

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ecología Marina**

**Efecto de los eventos ENSO 1997-2012 en la producción y
biomasa del fitoplancton de Bahía Sebastián Vizcaíno, Baja
California**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Luz María Martínez Fuentes

Ensenada, Baja California, México
2015

Tesis defendida por

Luz María Martínez Fuentes

y aprobada por el siguiente comité

Dr. Gilberto Gaxiola Castro
Director del Comité

Dra. Teresa Leticia Espinosa Carreón
Dra. Bertha Eugenia Lavaniegos Espejo
Dr. Alejandro Francisco Parés Sierra
Dr. José Rubén Lara Lara



Dr. David Alberto Rivas Camargo
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Luz María Martínez Fuentes** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Efecto de los eventos ENSO 1997-2012 en la producción y biomasa del fitoplancton de Bahía Sebastián Vizcaíno, Baja California

Resumen aprobado por:

Dr. Gilberto Gaxiola Castro
Director de tesis

Bahía Sebastián Vizcaíno (BSV) localizada en la costa occidental de la Península de Baja California es impactada por los eventos de surgencias costeras estacionales y por el giro anticiclónico presente al este de Isla de Cedros, el cual se ha observado durante la mayor parte del año. Debido a la importancia ecológica y económica de BSV es trascendente caracterizar los cambios de gran escala temporal en la biomasa y producción del fitoplancton, así como su posible relación con procesos físicos estacionales e interanuales. En este trabajo se presenta la variación en la producción y biomasa del fitoplancton obtenido durante las campañas IMECOCAL de 1997 a 2012, así como la información a partir de sensores remotos de temperatura (TSM) y clorofila (CHL). Con las series de tiempo de las variables hidrográficas y biológicas se calcularon los promedios climatológicos para cada estación y mes del año en particular. A partir de estos promedios se obtuvieron las anomalías y se relacionaron con los principales eventos climatológicos que afectaron las condiciones de la bahía de 1997 a 2012. BSV presentó una fuerte estacionalidad anual, con temperaturas menores de diciembre a junio y más altas de julio a noviembre. La clorofila mostró menor biomasa de agosto a enero y mayor de marzo a julio, con un patrón estacional similar para la producción primaria (PP). Los eventos interanuales que influenciaron mayormente a BSV fueron El Niño 1997-1998 y La Niña 2011. El Niño 1997-1998 presentó mayor influencia en la temperatura de BSV, observando temperaturas superficiales de hasta 3 °C mayores al promedio y un aumento de 0.4 unidades de salinidad. Durante La Niña 2011 se observaron anomalías negativas de TSM (-0.6 y -0.2 °C) y de temperatura *in situ* (-0.6 °C), aunque la salinidad no mostró cambios importantes. La biomasa del fitoplancton mostró una anomalía positivas de CHL con un valor $>1 \text{ mg m}^{-3}$ y de clorofila *in situ* de 0.3 mg m^{-3} . En general, no se observó una gran influencia en la clorofila ni en PP durante los eventos El Niño's ya que el efecto del agua proveniente de surgencias costeras del norte de la bahía amortigua el posible impacto de las condiciones anómalas. Por el contrario, en la mayoría de los eventos La Niña's se observó un aumento en la clorofila, esto debido a que se favorecen las condiciones de surgencias. La drástica disminución de la biomasa del fitoplancton a finales de 2003 estuvo asociada a la influencia del ingreso anómalo de Agua SubArctica (ASA) en la región de Baja California, observando anomalías negativas de salinidad de hasta -1.6. Este estudio confirma que BSV tiene su propia dinámica física y biológica, lo cual le permite no ser fuertemente afectada por procesos de gran escala temporal y espacial, lo que le permite mantener su riqueza de diferentes especies de organismos dentro de la cadena trófica.

Palabras clave: Productividad Primaria, Biomasa del fitoplancton, El Niño-La Niña, Corriente de California, Baja California

Abstract of the thesis presented by **Luz Maria Martinez Fuentes** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Effect of ENSO events 1997-2012 in the phytoplankton production and biomass of Sebastian Vizcaino Bay, Baja California

Abstract approved by:

Dr. Gilberto Gaxiola Castro
Thesis Director

Sebastian Vizcaino Bay (BSV) located on the western coast of the Baja California Peninsula is impacted by seasonal coastal upwelling events and by an anticyclonic gyre present East Cedros Island, which has been observed most of the year. Due to its ecological and economic importance, BSV, it is significant characterize changes in temporal large-scale in the phytoplankton biomass and production, as well as their possible relation to physical processes over seasonal and interannual scales. This work shows the phytoplankton production (PP) and biomass variability, obtained during the IMECOCAL campaigns from 1997 to 2012, as well as information from remote sensing of temperature (SST) and chlorophyll (CHL). Using the time series of hydrological and biological variables, climatological averages for each season and month of the year were calculated. From these averages, anomalies has gotten and related to the main climate events affecting the conditions of the bay from 1997 to 2012. BSV showed a strong seasonality during the year, with low temperatures from December to June and warm from July to November. Phytoplankton had less biomass from August to January and high from March to July, with PP following a similar pattern. The 1997-1998 El Niño and 2011 La Niña events influenced generally BSV. The 1997-1998 El Niño event had more influence on temperature, with surface values up to 3 °C higher than average, and an increase of 0.4 in salinity. During the 2011 La Niña event negative SST (-0.6 and -0.2 ° C) and *in situ* (-0.6 ° C) anomalies were observed; although salinity no had significant changes. Also, CHL had a positive value >1 mg m⁻³ and chlorophyll *in situ* of 0.3 mg m⁻³. In overall, there was not a great influence on chlorophyll and PP of the El Niño's events, since the effect of the coastal upwelling mitigates the possible impact of anomalous conditions. By contrast, in most La Niña's events chlorophyll increased as result of enhancing of coastal upwelling north the bay. The drastic decline in phytoplankton biomass late 2003 was associated with the influence of anomalous SubArctic Water (SAW) over the Baja California region, with up to -1.6 salinity anomalies. This work concluded that BSV has its particular physical and biological dynamics, which allows not to be strongly affected by large temporal and spatial processes, maintaining its richness in organisms of different species within the food chain.

Keywords: Primary Productivity, phytoplankton biomass, El Niño-La Niña, California Current, Baja California

Dedicatoria

La realización de esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo de mis padres y mis hermanos, haciendo un esfuerzo anímico y económico para que nunca me faltara nada.

A mis hermanos Marco Antonio y Jorge Eduardo, que siempre me apoyaron y me dieron la fortaleza para seguir adelante, además de ser las personas más importantes de mi vida, en lo personal siempre los he considerado como un gran ejemplo a seguir.

A mi mamá por apoyarme al llegar a estudiar a ensenada, sin tus cuidados y cariño no me hubiera recuperado rápidamente.

A mi papá por estar ahí siempre y por desvelarse conmigo a través de Skype.

A mi familia, en especial a todos mis primos, quienes me han enseñado que a pesar de cualquier obstáculo, la familia siempre está presente.

Agradecimientos

A CONACYT por el apoyo económico brindado para poder realizar esta tesis y mis estudios de maestría con el N° de becario: 285865.

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y contribuir a mi formación personal y académica.

A mi director de tesis, maestro y amigo Dr. Gilberto Gaxiola Castro, por compartir tu conocimiento y trabajar conmigo, guiarme y aconsejarme en el proceso de este trabajo de tesis. Gracias por su paciencia y por confiarme este estudio.

A los miembros de mi comité de tesis Dra. Bertha Lavaniegos, Dra. Leticia Espinosa, Dr. Rubén Lara, y Dr. Alejandro Parés, por sus asesorías, comentarios y apoyo para el desarrollo de esta tesis.

Al personal administrativo y docente de CICESE principalmente a Elizabeth Farías Barajas, por su paciencia y apoyo durante los momentos de duda e incertidumbre, tanto en el ámbito laboral como personal.

A los profesores con los que tuve la fortuna de convivir: Tim Baumgartner, Saúl Álvarez, Lydia Ladah, Bertha Lavaniegos, Oscar Sosa y a la Dra. Elena Solana. Gracias por su apoyo y ayuda, además del conocimiento que me aportaron durante estos años.

A mis papás María Lucero y Marco por su apoyo incondicional, por alentarme a seguir adelante, principalmente en los momentos en los que “ya no podía más”, por su amor, cariño y educación que me han dado a lo largo de mi vida. Gracias a ustedes he llegado hasta donde he querido. Los amo.

A mi hermano mayor y futuro Dr. En Física Marco Antonio Martínez Fuentes, gracias por darme las alas para volar y convencer a mis papás para poder estudiar lejos del D.F. y presentar la maestría en Ensenada.

A mi gemelo Jorge Eduardo, tu fortaleza y tu alegría me inspiran a seguir adelante, gracias por ser un gran pilar para mí.

A Venus, porque sin ti mi vida no sería tan feliz y llena de esos pequeños detalles y sonrisas que me das, gracias peluche.

A mis compañeras y amigas de generación, Karen Raquel, Abilene Gizeh, Verónica morales, Karen Faurrieta, Paula y Celia, gracias chicas por el apoyo, el aprendizaje y esos momentos invaluable que me dejan.

A mis compañeros y amigos de CICESE, Rafa, Uriel, siempre recordare las clases de óptica con ustedes, a Aideé, Andrea, Luis, Rubén, Edgar, Yama, Laura, Laurica, Beto, Ramón, Rigo. Gracias por su amistad y apoyo en estos años.

A mi querida amiga Melisa, sin ti no hubiera tenido la oportunidad de conocer el CICESE, gracias por las experiencias vividas.

A mis mejores amigos y hermanos del D.F. Lore, Muciño, Alan, Johaly, Zac, Mayte, Memo, Ana, Gaby, Kalia, Barbie, El Marchante, Chebuz, Maye, Fernanda. Gracias por su apoyo a distancia, y porque gracias a ustedes sé que los amigos son la familia que se escoge.

A Juan Manuel (Geo Neo), gracias por estar conmigo durante esta importante etapa de mi vida, ya que sin ti no hubiera podido reencontrarme a mí misma. Te quiero.

A todas las personas que por alguna razón ya no se encuentran a mi lado, sé que me cuidan donde quiera que estén, gracias por mostrarme que la melodía de la vida posee ciertos bemoles, pero al escuchar la pieza completa es una canción única.

“Necesito creer que algo extraordinario es posible”

John Nash.

Tabla de contenido

	Página
Resumen español.....	ii
Resumen inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xiv
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Antecedentes	6
Capítulo 3. Objetivos	
3.1 Objetivo general.....	13
3.2 Objetivos específicos.....	13
3.3 Hipótesis.....	13
Capítulo 4. Material y Métodos	
4.1 Datos.....	14
4.2 Datos recolectados en cruceros.....	14
4.3 Análisis de las muestras de Clorofila-a (Chl-a).....	15
4.4 Determinación de oxígeno disuelto por el método micro- Winkler	16
4.5 Datos de sensores remotos.....	16
4.6 Climatología y anomalías a partir de datos <i>in situ</i> y de sensores remotos.....	17
4.7 Obtención de las muestras para la construcción de curvas P-E	18
4.8 Curvas P-E (parámetros fotosintéticos).....	19
4.9 Producción primaria calculada a partir de sensores remotos....	21
4.10 Análisis estadísticos.....	23
Capítulo 5. Resultados	
5.1 Climatología de las variables <i>in situ</i> y de sensores remotos.....	25
5.2 Anomalías de las variables <i>in situ</i>	30
5.3 Perfiles verticales de variables <i>in situ</i>	34
5.4 Anomalías de datos derivados de sensores remotos.....	44
5.4.1 Distribución de las anomalías de variables de sensores remotos.....	46
5.5 Producción Primaria.....	50
5.6 Anomalías de Producción Primaria.....	52
5.6.1 Distribución de las anomalías de PP	53
5.7 Análisis de similitud a partir de la temperatura superficial del mar de satélite (TSM).....	56
5.8 Análisis de similitud de la clorofila-a de satélite.....	57
5.9 Análisis de correlación.....	58
5.10 Comparación entre zonas dentro de BSV.....	62
Capítulo 6. Discusión	

6.1	Variación temporal.....	65
6.2	Variación espacial.....	70
Capítulo 7. Conclusiones		71
Lista de referencias bibliográficas		74
Anexos		80

Lista de figuras

Figura		Página
1	Localización de las líneas hidrográficas y estaciones del programa IMECOCAL. El recuadro muestra con círculos oscuros las estaciones hidrográficas muestreadas en la zona de Bahía Vizcaíno (113.30, 113.35, 117.30, 117.35, 119.33, 120.30, 120.35, 120.39) utilizadas en este trabajo.....	3
2	Serie de tiempo del Índice Multivariado ENSO (MEI) de 1997-2012. (Datos obtenidos de http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html).....	4
3	Modelo conceptual de la circulación superficial de la región de Bahía Sebastián Vizcaíno (adaptado de Wyllie, 1960).	6
4	Campo del viento observado durante septiembre de 1992. Note la zona de calmas (sombreada) al sureste de Isla de Cedros (Modificada de Palacios-Hernández et al., 1996).....	8
5	Series de tiempo 1993-2003 en BSV del promedio de temperatura, salinidad y nivel del mar modeladas a partir de ROMS. Serie de tiempo 1997-2011 del promedio de clorofila derivada de imágenes de sensores remotos (SeaWiFS con resolución de 9x9 km) (tomadas de http://omm.cicese.mx/).....	10
6	Localización de las estaciones del programa IMECOCAL en el área de Bahía Sebastián Vizcaíno utilizadas en este estudio. Las líneas en las figuras muestran las profundidades en metros (tomadas de la NOAA: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/relief.html).....	14
7	Relación fotosíntesis-irradiancia (curva P-E). P^B_m es la tasa fotosintética máxima [$\text{mgC} (\text{mg Cl-a})^{-1} \text{h}^{-1}$]; α_B es el coeficiente de máxima utilización de luz [$\text{mgC} (\text{mg Cl-a h})^{-1} / (\mu\text{mol cuanta m}^{-2} \text{s}^{-1})$] y $E_k (P^B_m/\alpha_B)$ es el parámetro de fotoaclimatación del fitoplancton [$\mu\text{mol cuanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$]. La línea roja representa el ajuste hiperbólico a partir de la ecuación de Jassby y Platt (1976). Las líneas representan intersecciones y prolongaciones para calcular los parámetros fotosintéticos.....	21
8	Valores promedio de las variables derivadas de los cruceros IMECOCAL de 1997-2012. a) Transecto utilizado para los perfiles verticales de variables dentro de BSV; b) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); c) Salinidad; d) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y e) Clorofila (mg m^{-3}). Nótese el cambio de dirección a partir de la estación 120.30 marcado con línea punteada en los perfiles verticales.....	26

9	Distribución de las variables a 10 m de profundidad (promedio del período 1997-2012) en BSV: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno (ml l^{-1}) y d) Clorofila-a (mg m^{-3}). Los puntos negros dentro de BSV representan las estaciones IMECOCAL que se utilizaron en el presente estudio.....	27
10	Serie de tiempo de TSM ($^{\circ}\text{C}$) en el período 1997-2012 obtenida a partir de datos de sensores remotos.....	28
11	Climatología mensual de la TSM ($^{\circ}\text{C}$) del período de estudio (1997-2012) obtenida a partir de datos de sensores remotos.....	29
12	Serie de tiempo de Clorofila satelital (mg m^{-3}) en el período 1997-2012 obtenida a partir de datos de sensores remotos	30
13	Climatología de la CHL (mg m^{-3}) del período de estudio (1997-2012). La barra de color está en escala logarítmica base 10.....	30
14	Anomalías de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) a 10 m de profundidad en la región de BSV (líneas 113-120) en el periodo 1997-2012. Los símbolos y colores representan las estaciones de muestreo en las campañas IMECOCAL.	31
15	Anomalías de salinidad a 10 m de profundidad en la región de BSV (líneas 113-120) en el periodo 1997-2012. Los símbolos y colores representan las estaciones de muestreo en las campañas IMECOCAL	32
16	Anomalías de oxígeno disuelto (ml l^{-1}) a 10 m de profundidad en la región de BSV (líneas 113-120) en el periodo 1997-2012. Los símbolos y colores representan las estaciones de muestreo en las campañas IMECOCAL.....	33
17	Anomalías de clorofila del fitoplancton (Chl-a; mg m^{-3}) a 10 m de profundidad en BSV (líneas 113-120) en el periodo 1997-2012. Los símbolos y colores representan las estaciones de muestreo en las campañas IMECOCAL.....	34
18	Perfil vertical de variables dentro de BSV durante enero de 1998 representativo de un evento El Niño; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad y c) Clorofila (mg m^{-3}).....	35
19	Perfil vertical de variables dentro de BSV durante enero de 1999 representativo de un evento La Niña; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad y c) Clorofila (mg m^{-3}).....	36
20	Perfil vertical de variables dentro de BSV durante febrero de 2003 representativo de un evento El Niño; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad y c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}).....	37

21	Perfiles verticales de variables medidas en abril de 2003: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}); d) Clorofila (mg m^{-3}).....	38
22	Perfiles verticales de variables medidas en BSV durante febrero 2004, representativo del inicio de la entrada de ASA en la región de Baja California: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila-a (mg m^{-3}).....	39
23	Perfil vertical de variables dentro de BSV durante abril de 2004 representativo de un evento El Niño; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila (mg m^{-3}).....	40
24	Perfil vertical de variables dentro de BSV durante enero de 2008 representativo de un evento La Niña; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila (mg m^{-3}).....	41
25	Perfil vertical de variables dentro de BSV durante abril de 2010 representativo de un evento El Niño; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad y c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}).....	42
26	Perfil vertical de variables dentro de BSV durante octubre de 2010 representativo de un evento La Niña; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila (mg m^{-3})....	43
27	Perfil vertical de variables dentro de BSV durante enero de 2011 representativo de un evento La Niña; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila (mg m^{-3}).....	44
28	Anomalías de TSM ($^{\circ}\text{C}$) en BSV durante 1997-2012, calculas a partir de datos de satélite.....	45
29	Anomalías de CHL (mg m^{-3}) en BSV durante 1997-2012, calculada con información derivada de sensores remotos.....	46
30	Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para diciembre de 1997, derivadas de los datos de sensores remotos.....	47
31	Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para diciembre de 1998, derivadas de los datos de sensores remotos.....	47
32	Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para julio 2002, derivadas de los datos de sensores remotos.....	48
33	Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para febrero de 2003, derivadas de los datos de sensores remotos	48
34	Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para julio de 2006, derivadas de los datos de sensores remotos	49

35	Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para febrero de 2008, derivadas de los datos de sensores remotos.....	49
36	Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para enero de 2010, derivadas de los datos de sensores remotos	50
37	Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para enero de 2011, derivadas de los datos de sensores remotos	50
38	Serie de tiempo (1997-2012) de la producción primaria mensual calculada con el modelo de Carr (2002) a partir de información de satélite	51
39	Anomalías de PP calculada (1997-2012) a partir de datos de satélite y el modelo de Carr (2002).....	53
40	Anomalía de PP durante el evento El Niño a inicios de 1998.....	54
41	Anomalía de PP durante el evento La Niña en marzo de 1999.....	54
42	Anomalía de PP durante el evento El Niño en febrero de 2003....	55
43	Anomalía de PP calculada durante el evento El Niño en abril de 2004.....	55
44	Anomalía de PP durante abril de 2010.....	55
45	Índice de similitud de la TSM obtenida de sensores remotos para la serie de tiempo 1997-2012. a) Distancia euclidiana; b) índice de similitud espacio-temporal.....	57
46	Índice de similitud de CHL obtenida de sensores remotos para la serie de tiempo 1997-2012. Dónde: a) Distancia euclidiana; b) índice de similitud espacio-temporal.....	58
47	Prueba de correlación de Spearman para las diferentes variables de los datos in situ (temperatura (n=50), salinidad (n=50), oxígeno disuelto (n=48) y clorofila (n=49)).....	59
48	Prueba de correlación de Spearman para las anomalías de la serie de tiempo de los datos in situ (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila).....	60
49	Prueba de correlación de Spearman para las diferentes variables (CHL (mg m^{-3}), TSM ($^{\circ}\text{C}$), PP ($\text{mgC M}^{-2} \text{d}^{-1}$) y el MEI.....	61
50	Análisis de correlación de Spearman entre las anomalías de Año, CHL (mg m^{-3}), TSM ($^{\circ}\text{C}$), PP ($\text{mgC M}^{-2} \text{d}^{-1}$) y el índice MEI, durante el período de estudio.....	62

51	Anomalías promedio de CHL de las zonas A y B durante el período de estudio (1997-2012) con un valor de $P=0.56$, las barras verticales muestran el intervalo de confianza al 95%.....	63
52	Anomalías de TSM de las zonas A y B por año durante el período de estudio (1997-2012) con un valor de $P=0.16$, las barras verticales muestran el intervalo de confianza al 95%.....	64

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Parámetros fotosintéticos utilizados para calcular la PP durante el período de tiempo (1997-2012). P_m^B [$\text{mgC (mg Cl-a)}^{-1} \text{ h}^{-1}$] y α^B [$\text{mgC (mg Cl-a)}^{-1} \text{ h}^{-1} / \mu\text{moles cuanta m}^{-2} \text{ s}^{-1}$].....	22
2	Prueba estadística Bonferroni, años con diferencias estadísticamente significativas de PP.....	52
3	Análisis de dos vías de las anomalías de CHL durante el período de estudio, en la tabla se muestran los grados de libertad y el valor de P.....	63
4	Análisis de dos vías de las anomalías de TSM durante el período de estudio, en la tabla se muestran los grados de libertad y el valor de P.....	63

Capítulo 1. Introducción

El Sistema de la Corriente de California (SCC), ubicado al noreste del Océano Pacífico, se extiende a lo largo de la costa oeste de América del Norte al menos hasta 23°N (U.S. GLOBEC, 1994). De acuerdo con Hickey (1979) este sistema para la costa de California está compuesto por la Corriente de California (CC), la Corriente Subsuperficial de California y la Contracorriente del sur de California (Contracorriente de Davidson).

El SCC está influenciado principalmente por Agua Subártica, caracterizada por baja temperatura y salinidad, además de alto contenido de oxígeno y fosfatos (Lynn y Simpson, 1987); Agua Central del Pacífico Norte o Agua Subtropical Superficial (Durazo *et al.*, 2010; Durazo *et al.*, 2015), con alta temperatura y salinidad pero baja en oxígeno y nutrientes; Agua de Surgencias Costeras, con baja temperatura, alta salinidad y nutrientes, pero baja en oxígeno disuelto; y Agua Ecuatorial Subsuperficial, con alta temperatura, salinidad y concentración de nutrientes y baja en oxígeno disuelto.

La Corriente de California (CC) es una corriente limítrofe oriental que transporta agua fría subártica hacia el ecuador a lo largo de la costa occidental de América del Norte con una velocidad promedio menor a 25 cm s⁻¹ (Lynn y Simpson, 1987), generando un cinturón de surgencias a gran escala en el borde nororiental de América (Hickey, 1979; Durazo *et al.*, 2010). La influencia de la CC de acuerdo a Checkley y Barth (2009) se divide en 3 zonas (norte, centro y sur). El presente estudio se enfoca en la zona sur, caracterizado por presentar un ligero y persistente esfuerzo del viento desde el noroeste a lo largo de la costa, lo que genera surgencias principalmente en primavera y verano, ocasionando estacionalidad en la biomasa del fitoplancton (Gaxiola-Castro *et al.*, 2008).

De los eventos interanuales que afectan al SCC, El Niño es un evento meteorológico-oceanográfico asociado al debilitamiento de los vientos alisios en la región ecuatorial del Pacífico, resultando en temperaturas cálidas en la capa superficial del mar, engrosamiento de la capa de mezcla (sumergiendo la posición vertical de la termoclina-nutriclina cerca de la costa) y provocando reducción en el aporte de

nutrientes hacia la superficie y por lo tanto una disminución en la producción biológica (Barber *et al.*, 1985; Luch-Cota *et al.*, 1999). Este evento transporta agua cálida y con elevada salinidad hacia el norte del SCC (Bograd *et al.*, 2001). Contrario a esto, los eventos La Niña están asociados a temperaturas bajas en la capa superficial del mar, ya que debido al incremento de los vientos del noroeste la CC se intensifica, transportando un mayor volumen de agua Subártica. Esto provoca un aumento en la elevación de la nutriclina cerca de la costa con el transporte vertical de alta concentración de nutrientes, lo que incrementa la producción biológica en la zona eufótica del océano (Larkin y Harrison, 2002; Checkley y Barth, 2009; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010a).

De acuerdo a los reportes de CalCOFI (California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations) basados en información de la región frente a Norteamérica que incluye información del programa IMECOCAL frente a la Península de Baja California (Figura 1), los principales eventos climáticos-oceanográficos que afectaron la CC durante el período 1997-2012 fueron: un fuerte El Niño durante 1997-98, La Niña 1998-99, el ingreso anómalo de Agua Subártica de 2002-2005, un El Niño moderado en 2003, El Niño débil entre 2004-2005, condiciones La Niña de 2007 a inicios de 2009, un El Niño a partir de la primavera de 2009, con posteriores condiciones de transición hacia La Niña entre 2009-2011 y un evento ENSO neutral a partir de la primavera de 2012.

El Niño 1997-98 afectó la región de la CC desde finales del verano de 1997 hasta el verano de 1998 y se caracterizó por el aumento de la contracorriente superficial costera, la cual transportó aguas inusualmente cálidas y salinas hacia el norte por debajo de 100 m de profundidad (Lynn *et al.*, 1998). De acuerdo con Hayward *et al.* (1999) las condiciones El Niño 1997-98 en la Corriente de California se redujeron durante el verano y otoño de 1998, con una rápida transición a condiciones de agua fría (La Niña) durante el invierno de 1998-1999 y la primavera de 1999 con surgencias intensas durante este período.

A partir del verano de 2002 se registró un inusual aumento de la baja presión de las Aleutianas que dio lugar a una anomalía de viento ciclónico sobre la mayor parte del noreste del Pacífico, patrón que persistió hasta principios de 2003, por lo que un moderado El Niño alcanzó su punto máximo a principios de 2003 (Venrick *et al.*, 2003). Goericke *et al.* (2004) reportaron que 2003 se consideró un año con condiciones

“normales”, al menos hasta la primavera de 2004, debido a la ausencia de un evento La Niña que se esperaba después de que en el año anterior se reportara un El Niño. Durante el período de abril 2004 hasta enero 2005, Goericke *et al.* (2005) reportaron que El Niño débil de 2004 no pareció haber tenido un efecto notable en la SCC. En el periodo de 2002 a 2005 se registró la intrusión inusual de Agua Subártica (ASA) fría y de baja salinidad frente al sur de California y Baja California (Espinosa-Carreón *et al.*, 2015; Durazo *et al.* 2005; Gaxiola-Castro *et al.*, 2008). Posteriormente, la CC fue influenciada por un evento El Niño débil desde la primavera de 2006 a la primavera de 2007, durante este período en la zona IMECOCAL se presentó una transición a condiciones más cálidas (Goericke *et al.*, 2007).

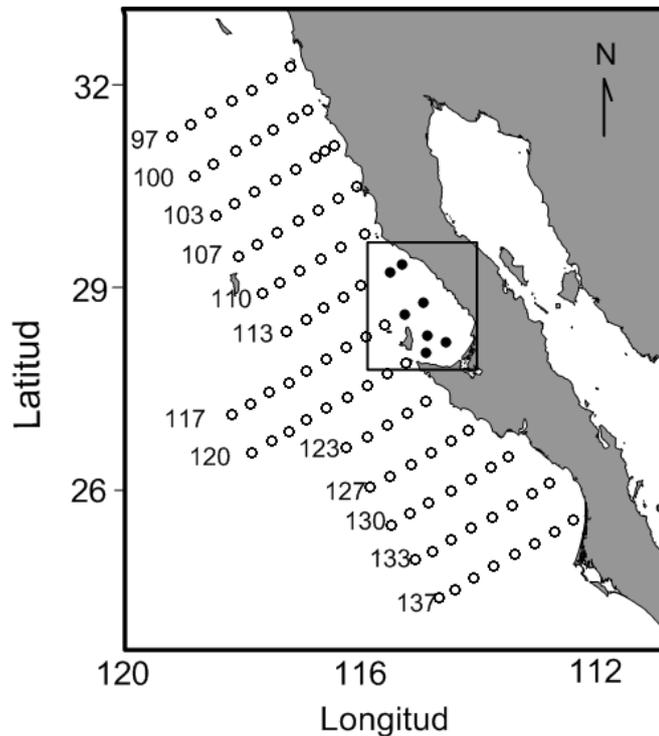


Figura 1. Localización de las líneas hidrográficas y estaciones del programa IMECOCAL. El recuadro muestra con círculos oscuros las estaciones hidrográficas muestreadas en la zona de Bahía Vizcaíno (113.30, 113.35, 117.30, 117.35, 119.33, 120.30, 120.35, 120.39) utilizadas en este trabajo.

De acuerdo a McClatchie *et al.* (2009) desde el verano de 2007 hasta el inicio de 2009, el SCC estuvo dominado por condiciones del evento La Niña, con una transición hacia condiciones El Niño a partir de la primavera de 2009, posteriormente durante 2009 a 2010, los cambios en el estado del SCC reflejaron una transición de condiciones frías de La Niña, a través de un tiempo corto, con un El Niño relativamente débil a inicios del año 2010. Las respuestas a El Niño en el otoño e invierno de 2009 a 2010 parecen

haber variado sustancialmente con la latitud para la zona norte de la región IMECOCAL (Bjorkstedt *et al.*, 2010). Bjorkstedt *et al.* (2012) reportaron que en verano de 2010 se inició un evento La Niña el cual terminó en la primavera de 2011, también se observaron condiciones La Niña débil desde otoño de 2011, a inicios del 2012 y finalmente una transición hacia condiciones de ENSO-neutral en la primavera de 2012.

