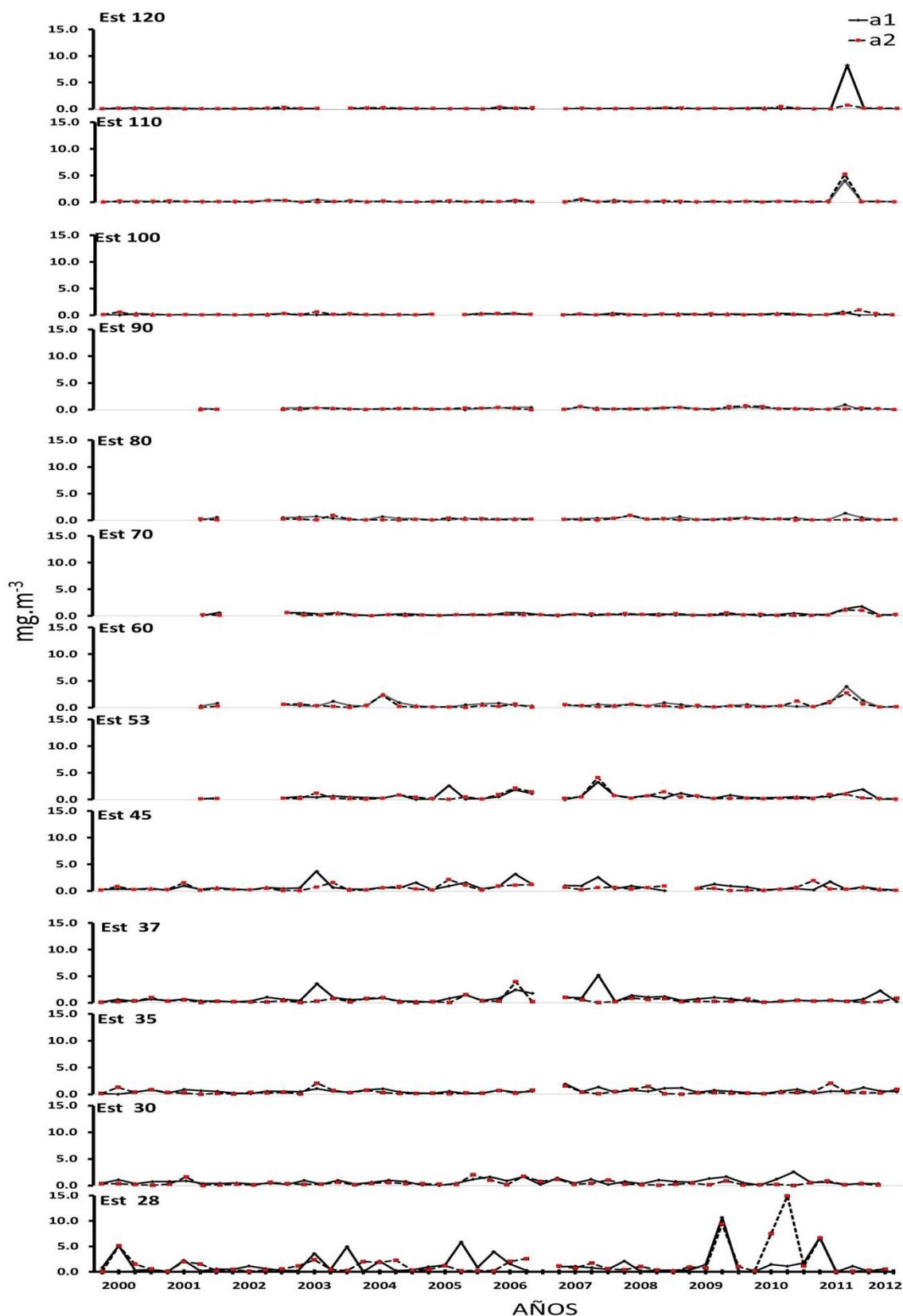


**Figura 55.** Serie de tiempo para  $Zm_1$  y  $Zm_2$  en el transecto 80 con ocho estaciones de muestreo del 2000 al 2011 Cuatro cruces por año, invierno, primavera, verano y otoño.

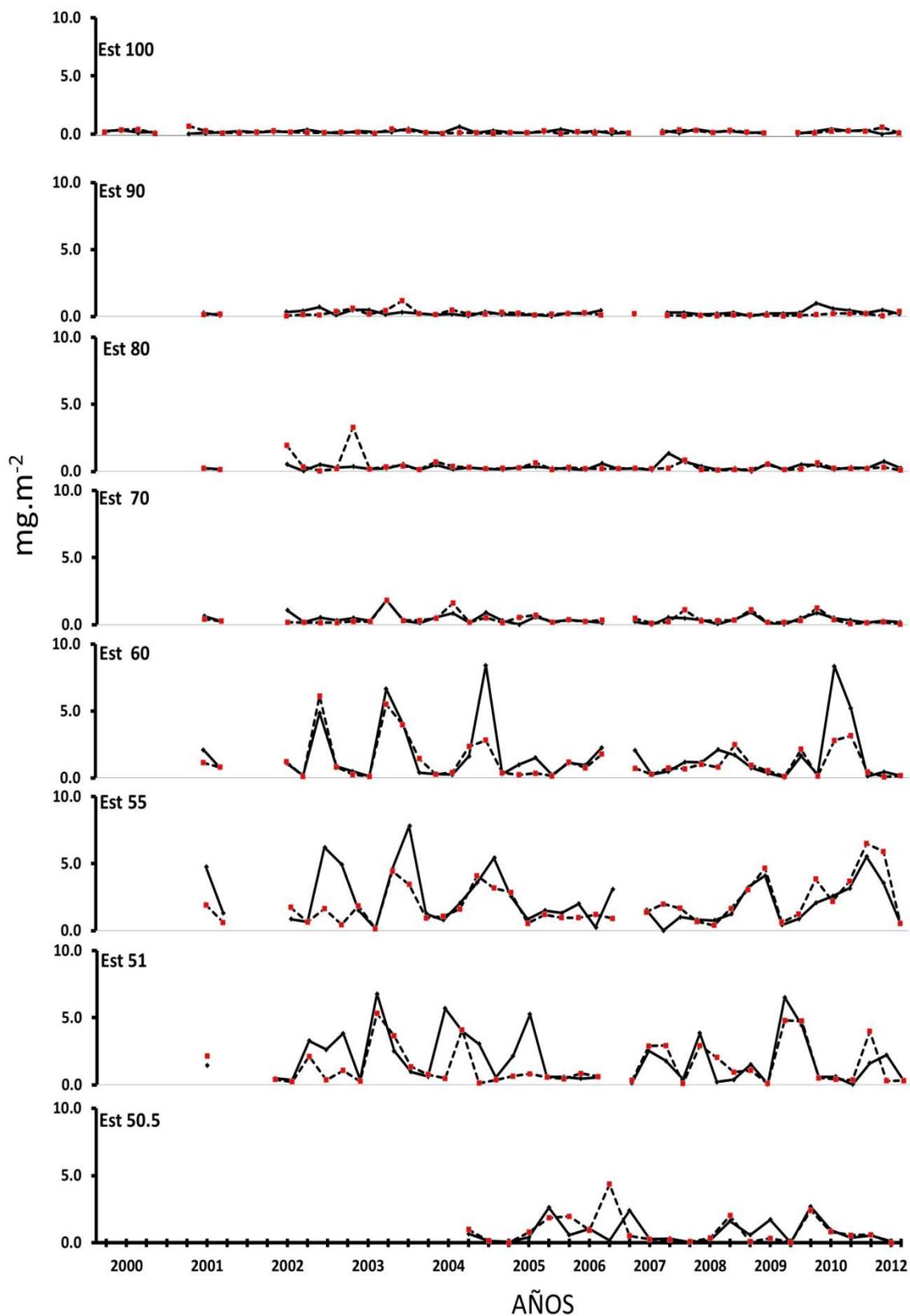
similares, solo un pequeño cambio en el crucero de otoño de 2011 en donde la  $a_1$  alcanzó un valor hasta de  $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . La estación 35 presentó un comportamiento con pocas fluctuaciones en la concentración máxima de clorofila, solo se detectan aumentos en el crucero de primavera de 2003, invierno de 2007, primavera de 2008, y el cambio más notable se da en el crucero de verano de 2010 con un valor en  $a_1$  de  $3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Fig. 56). La estación que presentó la mayor variabilidad fue la estación 28, considerada la segunda más costera (Fig. 56). Desde el crucero de primavera del año 2000 hasta el crucero de otoño de 2003 las concentraciones en ambas concentraciones máximas son prácticamente las mismas. El crucero de primavera de 2005, primavera y otoño de 2006 presentaron diferentes concentraciones máximas de clorofila, con un valor de  $6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en el crucero de verano de 2005. Cambios muy marcados se dan en el crucero de otoño de 2009 con un valor de  $11 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en ambas amplitudes. En el crucero otoño de 2010 se da la concentración más grande de toda la serie de tiempo con un valor en  $a_2$  de  $15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Fig. 56).