La variabilidad estacional y alteraciones interanuales por efecto de los eventos El Niño y La Niña causan cambios en la composición y abundancia de los organismos de la trama trófica, afectando principalmente al fitoplancton (Millán-Núñez, 2010) que son una componente ecológica clave (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010a). Al alterarse las condiciones ambientales por eventos interanuales también se ven afectados los organismos que habitan en la zona afectada. En la región IMECOCAL, la ecología y fisiología del fitoplancton se ve afectada por estos eventos, ya que de acuerdo con Gaxiola-Castro *et al.* (2010b) se registraron anomalías negativas de clorofila-a durante El Niño 1997-1998, con anomalías positivas de clorofila-a durante 1999, 2000, 2002, 2003 y menores durante 2005 y 2006 (únicamente en la región costera).

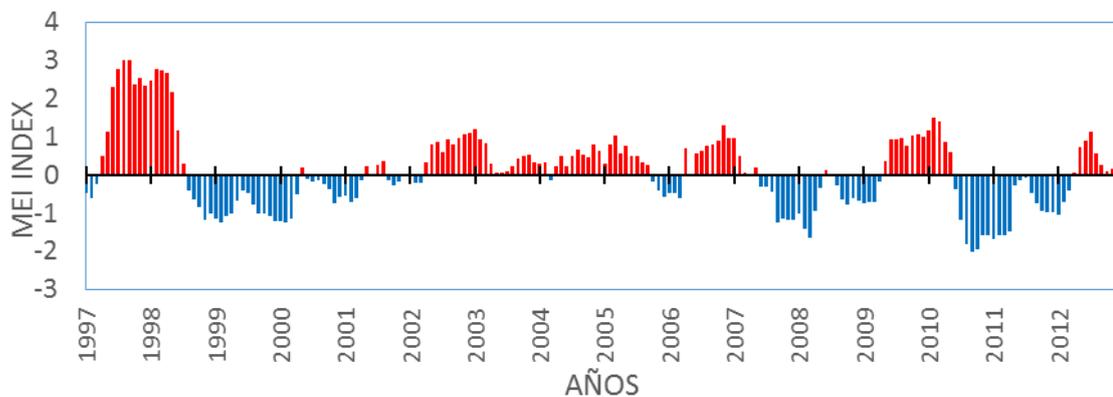


Figura 2. Serie de tiempo del Índice Multivariado ENSO (MEI) de 1997-2012. (Datos obtenidos de <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>).

La región costera de la Península de Baja California a pesar de su gran importancia ecológica y económica ha sido poco estudiada (Durazo y Baumgartner, 2002). A partir de 1997, el programa de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) retomó el monitoreo estacional del ecosistema pelágico de la región, siguiendo una malla similar a la propuesta por el programa norteamericano CalCOFI.

Bahía Sebastián Vizcaíno (BSV), ubicada en la costa occidental de la Península de Baja California es una zona que constituye un hábitat natural para diversas especies que forman parte de la trama trófica, desde organismos fitoplanctónicos y zooplancton, además de especies de gran importancia comercial y ecológica como anchoveta, atún, langosta, camarón, abulón, almejas, tiburón mako, tiburón azul, rayas y ballena gris (Mancilla-Peraza *et al.*, 1993; Palacios-Hernández *et al.*, 1996; Gómez, 1995; Lavaniegos, 1995; Checkley *et al.*, 2009; Santana-Morales, 2008). También es una de las zonas reproductivas de la ballena gris (Rice *et al.*, 1984). Debido a la importancia de esta zona, es necesario tener un conocimiento más amplio que apoye científicamente la valoración del estado estructural y funcional del ecosistema para inferir el potencial uso que se le pueden dar a los recursos renovables (García-Rey, 2014). Debido a esto, la pregunta problema del presente estudio es: ¿Cómo ha sido afectada la producción y biomasa del fitoplancton de Bahía Sebastián Vizcaíno por los eventos ENSO e intrusión anómala de Agua Subártica en el periodo 1997 a 2012?

Capítulo 2. Antecedentes

La característica más sobresaliente de la circulación en Bahía Sebastián Vizcaíno (BSV) es la presencia de un giro anticiclónico cercano al centro de la bahía, reportado por primera vez por McEwen (1916). La posición del centro del giro ha sido ubicada principalmente en la parte occidental de la bahía ($28^{\circ}15'N$) (Figura 3).

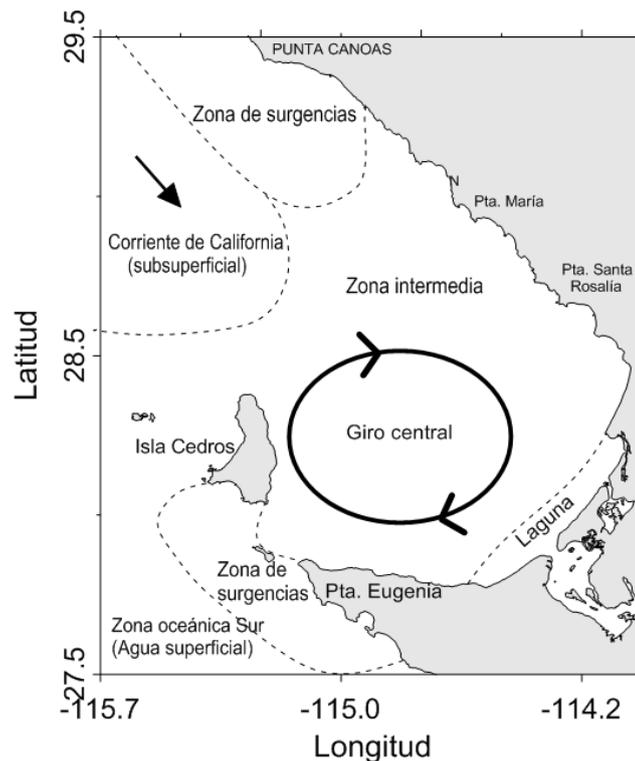


Figura 3. Modelo conceptual de la circulación superficial de la región de Bahía Sebastián Vizcaíno (adaptado de Wyllie, 1960).

Dawson (1952) fue uno de los primeros investigadores en caracterizar en forma biológica BSV y relacionar su circulación con la abundancia de macroalgas durante 1950 y 1951, mostrando que las macroalgas retenidas en el remolino central de la bahía eran de afinidad tropical, mientras que donde predominaba el agua de surgencias costeras había mayormente flora templada.

Willie (1960) caracterizó la influencia de 7 tipos de masas de agua dentro y fuera de BSV, con un esquema conceptual de la circulación como se puede observar en la figura 3: Agua de la Corriente de California, Agua de Surgencias frente a Punta Eugenia, agua modificada por la circulación en el centro de la bahía, agua proveniente de la Laguna Ojo de Liebre, agua de surgencias frente a la región de Punta Canoas, agua superficial oceánica del sur y agua subsuperficial proveniente del sur

caracterizada por baja concentración de oxígeno disuelto, alta salinidad y alto contenido de fosfatos. Este autor determinó en agosto de 1952 que el área de Punta Canoas tuvo una temperatura superficial promedio de 12 a 14°C, con un intervalo de salinidad de 33.60 a 33.65; mientras que para la zona centro de la bahía la temperatura superficial estuvo entre 18 y 20°C con salinidad de 33.50 a 33.60. Mostró además con datos de cruceros CalCOFI que en el centro de la bahía se presenta una estacionalidad marcada, ya que los meses de julio y agosto tuvieron valores mayores de temperatura superficial (19-21°C) y alta salinidad (~33.7). En contraste, durante enero y febrero el agua de la bahía fue relativamente más fría (15-18°C) y más salina (~34). En general, la temperatura del agua fue relativamente menor de enero a junio.

Los estudios hidrográficos reportados por Dawson (1952) y Wyllie (1960) dedujeron la ocurrencia del giro anticiclónico al este de Isla de Cedros con un diámetro aproximado de 60 km y profundidad máxima de 60 m (Amador-Buenrostro *et al.*, 1995). Mancilla-Peraza *et al.* (1993) caracterizaron la variabilidad hidrográfica de la bahía a partir de datos del crucero ECONER en marzo de 1991 (18 a 22 de marzo) y datos de 1960 y 1968 proporcionados por el Banco de Datos e Información Oceanográfica de la Secretaría de Marina. Estos autores demostraron la ocurrencia de la variabilidad estacional en la bahía, con surgencias costeras en la zona frente a Punta Canoas, calentamiento y enfriamiento estacional, convergencia del agua hacia la zona sur de la bahía e intrusiones del Agua Subártica y del Agua Ecuatorial transformada.

Amador-Buenrostro *et al.* (1995) a partir de información de sensores remotos y corrientímetros mostraron la presencia del remolino central en BSV, el cual estuvo influenciado por el evento anual de surgencias, con procesos muy desarrollados durante primavera al norte de la bahía (Punta Canoas). Palacios-Hernández *et al.* (1996) mediante un modelo numérico bidimensional utilizado para simular la circulación barotrópica inducida por viento, reportaron que BSV es una de las zonas de surgencias costeras más intensas y productivas de la Corriente de California. Estos autores expusieron una zona de calma al sureste de Isla de Cedros (Figura 4) y describieron el remolino anticiclónico al este de la Isla de Cedros. Amador-Buenrostro *et al.* (1995) mostraron una superposición de temperatura superficial correspondiente a una imagen infrarroja (satélite NOAA12) e indicaron que durante septiembre de 1992 hubo una estrecha relación entre la manifestación superficial de un giro de agua cálida en el interior de la bahía y la intensificación o relajamiento de las surgencias al norte

de la bahía, resultado de la advección del agua de surgencias desde el norte de Punta Canoas. Estos autores también reportaron que los vientos predominantes a lo largo del año en la zona de estudio tienen una dirección noroeste. Esta característica, junto con la orientación de la costa, produce surgencias durante todo el año, principalmente en Punta Canoas (Amador-Buenrostro *et al.*, 1995; Palacios *et al.*, 1996).

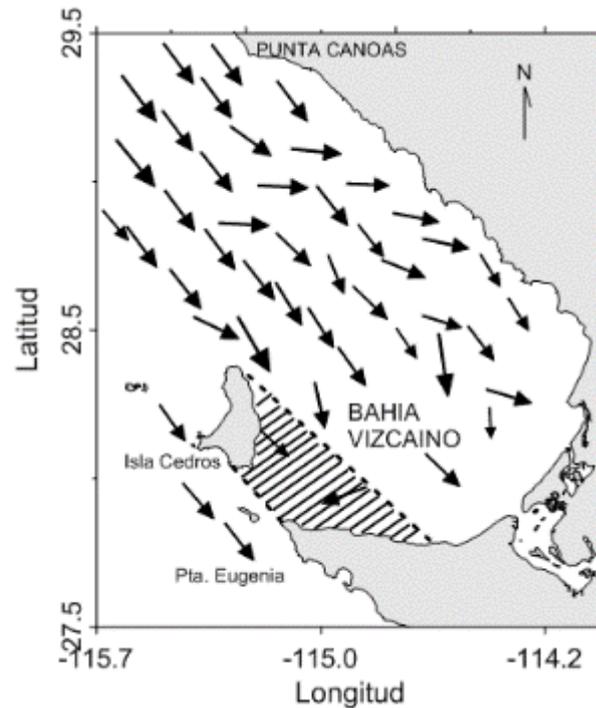


Figura 4. Campo del viento observado durante septiembre de 1992. Note la zona de calmas (sombreada) al sureste de Isla de Cedros (Modificada de Palacios-Hernández *et al.*, 1996).

Durazo *et al.* (2005) describieron las condiciones oceanográficas frente a Baja California durante el periodo 2002 a 2003, registrando durante otoño de 2002 altas concentraciones de clorofila ($>1.0 \text{ mg m}^{-3}$) dentro de BSV con agua más cálida que lo usual ($\sim 3^\circ\text{C}$) en abril de 2003 (0304), originada por el transporte de agua superficial hacia el interior de la bahía y recirculada en el remolino anticiclónico. Además, registraron altos volúmenes de zooplancton a lo largo de la costa, que se acrecentaron durante abril de 2003 excediendo los $500 \mu\text{L m}^{-3}$ dentro de Bahía Vizcaíno ($\sim 26.5^\circ\text{N}$), asociados al incremento en la biomasa del fitoplancton.

De los estudios regionales relacionados con los efectos ENSO en la variabilidad del ecosistema pelágico, en la página del proyecto Oceanografía de los Mares Mexicanos (omm.cicese.mx), para Bahía Vizcaíno se muestran campos superficiales de temperatura, salinidad, nivel del mar y corrientes que corresponden a las salidas del

modelo Regional Ocean Modeling System (ROMS). Estas series de tiempo muestran la variación estacional e interanual de la bahía (Figura 5) de temperatura superficial del mar (1993-2003), salinidad (1993-2003), así como la variación de nivel del mar (1993-2003) y la biomasa del fitoplancton (Clorofila-a satelital) estimada de 1997 a 2011. Nótese en las series de tiempo la relación inversa entre la temperatura y la salinidad, y directa entre el nivel del mar y la temperatura. Destaca en la serie el año 1997 en el cual se presentó un El Niño muy intenso y contrario a éste evento también es muy notorio La Niña a inicios de 1999. Con respecto a las imágenes de satélite (no mostradas aquí) se observa un patrón estacional que presenta bajas temperaturas de enero a junio y altas temperaturas de julio a diciembre.

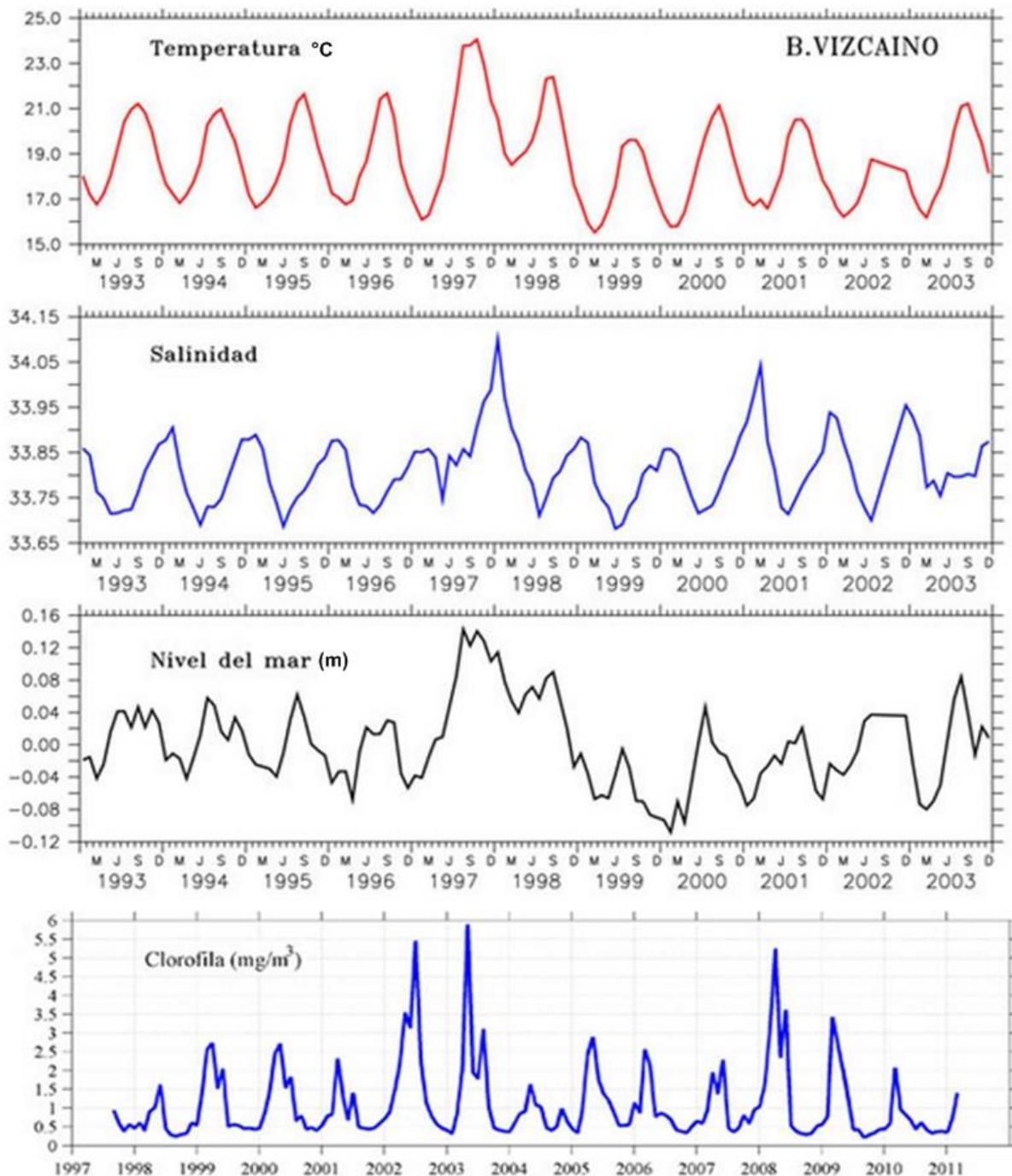


Figura 5. Series de tiempo 1993-2003 en BSV del promedio de temperatura, salinidad y nivel del mar modeladas por ROMS. Serie de tiempo 1997-2011 del promedio de clorofila derivada de imágenes de sensores remotos (SeaWiFS con resolución de 9x9 km) (tomadas de <http://omm.cicese.mx/>).

Herrera-Cervantes *et al.* (2014) analizaron datos de sensores remotos y frente a Punta Eugenia apoyándose con datos oceanográficos mostraron la variabilidad de la TSM y Chl-a (composiciones mensuales derivadas de imágenes satelitales, AVHRR-Pathfinder y SeaWiFS) para el período comprendido entre septiembre de 1997 y diciembre de 2007. Estos autores mostraron la influencia del ciclo de El Niño-La Niña durante 1997-2000 y la intrusión de Agua Subártica de 2002 a 2004. En la zona

costera cercana a Punta Eugenia durante 2002-2003 las series de tiempo de clorofila derivada de satélite presentaron valores más altos de clorofila en primavera de 2002 y primavera de 2004, y valores bajos de biomasa durante el año 2003 asociada a la intrusión de Agua Subártica.

Lavaniegos (1995) asoció el giro anticiclónico de BSV después de la época de surgencias costeras intensas (septiembre), como un mecanismo de retención de eufáusidos hasta su metamorfosis adulta, incrementando su tasa de desarrollo debido a las altas temperaturas presentes en el remolino. Además, esta autora encontró que para *N. simplex* la bahía es una e región de alimentación relevante en invierno y para reproducción durante el otoño, ya que es una especie con afinidad a aguas cálidas. Jiménez-Rosenberg *et al.* (2010) al analizar la composición taxonómica del conjunto de larvas de peces de la bahía observó valores altos de diversidad (H') durante la primavera y verano de 1999 y 2000, en contraste con los obtenidos para el verano de 1998. Lavaniegos (2014) analizó la composición de anfípodos del crucero de julio de 2002 frente a la costa occidental de Baja California en busca de evidencias de la intrusión de Agua Subártica y de El Niño 2002-2003, reportando la distribución extendida hacia el sur (cerca de 27°N) de *Themisto pacífica*, una especie con afinidad por aguas frías y que se distribuye ampliamente en el Pacífico subártico y en el SCC preferentemente al norte de Punta Concepción (35°N). Además encontraron que la abundancia total y la composición de especies típicas de la Corriente de California indicaron mezcla de Agua Subártica y Agua Subtropical.

Los efectos del ENSO 1997-1998 en la composición de especies de eufáusidos confirmaron pronunciados cambios (Ambriz-Arreola, 2007; Lavaniegos y Ambriz-Arreola, 2012; Linacre, 2004). Posteriormente García-Rey (2014) analizó la composición y abundancia de eufáusidos dentro de la bahía y la zona oceánica aledaña durante el ciclo ENSO 2009-2011, registrando variabilidad estacional junto con variabilidad interanual, tanto sobre la plataforma continental como en las estaciones oceanográficas aledañas frente a Punta Canoas, Isla de Cedros y Punta Eugenia. Lavaniegos *et al.* (2015) observaron en BSV la tendencia al aumento de herbívoros gelatinosos y la disminución drástica de los crustáceos (copépodos y eufáusidos) que forman una parte importante de la cadena trófica, ya que son alimento de larvas de peces y adultos como sardina y anchoveta, y estos a su vez son alimento de organismos mayores.

A pesar de los diversos estudios sobre los procesos físicos y biológicos de mesoescala que se han realizado frente a BSV, pero no existe ningún trabajo donde se relacionen los efectos de la variabilidad interanual sobre la biomasa y producción del fitoplancton dentro de la bahía. Es por ello que en este trabajo se plantea contribuir al conocimiento de la variabilidad interanual sobre la producción y biomasa del fitoplancton en BSV, para un mejor entendimiento de los efectos derivados de los eventos climáticos y con escalas interanuales sobre la trama trófica.

Capítulo 3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Caracterizar la variabilidad espacial y temporal de la biomasa y producción del fitoplancton en escalas estacionales e interanuales (eventos El Niño/La Niña) durante el período 1997 a 2012 en Bahía Sebastián Vizcaíno.

3.2 Objetivos específicos

Evaluar la variabilidad de la biomasa del fitoplancton obtenida a partir de datos derivados del programa IMECOCAL durante los eventos El Niño y La Niña del período 1997 a 2012.

Describir la variación de la biomasa y producción del fitoplancton con datos obtenidos por medio de sensores remotos durante los eventos El Niño y La Niña registrados en el período de estudio y al remolino anticiclónico cuasi-permanente al centro de la bahía.

3.3 Hipótesis

Debido a la influencia predominante de los procesos de gran escala oceánica sobre las condiciones hidrográficas y ecológicas de Bahía Sebastián Vizcaíno, la producción y biomasa del fitoplancton presentarán anomalías positivas asociadas a períodos fríos (La Niña) y anomalías negativas asociadas a períodos cálidos (El Niño).

La hipótesis alterna es que los cambios en la biomasa y producción del fitoplancton no serán impactados por procesos de gran escala oceánica (ENSO) debido a la dinámica particular de la bahía y su región adyacente.

Capítulo 4. Material y Métodos

4.1 Datos

El procesamiento de la información se dividió en dos partes: los datos obtenidos *in situ* durante cruceros del programa IMECOCAL y los recolectados y procesados a partir de información de sensores remotos.

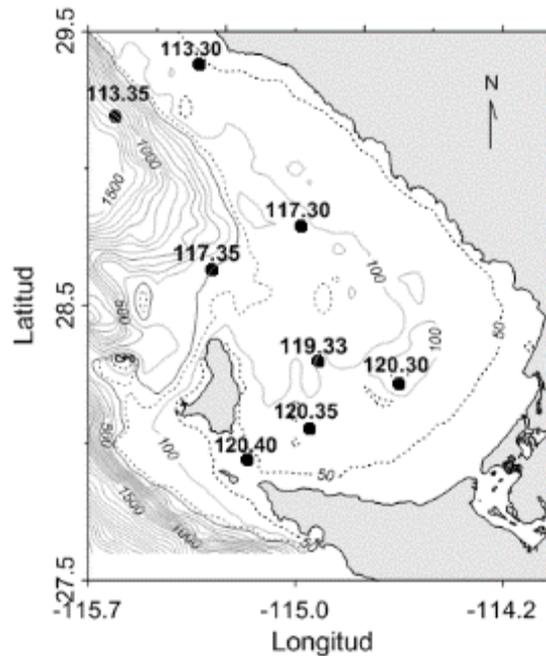


Figura 6. Localización de las estaciones del programa IMECOCAL en el área de Bahía Sebastián Vizcaíno utilizadas en este estudio. Las líneas en las figuras muestran las profundidades en metros (tomadas de la NOAA: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/relief.html>).

4.2 Datos recolectados en cruceros

El programa de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) conformado por CICESE, CICIMAR-IPN, CIBNOR, ICMYL-UNAM y UABC (IIO y FCM) inició la recolección de datos frente a Baja California en 1997 con cruceros estacionales. A partir de octubre de 1997, IMECOCAL realizó campañas trimestrales en el *B/O Francisco de Ulloa* durante invierno, primavera, verano y otoño (usualmente en enero, abril, julio y octubre, respectivamente) y obtuvo muestras en todas las líneas hidrográficas (100 a 137) y estaciones (pares e impares). Para este estudio se utilizaron datos hidrográficos obtenidos por el programa IMECOCAL de 1997 a 2012, para obtener promedios climatológicos estacionales de temperatura y salinidad. Los datos de temperatura (°C) y salinidad se obtuvieron de la base de datos IMECOCAL (www.imecocal.cicese.mx).

Las estaciones de IMECOCAL que se utilizaron correspondientes a Bahía Vizcaíno fueron: 113.30, 113.35, 117.30, 117.35, 119.33, 120.30, 120.35, 120.40 (Figura 6).

En las estaciones hidrográficas designadas anteriormente se recolectaron muestras de agua a diferentes profundidades (superficie, 10, 20, 50 100, y 150, 200 m para las estaciones 113.35 y 117.35), para medir la concentración de clorofila-a y del oxígeno disuelto. Las muestras de agua fueron tomadas con botellas Niskin de 5 litros de capacidad, acopladas a una roseta General Oceanics® integrada con un sistema de CTD Sea-Bird Electronics modelo SeaBird 911 plus, conectado a una unidad de computo convencional, el cual permitió descargar la información de profundidad, conductividad y temperatura.

Las muestras de agua para el análisis de clorofila se recolectaron en recipientes de plástico y oscuros de 1 litro de capacidad, con el propósito de evitar el efecto de las altas irradiancias sobre los pigmentos del fitoplancton. Los recipientes con las muestras se trasladaron desde la cubierta hacia el interior del laboratorio húmedo del barco. Las muestras de oxígeno disuelto se vertieron en botellas de 125 ml con tapón de cristal esmerilado y se analizaron en el laboratorio del barco por medio del método microWinkler (descrito más adelante).

4.3 Análisis de las muestras de Clorofila-a (Chl-a)

Las muestras para el análisis de clorofila-a (mg Cl-a m^{-3}) se obtuvieron de los lances regulares en las estaciones IMECOCAL y de los destinados a los experimentos de productividad primaria. En cada una de las estaciones se tomó un litro de agua de los niveles de 0, 10, 20, 50, 100 m de profundidad, además 150 y 200 m para las estaciones 113.35 y 117.35. Las muestras se filtraron en un sistema de vacío con filtros GF/F, que se depositaron en cápsulas plásticas de protección (HISTO prep, de la FISHER brand), debidamente rotulados indicando: fecha, estación, línea y profundidad. Inmediatamente después fueron almacenados en contenedores con nitrógeno líquido hasta su análisis en el laboratorio de Ecología de Lagunas Costeras del Departamento de Oceanografía Biológica del CICESE.

Para cuantificar la concentración de clorofila-a se utilizó el método fluorimétrico descrito por Yentsch y Menzel (1963) y Holm Hansen *et al.* (1965), con las

modificaciones referidas por Venrick y Hayward (1984). Cada filtro se depositó en un frasco de vidrio de 20 ml forrado con papel aluminio, al cual se le agregaron 10 ml de acetona al 90 % y posteriormente se almacenó durante 24 horas en refrigeración para la extracción de los pigmentos fotosintéticos. Posteriormente se tomó una alícuota de aproximadamente 5 ml del extracto y se midió la fluorescencia con un fluorómetro Turner Designs 10-AU-05 y con un Trilogy Laboratory Fluorometer 7200-000. Ambos fluorímetros fueron calibrados con Clorofila-*a* pura de espinaca, de forma que finalmente se calcularon las concentraciones en miligramos por metro cúbico (mg Chl-*a* m⁻³).

4.4 Determinación de oxígeno disuelto por el método micro-Winkler

Se obtuvieron muestras por medio de botellas Niskin de 5-litros de capacidad a 10, 20, 50 100, 150 y 200 de profundidad y se colocó una alícuota de cada profundidad en botellas de oxígeno disuelto de 125 ml, para determinar oxígeno por el método microWinkler (Helm *et al.*, 2009). El análisis consistió en la adición de una solución de 2 ml de MnSO₄ (manganeso divalente, MnSO₄) [sulfato manganoso] a una muestra de agua, seguida de la adición de una base fuerte (2 ml de ioduro de potasio alcalino), generándose un precipitado de hidróxido manganoso. El oxígeno disuelto en la muestra oxidará una cantidad equivalente del hidróxido manganoso a hidróxido mangánico. En la presencia de iones de yoduro y la acidificación de la muestra con ácido sulfúrico concentrado (2 ml de H₂SO₄), el manganeso oxidado revierte al estado divalente, liberándose al mismo tiempo una cantidad de yodo equivalente al contenido original de oxígeno disuelto en la muestra. Finalmente el yodo liberado es cuantificado mediante una titulación con tiosulfato de sodio (APHA, 1996) por medio de la siguiente ecuación:

$$1 \text{ mL de tiosulfato de sodio} = 1 \text{ mg/L de oxígeno disuelto}$$

4.5 Datos de sensores remotos

A partir de los datos de clorofila-*a* obtenidos por los sensores del color del océano SeaWiFS (Seaviewing Wide Field of view Sensor), MODIS-A (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer-Aqua), MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) y VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) se generaron imágenes compuestas mensuales para BSV con una resolución de 1x1 km por pixel

durante el período 1997-2012. La información de alta resolución de estos sensores fue proporcionada por el Dr. Mati Kahru de la Institución Scripps de Oceanografía en La Jolla, California, EUA.

Para describir los cambios en las condiciones oceanográficas temporales y espaciales de BSV se analizaron las imágenes de la temperatura superficial del mar del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y MODIS-A, con una resolución de 1x1 km durante el período 1997-2012. Para la descompresión y manejo de las imágenes de satélite se utilizó el programa WIM/WAM, así como el programa MATLAB.