Para la región norte se describe el transecto 80. La concentración máxima de clorofila de la estación 100 a la 80 presentaron menores a  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en prácticamente toda la serie de tiempo. Solo el crucero de primavera de 2002 y el de otoño de 2003 de 2 y  $4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  respectivamente en la  $a_2$ . La estación 70 también presentó un comportamiento sin cambios notables, solo en el crucero de verano de 2004, crucero otoño de 2005, verano de 2009, se incrementó la concentración máxima hasta  $2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . A partir de la estación 60 y hasta la 50.5, la más costera, se presentaron cambios notables en la concentración máxima prácticamente en cada crucero. En la estación 60 hay una cierta regularidad a partir del crucero de verano de 2006 hasta el

crucero de verano de 2010, los valores más altos en la concentración máxima de toda la serie de tiempo en este transecto se dan el crucero de primavera de 2011 con un valor superior a los  $8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .



**Figura 56.** Serie de tiempo para  $a_1$  y  $a_2$  en el transecto 90 con catorce estaciones de muestreo, del año 2000 al 2011. Cuatro cruces por año, invierno, primavera, verano y otoño.



**Figura 57.** Serie de tiempo para  $a_1$  y  $a_2$  en el transecto 80 con ocho estaciones de muestreo, del 2000 al 2011. Cuatro cruces por año, invierno, primavera, verano y otoño.

## Discusión y Conclusiones

La región CALCOFI se caracteriza por presentar una fuerte variabilidad oceanográfica debida a factores como son el patrón de circulación de la Corriente de California que cambia por topografía, calentamiento solar, surgencias, abundancia y distribución fitoplanctónica (Steele, 1978; Esaias, 1981). Durazo *et al.*, (2002) reportaron una contribución clara de baja salinidad y baja temperatura del agua subártica en los 100 m superiores de la columna de agua en la CCS frente a la península de Baja California en el período de octubre 2002 a abril 2003. Como se menciona son muchos los factores (físicos y biológicos) que van a inducir a la variabilidad que se presenta en la zona de estudio. En este trabajo se observa que existe marcada diferencia en los perfiles de la zona norte entre la región costera y oceánica, la cual está relacionada con esta variabilidad oceanográfica. Para la región oceánica la variabilidad es poco significativa para las dos regiones y épocas del año por las condiciones oligotróficas que presenta esta zona (Millan-Núñez *et al.*, 1997). Por otro lado se observó un incremento en los valores de biomasa integrada en la región oceánica en los cruceros de primavera del 2011, estos debido a algunas extensiones o meandros de las altas concentraciones de clorofila; la zona costera presentó mayores concentraciones con perfiles similares para las épocas frío y caliente, resultados que coinciden con lo obtenido por Millan-Núñez *et al.* (1997). La biomasa integrada se incrementa hacia la costa (Platt *et al.*, 1998) con máximos en los cruceros de primavera y pequeños incrementos durante el otoño, pudiendo asociar este fenómeno a las surgencias que se presentan en la Corriente de California (CC) en estas épocas del año (Cullen *et al.*, 1981, Durazo 2009). Los valores de  $Z_{m1}$  y  $Z_{m2}$  presentaron valores promedio entre 50 y 100 metros de profundidad en las

zonas oceánicas y valores muy someros en las regiones costeras con promedios entre 13 y 16 metros de profundidad. Los valores del MPC en la región costera presentaron una gran variabilidad entre el norte y el sur (Millan-Nuñez *et al.*, 1997).

Los perfiles oceánicos son los que presentaron menores concentraciones de clorofila en la región norte y en la época caliente debida a las condiciones oligotróficas ya que la mayor presencia de las surgencias se presentan en la época fría (Durazo, 2009, Millan-Nuñez, *et al.*, 1997). Para la región sur los perfiles costeros presentaron mayores concentraciones de Chla que los oceánicos con perfiles con dos máximos. En la región sur existe una mayor posibilidad de encontrar perfiles verticales de Chla con dos máximos en la época fría, en la región costera. Perfiles con un solo máximo son característicos del norte en la región oceánica y principalmente en la época caliente, variabilidad similar a la que encontraron Millan-Nuñez *et al.* (1997).

Al analizar y comparar la región norte-sur, en la zona costera y época caliente incluyendo las diferentes categorías de Chla, tenemos que el parámetro H, en la región sur tiene una tendencia a aumentar conforme aumenta la categoría. La profundidad del máximo de clorofila presenta una tendencia a disminuir conforme aumenta la categoría. Para las concentraciones máximas de clorofila la tendencia fue de aumentar con la categoría, pero con valores mayores en la región sur. Esta variación en los distintos parámetros a lo largo del año se debe principalmente a los cambios hidrológicos estacionales de la Corriente de California (Hayward *et al.*, 1995, Millan-Nuñez *et al.*, 1997), debido al rompimiento de la termoclina durante primavera y otoño, produciendo la mezcla en la columna y permitiendo un aporte de nutrientes a la

zona eufótica y un incremento en la biomasa del fitoplancton (Millan-Nuñez *et al.*, 1997).

Las concentraciones de clorofila máximas tienen un comportamiento similar al de la biomasa integrada, es decir aumenta la concentración con el aumento de la categoría con valores mayores en la región sur. Esta variación se da en la mayoría de los parámetros que conforman el perfil vertical de clorofila en el Sistema de la Corriente de California (SCC), es decir un aumento de valor y/o concentración a medida que es mayor la categoría y con valores más altos en la región costera como lo reporta Millan-Nuñez *et al.*, (1997).

Los valores máximos de biomasa integrada del perfil de clorofila para el sur en la región oceánica ocurrieron en los cruceros de primavera y verano de 2011, valores que coincidieron con un evento Niña (CALCOFI Reports 2011). Este evento ocurrió en los meses de agosto, septiembre y octubre y en la región costera los valores más altos fueron durante el crucero de otoño de 2009 y en los cruceros de primavera y verano de 2010, coincidiendo con el inicio de una condición Niña. Para la región norte los valores de la biomasa integrada del perfil de clorofila en la zona oceánica se dan el crucero de invierno de 2003, el cual coincide con una condición Niña, primavera de 2004 y verano de 2005. La estación 60 que se considera en este trabajo como la frontera entre la zona oceánica y costera se dio el valor más alto para biomasa integrada de toda la serie de tiempo para el año 2004 en los cruceros de primavera y verano (este último coincide con una condición Niño) y en el año 2011

en los cruceros de invierno y primavera, coincidiendo el crucero de invierno con una condición Niña (CALCOFI Reports 2011).