4.6 Climatología y anomalías a partir de datos *in situ* y de sensores remotos

Para el análisis de las series de tiempo *in situ* se calcularon los promedios climatológicos para cada estación del año (de acuerdo a los cruceros cuatrimestrales del programa IMECOCAL) y a partir de estos las anomalías de temperatura, salinidad, oxígeno y clorofila-a del periodo 1997-2012 a 10 m de profundidad. Inicialmente se calcularon promedios por crucero de los datos correspondientes a las estaciones 113, 117, 119 y 120 ubicadas dentro de BSV. Posteriormente se calcularon medias de largo plazo para las cuatro estaciones del año (invierno, primavera, verano, otoño) y se restaron a los promedios por crucero, a fin de remover la variabilidad estacional. Los datos de clorofila fueron integrados de todas las profundidades muestreadas para estimar la clorofila-a integrada en la columna de agua. Las anomalías de sensores remotos se calcularon como la diferencia de la imagen mensual y la imagen mensual promedio construida a partir de la serie completa de 1997 a 2012.

Se calcularon promedios de largo período utilizando la serie de tiempo disponible para cada sensor remoto a bordo de satélites. Como referencia a los cambios climáticos que afectan el Océano Pacífico oriental, se utilizaron los registros del Índice Multivariado ENSO (MEI) (Figura 2). En este índice los valores positivos (anomalía mayor o igual +0.5) representan la fase de cálida del ENSO (El Niño) mientras que los valores negativos (anomalía menor o igual a -0.5) representan la fase fría (La Niña) de acuerdo a la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>).

4.7 Obtención de las muestras para la construcción de curvas P-E

En cada estación se recolectaron muestras de agua para generar curvas P-E (fotosíntesis-irradiancia) a diferentes niveles de los porcentajes de irradiancia en la columna de agua. El coeficiente vertical promedio de la luz difusa (K_d) que penetra en la zona eufótica se calculó por medio de la lectura del disco de Secchi, a partir de la apreciación visual de la profundidad donde se pierde de vista el disco (Z_s). El coeficiente de atenuación promedio de la luz difusa en la columna de agua (K_d) se calculó con la siguiente fórmula:

$$K_d = \frac{1.7}{Z_s}$$

Donde 1.7 es una constante para Aguas Caso I (Kirk 1994). Las aguas Caso I son aquellas donde la concentración de Chl es menor a 1.5 mg m^{-3} y el detritus y las partículas orgánicas disueltas de color (CDOM) co-varían con la clorofila.

A partir de la ecuación de Lambert-Beer se obtuvieron las profundidades físicas de donde se tomaron las muestras a diferentes intensidades de luz (E_{zPAR}). Donde PAR (Photosynthetic Active Radiance) es la radiación fotosintéticamente activa entre 400-700 nm; E_{oPAR} representa la irradiancia superficial, K_d es el coeficiente de atenuación vertical de luz difusa calculado a partir de la lectura del disco de Secchi y Z es la profundidad a la que corresponden los porcentajes de irradiancia determinados.

$$Z = \frac{\left[\ln \left(\frac{E_{oPAR}}{E_{zPAR}} \right) \right]}{K_d}$$

Las muestras de agua para los experimentos P-E se recolectaron en las profundidades con el 50% y al 30 % de la irradiancia superficial para hacer incubaciones con ^{14}C ($\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$) y calcular los parámetros fotosintéticos de las curvas P-E. De estos mismos niveles de irradiancia se obtuvieron también muestras para analizar la concentración de Clorofila-a (mg Cl-a m^{-3}) en la forma descrita anteriormente.

4.8 Curvas P-E (parámetros fotosintéticos)

Los experimentos fotosíntesis-irradiancia (curvas P-E) se realizaron a bordo del buque, con muestras recolectadas entre las 10:00 y las 14:00 horas del tiempo local, a la profundidad correspondiente al 50% o 30% $E_{O(PAR)}$ (irradiancia superficial). El agua fue recolectada con botellas Niskin de 5 L de capacidad con ligas de silicón para evitar la contaminación de las muestras por metales pesados (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010b). De estas botellas se tomaron alícuotas que se pasaron a través de una malla de nylon de 150 μm para evitar el ingreso del macrozooplancton en las muestras a incubar y se inocularon en botellas planas de plástico con 100 μL de $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ (~5 μCi) siguiendo el método descrito por Steeman Nielsen (1952). Las botellas fueron colocadas en un incubador tipo Morel (Babin *et al.*, 1994) por ~2 horas en un gradiente de luz de 9 $\mu\text{mol cuanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 900 $\mu\text{mol cuanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$ generado por una lámpara de tungsteno-halógeno de 500 W.

Una vez finalizado el período de incubación, el agua contenida en cada botella fue filtrada para concentrar el fitoplancton con carbono radioactivo. Las muestras se filtraron con una bomba de vacío con una presión no mayor a 5 psi (libra-fuerza por pulgada cuadrada) para evitar la destrucción celular. Se utilizaron filtros de membrana de 0.45 μm de poro y 2.5 cm de diámetro. Los filtros fueron colocados en frascos de centelleo líquido de 20 ml de capacidad, a los que se les adicionó 0.5 ml de ácido clorhídrico al 10% para eliminar el ^{14}C inorgánico que no fue fijado por el fitoplacton, dejándolos reposar durante aproximadamente 2 horas. Posteriormente, a cada frasco se le agregaron 10 ml de solución Ecolite (solucion de centelleo) almacenándolos en total oscuridad hasta su posterior análisis en el laboratorio del CICESE con un contador de centelleo Beckman LS-6500.

A los datos obtenidos en el contador de centelleo se le aplicó la fórmula propuesta por Parsons *et al.* (1984) para obtener la producción primaria de cada muestra:

$$P = \frac{(R_s - R_B) * W * 1.06}{R * T}$$

Dónde: P es la tasa de incorporación de carbono por el fitoplancton ($\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$); R_s es dpm (decaimientos por minuto) de la muestra medida con el contador de centelleo;

RB es dpm del blanco o tiempo cero medidos con el mismo contador; T es el tiempo de incubación (horas) de la muestra; R es dpm agregados inicialmente a la muestra; W es la cantidad total promedio del carbono inorgánico disuelto en el agua de mar ($1200 \cdot TC$) y 1.06 es la corrección por diferencia entre la razón de asimilación isotópica ($^{12}C/^{14}C$). La concentración de CO_2 total en el agua de mar (TC) fue calculada a partir de la salinidad (S) según la relación:

$$TC = 0.98[(S * 0.067) - 0.05]$$

La tasa de asimilación de carbono (P ; $mgC\ m^{-3}\ h^{-1}$) obtenida a partir de la incorporación de ^{14}C durante la incubación se normalizó con respecto a la clorofila-a (Cl-a) medida a las mismas profundidades de donde se recolectaron las muestras, para obtener la razón de asimilación del carbono por el fitoplancton [P^B ; $mgC\ (mg\ Cl-a)^{-1}\ h^{-1}$]. La P^B se gráfico contra la irradiancia medida dentro de las botellas del incubador, para obtener las curvas P-E de cada experimento, como se muestra en la figura 7.

A partir de estas curvas se obtuvieron los valores de la pendiente inicial de la curva o α^B [$mgC\ (mg\ Cl-a\ h)^{-1}\ (\mu mol\ cuanta\ m^{-2}\ s^{-1})^{-1}$] y el valor máximo a saturación de luz o P^B_m [$mgC\ (mg\ Cl-a\ h)^{-1}$]. Ambos parámetros fueron ajustados a partir de la función hiperbólica descrita por Jassby y Platt, (1976): $P^B = P^B_m \tanh [E_L \alpha^B / P^B_m]$; donde E_L es la irradiancia de la lámpara de tungsteno-halógeno medida en el interior de cada botella dentro del incubador, P^B_m es la tasa máxima de producción fotosintética a saturación de luz [$mgC\ (mg\ Cl-a)^{-1}\ h^{-1}$] y α^B es el coeficiente de máxima utilización de luz del fitoplancton [$mgC\ (mg\ Cl-a)^{-1}\ h^{-1} / \mu moles\ cuanta\ m^{-2}\ s^{-1}$] determinado por la relación lineal entre P^B y la luz emitida por la lámpara durante la incubación. El parámetro de saturación E_k ($\mu mol\ cuanta\ m^{-2}\ s^{-1}$) fue calculado a partir de la relación P^B_m / α^B , a partir del gráfico que se muestra en la figura 7. Por medio de los experimentos de curvas P-E durante los cruceros IMECOCAL realizados entre 1997-2012, se calcularon los promedios de α^B , P^B y E_k de las estaciones más cercanas al área de estudio de la bahía para cada estación del año.

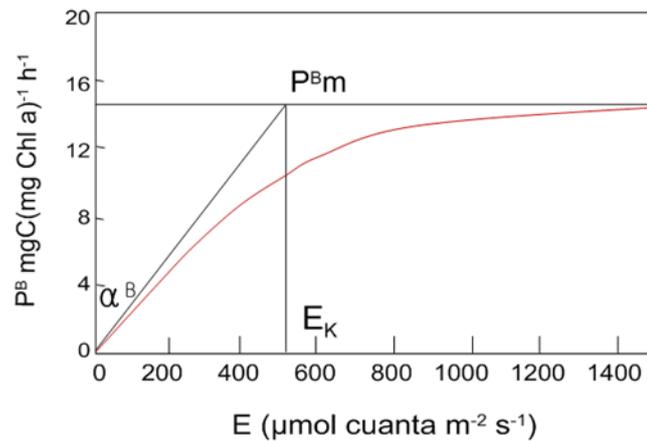


Figura 7. Relación fotosíntesis-irradiancia (curva P-E). P^B_m es la tasa fotosintética máxima [$\text{mgC} (\text{mg Chl a})^{-1} \text{h}^{-1}$]; α^B es el coeficiente de máxima utilización de luz [$\text{mgC} (\text{mg Chl a})^{-1} / (\mu\text{mol cuanta m}^{-2} \text{s}^{-1})$] y $E_K (P^B_m/\alpha^B)$ es el parámetro de fotoaclimatación del fitoplancton [$\mu\text{mol cuanta m}^{-2} \text{s}^{-1}$]. La línea roja representa el ajuste hiperbólico a partir de la ecuación de Jassby y Platt (1976). Las líneas representan intersecciones y prolongaciones para calcular los parámetros fotosintéticos.

4.9 Producción primaria calculada a partir de sensores remotos

La producción primaria en BSV se calculó con base en imágenes de sensores remotos con (resolución $1 \times 1 \text{ km}$) y con los parámetros fotosintéticos α^B y P^B_m de las estaciones del programa IMECOAL cercanas al área de estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros fotosintéticos utilizados para calcular la PP durante el período de tiempo (1997-2012). P^B_m [mgC (mg Cl-a)⁻¹ h⁻¹] y α^B [mgC (mg Cl-a)⁻¹ h⁻¹ / μ moles cuanta m⁻² s⁻¹].

Año	Mes	Alfa	P^B_m
1998	7	0.011	7.72
1998	10	0.009	4.89
1999	1	0.055	6.14
1999	4	0.042	6.62
1999	8	0.009	7.86
1999	10	0.017	7.32
2000	7	0.007	3.23
2000	10	0.011	4.57
2001	6	0.024	8.12
2001	10	0.005	3.40
2002	1	0.006	1.65
2002	10	0.026	7.48
2003	2	0.008	2.36
2003	6	0.022	11.05
2004	1	0.002	2.13
2005	4	0.051	3.52
2005	10	0.023	11.32
2006	7	0.002	0.67
2007	9	0.018	5.55
2008	7	0.003	1.11
2009	4	0.005	2.15
2010	8	0.004	0.70
2011	2	0.009	4.82
2011	10	0.005	6.94

La producción primaria integrada en la zona eufótica (PP; mgC m⁻² d⁻¹) se calculó con el modelo propuesto por Howard y Yoder (1997), modificado por Carr (2002):

$$PP = C_{sat} \left[\frac{(P^B_m)(E_D)}{\frac{P^B}{\alpha^B} + E_D} \right] D \quad (1)$$

Dónde: C_{SAT} es la clorofila derivada del satélite (mgCl-a m⁻³); P^B_m es la tasa fotosintética máxima promedio a saturación de luz (mgC (mgCl-a d)⁻¹); α^B es el coeficiente de máxima utilización de luz del fitoplancton (mgC (mgCl-a d)⁻¹ (mol cuanta m⁻² d⁻¹)⁻¹), E_D es la irradiancia media dentro de la zona eufótica (mol cuanta m⁻² d⁻¹) calculada a partir de la ecuación (3); D es la profundidad media de la zona eufótica (D ; m) considerada como el 1% de la $E_{0(PAR)}$ y calculada con la ecuación (4).

A partir de C_{SAT} se calculó el coeficiente de atenuación vertical de luz difusa (K_{PAR} ; m^{-1}) por medio de la expresión descrita por Nelson y Smith (1991):

$$K_{PAR} = 0.04 + 0.0088 C_{SAT} + 0.054 C_{SAT}^{0.66} \quad (2)$$

Con las imágenes mensuales de $E_{0(PAR)}$ obtenidas del sensor MODIS-AQUA y SeaWiFS y a partir de los datos de K_{PAR} con una resolución de 9x9 km, se calculó la irradiancia media en la zona eufótica (E_D ; mol cuanta $m^{-2} d^{-1}$) con la ecuación propuesta por Riley (1957):

$$E_D = \frac{(E_{0(PAR)} (1 - e^{-K_{PAR} D}))}{K_{PAR} D} \quad (3)$$

La profundidad media de la zona eufótica (D ; m) considerada como el 1% de la $E_{0(PAR)}$ se calculó a partir de la ecuación:

$$D = - \frac{\ln(0.01)}{K_{PAR}} \quad (4)$$

4.10 Análisis estadísticos

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el programa R. Primero se realizó una prueba de normalidad para las diferentes variables CHL, PP y TSM, para decidir sobre pruebas paramétricas o no paramétricas. Las variables no presentaron una distribución normal y no presentaron homocedasticidad, por lo que se hicieron pruebas no paramétricas.

Para explorar variaciones interanuales, se compararon promedios de valores de todos los años mediante la prueba de Kruskal-Wallis para variables múltiples independientes.

Con el propósito de observar si había correlación entre las diferentes variables, se aplicó la prueba no paramétrica de correlación de Spearman para las diferentes variables de los datos *in situ* (Temperatura (°C), Salinidad, Oxígeno disuelto (ml l⁻¹), índice MEI y Año), tanto en los datos derivados de la campaña IMECOCAL, como los datos derivados de sensores remotos (TSM y CHL).

Para delimitar áreas de la bahía y comparar la similitud espacio-temporal del fitoplancton entre puntos de muestreo en función de las variables ambientales registradas durante todo el periodo de estudio se aplicó un análisis de conglomerados (distancia euclidiana), utilizando los datos de clorofila y temperatura obtenidos a partir de sensores remotos, con 1x1 km de resolución durante el período 1997-2012, estas fueron analizadas por separado. Para el procesamiento de los datos y la obtención de los conglomerados se utilizó el programa The Environment for Visualizing Images (ENVI 3.6).

Se aplicó un ANOVA de 2 vías para observar posibles diferencias en TSM entre zonas de la BSV y los años del período de estudio (1997-2012), con la interacción de estos dos factores (año vs zonas). Para éste análisis se utilizó el programa *STATISTICA 7*.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Climatología de las variables *in situ* y de sensores remotos

La temperatura promedio dentro de BSV durante el período 1997-2012 fue $>17^{\circ}\text{C}$ por arriba de 20 m de profundidad (Figura 8), con salinidad de 33.5-33.7 en los 50 m superiores. La salinidad aumentó hacia valores >33.7 con la profundidad, también se observó una mayor concentración de oxígeno disuelto ($>5\text{ ml l}^{-1}$) en los primeros 40 m de profundidad. La temperatura superficial mayor (17.4°C) se observó cerca de las estaciones 120.30 y 119.33, disminuyendo hacia las estaciones cercanas a Punta Canoas a $15.0\text{-}16.6^{\circ}\text{C}$ (Figura 9a). Esta tendencia también se observó en la salinidad promedio, con valores de 33.6 hacia el centro de BSV (Figura 9b). El oxígeno disuelto tuvo concentraciones mayores a 5.5 ml l^{-1} en el centro de la bahía y en la estación 113.35, con valores de $5.2\text{-}5.4\text{ ml l}^{-1}$ en la zona norte entre las estaciones 113.30, 117.30 y 117.35. La clorofila superficial estuvo dentro del rango de $1.1\text{-}2.9\text{ mg m}^{-3}$, con un valor menor hacia el centro de la bahía y mayor hacia el norte (1.5 y 2.9 mg m^{-3} respectivamente). En general, se observa a partir de 70-90 m de profundidad una fuerte estratificación en temperatura, salinidad y oxígeno disuelto (Figura 8).

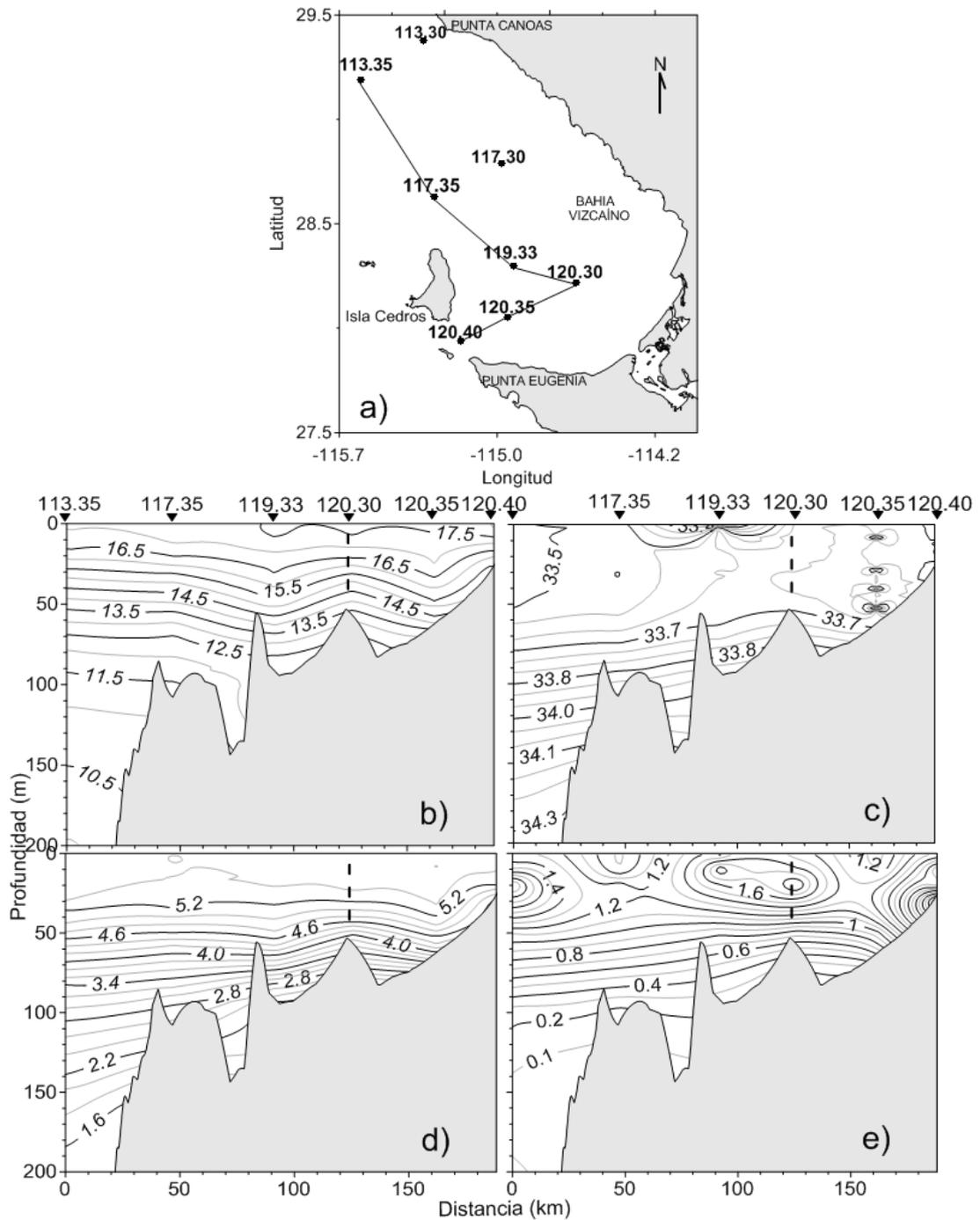


Figura 8. Valores promedio de las variables derivadas de los cruces IMECOCAL de 1997-2012. a) Transecto utilizado para los perfiles verticales de variables dentro de BSV; b) Temperatura (°C); c) Salinidad; d) Oxígeno disuelto (ml l⁻¹) y e) Clorofila (mg m⁻³). Nótese el cambio de dirección a partir de la estación 120.30 marcado con línea punteada en los perfiles verticales.

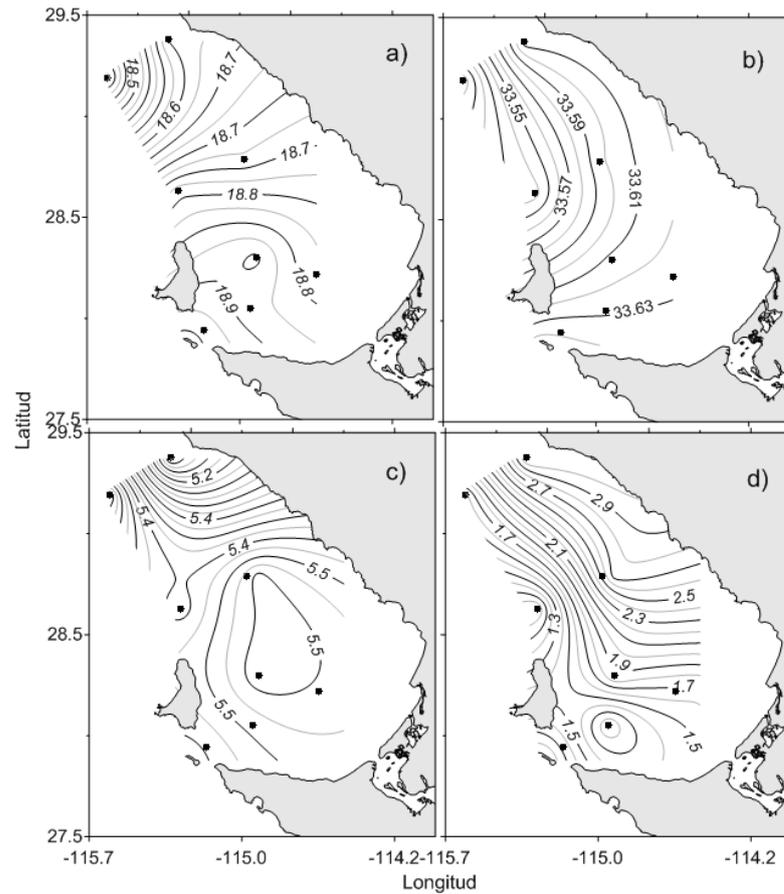


Figura 9. Distribución de las variables a 10 m de profundidad (promedio del período 1997-2012) en BSV: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno (ml l^{-1}) y d) Clorofila-a (mg m^{-3}). Los puntos negros dentro de BSV representan las estaciones IMECOCAL que se utilizaron en el presente estudio.

La temperatura superficial *in situ* no presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=47$, $p=0.47$). La salinidad presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=48$, $p<0.05$). Se realizó una prueba *a posteriori*, prueba Bonferroni y se encontraron valores de $p<0.05$ (estadísticamente significativos) entre los años 1998-2004, 1999-2004, 2000-2004, 2001-2004, 2002-2004, 2004-2007, 2004-2008. El oxígeno disuelto y la clorofila no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=44$, $p=0.13$; $n=50$, $p=0.06$).

En la serie de tiempo de TSM derivados de sensores remotos, se observó el valor más alto en septiembre de 1997 ($>24^{\circ}\text{C}$), correspondiente al evento El Niño (Lynn *et al.*, 1998) y en septiembre de 2012 ($>24^{\circ}\text{C}$), considerado un año anómalo de acuerdo al MEI pero no lo suficiente como para ser considerado un evento El Niño (Wells *et al.*, 2013). De julio a diciembre de 1997 se obtuvieron valores de temperatura superior a 20°C , con un patrón similar en los mismos meses de 2012 y con temperatura entre

18 y 24 °C. La temperatura menor (14.5 °C) a lo largo del período de estudio se obtuvo en marzo de 2011, asociada al evento La Niña durante la primavera de ese año (Bjorkstedt *et al.*, 2012).

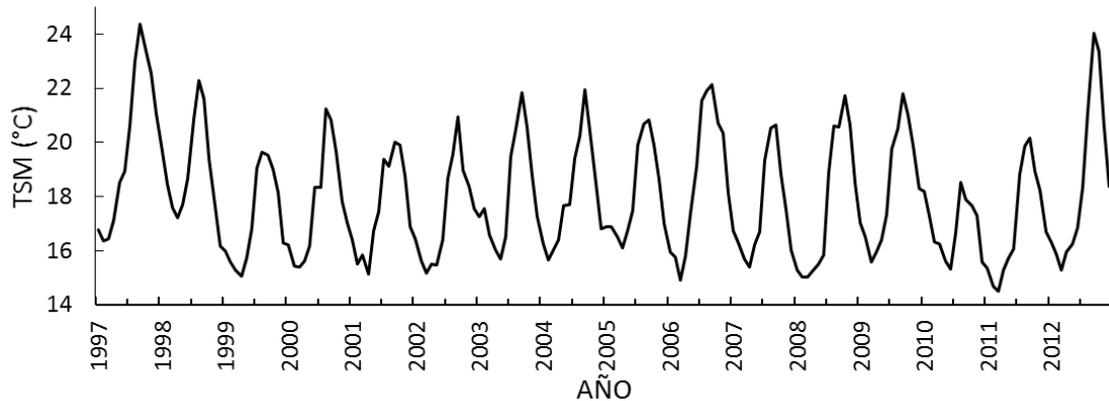


Figura 10. Serie de tiempo de TSM (°C) en el período 1997-2012 obtenida a partir de datos de sensores remotos.

La climatología de la temperatura superficial del mar (TSM) obtenida de sensores remotos en el período de estudio (1997-2012) con un promedio total de 18°C, muestra un patrón estacional con bajas temperaturas (16.4 °C) de enero a junio y las más altas de agosto a octubre (Figura 11). La temperatura más baja (15.7 °C) se obtuvo en marzo y la más alta durante septiembre (>21 °C) (Figura 11). Durante la mayor parte del año el centro de la bahía mostró temperatura superior a 16 °C y con valores >21°C en septiembre, con temperatura baja (~15 °C) solamente en abril y marzo derivado de las surgencias en la zona costera frente a Punta Canoas. La TSM no presentó diferencias estadísticas significativas entre años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=184$, $p=0.1$), debido a que la serie de tiempo analizada mostró un patrón de estacional muy marcado.

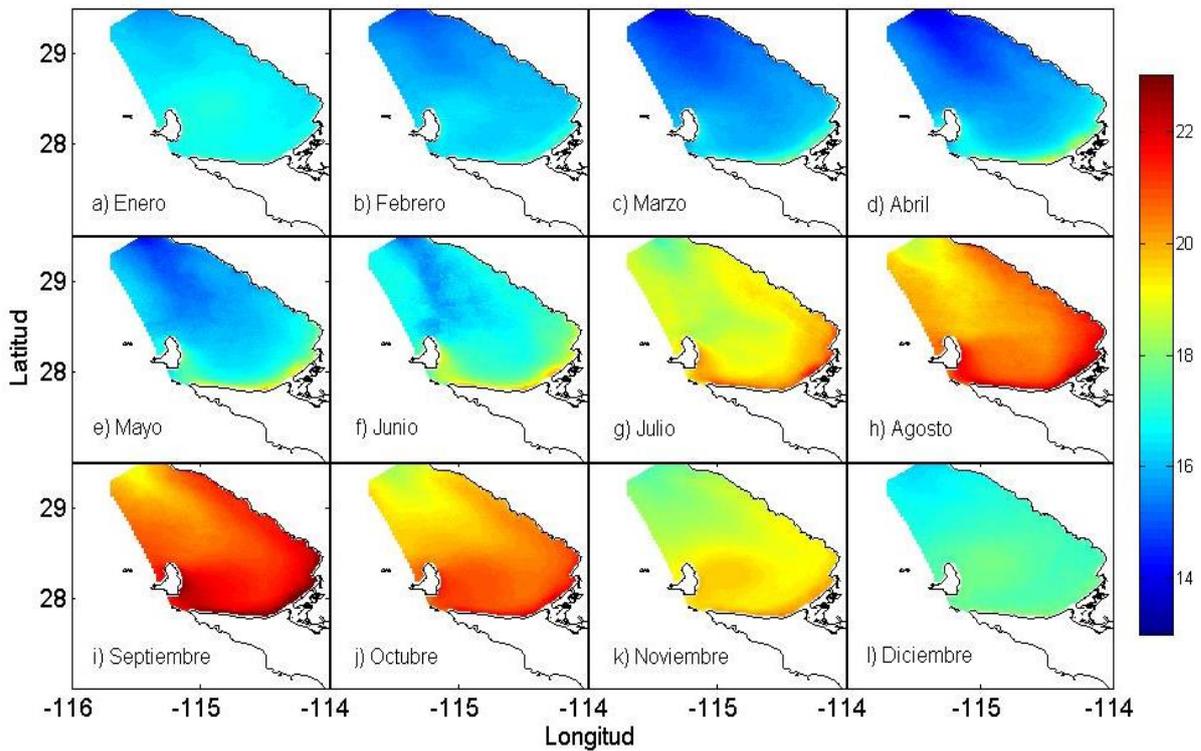


Figura 11. Climatología mensual de la TSM ($^{\circ}\text{C}$) del período de estudio (1997-2012) obtenida a partir de datos de sensores remotos.