Los valores máximos de Chls promedio se dieron en la región Sur Oceánica Fría, seguida de la Sur Oceánica Caliente, influenciada por fenómenos de surgencia que están presentes todo el año, pero con menor intensidad en la época caliente (Durazo, 2009).

En la región Sur Oceánica, de acuerdo a las series de tiempo de los parámetros Zm que se presentan en este trabajo tenemos que los dobles máximos se presentaron en el año 2000, en los cruceros de primavera que coincidieron con condición Niña, en el año 2006 crucero de otoño coincidió con el inicio de una condición Niño. Para la zona costera tenemos mayor variabilidad en la aparición de dobles máximos ya que de acuerdo con las estaciones 35 y 47 (transecto 90), tenemos dobles máximos en los cruceros de invierno 2002, primavera 2003, invierno y otoño 2004, primavera 2005, verano 2007, primavera 2008 y 2010, otoño 2011. Hay que hacer notar que la estación más costera no presentó dobles máximos, debido a lo somero de la zona que no permitió que se formara el doble máximo. Para la zona norte se noto la presencia de dobles máximos incluyendo la zona oceánica ya que en la estación 100 (la más oceánica) se presentan dobles máximos en 2004, 2005, 2009, 2010, 2011, bien identificados, conforme nos vamos acercando hacia la costa, por ejemplo en la estación 60 hay dobles máximos desde al 2003 hasta el crucero de primavera de 2009, y presencia de dobles máximos bien identificados en el crucero de verano y otoño de 2011. En la estación más costera de este transecto (80/55.5) se da el mismo fenómeno que en la región sur, es decir la poca presencia de dobles máximos,

confirman que la zona es más homogénea con un mayor proceso de mezcla en la columna de agua.

Debido a los diferentes cambios físicos, químicos y biológicos que ocurren a lo largo del año de manera estacional en la Corriente de California, por fenómenos meteorológicos o climáticos, los perfiles verticales de clorofila son muy variados, aunque se presentan ciertas tendencias. Por ejemplo la biomasa integrada de los perfiles verticales de *Chl a* tienden incrementarse hacia la costa, la profundidad de máximo de clorofila tiende a incrementarse a hacia la parte oceánica. La formación de los dobles máximos de clorofila pudiera ser debido a que un segundo florecimiento de fitoplancton surja después de que el primer florecimiento haya tenido tiempo suficiente para que las células se hundan, o por un decremento debido al pastoreo por el zooplancton en la parte superficial y se presente el primer máximo profundo, o porque éste segundo máximo pudiera ser debido a la diferencia en biomasa o por la adaptación fisiológica del fitoplancton a bajas irradiancias, teniendo un incremento de la concentración de clorofila por célula.

## **Conclusiones Generales**

- Con el modelo de ajuste con dos máximos y con gradiente fue posible ajustar casi la totalidad de perfiles verticales de *Chl a* con uno o dos máximos incluyendo aquellos que presentan gradiente con la profundidad.
- Se recomienda el uso de este modelo en regiones oceánicas donde existan dobles máximos de clorofila

- La forma de los perfiles verticales de clorofila en la Corriente de California varió mucho por región y época del año debido a múltiples factores físicos y biológicos.
- Se obtuvieron perfiles verticales promedios por región, época y por concentración de clorofila superficial.
- La comparación entre el perfil modelado y los perfiles *in situ* se considera que el perfil promedio modelado, representa una buena aproximación a los perfiles *in situ*.
- La variación entre el perfil modelado y el perfil *in situ* se da entre otros factores debido al proceso iterativo del modelo que utiliza algoritmos genéticos como herramienta de evaluación.
- Para evitar variabilidad y tener una mejor y mayor aproximación o inferencia al perfil esperado, se debe de realizar la comparación del perfil evaluado con un mayor número de perfiles *in situ* para la misma región y época
- La biomasa integrada de los perfiles verticales de clorofila se incrementan hacia la costa, las profundidades de máximo de clorofila se incrementan a hacia la parte oceánica.
- La formación de los dobles máximos de clorofila pudiera ser debido a que un segundo florecimiento de fitoplancton surja después de que el primer florecimiento haya tenido tiempo suficiente para que las células se hundan, o por un decremento debido al pastoreo por el zooplancton en la parte superficial y se presente el primer máximo profundo, o porque éste segundo máximo pudiera ser debido a la diferencia en biomasa o por la adaptación

fisiológica del fitoplancton a bajas irradiancias, teniendo un incremento de la concentración de clorofila por célula

- En las serie de tiempo de H,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $Z_{m1}$  y  $Z_{m2}$  se observa cómo cambian a lo largo de los años de muestreo, producidos por los cambios físicos y químicos en la Corriente de California.
- Debido a los diferentes cambios físicos, químicos y biológicos que ocurren a lo largo del año de manera estacional en la Corriente de California, por fenómenos meteorológicos o climáticos, los perfiles verticales de clorofila son muy variados

## Referencias

Aguirre-Hernández E, Gaxiola-Castro G, Nájera-Martínez S, Baumgartner T, Kahru M, Mitchell GB. 2004. Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: summer and autumn 1998. *Deep-Sea Research. II* 51: 799–816.

Alander, J. T. 1992. On optimal populations size of genetic algorithms. Laboratory of information processing science. Department of computer Science. Helsinki University of Technology Otakary, 1.SF 02 150. Espoo, Finland.

Anderson, G. C. 1969. Subsurface chlorophyll maximum in the northeast Pacific Ocean. *Limnology Oceanography*. 14: 386-391.

Barocio-León O.A., Millán-Núñez R, Santamaría-del-Ángel E, González-Silvera A. 2007. Phytoplankton primary productivity in the euphotic zone of the California Current System estimated by CZCS imagery. *Ciencias Marinas*. 33: 59–72.

Camacho, A. 2006. On the occurrence and ecological features of deep chlorophyll maxima (DCM) in Spanish stratified lakes. *Limnetica*, 25(1-2): 453-478.

California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports Volume 52 January 1 to December 31, 2011

Cullen, J. J. 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39: 791-803.

Cullen, J. J., y R. W. Eppley. 1981. Chlorophyll maximum layers of the Southern California Bight and possible mechanisms of their formation and maintenance. *Oceanologica Acta* 4: 23–32.

Demarq, H., A. J. Richardson, and J. G. Field. 2008. Generalised model of primary production in the southern Benguela upwelling system. *Marine Ecology Progress Series*. 354:59-74.

Durazo R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Progress Oceanography*. 83: 361–368.

Durazo R, Baumgartner T. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Progress Oceanography*. 54: 7–31.

Esaias, W, 198 L. Remote sensing in biological oceanography, *Oceanus*, 24(3):32-39,

Espinoza Carreón, T. L., G. G. Castro, J. M. Robles Pacheco, and S. Nájera Martínez. 2001. Temperatura, Salinidad, Nutrientes y Clorofila a en aguas Costeras de la Ensenada del Sur de California. *Ciencias Marinas*, 27: 397-422.

Espinosa-Carreón TL, Strub PT, Beier E, Ocampo Torres F, Gaxiola-Castro G. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California *Journal of Geophysical Research*.109, C03039, doi: 10.1029/2003JC002105.

Gaxiola-Castro G, Durazo R, Lavaniegos B, De la Cruz-Orozco ME, Millán-Núñez E, SotoMardones L, Cepeda-Morales J. 2008. Pelagic ecosystem response to interannual variability off Baja California. *Ciencias Marinas*. 34: 263–270.