En la serie de tiempo de CHL se observaron los valores más altos ($>5 \text{ mg m}^{-3}$) en julio del 2002 y los más bajos entre septiembre de 1997 a marzo de 1998 (0.3 a 0.7 mg m^{-3}) (Figura 12). En la climatología de clorofila (CHL, en escala logarítmica) obtenida a partir de sensores remotos para el período de estudio (1997-2012) se observa el aumento en la biomasa del fitoplancton en primavera (marzo), principalmente en la zona ubicada frente a Punta Canoas (Figura 13c). En general, los valores bajos dentro de BSV se encuentran hacia el centro, con el promedio mayor en abril (0.2 mg m^{-3}) y el valor promedio menor en octubre (-0.3 mg m^{-3}). La CHL no presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=192$, $p=0.1$), debido a que la serie de tiempo analizada muestra un patrón estacional muy marcado.

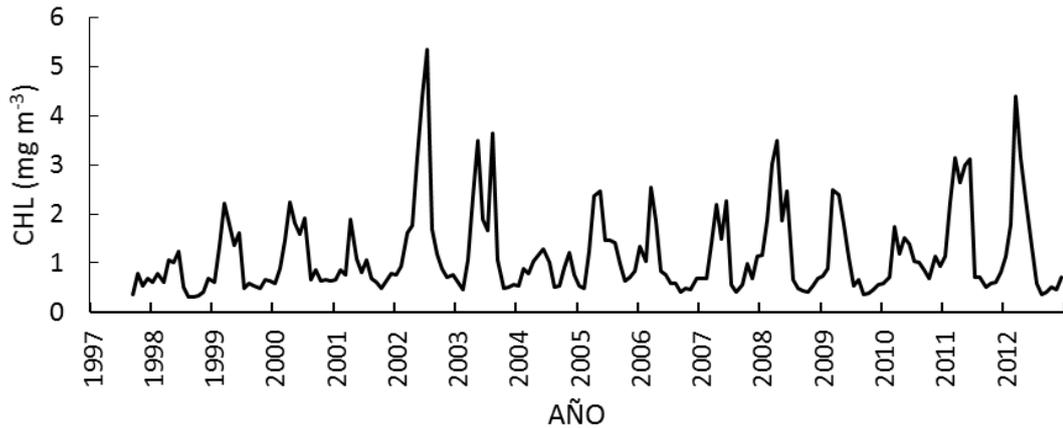


Figura 12. Serie de tiempo de Clorofila satelital (mg m^{-3}) en el período 1997-2012 obtenida a partir de datos de sensores remotos.

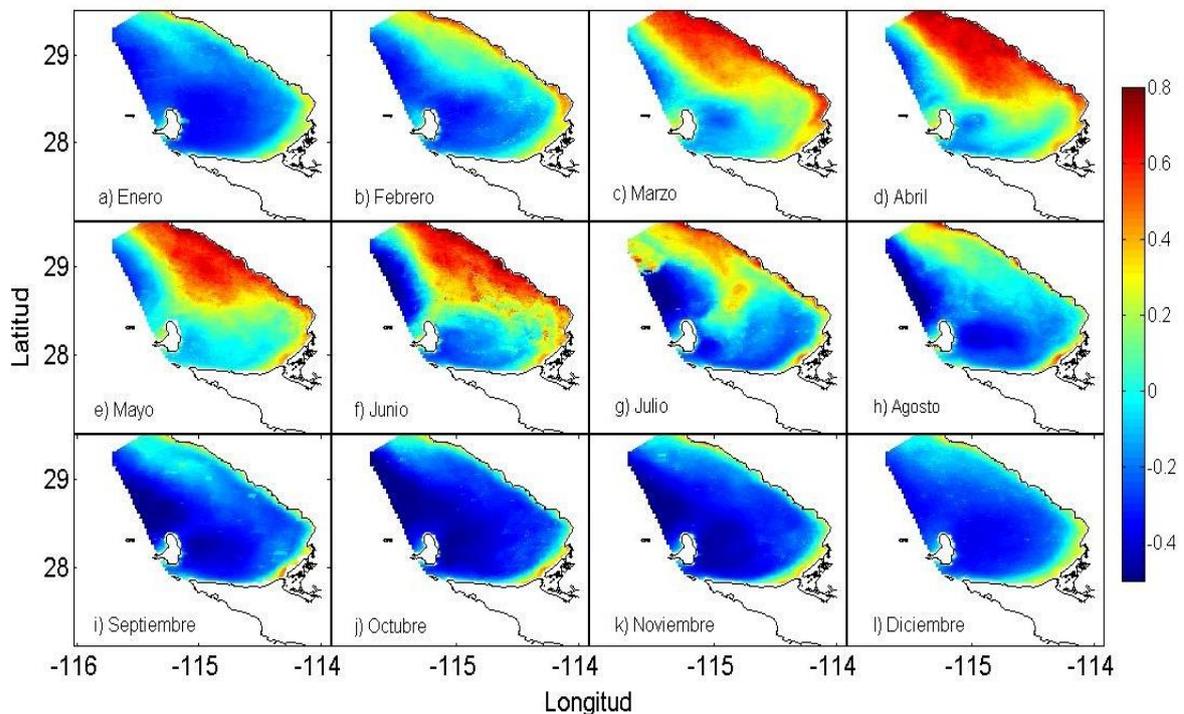


Figura 13. Climatología de la CHL (mg m^{-3}) del período de estudio (1997-2012). La barra de color está en escala logarítmica base 10.

5.2 Anomalías de las variables *in situ*

Las anomalías positivas mayores ($5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) de la temperatura 10 m de profundidad fueron encontradas durante El Niño en octubre de 1997 (9710). Hay un hueco en la serie de tiempo que no permite saber la magnitud de otro evento El Niño ocurrido en 2009-2010. Durante abril de 2010 se observó una anomalía positiva ($0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Figura 14) indicando que dicho evento El Niño ya estaba en fase de relajación (García-Rey, 2014). Las anomalías negativas más evidentes de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ correspondientes con la fase La Niña, se observaron en octubre de 2010 (1010). Otra anomalía negativa se calculó

en octubre de 2002 (0210) con un valor promedio de $-1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como resultado de un El Niño durante 2004 (Goericke *et al.*, 2005) se observó una anomalía positiva ($0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante octubre de 2004 (0410). Sin embargo, en 2003 considerado como año “promedio” (Goericke *et al.*, 2004), se observaron anomalías positivas de baja magnitud durante todo el año (entre 0.3 y $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$), siendo el más cercano al promedio el valor de $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ calculado para julio (0307). Con relación al evento La Niña 1998-1999, se observaron anomalías negativas bajas de -0.6 , -0.7 y $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura de las campañas de octubre de 1998 (9810), enero de 1999 (9901) y abril de 1999 (9904) respectivamente. La temperatura superficial no presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=47$, $p=0.07$).

La estación 113.30 frente a Punta Canoas mostró las mayores anomalías negativas durante el período de estudio, con excepción de las derivadas de El Niño 1997-98 en octubre de 1997 (9710) y julio de 1998 (9807) con valores positivos para esos eventos de 4.3 y $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. La anomalía negativa más alta de esta localidad se observó en octubre de 2010 con un valor de $-6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual fue la mayor anomalía negativa de las estaciones mostradas en la serie de tiempo. La estación 119.33, ubicada al centro de BSV, mostró tendencias hacia anomalías positivas ($\sim 2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante la mayor parte del período de estudio, con la más evidente en octubre de 1997 (9710) y con solamente un valor de anomalía negativa alta en enero de 2011 ($-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$).

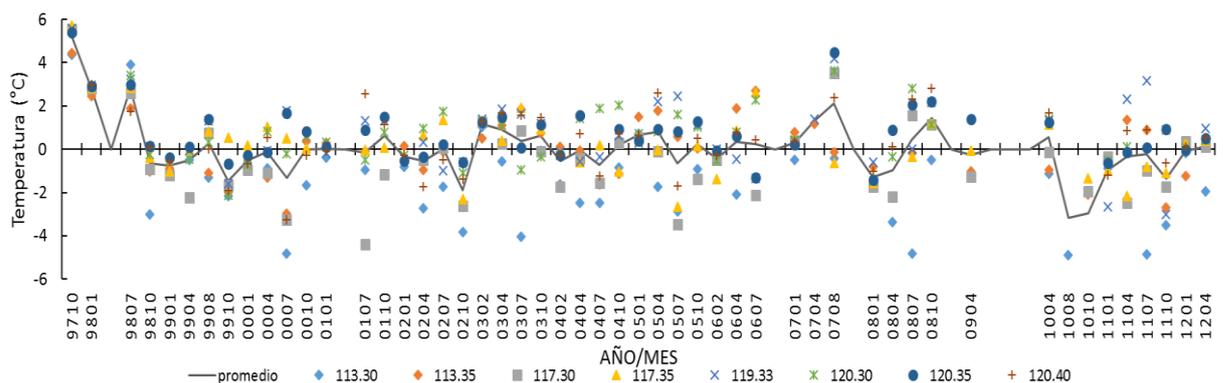


Figura 14. Anomalías de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) a 10 m de profundidad en la región de BSV (líneas 113-120) en el período 1997-2012. Los símbolos y colores representan las estaciones de muestreo en las campañas IMECOCAL.

Las anomalías positivas mayores de salinidad (entre 0.5 y 0.7) a 10 m de profundidad de las estaciones muestreadas se calcularon durante enero de 1998 (9801) con un valor promedio de 0.6 (Figura 15). Se muestra un período de anomalías negativas de salinidad que inició en abril de 2003 (0304, con un valor de -0.01) y se incrementó en

abril de 2004 (0404), con un valor de -0.3, el cual estuvo presente hasta julio de 2006 (0607). Entre febrero y octubre de 2003 se observó una drástica disminución de la salinidad en toda la bahía debido a la entrada de masa de Agua Subártica (Espinosa-Carreón *et al.*, 2015; Durazo *et al.*, 2005; Gaxiola-Castro *et al.*, 2008). Las anomalías negativas de salinidad en el periodo 2003-2006 fueron más evidentes en la estación 113.35 y ocurrieron desde octubre 2002 (Figura 15). Durante La Niña 2010-2011 se observaron anomalías negativas de salinidad durante octubre de 2010 (1010) y enero de 2011 (1101) con valores de -0.2 y -0.1, respectivamente. La salinidad presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=48$, $p=0.008$).

La estación 113.35 presentó regularmente anomalías negativas de salinidad, con valores de entre -0.5 a 0.6, con las anomalías positivas mayores durante los cruceros 9710 (0.3) y 9801 (0.6), asociadas al evento El Niño 1997-1998. La mayor anomalía positiva se observó en 9801 en la estación 120.30 (0.7) relacionada con el mismo evento El Niño, debido al ingreso de Agua Subtropical por la zona de Punta Eugenia. La estación 119.33 presentó valores cercanos al promedio de las anomalías de todas las estaciones (113-120), entre 0.7 en enero de 1998 (9801) y -0.3 para julio de 2004 (0407). Al igual que en la temperatura, se observó una tendencia a un aumento en las anomalías de salinidad a partir de octubre de 2011 (1110).

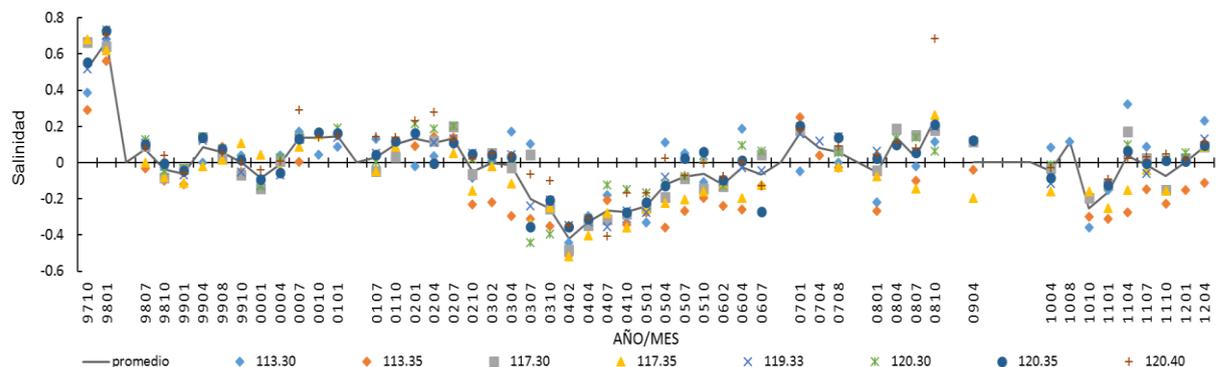


Figura 15. Anomalías de salinidad a 10 m de profundidad en la región de BSV (líneas 113-120) en el periodo 1997-2012. Los símbolos y colores representan las estaciones de muestreo en las campañas IMECOCAL.

En las anomalías de oxígeno disuelto (ml l^{-1}) a 10 m de profundidad, destaca la anomalía positiva en octubre de 1999 (9910), con un valor promedio de 4.6 ml l^{-1} , seguido por otra anomalía positiva en enero del 2001 (0101) con 4.1 ml l^{-1} (Figura 16). Ambos máximos se presentaron durante La Niña 1998-2000 (Hayward *et al.*, 1999).

En 2003 se observaron anomalías negativas en febrero y octubre (0307 y 0310), con valores entre -0.6 a -1.2 ml l^{-1} , como resultado de un evento El Niño débil (Venrick *et al.*, 2003; Goericke *et al.*, 2004), debido a la intrusión de una masa de agua más cálida, más salada y con menor concentración relativa de oxígeno (De la Cruz-Orozco, 2002). En abril de 2011 (1104) se observó una anomalía negativa (-0.3 ml l^{-1}), asociada a un evento La Niña aunque durante este año se registró el debilitamiento de las surgencias (Bjorkstedt *et al.*, 2012). En este crucero se calculó la anomalía negativa más alta (-2.8 ml l^{-1}) en la estación 113.30. El oxígeno disuelto no presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=44$, $p=0.6$).

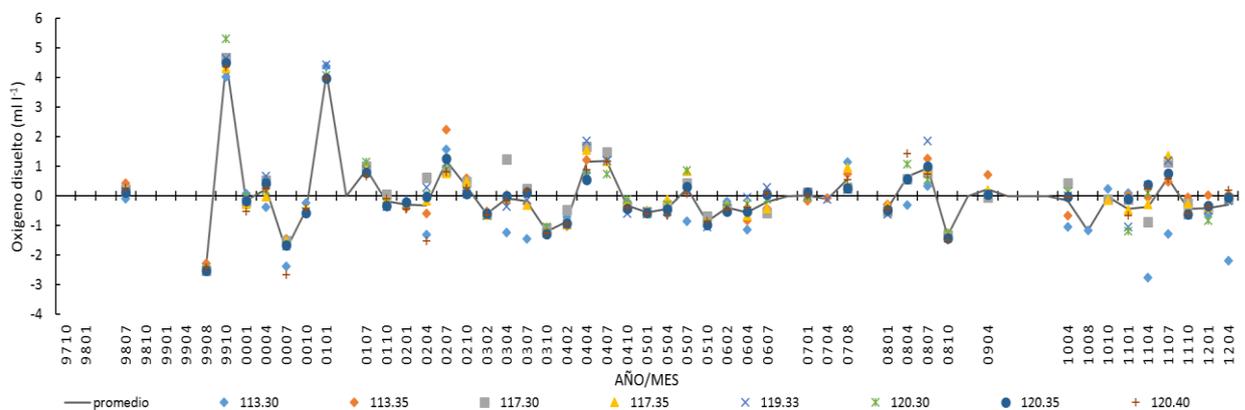


Figura 16. Anomalías de oxígeno disuelto (ml l^{-1}) a 10 m de profundidad en la región de BSV (líneas 113-120) en el periodo 1997-2012. Los símbolos y colores representan las estaciones de muestreo en las campañas IMECOCAL.

En enero de 1998 (9801) la anomalía de la biomasa del fitoplancton (Chl-a) a 10 m de profundidad presentó una anomalía de baja magnitud (0.2 mg m^{-3}) (Figura 17), con una anomalía negativa de -1.6 mg m^{-3} en julio de 1998 (9807) (Figura 17). Durante julio de 2000 se observó una anomalía positiva (3.5 mg m^{-3}) asociada a un período frío (La Niña). Y en julio de 2002 también fue positiva por la intrusión de agua subártica. Durante 2003 se observó una tendencia hacia anomalías negativas en Chl-a, con valores de -0.2 a -1.7 mg m^{-3} finalizando en enero de 2008 con un valor de Chl-a de 0.4 mg m^{-3} , debido a que entre el verano de 2007 e inicios de 2009 el SCC estuvo dominado por condiciones La Niña (McClatchie *et al.*, 2009). A inicios de 2010 (1001) se observó la tendencia a un aumento en Chl-a, con un alto valor positivo en julio del 2010 (1007) de 4.3 mg m^{-3} . La Chl-a no presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=47$, $p=0.07$).

La estación 113.30 localizada frente a Punta Canoas tuvo la anomalía positiva más marcada de clorofila (15 mg m^{-3}) en abril de 2009, mientras que la anomalía negativa más baja se observó en la estación 113.35 durante abril de 2011 (-3.1 mg m^{-3}). La estación 119.33 mostró anomalías negativas, con valores cercanos a -2.9 mg m^{-3} observados en abril de 2005 y 2007. La anomalía positiva mayor (8.9 mg m^{-3}) registrada para ésta misma estación se obtuvo en julio de 2002 (0207).

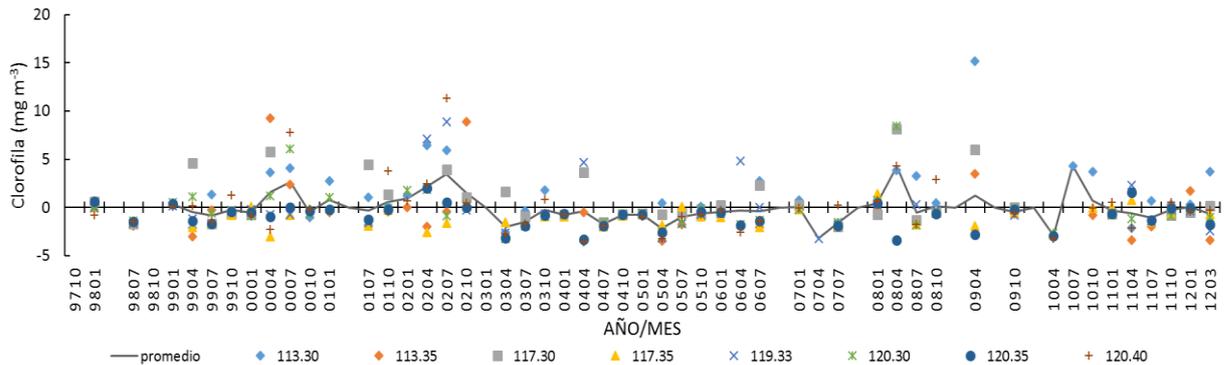


Figura 17. Anomalías de clorofila del fitoplancton (Chl-a; mg m^{-3}) a 10 m de profundidad en BSV (líneas 113-120) en el periodo 1997-2012. Los símbolos y colores representan las estaciones de muestreo en las campañas IMECOCAL.

5.3 Perfiles verticales de las variables *in situ*

El Niño 1997-1998 afectó el ecosistema de BSV. Esta influencia también se observó en la columna de agua con un aumento notable en temperatura de $\sim 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, en comparación con los valores promedio, así como en el hundimiento de la termoclina y la haloclina hasta 100 m de profundidad (Figura 18a). En la vertical se observó una disminución de clorofila de $\sim 0.4 \text{ mg m}^{-3}$ en los primeros 50 m de profundidad (Figura 18d), hacia valores bajos positivos a inicios de 1998.

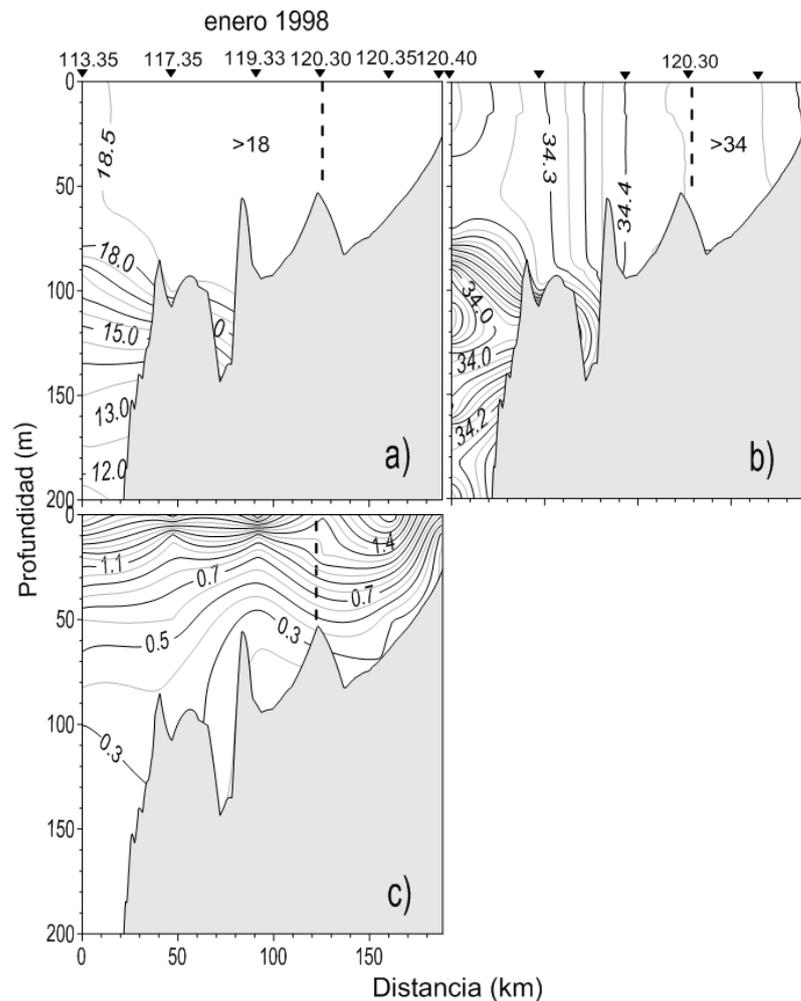


Figura 18. Perfil vertical de variables dentro de BSV durante enero de 1998 representativo de un evento El Niño; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad y c) Clorofila (mg m^{-3}).

A finales de 1998 e inicios de 1999 en la región IMECOCAL se presentó un ligero aumento de Chl-a superficial (0.3 mg m^{-3}), debido a la intensificación de las surgencias costeras y la influencia de La Niña 1998-1999 (Hayward et al., 1999). Como una consecuencia de esta influencia, en enero de 1999 se observó una leve anomalía negativa de temperatura superficial (-0.3°C). En la columna de agua, la termoclina y la haloclina se elevaron $\sim 10 \text{ m}$ (Figura 19) y la temperatura en la termoclina disminuyó (2°C) por encima de los 50 m de profundidad, con una anomalía positiva de Chl-a superficial ($>0.5 \text{ mg m}^{-3}$).

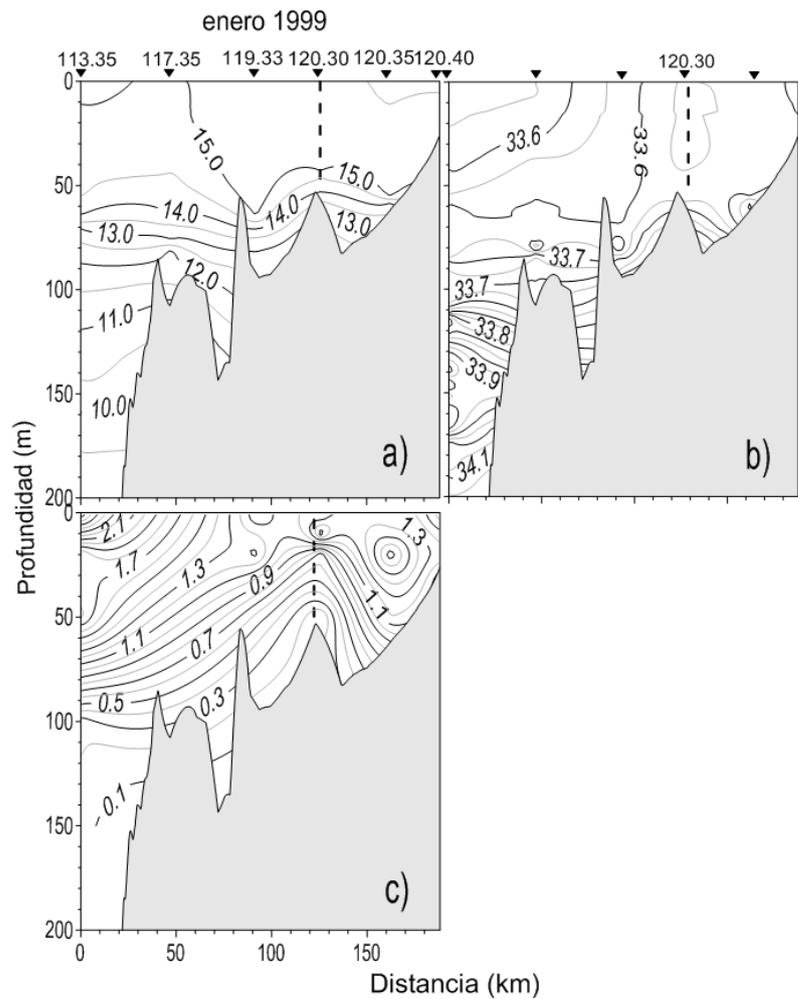


Figura 19. Perfil vertical de variables dentro de BSV durante enero de 1999 representativo de un evento La Niña; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad y c) Clorofila (mg m^{-3}).

Durante inicios de 2003 bajo condiciones de un evento El Niño “débil o moderado”, la temperatura a 10 m de profundidad aumentó 1°C por sobre la temperatura promedio. A inicios de este año (febrero de 2003) la termoclina se profundizó hasta 50 m de profundidad (Figura 20) al igual que la oxiclina, además la haloclina se profundizó hasta los 100 m de profundidad. Además la salinidad de la columna de agua disminuyó a causa del ingreso de agua Subártica.

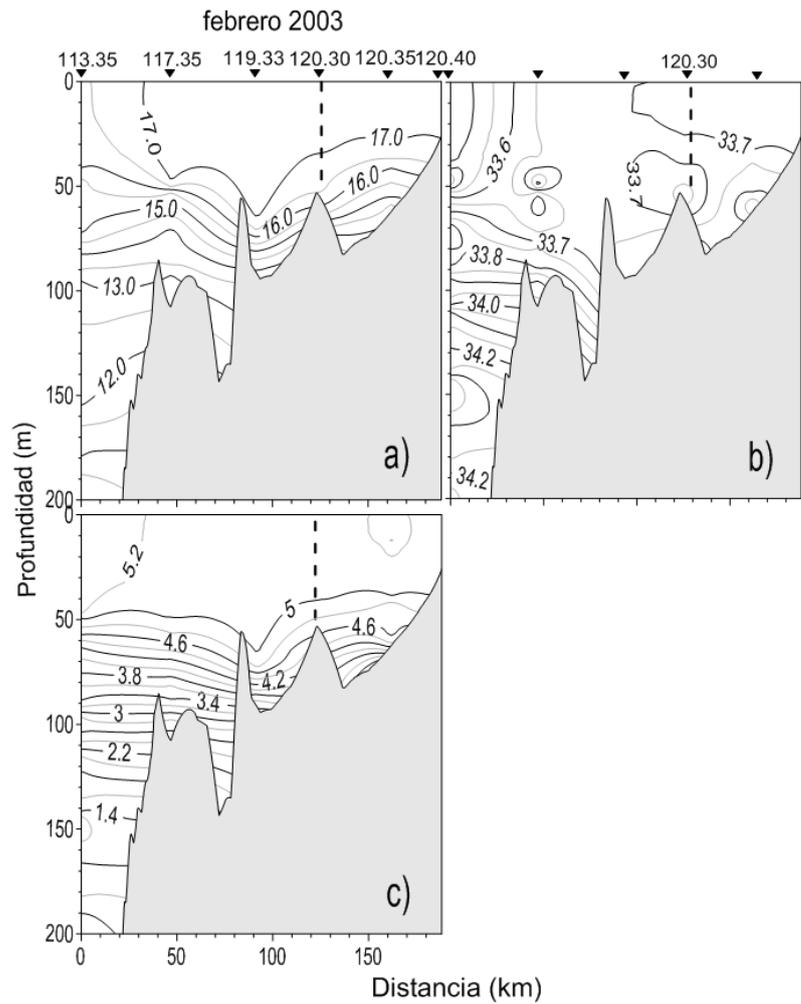


Figura 20. Perfil vertical de variables dentro de BSV durante febrero de 2003 representativo de un evento El Niño; a) Temperatura (°C); b) Salinidad y c) Oxígeno disuelto (ml l⁻¹).

En abril de 2003 considerado como periodo “normal” (verano de 2003; Goericke *et al.*, 2004), la termoclina se elevó ~10 m (Figura 21) en comparación con el promedio (~30 m).

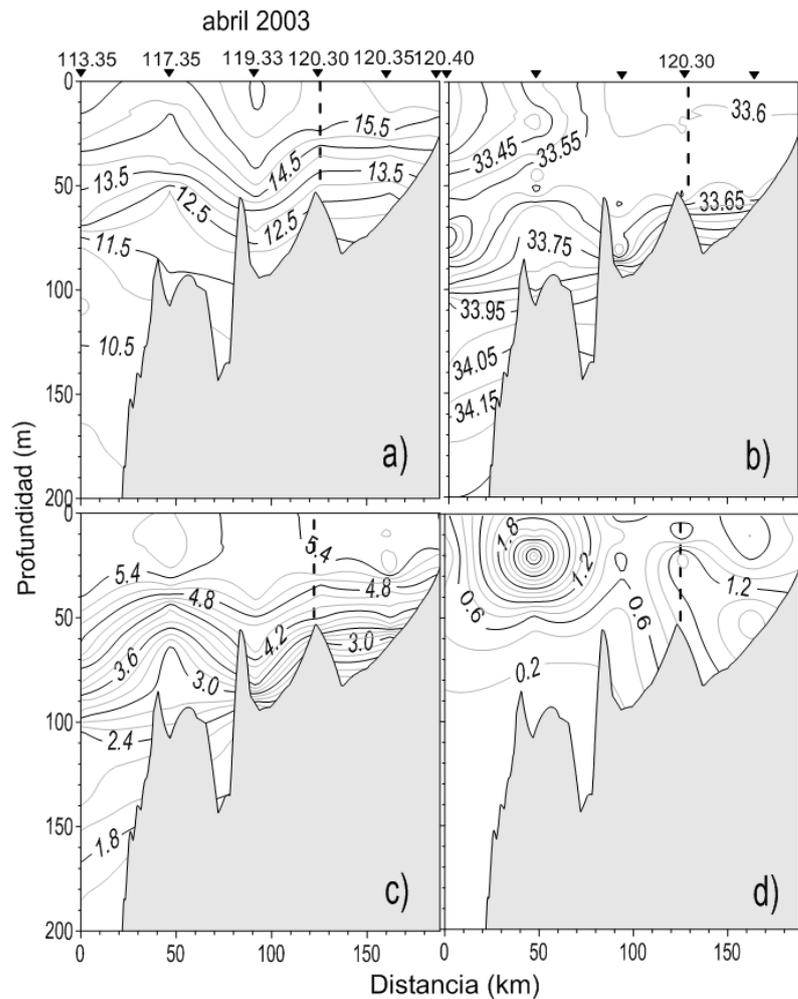


Figura 21. Perfiles verticales de variables medidas en abril de 2003: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}); d) Clorofila (mg m^{-3}).

En febrero de 2004, en la columna de agua la termoclina se profundizó hasta 60 m con relación al promedio, con una disminución de la temperatura superficial de $\sim 1^{\circ}\text{C}$ (Figura 22). El año 2004 estuvo principalmente influenciado por el ingreso anómalo de Agua SubArtica (ASA) en la región de Baja California (Espinosa-Carreón *et al.*, 2015)

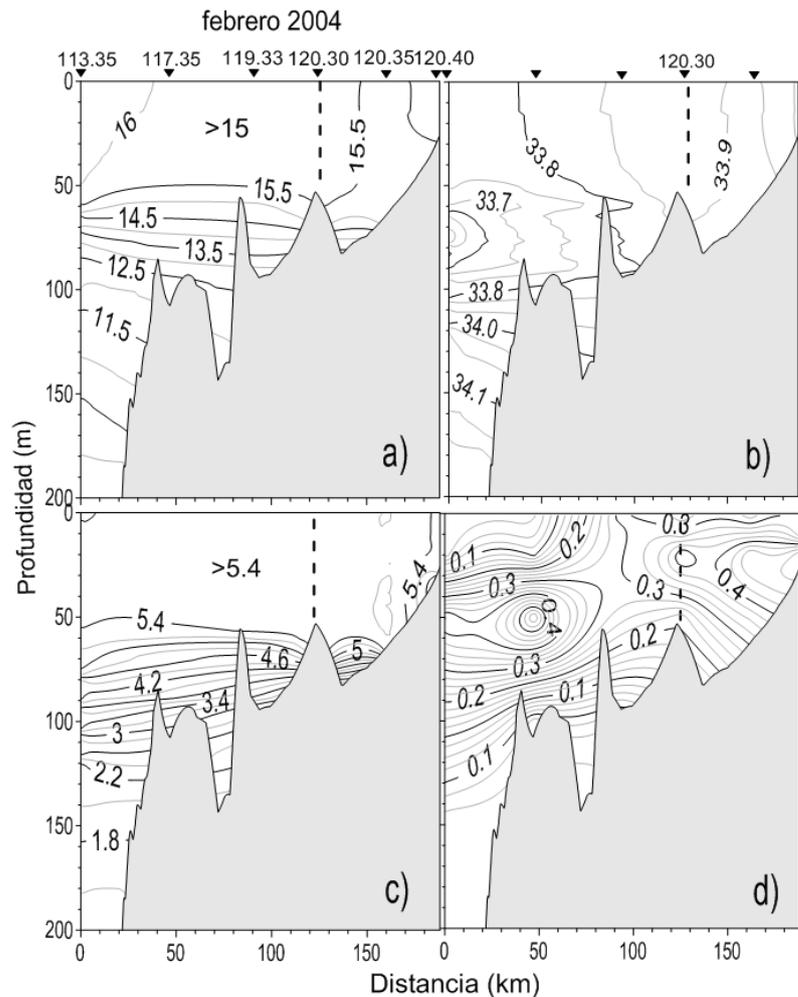


Figura 22. Perfiles verticales de variables medidas en BSV durante febrero 2004, representativo del inicio de la entrada de ASA en la región de Baja California: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila-a (mg m^{-3}).

En abril de 2004 se observó una elevación de la termoclina y la haloclina de aproximadamente 20 m (Figura 23b). La salinidad disminuyó (~ 0.2) por encima de los 80 m de profundidad, con un aumento en la concentración de oxígeno disuelto (1.1 ml l^{-1}) por encima de los 50 m de profundidad y en clorofila (0.8 mg m^{-3}).

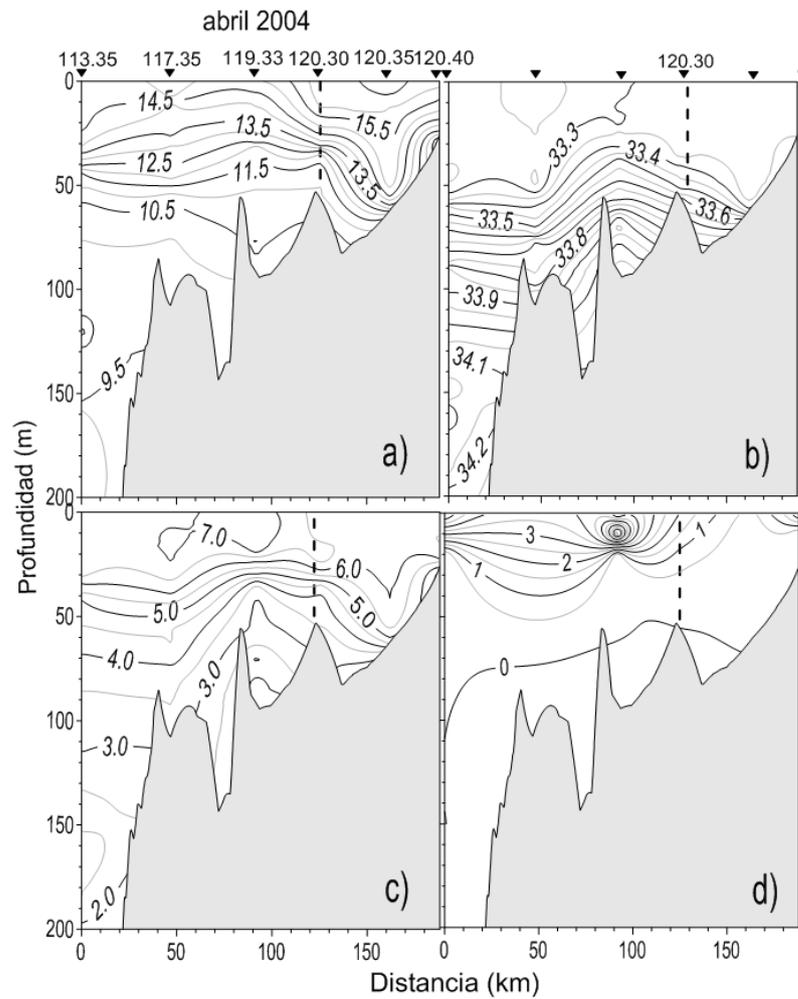


Figura 23. Perfil vertical de variables dentro de BSV durante abril de 2004 representativo de un evento El Niño; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila (mg m^{-3}).

En enero de 2008 la clorofila *in situ* se elevó (0.2 mg m^{-3}) en los 50 m superiores, con una termoclina mucho más somera entre 0 y 30 m de profundidad y la temperatura a una profundidad de $\sim 50 \text{ m}$ descendió 1°C (Figura 24a), sin un cambio aparente en la salinidad.

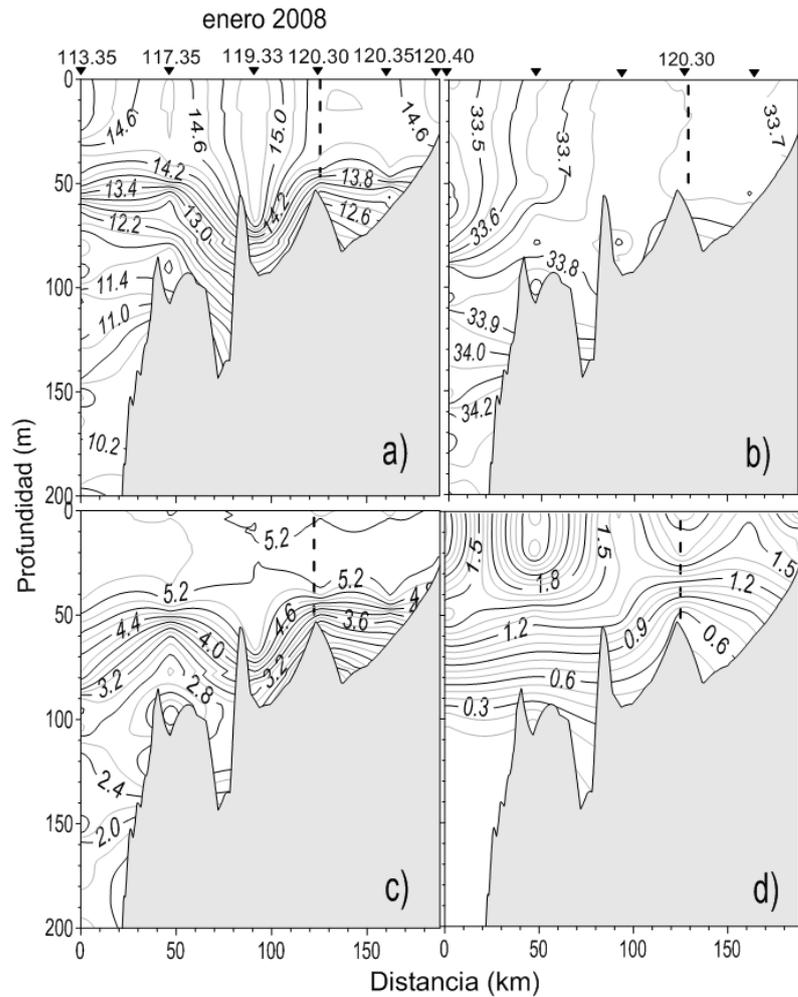


Figura 24. Perfil vertical de variables dentro de BSV durante enero de 2008 representativo de un evento La Niña; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila (mg m^{-3}).

En BSV, durante abril de 2010 como resultado de El Niño moderado de 2010 (Bjorkstedt *et al.*, 2010), la temperatura en la columna de agua mostró una disminución de $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ en los 50 m superiores. La oxiclina se profundizó a 30 m de profundidad (Figura 25).

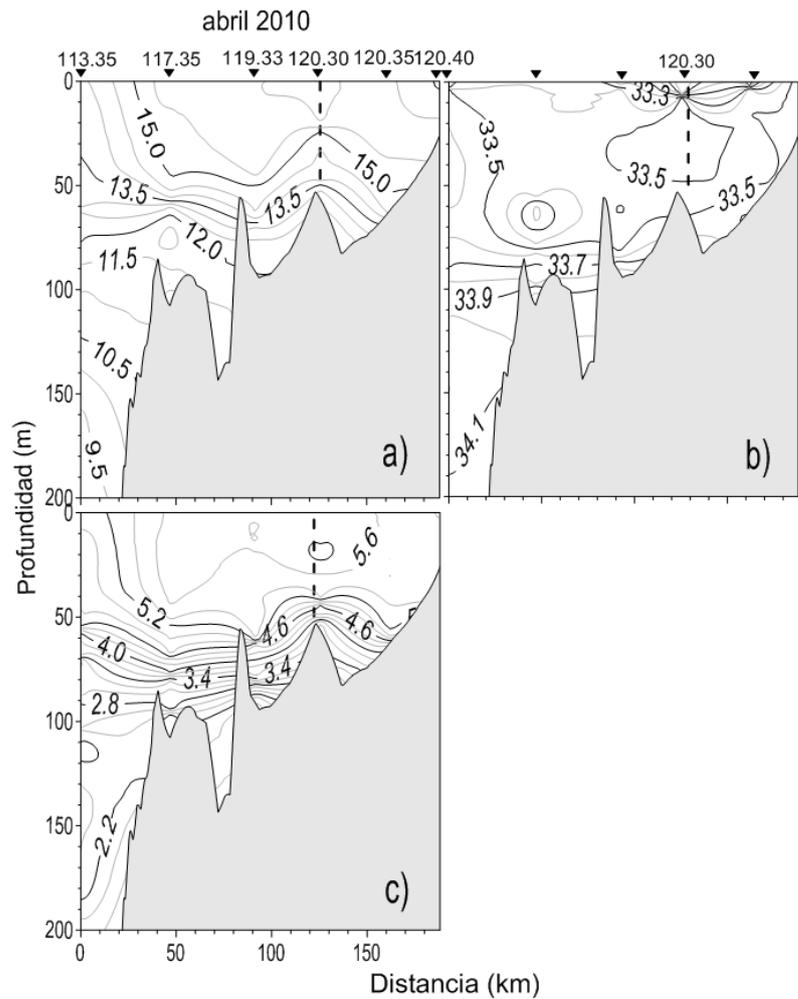


Figura 25. Perfil vertical de variables dentro de BSV durante abril de 2010 representativo de un evento El Niño; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad y c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}).

Durante octubre de 2010 la clorofila se elevó (0.2 mg m^{-3}) por encima de los 50 m (Figura 26) en la columna de agua, como resultado de la influencia del evento La Niña 2010 (Bjorkstedt *et al.*, 2012).

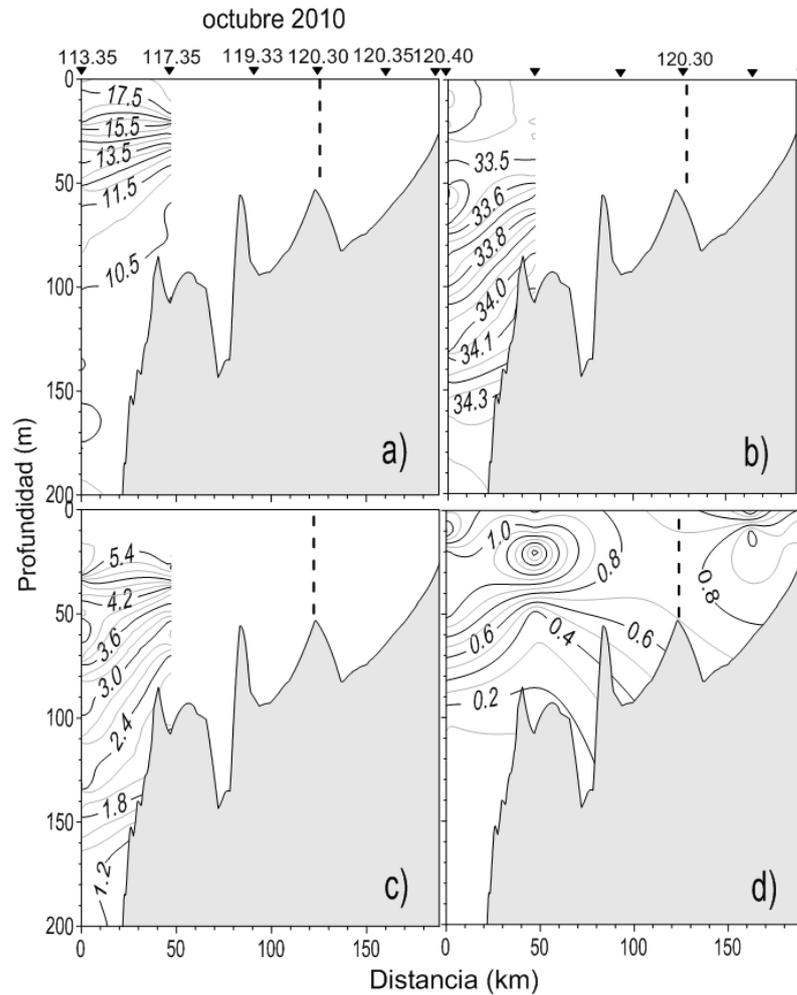


Figura 26. Perfil vertical de variables dentro de BSV durante octubre de 2010 representativo de un evento La Niña; a) Temperatura (°C); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l⁻¹) y d) Clorofila (mg m⁻³).

Durante enero de 2011 en BSV la termoclina se elevó aproximadamente 10 m y la temperatura disminuyó aproximadamente 2.0 °C por encima de los 50 m de profundidad (Figura 27a). La clorofila disminuyó ~1 mg m⁻³ por arriba de los 50 m de profundidad (Figura 27d).

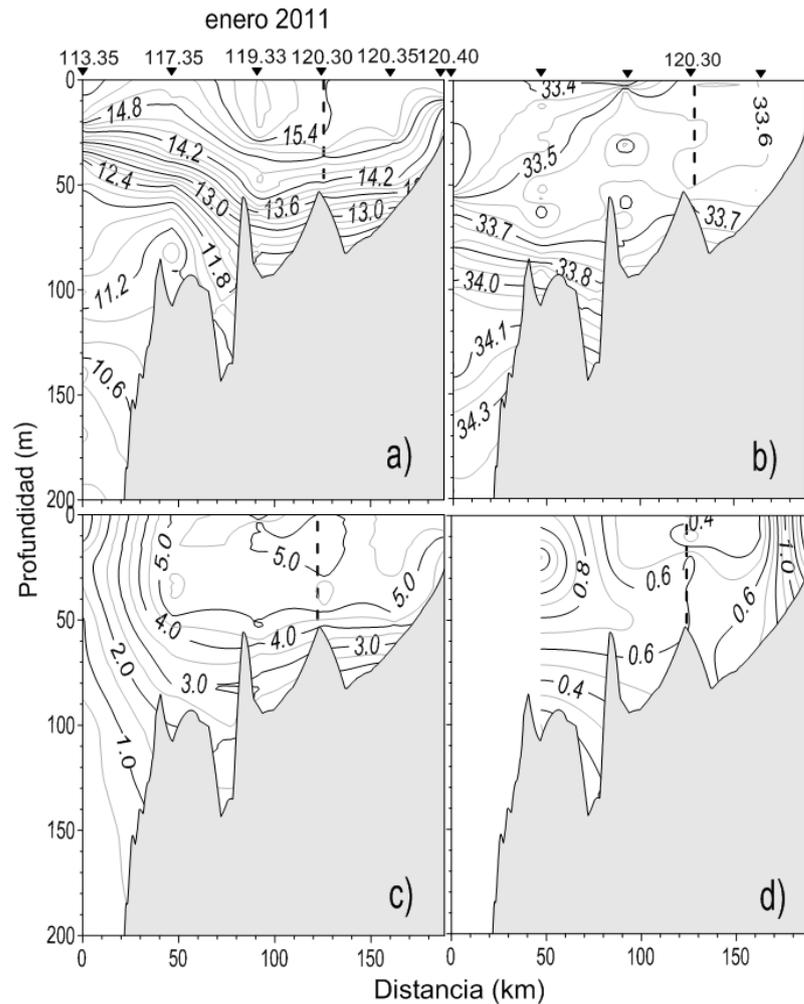


Figura 27. Perfil vertical de variables dentro de BSV durante enero de 2011 representativo de un evento La Niña; a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$); b) Salinidad; c) Oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y d) Clorofila (mg m^{-3}).

5.4 Anomalías de datos derivados de sensores remotos

En la TSM derivada de sensores remotos se observaron anomalías positivas que iniciaron en enero de 1997 y perduraron hasta septiembre de 1998 (Figura 28), con la anomalía positiva mayor en diciembre de 1997 ($>3.7^{\circ}\text{C}$). A partir de octubre de 1998 se presentó un período de anomalías negativas que se extendió a mayo de 2000, con valores entre -0.2 a -1.6°C . Para el 2001 y 2002 se observaron en su mayoría valores negativos (entre -0.2 a -1.4). En 2003, se calcularon anomalías de TSM cercanas a cero, principalmente en abril (0.1°C). Entre el verano de 2006 a enero de 2007 se presentó un período con anomalías positivas, con valores de 0.08 a 1.4°C , asociado a un El Niño débil en 2006-2007. A partir de marzo de 2007 inició un evento con anomalías negativas correspondiente a La Niña (McClatchie *et al.*, 2009), el cual terminó en septiembre de 2008 (valores entre -0.02 a -1.4°C). En 2009 se presentaron en su mayoría, anomalías positivas de baja magnitud con valores entre 0.1 a 1°C .

Dos años de anomalías negativas se presentaron de mayo de 2010 a mediados de 2012 (con valores entre -3.3 a -0.4 °C). Al final de la serie de tiempo hay un cambio a anomalías positivas en otoño de 2012, con valores de 2.9 °C. La TSM presentó diferencias significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=192$, $p<0.001$), por lo que se realizó una prueba *a posteriori*, prueba Bonferroni y se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p<0.05$), entre 1997 (año representativo de un evento El Niño intenso), 2005 (a inicios de éste año se presentó un evento El Niño débil) y 2009 con los años La Niña: 1999, 2007, 2008, 2010, 2011 y con el año 2002 (año en el que se presentó la anomalía del ingreso de ASA). Al aplicar el análisis de correlación cruzada para comparar los datos del índice MEI con la TSM, dio como resultado una alta correlación positiva de 0.7, a un intervalo de confianza del 95%.

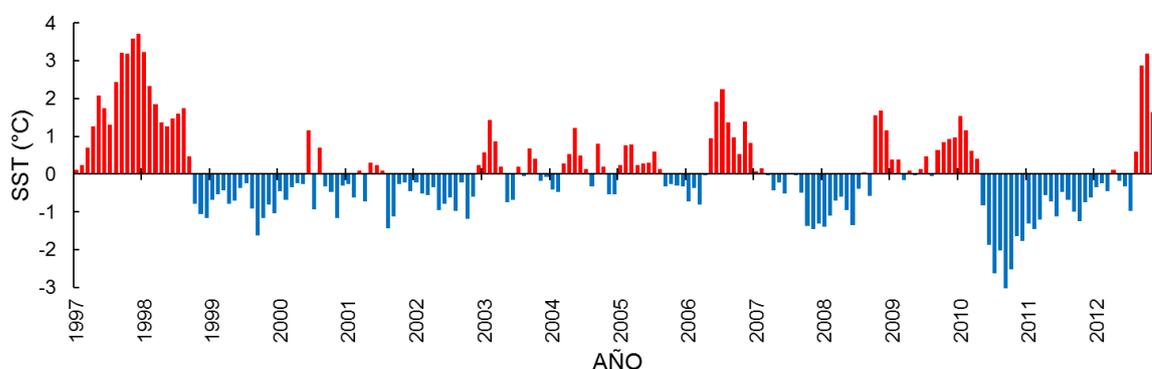


Figura 18. Anomalías de TSM (°C) en BSV durante 1997-2012, calculas a partir de datos de satélite.

La CHL derivada de sensores remotos presentó anomalías negativas en 1997 y 1998 (Figura 29), con el mayor valor negativo en marzo de 1998 (-1.2 mg m^{-3}). Estas anomalías negativas persistieron hasta abril del 2002, observando ligeras anomalías positivas en abril y julio de 2000 (0.1 y 0.7 mg m^{-3} , respectivamente). De mayo a diciembre de 2002 se observaron anomalías positivas, con el valor mayor en julio de 2002 (4.9 mg m^{-3}), correspondiente a la intrusión de agua subártica y al incremento del esfuerzo del viento durante 2002 (Herrera *et al.*, 2014). A partir de octubre de 2003 y 2004 se observaron anomalías negativas de CHL, con valores entre -0.1 y -1.1 mg m^{-3} (este último valor en marzo de 2004). Las anomalías negativas de CHL persistieron hasta septiembre del 2004, año correspondiente a El Niño 2004-2005 (Goericke *et al.*, 2005). En octubre 2007 se observaron anomalías positivas, las cuales terminaron en abril del 2008, cuando se observó una alta anomalía positiva (1.5 mg m^{-3}), correspondiente con un evento La Niña (McClatchie *et al.*, 2009).

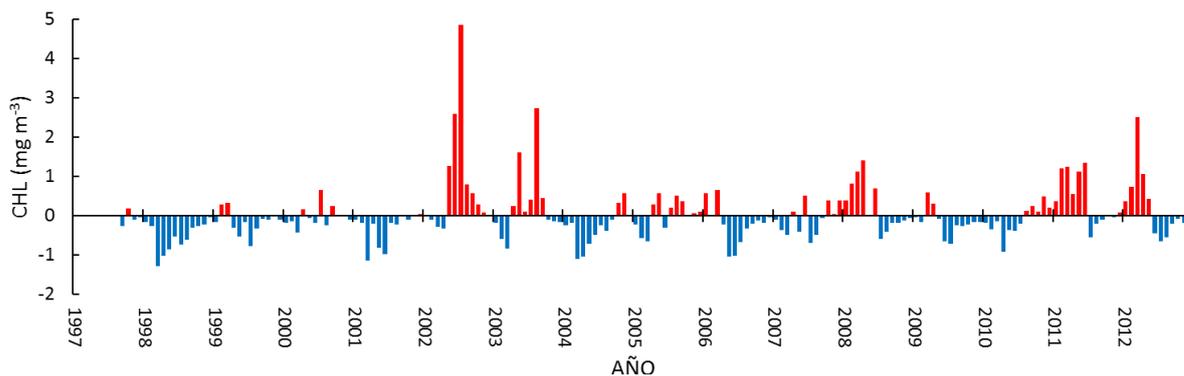


Figura 19. Anomalías de CHL (mg m^{-3}) en BSV durante 1997-2012, calculada con información derivada de sensores remotos.

A partir de mayo de 2009 se observaron valores negativos en las anomalías de CHL de -0.1 a -1.0 mg m^{-3} , los que persistieron hasta julio de 2010 (Figura 29), asociados a un evento El Niño caracterizado por anomalías positivas de temperatura de otoño de 2009 a inicios de 2010 (Bjorkstedt *et al.*, 2010). Entre agosto de 2010 y junio de 2011 se observaron anomalías positivas de 1.0 a 1.3 mg m^{-3} , periodo que correspondió a un evento La Niña ocurrida del 2010 a la primavera de 2011 (Bjorkstedt *et al.*, 2012). A principios de 2012 se manifestó una anomalía positiva de CHL, con un valor máximo en marzo (2.5 mg m^{-3}), relacionado con tendencias negativas del MEI (Figura 2). En junio de 2012 se observaron anomalías negativas de CHL (entre -0.02 a -0.70 mg m^{-3}), período correspondiente a valores positivos del MEI. La CHL presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=184$, $p<0.001$), por lo que se realizó una prueba *a posteriori*, prueba Bonferroni y se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p<0.05$) entre los años 1998-2002 y 1998-2011. Al aplicar el análisis de correlación cruzada para comparar los datos del índice MEI con la CHL, dio como resultado una correlación negativa de -0.2 a un intervalo de confianza del 95%.

5.4.1 Distribución de las anomalías de variables de sensores remotos

Debido al evento El Niño 1997-1998 durante diciembre de 1997 se obtuvo una alta anomalía positiva de temperatura en BSV ($>3 \text{ }^\circ\text{C}$, Figura 30a), con anomalías negativas de CHL ($\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$, Figura 30b). Herrera *et al.* (2014).

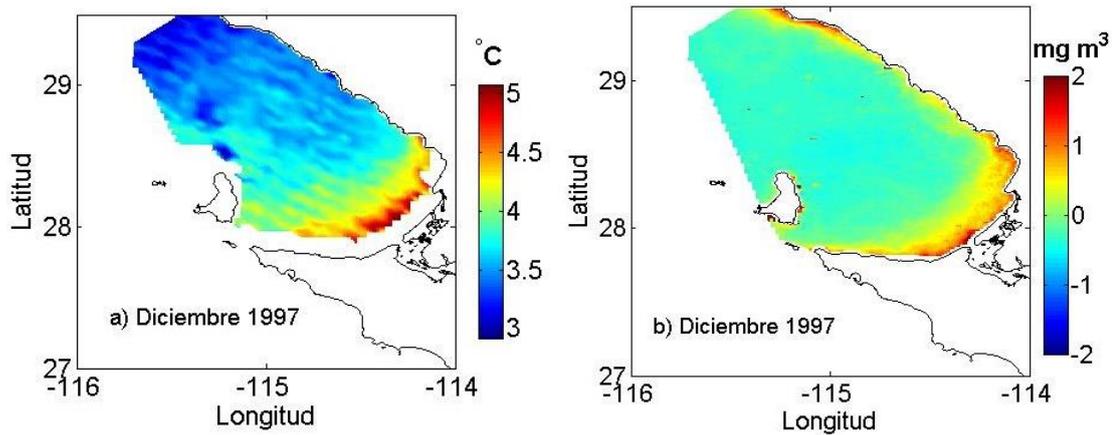


Figura 30. Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para diciembre de 1997, derivadas de los datos de sensores remotos.