Hayward, T. L., D. R. Cayan, P. J. S. Franks, R. J. Lynn, A. W. Mantyla, J. A. McGowan, P. E. Smith, F. B. Schwing, and E. L. Venrick 1995. The state of the California Current III 1994-1995. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports. 35: 19-35.

Hidalgo-González, R., and S. Álvarez-Borrego. 2008. Water column structure and phytoplankton biomass profiles in the Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 34(2): 179-195.

Hobson, L.A. and Lorenzen, C.J. (1972) Relationship of chlorophyll maxima to density structure in the Atlantic Ocean and Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res.*, 19, 297-306.

Holland, J. H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. 2<sup>nd</sup> ED Cambridge, MA: MIT Press.

Jerlov, N. G. 1959. Maxima in the vertical distribution of particles in the sea, *Deep Sea Research.*, 5, 173- 184.

Kahru M, Mitchell BG. 2002. Influence of the El Niño-La Niña cycle on satellite-derived primary production in the California Current. *Journal of Geophysical Research*. 29, 1846, doi:10.1029/2002GL014963

Kirk, J. T. O. 2011. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. 3<sup>rd</sup> ED. Cambridge University Press. 649 pp.

Lorenzen, C.J. 1967, Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology. Oceanography*. 12: 343- 346.

Lynn RJ, y Simpson J.J. 1987. The California Current system: the seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*. 92: 12947–12966.

Matsumara, S., and A. Shimoto. 1993. Vertical distribution of primary productivity function Phi-for the estimation of primary productivity using by satellite remote sensing. *Bulletin of National Research Institute of Far Seas Fisheries*, 30:227-270.

Mignot A., H. Claustre, F. D'Ortenzio, X. Xing, A. Poteau, and J. Raset. 2011. From the shape of the vertical profile of in vivo fluorescence to Chlorophyll-a concentration. *Biogeosciences*, 8, 2391–2406, 2011. doi:10.5194/bg-8-2391-2011

Millán-Núñez R. 1996. Caracterización de los parámetros que determinan el perfil vertical de clorofila a en la Corriente de California. Tesis doctoral, CICESE, Ensenada, Mexico

Millán-Núñez, R., S. Álvarez-Borrego, and C. C. Trees. 1997. Modeling the vertical distribution of chlorophyll in the California Current System. *Journal of Geophysical Research*. 102: 8587–8595.

Millan Nunez, R. y J. R. Lara Lara. (1995) Productividad primaria del fitoplancton del pacífico mexicano: un diagnóstico. en: Fernando González Farias y Jorge de la Rosa Vélez., Editores, "Temas de Oceanografía Biológica en México. Vol. II.". pp 31-60 p. (PA: CEECH9507)

Morel A. y J. F. Berthon. 1989. Surface pigment, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnology. And Oceanography*. 34(8): 1545-1562.

Muñoz-Anderson, M., Millán-Núñez, R., Hernandez-Walls, R. Gonzalez-Silvera, A., Santamaria-Del Angel, E., Rojas-Mayoral, E., Galindo-Bect, S. 2015. Fitting vertical chlorophyll profiles in the California Current using two Gaussian curves. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2015, VC 2015 Association for the Sciences of Limnology and Oceanography. doi: 10.1002/lom3.10034

Pielke, 2002. *Meso-scale Meteorological Modeling*. Academic Press, 612 pp.

Platt, T. 1986. Primary production of the ocean water column as a function of surface light intensity: Algorithms for remote sensing. *Deep-Sea Research*. 33: 149-163.

Platt, T., y S. Sathyendranath. 1988. Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science* 241: 1613–1620

Platt, T., and S. Sathyendranath. 1995. Software for use in calculation of primary production in the oceanic water column. [Http://www.iocccg.org/software/Ocean\\_Production](http://www.iocccg.org/software/Ocean_Production).