Como resultado de la intensificación de vientos durante el evento La Niña 1998-1999, se favorecieron las surgencias costeras y el aporte de agua con TSM menor en la CC frente a Baja California (Hayward *et al.*, 1999). Durante diciembre de 1998 se presentó una anomalía negativa de temperatura (~ -1 °C, Figura 31a). Contrario a lo obtenido a partir de los datos *in situ*, la anomalía de CHL en diciembre de 1998 fue negativa y cercana al promedio (-0.01 mg m⁻³, Figura 31b).

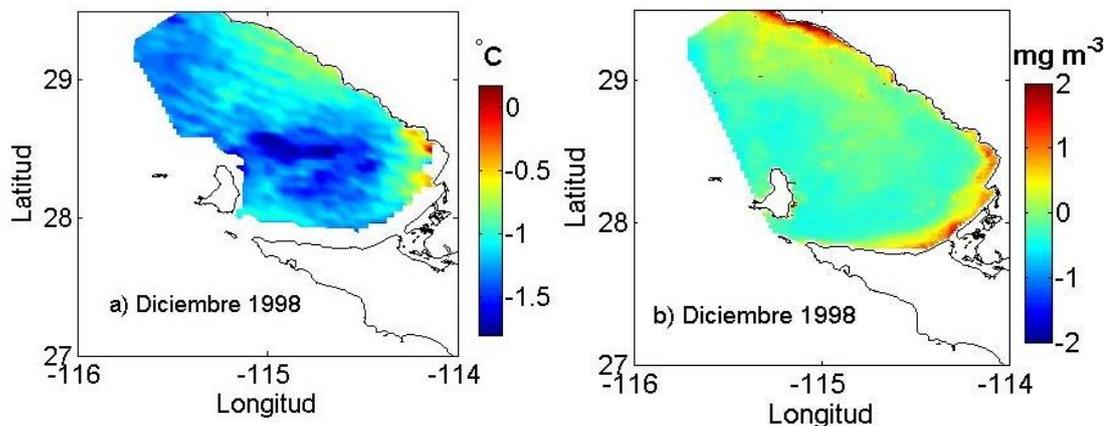


Figura 31. Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para diciembre de 1998, derivadas de los datos de sensores remotos.

Debido al incremento del esfuerzo del viento durante 2002 frente a Baja California (Herrera *et al.*, 2014) que promueve la intensificación de las surgencias costeras, en BSV durante la primavera de 2002 en promedio se generó una anomalía negativa de TSM (~ -0.5 °C, Figura 32a) y una muy fuerte anomalía positiva de CHL (~ 4 mg m⁻³, Figura 32b).

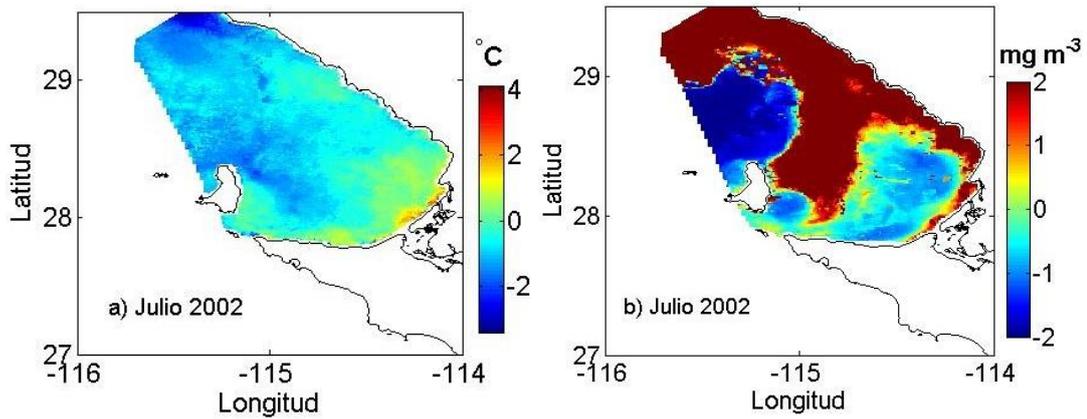


Figura 32. Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para julio 2002, derivadas de los datos de sensores remotos.

Durante febrero de 2003, por la entrada de agua cálida del sureste derivada de un El Niño moderado (principios de 2003) descrito por Venrick *et al.* (2003), en BSV se observó un incremento en la temperatura (>1 °C), relacionada con anomalías negativas (-0.6 mg m⁻³) de CHL, ésta disminución es mayor al norte de BSV frente a Punta Canoas en la zona más oceánica (Figura 33).

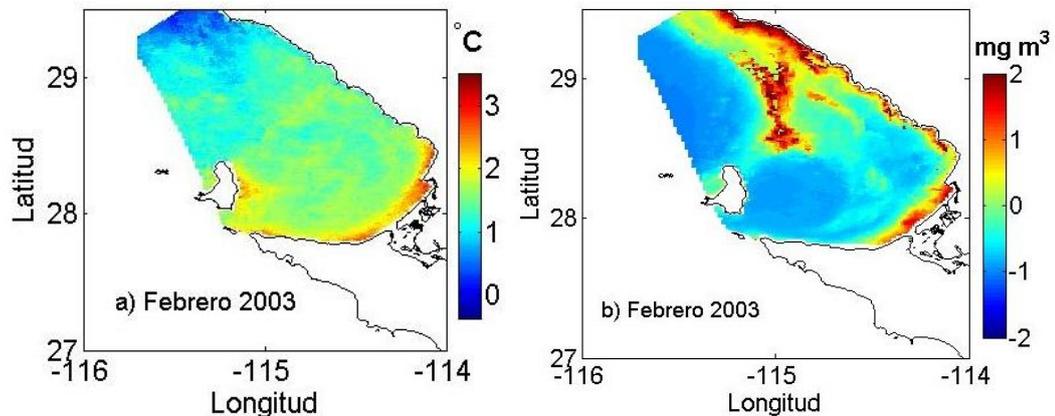


Figura 33. Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para febrero de 2003, derivadas de los datos de sensores remotos.

La característica más relevante durante el evento El Niño 2006-2007 en la CC frente a Baja California, fue la clara transición a condiciones más cálidas a partir de abril de 2006 (Goericke *et al.*, 2007). Debido a la influencia de éste evento, en BSV se calcularon anomalías positivas de temperatura en julio de 2006 (>2 °C, Figura 34a), relacionadas con anomalías negativas de CHL (~ 1 mg m⁻³, Figura 34b).

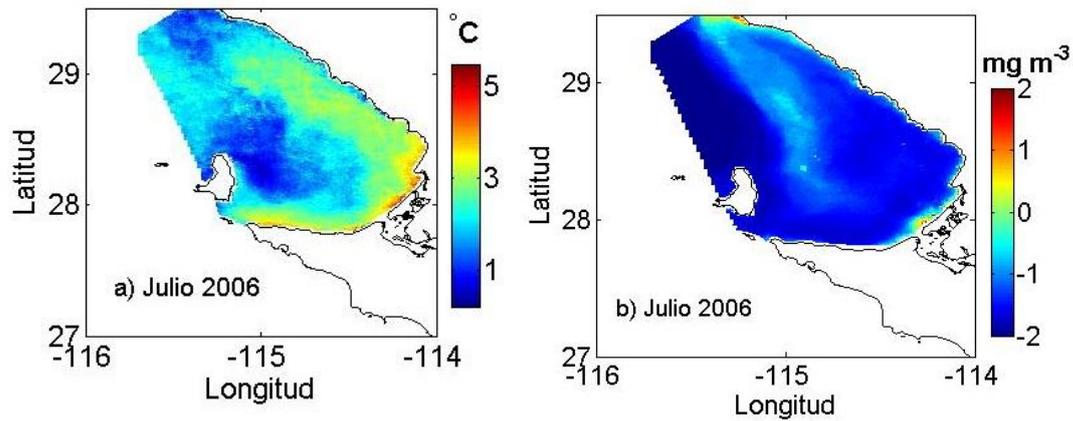


Figura 34. Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para julio de 2006, derivadas de los datos de sensores remotos.

En febrero de 2008 se calcularon anomalías negativas de TSM en la bahía (~ -1 °C, Figura 35a) asociadas a un evento La Niña que intensificó las surgencias costeras en la CC (McClatchie *et al.*, 2009), lo que propició además anomalías positivas de CHL que se extendieron desde Punta Canoas hacia el interior de BSV (1.5 mg m^{-3} , Figura 35b).

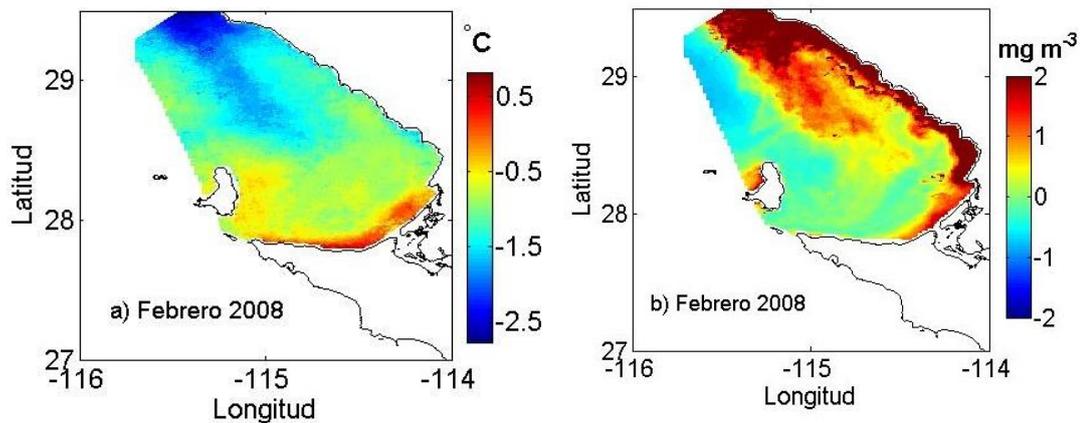


Figura 35. Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para febrero de 2008, derivadas de los datos de sensores remotos.

Asociados a un evento El Niño reportado en la CC (Bjorkstedt *et al.*, 2010), durante enero de 2010 se observaron anomalías positivas de TSM (~ 1.3 °C, Figura 36a) y negativas de CHL (> -0.2 mg m^{-3} , Figura 36b).

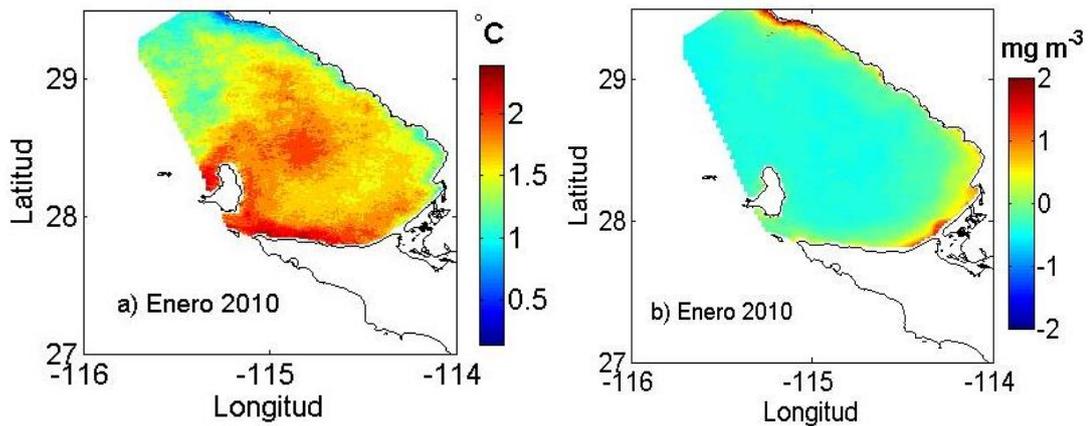


Figura 36. Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para enero de 2010, derivadas de los datos de sensores remotos.

En enero de 2011 en BSV se calcularon anomalías negativas de TSM (~ -1.3 °C, Figura 37a) relacionadas con anomalías positivas de CHL (>0.5 mg m⁻³, Figura 37b).

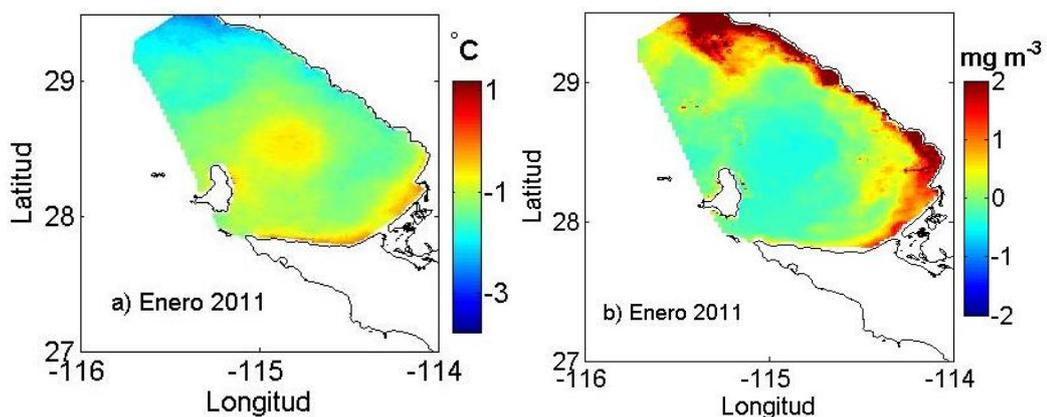


Figura 37. Anomalías de TSM (a) y CHL (b) para enero de 2011, derivadas de los datos de sensores remotos.

5.5 Producción Primaria

La PP de BSV no presentó una variación interanual bien definida, con tendencia similar a la de la CHL en cuanto a estacionalidad, ya que los mayores valores de PP se obtuvieron para primavera-verano, mientras que los menores se estimaron en otoño-invierno (Figura 38). El intervalo de los valores de PP varió entre 41 mg C m⁻² d⁻¹ y 2380 mg C m⁻² d⁻¹ a lo largo del período de estudio (1997-2012) (Figura 38). A finales de 1997 e inicios de 1998 la PP tuvo valores bajos (184 y 285 mg C m⁻² d⁻¹, respectivamente). En 1999 se observó un aumento de PP de 2380 mg C m⁻² d⁻¹ en marzo y disminuyendo a finales del año, con un valor menor a 400 mg C m⁻² d⁻¹ durante 2000. En 2001 se observó un aumento en PP, con un valor máximo de 1444 mg C m⁻² d⁻¹.

d^{-1} . En invierno de 2004 se calcularon valores bajos de $49 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y un mínimo de $137 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en el verano de ese mismo año.

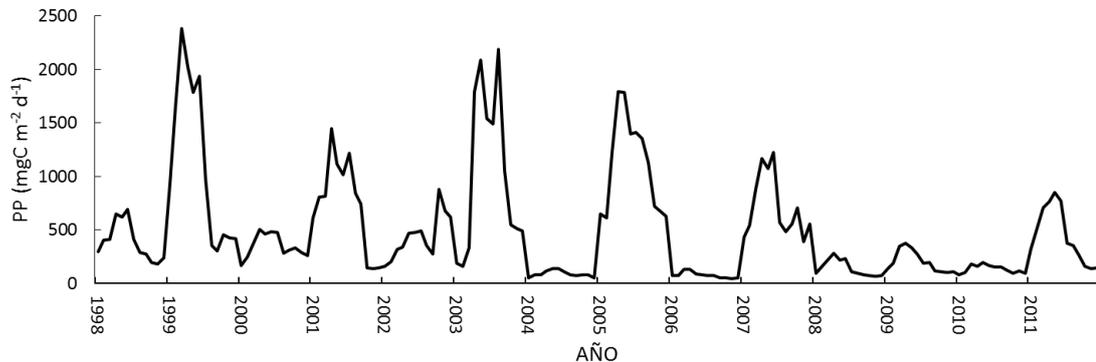


Figura 38. Serie de tiempo (1997-2012) de la producción primaria mensual calculada con el modelo de Carr (2002) a partir de información de satélite.

En 2005 se observó el incremento de la PP a inicios de primavera, alcanzando un valor máximo de $1791 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Los valores más bajos de PP se calcularon durante 2006 (entre $21 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $70 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) como resultado de las variaciones en la concentración de Chl-a, ya que en el presente trabajo en verano de 2006 se presentó un período con anomalías positivas. Entre 2008 y 2011 se obtuvieron PP menores a $500 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y valores $<1000 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en 2011 y 2012 (144 a $847 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en 2011 y de 11 a $843 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en 2012). La PP presentó diferencias estadísticas significativas entre los años (prueba de Kruskal-Wallis: $n=184$, $p=<0.001$), por lo que se realizó una prueba *a posteriori*, prueba Bonferroni y se encontraron diferencias ($p<0.05$) entre los años (Tabla 2):

Tabla 2. Prueba estadística Bonferroni, años con diferencias estadísticamente significativas de PP.

AÑO	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
1998		0.02	1	1	1	0.2	<0.0 01	<0.0 01	<0.0 01	0.2	<0.0 01	<0.0 01	0.00 1	1
1999			0.00 7	1	0.2	1	<0.0 01	1	<0.0 01	1	<0.0 01	<0.0 01	<0.0 01	0.09
2000				0.8	1	0.07	<0.0 01	<0.0 01	<0.0 01	0.07	0.00 1	0.8	0.00 6	1
2001					1	1	<0.0 01	1	<0.0 01	1	<0.0 01	<0.0 01	<0.0 01	1
2002						1	<0.0 01	0.00 6	<0.0 01	1	<0.0 01	0.04	<0.0 01	1
2003							<0.0 01	1	<0.0 01	1	<0.0 01	<0.0 01	<0.0 01	0.6
2004								<0.0 01	1	<0.0 01	1	0.1	1	<0.0 01
2005									<0.0 01	1	<0.0 01	<0.0 01	<0.0 01	0.00 2
2006										<0.0 01	1	0.01	1	<0.0 01
2007											<0.0 01	<0.0 01	<0.0 01	0.7
2008												1	1	<0.0 01
2009													1	0.09
2010														<0.0 01

Al aplicar el análisis de correlación cruzada para comparar los datos del índice MEI con la PP, dio como resultado una correlación negativa muy baja de -0.2, con un intervalo de confianza del 95%.

5.6 Anomalías de Producción Primaria

En la PP se observaron anomalías negativas en 1998 de -6 a 219 mg C m⁻² d⁻¹ (Figura 39). En 1999 que coincide con un período La Niña (Hayward *et al.*, 1999) se observaron anomalías positivas de PP de 644 a 1782 mg C m⁻² d⁻¹. A inicios del año 2003 resultado del evento durante El Niño moderado de 2002-2003 (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010b) se observaron anomalías negativas de la PP (hasta -248 mg C m⁻² d⁻¹ durante febrero 2003). Por otra parte, en primavera-verano 2003, se encontraron anomalías positivas, alcanzando 970 mg C m⁻² d⁻¹ durante abril del 2003.

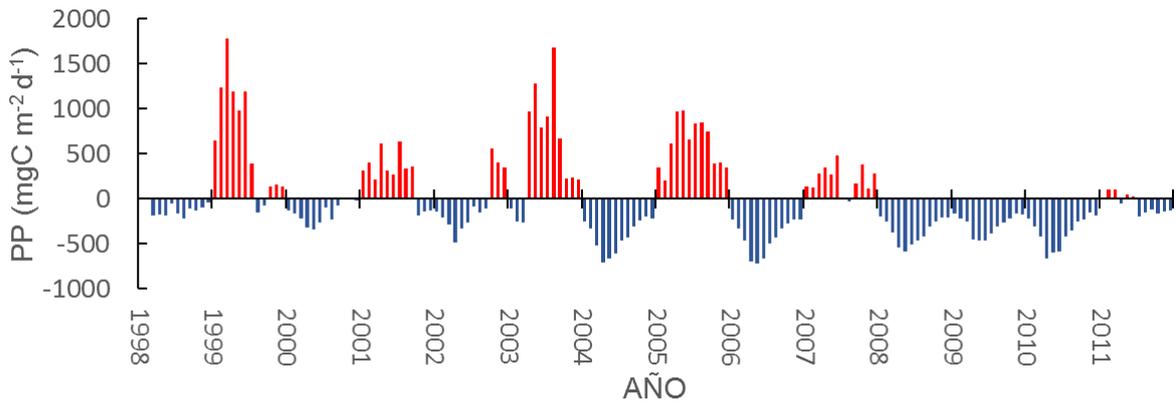


Figura 39. Anomalías de PP calculada (1997-2012) a partir de datos de satélite y el modelo de Carr (2002).

En 2004, correspondiente a otro El Niño (Goericke et al., 2005) se observaron anomalías negativas de PP de -250 a 707 mg C m⁻² d⁻¹ (Figura 39). En 2006 predominaron anomalías negativas de -225 a -714 mg C m⁻² d⁻¹ y en 2007 se presentaron, en su mayoría anomalías positivas de 113 a 476 mg C m⁻² d⁻¹. Durante 2008 se observaron anomalías negativas de PP de -202 a -583 mg C m⁻² d⁻¹, año dominado por condiciones La Niña (McClatchie et al., 2009). Las anomalías negativas de PP perduraron hasta el año 2010, año en que se observaron anomalías negativas de entre -221 hasta -661 mg C m⁻² d⁻¹ hasta, como resultado de El Niño moderado de 2009-2010 (Bjorkstedt et al., 2010). Por último, durante el evento La Niña 2011 (Bjorkstedt et al., 2012) se observaron bajas anomalías de entre 15 mg C m⁻² d⁻¹ hasta 105 mg C m⁻² d⁻¹.

5.6.1 Distribución de las anomalías de PP

En enero de 1998 durante el evento El Niño 1997-1998 se observó una anomalía baja de PP con una reducción de apenas el 2% (Figura 40) con respecto al enero climatológico promedio (409 mg C m⁻² d⁻¹).

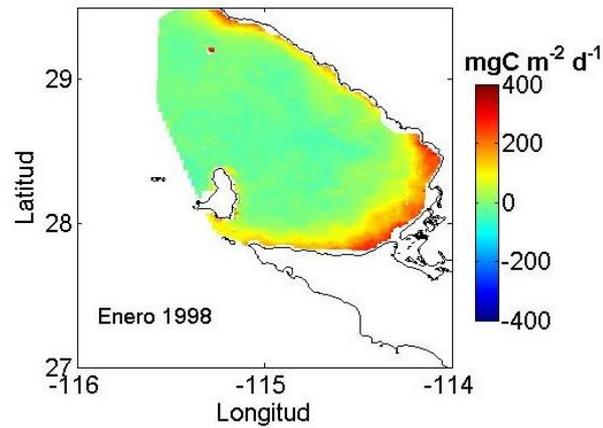


Figura 40. Anomalía de PP durante el evento El Niño a inicios de 1998.

En enero de 1999 caracterizado por un evento La Niña se observó un muy alto incremento de PP y durante marzo se triplicó el valor promedio de ese mes (599 mg C m⁻² d⁻¹), siendo el más alto de la serie de tiempo (Figura 41).

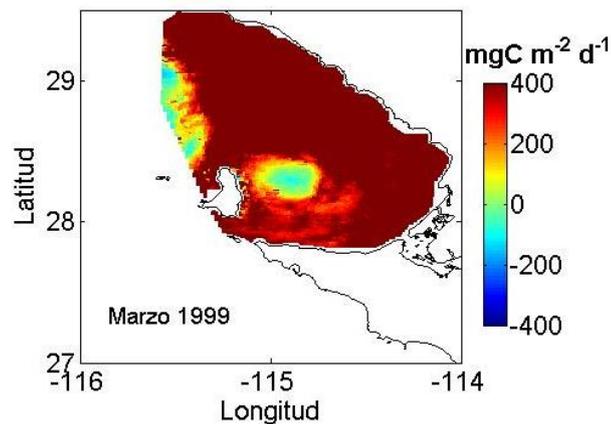


Figura 41. Anomalía de PP durante el evento La Niña en marzo de 1999.

A inicios de 2003 y debido a la influencia de El Niño moderado (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010b) además de la entrada de ASA (Espinosa-Carreón *et al.*, 2015), se observó una anomalía negativa de PP (-248 mg C m⁻² d⁻¹) durante febrero (Figura 42).

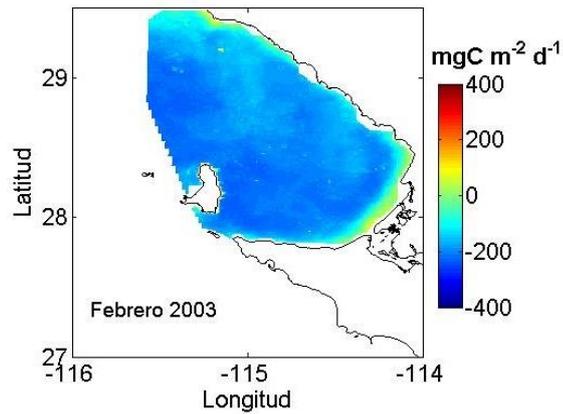


Figura 42. Anomalía de PP durante el evento El Niño en febrero de 2003.

Durante abril de 2004 correspondiente a un El Niño de acuerdo con Goericke *et al.* (2005), se observó una anomalía negativa de PP de $-707 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Figura 43).

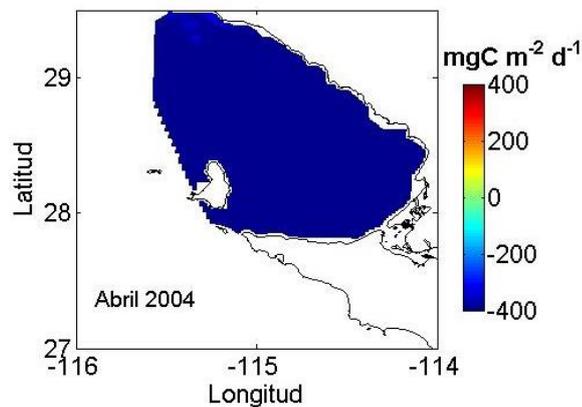


Figura 43. Anomalía de PP calculada durante el evento El Niño en abril de 2004.

A partir de 2008 se observaron anomalías negativas de PP ($202 \text{ mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ a $583 \text{ mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dominado por condiciones La Niña (McClatchie *et al.*, 2009). Las anomalías negativas perduraron hasta el año 2010, observando una disminución de PP de hasta el 50% en abril de 2010, con una PP de $-661 \text{ mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Figura 44).

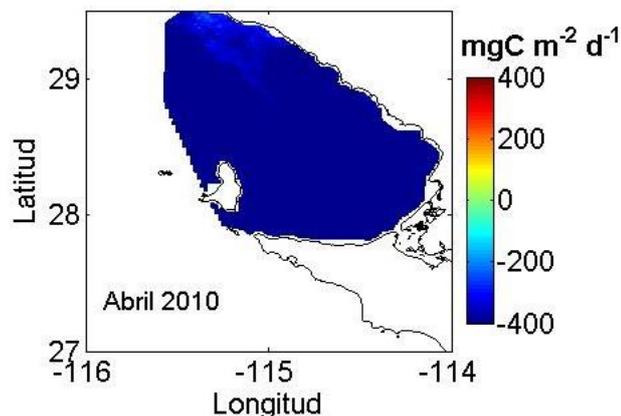


Figura 44. Anomalía de PP durante abril de 2010.

Las intensas anomalías negativas persistentes a partir de 2008 hasta finales de 2010 cesaron a inicios de 2011, con un incremento de apenas un 26% de PP, posiblemente asociado al evento La Niña (2010-2011) en la región de la CC (Bjorkstedt *et al.*, 2012).

5.7 Análisis de similitud a partir de la temperatura superficial del mar de satélite (TSM)

El análisis de similitud de la TSM correspondiente al período de estudio (1997-2012) mostró una división de BSV en 5 grupos principales ordenados de sur a norte (Figura 45a y 45b). El área 1 correspondió a la zona costera al sureste de la bahía, donde se apila agua con mayor temperatura y salinidad por el efecto del viento dominante del noroeste. Esta área tal vez esté también influenciada por el reflujó de agua proveniente de las lagunas costeras adyacentes. Las áreas 2 y 3 corresponden al centro de la bahía, donde se ubica el remolino anticiclónico estacional. Las áreas 4 y 5 (Figura 45a y b) delimitan espacialmente la forma del efecto de las surgencias costeras que se generan en la costa noroeste y se desplazan hacia el interior de la bahía. Este es uno de los procesos más importantes que fertilizan la bahía, principalmente durante primavera y verano. Con base en este análisis estadístico de la temperatura superficial del mar obtenida a partir de imágenes de satélite, es posible inferir que el agua más cálida de la bahía se encuentra regularmente en el área 1 y la de menor temperatura en el área 5, mostradas como las áreas extremas en las figuras 45a y 45b.

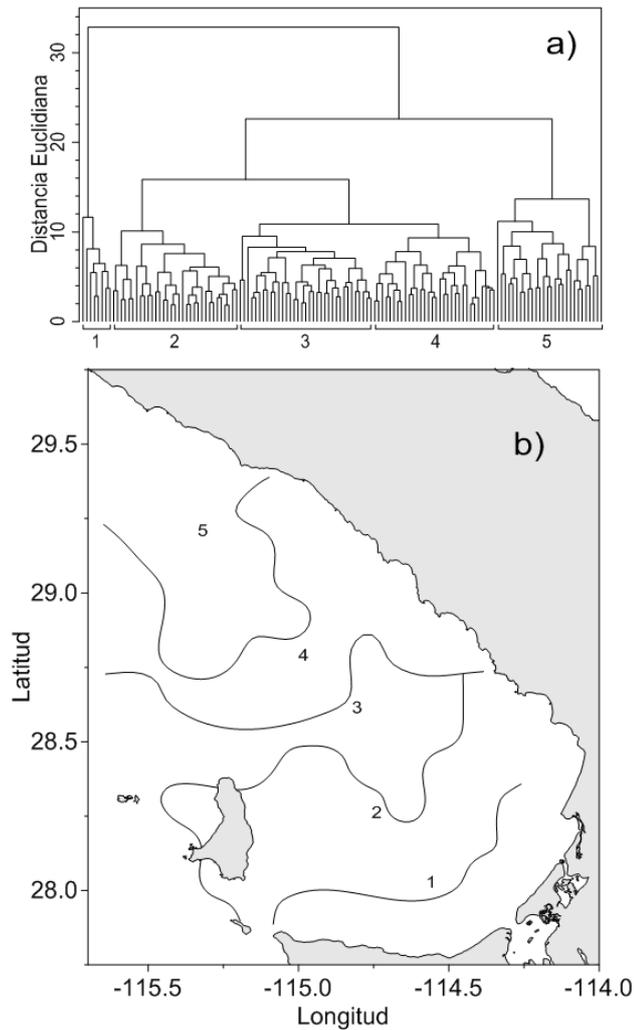


Figura 45. Índice de similitud de la TSM obtenida de sensores remotos para la serie de tiempo 1997-2012. a) Distancia euclidiana; b) índice de similitud espacio-temporal.

5.8 Análisis de similitud de la clorofila-a de satélite

El índice de similitud de la clorofila obtenida a partir de datos de sensores remotos (CHL) mostró una división más compleja que la TSM, con una separación en 6 grupos (Figura 46a). Las áreas 1 y 2 que cubren la mayor parte del centro y oeste de la bahía (Figura 46b), representarían la superficie con menor concentración de clorofila-a y menor variación a lo largo del año, debido a un mayor intercambio con las aguas del exterior de la bahía, lo que representaría una condición de mayor influencia “oceánica”.

Las áreas 4 y 5 que se localizan cerca de la costa al norte de la bahía y al sur entre Punta María y Punta Santa Rosalía, representan la región donde se encuentra alta concentración de clorofila, principalmente como resultado de la influencia de surgencias costeras generadas frente a Punta Canoas.

Las áreas 3 y 6 representadas mayormente en la región costera al sur de la bahía, son zonas influenciadas por las lagunas costeras Ojo de Liebre y Guerrero Negro, las cuales por su menor intercambio con el océano abierto mantienen condiciones más extremas de temperatura y salinidad y baja concentración de clorofila a lo largo del año.

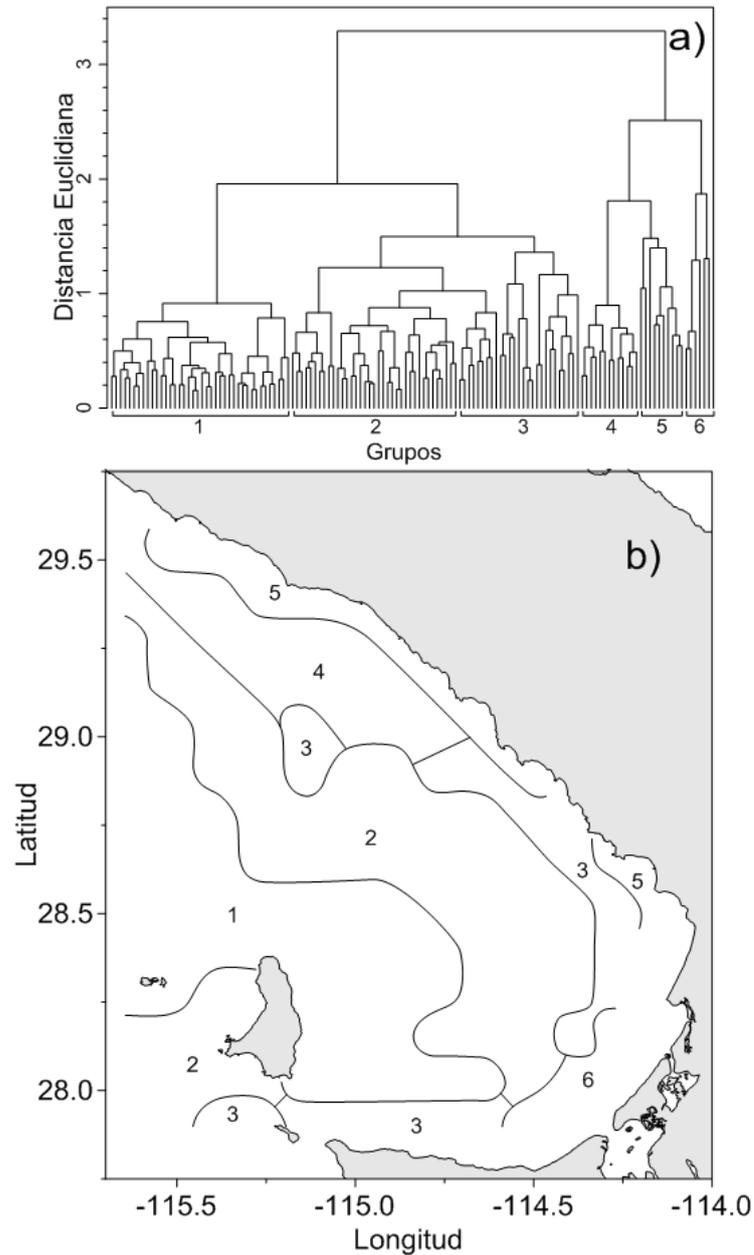


Figura 46. Índice de similitud de CHL obtenida de sensores remotos para la serie de tiempo 1997-2012. Dónde: a) Distancia euclidiana; b) índice de similitud espacio-temporal.

5.9 Análisis de correlación

El análisis de correlación no paramétrica de Spearman para los datos *in situ* (Figura 47) entre las variables temperatura-clorofila son significativas ($p=0.004$), con una

correlación negativa ($r=-0.44$); mientras que la relación clorofila-salinidad presentó una correlación positiva ($r=0.41$; $p=0.008$). Similarmente el análisis de correlación para las anomalías de los datos *in situ* (Figura 48), la clorofila y la temperatura mostraron una correlación negativa (-0.5) con una $p=0.001$. Además, la clorofila y la salinidad presentaron una relación positiva (0.41) y estadísticamente significativa ($p=0.007$).

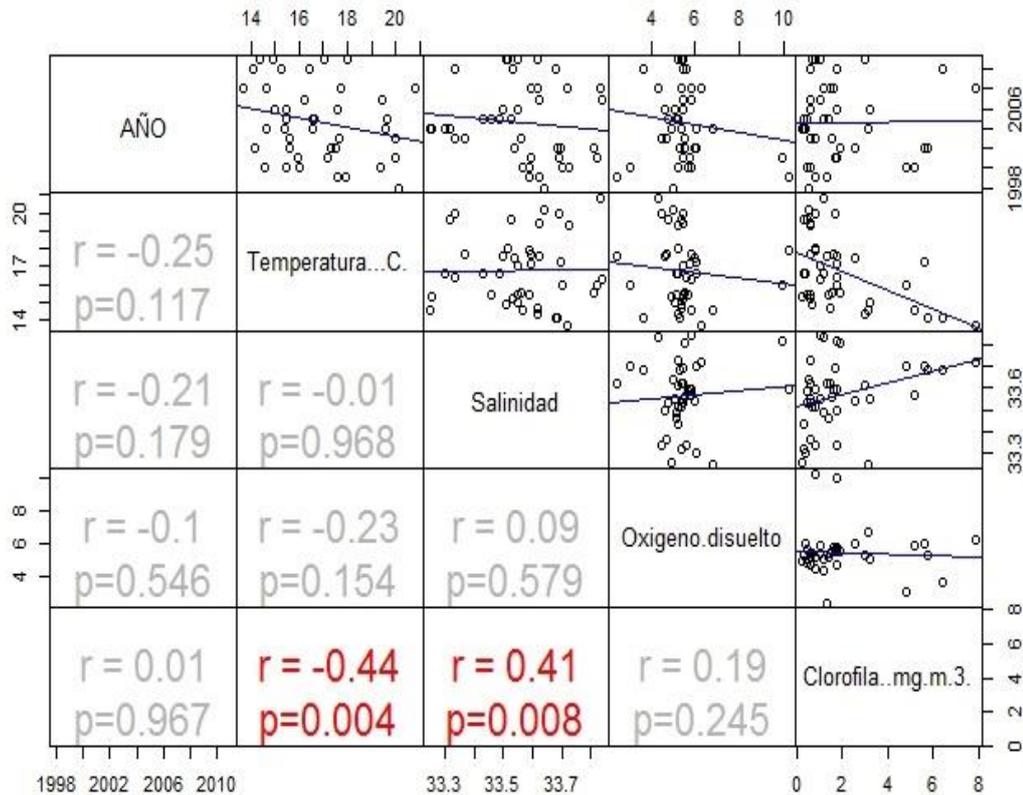


Figura 47. Prueba de correlación de Spearman para las diferentes variables de los datos *in situ* (temperatura ($n=50$), salinidad ($n=50$), oxígeno disuelto ($n=48$) y clorofila ($n=49$)).

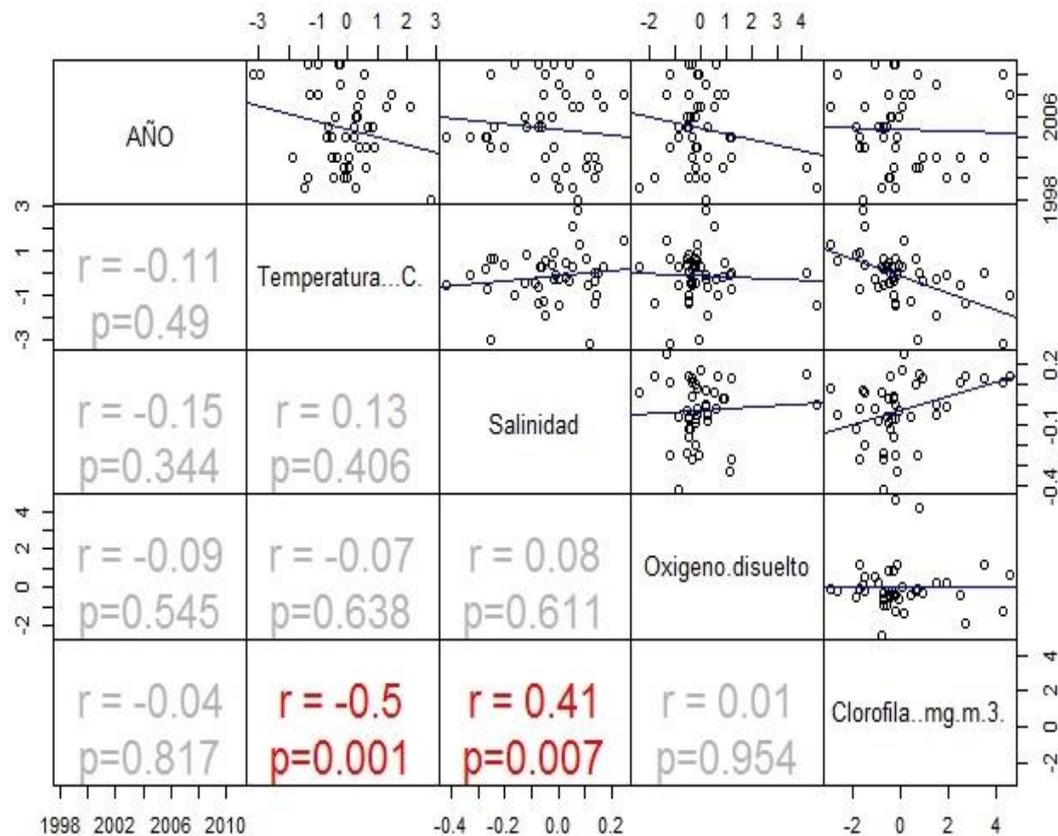


Figura 48. Prueba de correlación de Spearman para las anomalías de la serie de tiempo de los datos *in situ* (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila).

Del análisis de correlación de Spearman para los datos obtenidos de sensores remotos [CHL y TSM], PP y el MEI (Figura 49), las variables PP-año presentaron una relación negativa ($r = -0.3$) estadísticamente significativa ($p < 0.01$). Las variables PP-CHL presentaron una relación positiva ($r = 0.41$) estadísticamente significativa ($p < 0.001$). Las variables de PP y TSM presentaron una relación negativa (-0.2) estadísticamente significativa ($p = 0.009$). La relación MEI-TSM presentaron una relación positiva ($r = 0.3$) estadísticamente significativa ($p < 0.001$).

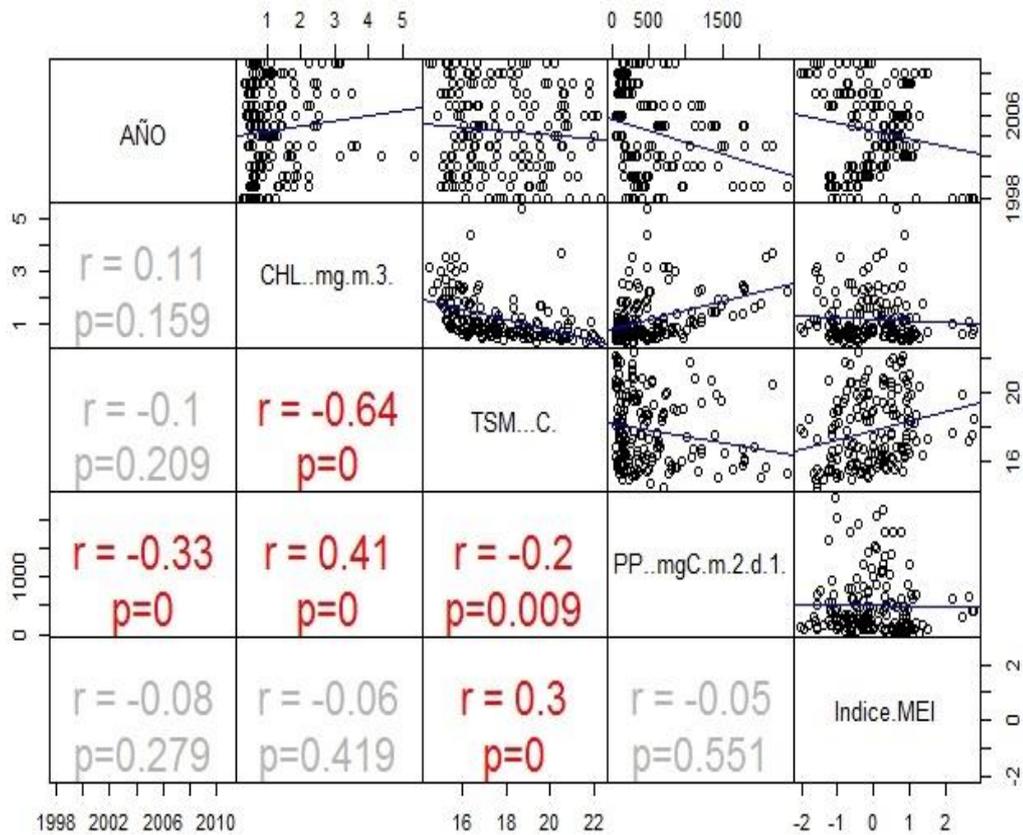


Figura 49. Prueba de correlación de Spearman para las diferentes variables (CHL (mg m^{-3}), TSM ($^{\circ}\text{C}$), PP ($\text{mgC M}^{-2} \text{d}^{-1}$) y el MEI.

En el análisis de correlación de Spearman de las series de tiempo de anomalías (Figura 50) de la CHL y TSM, basada en datos de satélite, de PP y el MEI. Todas las correlaciones fueron significativas excepto la correlación de la PP con el MEI.

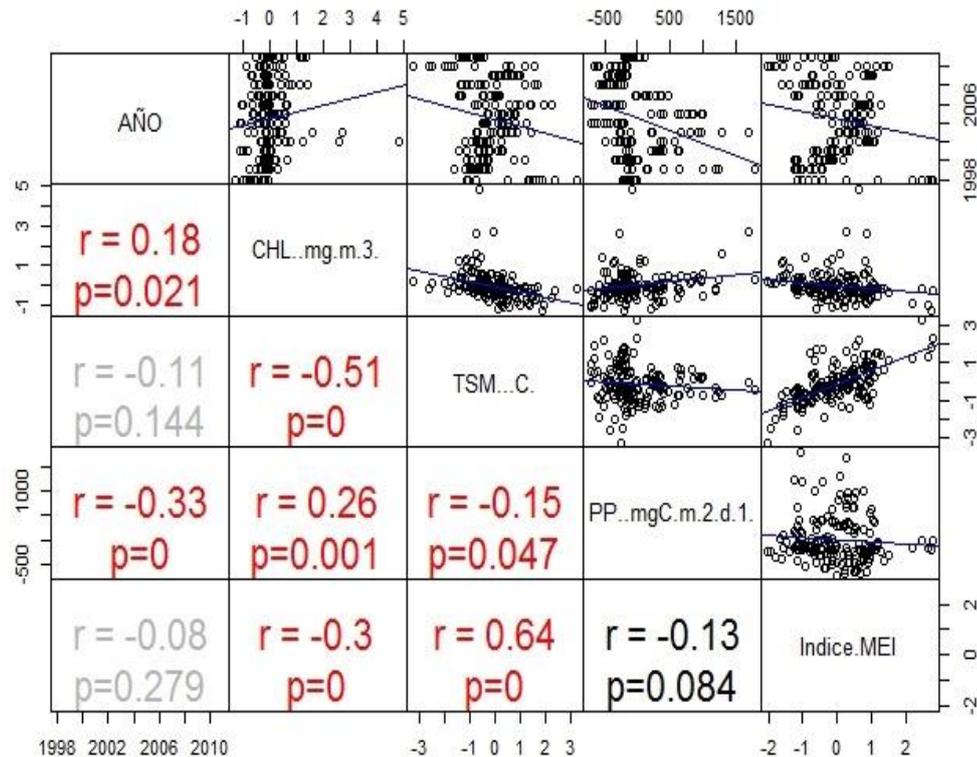


Figura 50. Análisis de correlación de Spearman entre las anomalías de Año, CHL (mg m^{-3}), TSM ($^{\circ}\text{C}$), PP ($\text{mgC M}^{-2} \text{d}^{-1}$) y el índice MEI, durante el período de estudio.

5.10 Comparación entre zonas dentro de BSV

De acuerdo con el índice de similitud se tomó en cuenta como zona Norte (Zona A) el grupo 5 de la figura 45b y como zona centro (Zona B) el grupo 2 y parte del 3, con el propósito de observar diferencias entre zonas y mostrar si el ENSO influye sobre estas regiones de BSV. Se aplicó un ANOVA de 2 vías para observar posibles diferencias en TSM entre zonas de la BSV y los años, con la interacción de estos dos factores (año vs zonas).

Con respecto al análisis de dos vías de las anomalías de CHL (Tabla 4), se observó una diferencia estadísticamente significativa entre años ($p < 0.001$). A pesar de que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre zonas, en la figura 51 se observó una anomalía positiva más alta en la zona B que la zona A en el año 2002.

Tabla 3. Análisis de dos vías de las anomalías de CHL durante el período de estudio, en la tabla se muestran los grados de libertad y el valor de P.

	Grados de libertad	P
Intercepto	1	0.89
ZONA	1	0.93
AÑO	15	-0.001
ZONA*AÑO	15	0.56
Error	336	

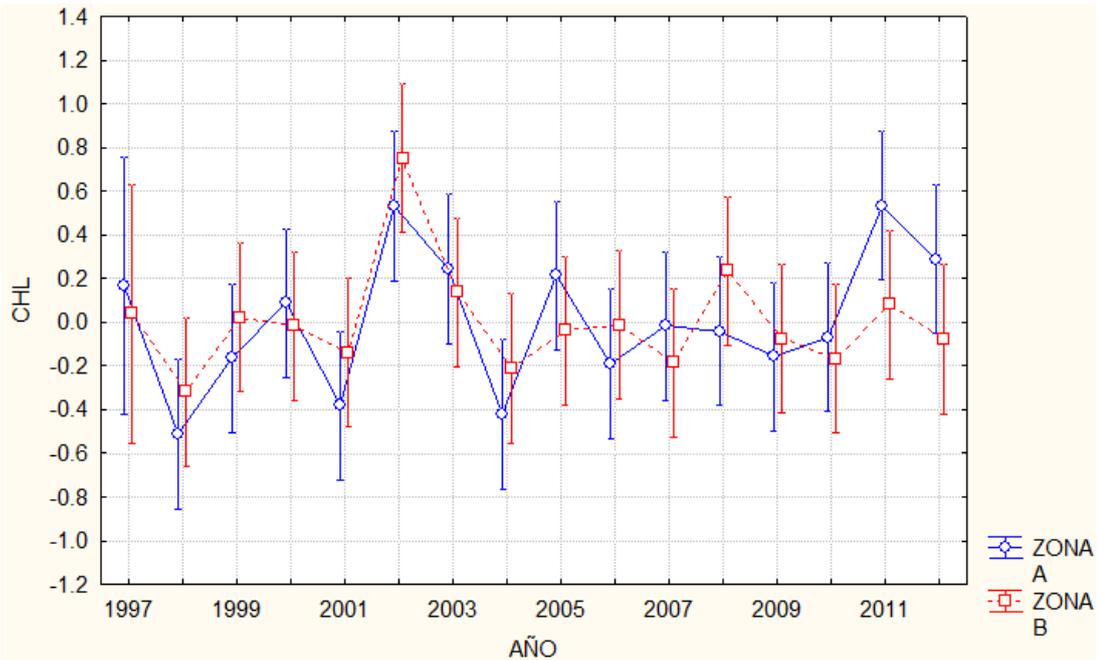


Figura 51. Anomalías promedio de CHL de las zonas A y B durante el período de estudio (1997-2012) con un valor de $P=0.56$, las barras verticales muestran el intervalo de confianza al 95%.

En el análisis de dos vías de las anomalías de la TSM (Tabla 4), también se observaron diferencias estadísticamente significativas entre años ($p=<0.001$). A pesar de que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre zonas, en la figura 52 se muestra una anomalía negativa más alta en la zona B que la zona A sólo para 1999.

Tabla 4. Análisis de dos vías de las anomalías de TSM durante el período de estudio, en la tabla se muestran los grados de libertad y el valor de P.

	Grados de libertad	P
Intercepto	1	1.0
ZONA	1	1.0
AÑO	15	<0.001
ZONA*AÑO	15	0.16
Error	352	

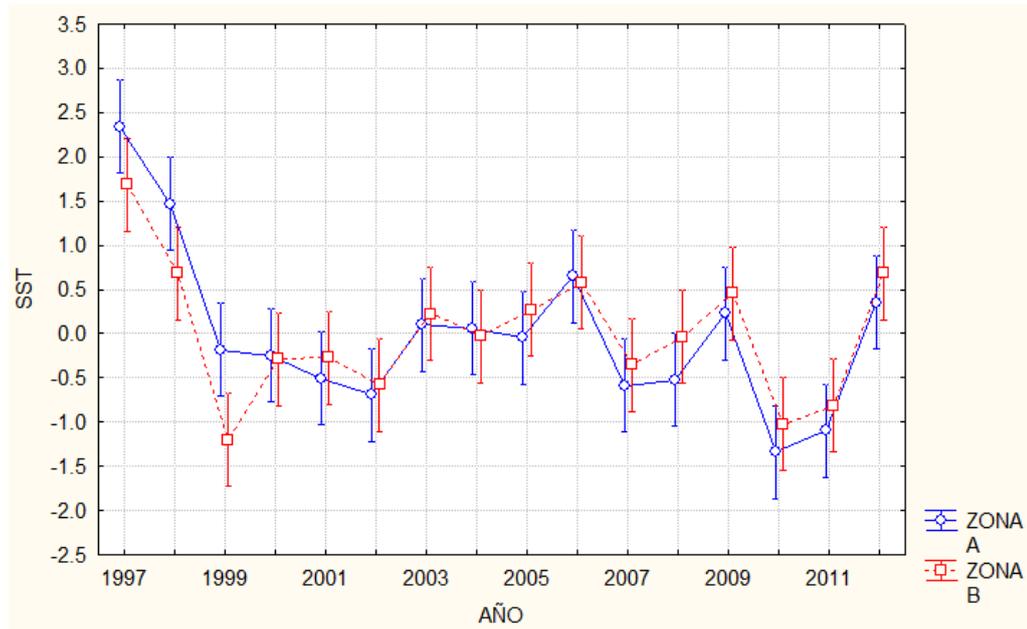


Figura 52. Anomalías de TSM de las zonas A y B por año durante el período de estudio (1997-2012) con un valor de $P=0.16$, las barras verticales muestran el intervalo de confianza al 95%.

Capítulo 6. Discusión

6.1 Variación temporal.

Bahía Sebastián Vizcaíno se encuentra influenciada por los eventos ENSO, aunque mayormente diferenciados por los efectos físicos que los biológicos. El Niño 1997-1998 afectó el ecosistema de BSV, resultando en anomalías positivas tanto de temperatura $>5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 1997 y $>2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 1998 y de salinidad >0.5 para 1997, siendo las más altas del período de estudio (1997-2012). Esta influencia también se observó en la columna de agua con un aumento notable en temperatura de $\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, en comparación con los valores promedio, así como en el hundimiento de la termoclina y la haloclina hasta 100 m de profundidad. Esta tendencia de incremento de temperatura y salinidad fue reportada por Lynn *et al.* (1998) frente a Punta Canoas durante El Niño 1997-1998, con anomalías positivas de temperatura y salinidad ($8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0.8 , respectivamente). Con respecto a los datos derivados de sensores remotos en diciembre de 1997 se obtuvo una alta anomalía positiva de temperatura en BSV ($>1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), con anomalías negativas de CHL ($\sim 1\text{ mg m}^{-3}$), similar a esta tendencia, Herrera *et al.* (2014) obtuvieron anomalías positivas mayores de temperatura ($\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$) y negativas de CHL (~ 2 a 1.5 mg m^{-3}) de datos derivados de sensores remotos frente a Punta Eugenia durante éste mismo período (1997-1998). A partir de esta información, se puede inferir que BSV, por su propia dinámica responde a eventos El Niño disminuyendo los efectos de los procesos físicos y biológicos. La temperatura de la bahía se incrementó a cerca de la mitad con respecto a la zona exterior y la clorofila del fitoplancton disminuyó en la bahía aproximadamente un 50% con respecto a la misa zona. Por otra parte, para la PP únicamente se observó una reducción de apenas el 2%, ya que en general, las anomalías de la PP tuvieron un comportamiento diferente al de las demás variables, ya que esta no tuvo una correlación significativa con el índice MEI.

Con relación al aumento de temperatura y salinidad, durante éste período (1997-1998) se observó la presencia de la especie tropical de zooplancton *E. eximia* fuera de BSV (Lavaniegos y Ambriz-Arreola, 2012). En la vertical se observó una disminución de clorofila de $\sim 0.4\text{ mg m}^{-3}$ en los primeros 50 m de profundidad, hacia valores bajos

positivos a inicios de 1998 y con anomalías positivas en abundancias ($>0.5 \text{ ind m}^{-3}$) de organismos del zooplancton como tunicados, carnívoros y crustáceos (Lavaniegos *et al.*, 2015). De acuerdo a Lluch-Cota *et al.* (1999), durante El Niño 1997-98 en las costas adyacentes a la Península de Baja California se reportaron reducciones importantes en la pesca de erizo, langosta, abulón, caracol, pepino de mar y camarón. Estos autores estiman que en este evento ENSO la producción en los bancos de macroalgas se redujo un 70% y que la producción pesquera en la región disminuyó alrededor de 30%, debido a las fuertes reducciones en la biomasa del fitoplancton y como consecuencia de los cambios en la base de la cadena trófica (fitopláncton).

Los datos de sensores remotos durante diciembre de 1998 se presentaron una anomalía negativa de temperatura ($-1 \text{ }^\circ\text{C}$) y una anomalía negativa de CHL (-0.05 mg m^{-3}). De acuerdo con Herrera *et al.* (2014), la ligera atenuación (disminución) de la temperatura, además de las anomalías de clorofila cercanas al promedio calculadas frente a Punta Eugenia durante 1998-1999, fueron el resultado de la fuerte y prolongada influencia del evento El Niño 1997-1998 en la región. Durante el año 1999 se observó un rango de temperatura ($15 \text{ a } 20 \text{ }^\circ\text{C}$) similar al rango del campo superficial temperatura ($15 \text{ a } 22 \text{ }^\circ\text{C}$) que corresponde a las salida del modelo ROMS en la página del proyecto Oceanografía de los Mares Mexicanos (omm.cicese.mx). Durante este mismo año (1999), se observó la disminución de la temperatura y una anomalía negativa de temperatura superficial de baja magnitud (-0.3°C) y el aumento de la clorofila con una anomalía positiva de Chl-a superficial ($>0.5 \text{ mg m}^{-3}$), como resultado de la intensificación del viento durante éste periodo (Hayward *et al.*, 1999), lo que favoreció las surgencias costeras y el aporte de agua con menor temperatura. En enero de 1999 caracterizado por un evento La Niña se observó un muy alto incremento de PP y durante marzo se triplicó el valor promedio de ese mes ($599 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), el valor de PP durante primavera de ese año fue similar al reportado por Sosa-Ávalos *et al.* (2010) para la zona IMECOCAL, con un promedio regional en la zona costera de $516 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a causa de la fuerte intensificación de las surgencias costeras estacionales y como consecuencia de la influencia de La Niña durante ese año (Sosa-Ávalos *et al.*, 2010).

Debido al evento La Niña (1998-1999), en octubre de 1998 frente a BSV se reportó la presencia de organismos del zooplancton como *T. pacífica*, aunque todavía hubo cierta dominancia de *E. eximia* (Lavaniegos y Ambriz-Arreola, 2007). Otro resultado

de las bajas temperaturas frente a Baja California fue el retraso en la eclosión de las larvas de langosta *P. interruptus* (Hayward *et al.*, 1999), lo que sugiere que esta especie ha desarrollado estrategias reproductivas para asegurar un reclutamiento exitoso en un ambiente tan dinámico como la región IMECOCAL (Hernández-Rivas *et al.*, 2010). Las condiciones del evento La Niña 1998-1999 propiciaron el aumento de la población de anchoveta con una alta abundancia de huevos durante el otoño (Hayward *et al.*, 1999), ya que en condiciones normales durante esta estación del año regularmente se recolecta una baja abundancia de huevos este pez pelágico.