Platt, T., C. Caverhill, y S. Sathycndrallath. 1991. Basin-Scale estimates of oceanic primary; production by remote sensing: The North Atlantic *Journal of Geophysical Research*. 96: 147-159.

- Pingree, R. D. 1978. Mixing and stabilization of phytoplankton distribution on the Northwest European continental shelf, in: Spatial pattern in plankton communities, Edited by J. H. Steele, Plenum Press N.Y. 181-220.
- Richardson, A. J., N.F. Silulwane, B. A. Mitchell-Innes, and F. A. Shilington. 2003. A dynamic quantitative approach for predicting the shape of phytoplankton profiles in the ocean. *Progress in Oceanography* 59:301-319.
- Riley, G.A., Stommel, H. and Bumpus J.J.F. (1949) Quantitative ecology of the plankton of the western North Atlantic. *Bull Bingham Oceanography* 1, 1-169.
- Sarmiento, J. L., and M. Bender. 1994. Carbon biogeochemistry and climate change. *Photosynthesis Research*. 39: 209–234.
- Sathyendranath, S., A. R. Longhurst, C. M. Caverhill, and T. Platt. 1995. Regionally and seasonally differentiated primary production in the North Atlantic. *Deep Sea Research*. I 42: 1773–1802.
- Smith, R., 1981. Remote sensing and the depth distribution of ocean chlorophyll. *Marine Ecology Progress*. Ser. 5: 359-361.
- Smith R. C., Eppley R. W., Baker K. S., 1982. Correlation of primary production as measured aboard ship in southern California 113 coastal waters and as estimated from satellite chlorophyll images, *Mar. Biol.*, 66, 281-288.
- Smith, R., X. Zhang, and J. Michaelson. 1988. Variability of pigment biomass in the California Current system as determined by satellite imagery. *Spatial variability*

Journal of Geophysical Research. 93: 10863–10882.

Steele, J. H. 1978. Some comments on plankton patches. en J. H. Steele (cd) *Spatial Patterns in Plankton Communities*, plenum press, N. Y. 1-20.

Steele, J. H., and C. S. Yentsch. 1960. The vertical distribution of chlorophyll. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 39: 217-226.

Taguchi, S., Kasai, H., y Saito, H. 1994. Estimation of vertical distribution of Chlorophyll a off east Hokkaido by Gaussian Curve fitting. *Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Biology*. 7, 17-31, 1994

Takahashi, M. y T. Hori. 1984. Abundance of picophytoplankton in the surface chlorophyll maximum layer in subtropical and tropical waters. *Marine Biology* 79, 177-186.

Venrick, E. L. and T. L. Hayward. 1984. Determining chlorophyll on the CALCOFI (surveys California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports. Rep. 25 74-79.

Walsh, M. J., L. J. Fogel, and A. J. Owens. 1966. *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*. Wiley Publishing. New York

Williamson, R., J. G. Field, F. A. Shillington, A. Jarre, and A. Potgieter. 2011. A Bayesian approach for estimating vertical chlorophyll profiles from satellite remote sensing: proof-of-concept. *ICES Journal of Marine Science*, 68(4):792-799.

Xiu, P., Y. Lui, and X. B. Yin. 2007. Preliminary study on distribution of deep chlorophyll maximum and remote sensing model in the Bohai Sea of China. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.28, No. 11, 10 June 2007, 2599–2612.

Zhai, Li, T. Platt, C. Tang, S. Sathyendranath, and R. Hernandez-Walls, 2011. Phytoplankton phenology on the Scotian Shelf. *ICES Journal of Marine Science*, 68 (4), 781–791. doi:10.1093/icesjms/fsq 175.

Zhai, L., K. Gudmundsson, P. Miller, W. Peng, H. Gujfinnsson, H. Debes, H. Hatun, G. N. White III, R. Hernandez-Walls, S. Sathyendranath, and T. Platt. 2012. Phytoplankton phenology and production around Iceland and Faroes. Elsevier. *Continental Shelf Research* 37: 15–25.