Como una respuesta regional a las condiciones persistentes de La Niña desde 1999 hasta casi 2003 (Hayward *et al.*, 1999) y al incremento del esfuerzo del viento durante 2002 (Herrera *et al.*, 2014) que promueven la intensificación de las surgencias costeras (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010a; Espinosa-Carreón *et al.*, 2015), durante la primavera de 2002 propició el aumento de la biomasa del fitoplancton ($>2 \text{ mg m}^{-3}$) y una anomalía negativa de TSM ($\sim 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), este incremento de clorofila en 2002 fue también reportado por Herrera *et al.* (2014), quienes calcularon en 2002 las mayores anomalías positivas de CHL (1.8 a 2 mg m^{-3}) dentro de su periodo de estudio. La drástica disminución en la biomasa del fitoplancton a finales de 2003 estuvo asociada con la influencia del ingreso anómalo de Agua Subártica (ASA) en la región de Baja California (Espinosa-Carreón *et al.*, 2015), ya que se obtuvieron anomalías negativas de salinidad en ese período descritas también por Gaxiola-Castro *et al.* (2008). Los valores de temperatura ($13\text{-}15^{\circ}\text{C}$) y salinidad (33.7) que Venrick *et al.* (2003) reportaron para la región frente a Punta Canoas a 10 m de profundidad, con concentraciones altas de clorofila-a ($>8 \text{ mg m}^{-3}$), coinciden con lo observado en el presente trabajo.

Durante inicios de 2003 bajo condiciones de un evento El Niño “débil o moderado”, la temperatura a 10 m de profundidad aumentó 1°C por sobre la temperatura promedio. No se cuenta con información de clorofila *in situ* durante este mes, aunque en otros sectores de la CC se observó que la clorofila disminuyó en promedio ($\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$) para enero y febrero de 2003 (Venrick *et al.*, 2003). A inicios de 2003 se observó una disminución de aproximadamente 60% en PP durante febrero, contrario a esto se observaron anomalías positivas de baja magnitud (0.1 mg m^{-3}) de biomasa del fitoplancton, resultado de la intensificación de surgencias costeras durante éste período en la CC frente a Baja California, disminuyendo la temperatura a 10 m de

profundidad ($\sim 15^{\circ}\text{C}$). En general, en los El Niño's débiles como el de 2003 el efecto de las surgencias costeras en la región de Punta Canoas atenúa el posible impacto de las condiciones oceanográficas derivadas de un El Niño. Durante la primavera de 2003 y frente a Baja California la biomasa del fitoplancton y el volumen del zooplancton estuvieron sólo ligeramente por debajo de los promedios climatológicos (Venrick *et al.*, 2003).

Contrario al evento de El Niño 1997-1998, El Niño 2004 no pareció tener un efecto importante en los procesos físico-biológicos de la CC (Goericke *et al.*, 2005), aunque en dicho estudio no se documentaron suficientemente sus efectos para Baja California. Particularmente, en BSV la disminución de temperatura y principalmente de salinidad se debió a que la región sur de la CC estuvo influenciada por el ingreso anómalo del ASA desde al año 2002 (Espinosa-Carreón *et al.*, 2015), afectando en forma muy importante las condiciones ambientales de BSV.

La característica más relevante durante el evento El Niño 2006-2007 en la CC frente a Baja California, fue la clara transición a condiciones más cálidas a partir de abril de 2006 (Goericke *et al.*, 2007), en este mes se observaron muy leves eventos de surgencias frente a punta Canoas, que influenciaron ligeramente las condiciones de la bahía con menor temperatura y mayor clorofila al menos hasta frente a Isla de Cedros. Similar a esta tendencia, Herrera *et al.* (2014) mostraron durante este evento El Niño (2006-2007) anomalías positivas en temperatura ($\sim 2^{\circ}\text{C}$) frente a Punta Eugenia, sin un efecto considerable en clorofila.

Debido a que a partir del verano de 2007 hasta inicios de 2009 el SCC estuvo dominado por condiciones La Niña y por la intensificación de los eventos de surgencias frente a la costa de Baja California (McClatchie *et al.*, 2009), en BSV se observaron anomalías positivas de Chl-*a* a 10 m de profundidad (0.1 a 1.5 mg m^{-3}). Durante La Niña 2008 hubo predominio de células grandes ($> 8.0\ \mu\text{m}$) y de alta biomasa en zonas cercanas a la costa como resultado de las surgencias costeras durante la primavera (a 50 km de la costa; Martínez Almeida *et al.*, 2014). En este mismo periodo se reportó una fuerte anomalía positiva (+90 %) de clorofila integrada en la columna de agua frente a las costas de Baja California (McClatchie *et al.*, 2009). Como posible consecuencia de esta anomalía positiva de clorofila, entre 2005 y 2008 hubo un importante incremento del volumen del zooplancton, sobre todo durante

invierno y primavera, lo cual estuvo relacionado con la intensificación de las surgencias costeras, con una abundancia alta de copépodos $>40 \text{ ind m}^{-3}$ y menor de eufáusidos ($<15 \text{ ind m}^{-3}$) (McClathcie *et al.*, 2009).

En 2008 no se observó un aumento en la población de anchoveta en el SCC (McClathcie *et al.*, 2009) y durante el evento La Niña 2008 en Bahía Magdalena se reportó el descenso en las capturas de la sardina del Pacífico *S. sagax* (Melo-Barrera *et al.*, 2010). Estos autores mencionan que éste no debe ser visto como un decremento sistemático en la población de sardina, ya que los pelágicos menores presentan amplias fluctuaciones interanuales y estacionales. En la Corriente de California, *S. sagax* es el pez pelágico más importante en términos de abundancia, afectando su disminución en las capturas de manera importante a la industria sardinera nacional. Una de las características principales de esta especie es su plasticidad, lo que le permite responder de manera rápida a los cambios en las condiciones del ambiente (Melo-Barrera *et al.*, 2010).

En verano de 2010 inició un evento La Niña que afectó a la zona de la Corriente de California (Bjorkstedt *et al.*, 2012). A pesar de que no se cuenta con mucha información de la columna de agua para BSV, durante octubre de 2010 se observó el aumento de la termoclina a 10 m de profundidad, causa este evento La Niña se observaron anomalías negativas bajas de temperatura superficial en la bahía ($<0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y el incremento de PP de apenas un 26%, además se observaron anomalías positivas de Chl-*a* en la superficie ($>1 \text{ mg m}^{-3}$). Durante enero de 2011 en BSV, la persistencia de baja salinidad y temperatura debido al evento La Niña a inicios de 2011, parece ser el principal factor ambiental que influenció en la anómala baja abundancia de *N. simplex* en BSV (García-Rey, 2014). A diferencia de las anomalías negativas de clorofila *in situ*, se observaron anomalías positivas de CHL ($>0.5 \text{ mg m}^{-3}$); debido a que las observaciones de clorofila *in situ* derivadas de los cruceros IMECOCAL no incluyen puntos de muestreo cercanos a la costa que pudieran contener zonas de alta clorofila. Al utilizar datos de imágenes de sensores remotos con alta resolución espacial (1x1 km) ofrecen la ventaja de que incluyen el área cercana a la costa dentro de BSV, que como se observó en otros años La Niña se encuentra influenciado por la intensificación de la surgencias costeras generadas frente a Punta Canoas.

6.2 Variación espacial

Se ha reportado que BSV es una de las zonas de surgencias costeras más intensas y productivas de la Corriente de California, principalmente al norte de la bahía (Amador-Buenrostro *et al.*, 1995; Palacios-Hernández *et al.*, 1996), en el caso de la CHL, la zona frente a Punta Canoas hasta el sur de Punta San Antonio representan la región donde se producen las surgencias costeras que se intensifican o se relajan de acuerdo a la estación del año, además la TSM mensual mostró que la variación espacial y estacional es relativamente homogénea en toda la bahía, se definen áreas que gradualmente van de aguas más frías a aguas más cálidas desde la región de surgencias al noroeste de la bahía hacia el sureste de menor influencia de las mismas. El área del centro presentó la superficie con menor concentración de clorofila-*a*, y TSM relativamente cálidas durante la mayor parte del año.

Debido a la posible influencia de los procesos externos en BSV, se realizó una comparación entre zona norte y zona centro de BSV, para poder observar si El Niño y La Niña influenciaban la variabilidad espacial dentro de la bahía. A partir de este análisis no se observaron diferencias significativas entre zonas, tanto para la CHL como para la SST, pero si se observaron diferencias entre algunos años, como en el caso de julio de 2002 en el que se observó una diferencia de 2 mg m^{-3} entre la zona Norte y la zona Centro, con una mayor concentración de CHL en la zona centro. Esto puede explicarse como una respuesta regional debido al giro anticiclónico evidente hacia el centro de BSV, que a diferencia de las condiciones normales (aguas cálidas), acarrió agua con menor temperatura como consecuencia de las condiciones persistentes de La Niña a partir de 1999 que promueven el incremento de las surgencias costeras en la zona de Punta Canoas (Herrera *et al.*, 2014), lo cual propició el transporte de agua más fría y rica en nutrientes.

Capítulo 7. Conclusiones

En el periodo estudiado (1997-2012) BSV se observó una estacionalidad muy marcada, con surgencias costeras durante primavera y verano. Con altas temperaturas de julio a noviembre (19-21 °C) y bajas de diciembre a junio (15-17 °C). La clorofila presenta una menor biomasa de agosto a enero (0.6- 0.9 mg m⁻³) y se incrementa debido a las surgencias costeras de marzo a julio (1.7-2 mg m⁻³). Los mayores valores de PP se presentaron de marzo a agosto (496-685 mg C m⁻² d⁻¹), mientras que los menores en septiembre a febrero (219-423 mg C m⁻² d⁻¹).

El Niño 1997-1998 tuvo un efecto positivo en la temperatura, para los datos *in situ* y los derivados de sensores remotos, además de en la salinidad, siendo los más altos del período de estudio (1997-2012).

El Niño 1997-1998 influyó en la columna vertical con el hundimiento de la termoclina y la haloclina hasta 100 m de profundidad.

Durante El Niño 1998 las anomalías de clorofila a 10 m de profundidad mostraron valores cercanos al cero (0.2 mg m⁻³). Contrario a esto, se observó una anomalía negativa de baja magnitud en la CHL satelital (-0.2 mg m⁻³).

En general, las anomalías de la PP tuvieron una correlación muy baja con la TSM ($r=-0.2$), mostrando un comportamiento diferente al de las demás variables. En enero de 1998 durante el evento El Niño 1997-1998 se observó una anomalía baja de PP con una reducción de apenas el 2%.

En enero de 1999 caracterizado por un evento La Niña se observó un muy alto incremento de PP y durante marzo se triplicó el valor promedio de ese mes (599 mg C m⁻² d⁻¹)

Como una respuesta regional a las condiciones persistentes de La Niña desde 1999 hasta casi 2003 y al incremento del esfuerzo del viento durante 2002 que promueven la intensificación de las surgencias costeras, durante la primavera de 2002 propició el

aumento de la biomasa del fitoplancton (4.8 mg m^{-3}) y una anomalía negativa de TSM ($-0.2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Como resultado del incremento del esfuerzo del viento durante 2002 frente a Baja California que promovió la intensificación de las surgencias costeras, en BSV durante la primavera de ese año se generó una ligera anomalía negativa de TSM ($\sim 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$) y una muy alta anomalía positiva de CHL ($>5 \text{ mg m}^{-3}$), siendo la mayor del periodo de estudio.

En general, en los El Niño's débiles como el de 2003 el efecto de las surgencias costeras en la región de Punta Canoas atenúa el posible impacto de las condiciones oceanográficas derivadas de un El Niño.

Durante el evento El Niño 2006-2007La clara transición a condiciones más cálidas a partir de abril de 2006 se observaron muy leves eventos de surgencias frente a punta Canoas, que influenciaron ligeramente las condiciones de la bahía con menor temperatura y mayor clorofila al menos hasta frente a Isla de Cedros

Debido a la influencia del evento La Niña 2007-2009 y por la intensificación de los eventos de surgencias en BSV se observaron anomalías positivas de Chl-a a 10 m de profundidad (0.1 a 1.5 mg m^{-3}), con la termoclina mucho más somera entre 0 y 30 m de profundidad y un descenso de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ en la temperatura a ~ 50 m de profundidad.

A partir de 2008 se obtuvieron anomalías negativas de PP ($202 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a $583 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), dominadas por condiciones La Niña. Estas anomalías negativas perduraron hasta 2010, con una disminución de PP de hasta el 50% en abril de ese año.

A causa este evento La Niña 2010, se presentaron anomalías negativas de alta magnitud de temperatura superficial en la bahía ($-3 \text{ }^\circ\text{C}$), se observó el aumento de la haloclina a 10 m de profundidad, en octubre se calcularon anomalías positivas en Chl-a superficial ($>1 \text{ mg m}^{-3}$).

A principios de 2011 la termoclina se elevó aproximadamente 10 m y la temperatura disminuyó cerca de 2.0 °C por encima de los 50 m de profundidad como resultado de la intensificación de surgencias frente a Punta Eugenia.

Las intensas anomalías negativas de PP persistentes a partir de 2008 hasta finales de 2010 cesaron a inicios de 2011, con un incremento de apenas un 26%, posiblemente asociado al evento La Niña (2010-2011).

Durante La Niña a inicios de 2011 se observaron anomalías negativas de clorofila *in situ* (-0.3 mg m^{-3}), a diferencia de esto se observaron anomalías positivas de CHL ($>0.5 \text{ mg m}^{-3}$) debido a que las observaciones de clorofila *in situ* derivadas de los cruceros IMECOCAL no incluyen puntos de muestreo cercanos a la costa que pudieran contener zonas de alta clorofila.

La zona frente a Punta Canoas hasta el sur de Punta San Antonio representan la región donde se producen las surgencias costeras que se intensifican o se relajan de acuerdo a la estación del año.

El área del centro presentó la superficie con menor concentración de clorofila-a, y TSM relativamente cálidas durante la mayor parte del año.

A partir de este análisis de similitud no se observaron diferencias significativas entre zonas, tanto para la CHL como para la SST, pero si se observaron diferencias en 2002 para el caso de la CHL en el que se observó una diferencia de 2 mg m^{-3} entre la zona Norte y la zona Centro, aunque no fue significativa, como una respuesta regional debido al giro anticiclónico evidente hacia el centro de BSV, que a diferencia de las condiciones normales (aguas cálidas), acarreoó agua con menor temperatura como consecuencia de las condiciones persistentes de La Niña a partir de 1999.

Lista de referencias bibliográficas

- Amador-Buenrostro, A., Argote-Espinoza, M. L., Mancilla-Peraza, M., y Figueroa-Rodríguez, M. (1995). Variaciones de período corto de la circulación anticiclónica en Bahía Sebastián Vizcaíno. *BC. Ciencias Marinas*, 21, 201-223.
- Ambriz-Arreola, I. (2007). Estudio multivariado de las comunidades de eufáusidos del sector sur de la Corriente de California, durante el ciclo ENSO 1997-1999. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 164 p.
- Barber, R. T., Kogelschartz, J. E. and Chavez, F. P. (1985). Origin of productivity anomalies during the 1982-1983 El Niño. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 26, 65-71.
- Bjorkstedt, E.P., Goericke, R., McClatchie, S., Weber, E., Watson, W., Lo, N., Peterson, B., Emmett, B., Peterson, J., Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Chavez, F., Pennington, J. T., Collins, C. A., Field, J., Ralston, S., Sakuma, K., Bograd, S., Schwing, F. B., Xue, Y., Sydeman, W. J., Thompson, S. A., Santora J. A., Largier, J., Halle, C., Morgan, S., Kim, S. Y., Merkens, K. P. B., Hildebrand, J. A. and Munger, L. M. (2010). State of the California Current 2009–2010: regional variation persists through transition from La Nina to El Nino (and back?). *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 51, 39-69.
- Bjorkstedt, E., Goericke, R., McClatchie, S., Weber, E., Watson, W., Lo, N., Peterson, B., Emmett, B., Brodeur, R., Peterson, J., Litz, M., Gomez Valdez, J., Gaxiola-Castro, G., Lavaniegos, B., Chavez, F., Collins, C. A., Field, J., Sakuma, K., Warzybok, P., Bradley, R., Jahncke, J., Bograd, S., Schwing, F., Campbell, G. S., Hildebrand, J., Sydeman, W., Thompson, S., Largier, J., Halle, C., Kim, S. Y. and Abell, J. (2011). State of the California Current 2010-2011: Regionally variable responses to a strong (but fleeting?) La Niña. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 52, 36–68.
- Bjorkstedt, E. P., Bograd, S. J., Sydeman, W. J., Thompson, S. A., Goericke, R., Durazo, R., Warzybok, P., Bradley, R., Jahncke, J., McClatchie, S., Weber, E., Watson, W., Gaxiola-Castro, G., Lavaniegos, B., Golightly, R. T., Schneider, S. R., Lo, N., Chavez, F. P., Suryan R. M., Gladics, A. J., Horton, C. A., Peterson W. T., Brodeur, R. D., Collins, C. A., Kim S., Auth, T., Fisher, J., Morgan, C., Peterson, J., Hannah, B., Melin, S. R., DeLong, R. L., Largier, J., Field, J., Sakuma, K., Sattertwate, W., O'Farrell, M., Hayes, S., Harding, J. and Abell, J. (2012). State of the California Current 2011–2012: ecosystems respond to local forcing as La Niña wavers and wanes. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 53, 41-76.
- Bograd, S. J., Chereskin, T. K. and Roemmich, D. (2001). Transport of mass, heat, salt, and nutrients in the southern California Current System: Annual cycle and interannual variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 106 (C5), 9255–9275.

- Checkley Jr., D.M., Ayon, P., Baumgartner, T.R., Bernal, M., Coetzee, J.C., Emmett, R., Guevara-Carrasco, R., Hutchings, L., Ibaibarriaga, L., Nakata, H., Oozeki, Y., Planque, B., Schweigert, J., Stratoudakis, Y. and van der Lingen, C., (2009). In: Checkley, D.M., Jr., Alheit, J., Oozeki, Y., Roy, C. (Eds.), *Climate Change and Small Pelagic Fish* (pp. 12–44). Cambridge University Press, Cambridge.
- Checkley, D. M. and Barth, J. A. (2009). Patterns and processes in the California Current System. *Progress in Oceanography*, 83 (1), 49–64.
- De la Cruz-Orozco, M. (2002). Efecto de El Niño 1998 - La Niña 1999 en el oxígeno disuelto de la región Sur de la Corriente de California. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC.
- Durazo, R., Ramírez-Manguilar, A. M., Miranda, L. E. y Soto-Mardones, L. A. (2010). Climatología de variables hidrográficas. Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 2007. En: G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, Editores, "Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California". *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 25-57 p.
- Durazo, R. and Baumgartner, T. R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Progress in Oceanography*, 54 (1), 7-31
- Durazo R., Gaxiola-Castro G., Lavaniegos B. E., Castro-Valdez R., Gómez-Valdés J. and Mascarenhas Jr. A. S. (2005). Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002–2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement, *Marine Science*, 31 (3), 537–552.
- Espinosa-Carreón, T. L., Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., De la Cruz-Orozco, M. E., Norzagaray-Campos, M., and Solana-Arellano, E. (2015). Influence of anomalous subarctic water intrusion on phytoplankton production off Baja California. *Continental Shelf Research*, 92, 108-121.
- Gaxiola-Castro G., Durazo R., Lavaniegos B., De la Cruz-Orozco M.E., Millan-Nunez E., Soto-Mardones L. y Cepeda-Morales J. (2008). Respuesta del ecosistema pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, 34 (2), 263-270.
- Gaxiola-Castro, G., Lavaniegos, B. E., Martínez, A., Castro, R. and Espinosa-Carreón, T. L. (2010 a). Pelagic ecosystem response to climate variability in the Pacific Ocean off Baja California. *Climate Change and Variability. SW Simrad, ME Austin (eds). Sciyo, Croacia*, 163-182 p.
- Gaxiola-Castro, G., Cepeda-Morales, J., Nájera-Martínez, S., Espinosa-Carreón, T. L., De la Cruz-Orozco, M. E., Sosa-Avalos, R., Aguirre-Hernández, E. y Cantú-Ontiveros, J. P. (2010 b). Biomasa y Producción de Fitoplancton. En: G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, Editores, "Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California". *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 59-85 p.

- Goericke, R., Venrick, E., Mantyla A., Bograd S. J., Schwing F. B., Huyer A., Smith R. L., Wheeler P. A., Hooff R., Peterson W. T., Gaxiola-Castro G., Gomez-Valdes J., Lavaniegos B. E., Hyrenbach K. D. and Sydeman W. J. (2004). The state of the California Current, 2003-2004: A rare "normal" year. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 45, 27-59.
- Goericke, R., Venrick, E., Mantyla, A., Bograd, S. J., Schwing, F. B., Huyer, A., Smith, R. L., Wheeler, P. A., Hoff, R., Peterson, W. T., Chavez, F., Collins, C., Marinovic, B., Lo, N., Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., Hyrenbach, K. D. and Sydeman, W. J. (2005). The state of the California Current, 2004–2005: Still cool. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 46, 32–71.
- Goericke, R., Venrick, E., Koslow, T., Sydeman, W. J., Schwing, F. B., Bograd, S. J., Lara-Lara, J. R., Gaxiola-Castro G., Gómez, J. G., Hyrenbach, K. D., Bradley, R. W., Weise, M. J., Harvey, J. T., Collins, C. & Lo, N. C. (2007). The state of the California Current, 2006-2007: regional and local processes dominate. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report*, 48, 33-66.
- Gómez, J. G. (1995). Distribution patterns, abundance and population dynamics of the euphausiids *Nyctiphanes simplex* and *Euphausia eximia* off the west coast of Baja California, Mexico. *Marine Ecology Progress Series*. 119 (1), 63-76.
- Hayward, T. L., Durazo, R., Baumgartner, T. R., Checkley, D. M., Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Hyrenbach, K. D., Mantyla A. W., Mullin M. M., Murphree, T., Schwing, F. B., Smith, P. E. and Tegner, M. J. (1999). The state of the California Current in 1998-1999: transition to cool-water conditions. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 40, 29-62.
- Helm, I., Jalukse, L., Vilbaste, M. and Leito, I. (2009). Micro-Winkler titration method for dissolved oxygen concentration measurement. *Analytica chimica acta*. 648 (2), 167-173.
- Hernández-Rivas, M. E., Peñaloza-Mayorazgo, M. C. y González-Armas, R. (2010) Fase larval de la langosta roja durante 1997–1999. En: G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, Editores, "Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 381-396 p.
- Herrera-Cervantes, H., Lluch-Cota, S. E., Lluch-Cota, D. B. and Gutiérrez-de-Velasco, G., (2014). Interannual correlations between sea Surface temperature and concentration of chlorophyll pigment off Punta Eugenia, Baja California, during different remote forcing conditions. *Ocean Science*, 10 (3), 345-355.
- Hickey, B. M. (1979). The California Current System hypotheses and facts. *Progress in Oceanography*. 8 (4), 191-279.

- Jiménez-Rosenberg, S. P. A., Saldierna-Martínez, R. J., Aceves-Medina, G., Hinojosa-Medina, A., Funes-Rodríguez, R., Hernández-Rivas, M. and Avendaño-Ibarra, R. (2010). Fish larvae off the northwestern coast of the Baja California Peninsula, Mexico. *Check List*, 6 (2), 334-349.
- Larkin, N. K. and Harrison, D. E. (2002). ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: Ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries, and implications. *Journal of Climate*, 15 (10), 1118-1140.
- Lavaniegos, B. E. and Ambriz-Arreola, I. (2012). Interannual variability in krill off Baja California in the period 1997–2005. *Progress in Oceanography*, 97, 164-173.
- Lavaniegos, B. E. (1995). Production of *Nyctiphanes simplex* in Vizcaino Bay, western Baja California. *Jour. Crustacean Biology*, 15 (3), 444-453.
- Lavaniegos, B. E., Jiménez-Pérez, L. C. and Gaxiola-Castro, G. (2002). Plankton response to El Niño 1997–1998 and La Niña 1999 in the southern region of the California Current. *Progress in Oceanography*, 54 (1), 33–58.
- Lavaniegos, B. E. (2014). Pelagic amphipod assemblage associated with subarctic water off the West Coast of the Baja California peninsula. *Journal of Marine Systems*, 132, 1–12.
- Lavaniegos, B. E., Molina-González, O., and Murcia-Riaño, M. (2015). Zooplankton functional groups from the California Current and climate variability during 1997-2013. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. *Oceánides*, 30 (1), 45-62.
- Lluch-Cota, D., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, S., López-Martínez, J., Nevárez-Martínez, M., Ponce-Díaz, G. and Morales, J. (1999). Las pesquerías y El Niño. *Los impactos de El Niño en México. SEP-CoNaCyT-IAI, México DF, Mexico*, 137-178.
- Lynn, R. J. y Simpson, J. J. (1987). The California Current system: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92 (12), 12947–12966.
- Lynn, R. J., Baumgartner, T., Garcia, J., Collins, C. A., Hayward, T. L., Hyrenbach, K. D., Mantyla, A. W., Murphree, T., Shankle, A., Schwing, F. B., Sakuma, K. M. and Tegner, M. J. (1998). The state of the California Current, 1997–1998: transition to El Niño conditions. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 39, 25-49.
- Mancilla-Peraza, M., Palacios-Hernández, E. y López-Castillo, G. (1993). Variabilidad hidrográfica de Bahía Vizcaíno, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 19, 265-284.
- Martínez-Almeida, V. M., Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., & Lara-Lara, J. R. (2014). Phytoplankton size-fractionated chlorophyll-*a* off Baja California during winter, spring, and summer 2008 Clorofila-*a* del fitoplancton separado por

fracciones de tamaño frente a Baja California durante invierno, primavera y verano de 2008. *Hidrobiológica*, 24 (3), 191-206.

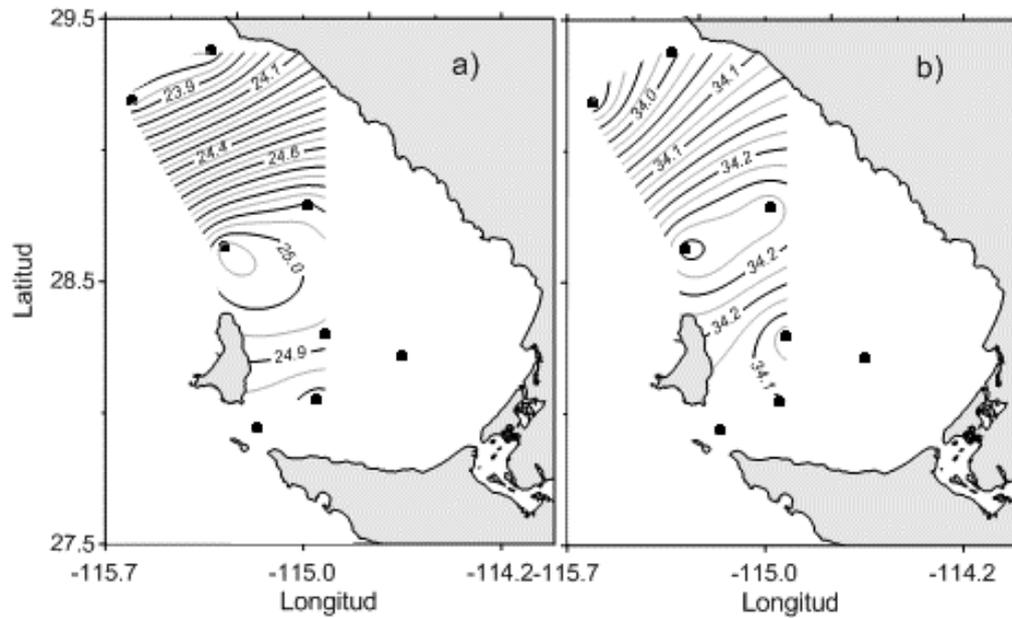
- McClatchie, S., Goericke, R., Schwing, F. B., Bograd, S. J., Peterson, W. T., Emmett R., Charter, R., Watson W., Lo, N., Hill, K., Collins, C., Kahru, M., Mitchell, B. G., Koslow, J. A., Gomez-Valdes J., Lavaniegos, B. E., Gaxiola-Castro, G., Gottschalk, J., L'Heureux, M., Xue, Y., Manzano-Sarabia, M., Bjorkstedt, E., Ralston, S., Field, J., Rogers-Bennett, L., Munger, L., Campbell, G., Merkens, K., Camacho, D., Havron, A., Douglas, A., and J. Hildebrand. (2009). The state of the California Current, spring 2008–2009: Cold conditions drive regional differences in coastal production. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*. 50, 43–68
- McEwen, G. F. (1916). Summary and interpretation of the hydrographic observations made by the Scripps Institution for Biological Research of the University of California 1908 to 1915. *Zoology*, 15, 255-356.
- Melo-Barrera, F. N., Félix-Uraga, R. y Quiñonez-Velásquez, C. (2010). Análisis de la pesquería de *Sardinops sagax* en la costa occidental de Baja California Sur, México, durante 2006-2008. *Ciencia Pesquera*, 18 (2), 33-46.
- Millán-Núñez, E. (2010). Variabilidad interanual del nano microfitoplancton: inviernos 2001–2007. En: G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, Editores, "Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 241-262 p.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2013). Oceanic Niño Index. Recuperado en octubre de 2013 de: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
- Nelson, D. M. and Smith, W. O. (1991). Sverdrup revisited: critical depths, maximum chlorophyll levels, and the control of Southern Ocean productivity by the irradiance-mixing regime. *Limnology and Oceanography*. 36, 1650–1661.
- Oceanografía de los Mares Mexicanos Aplicaciones a la Pesca y Acuicultura. (2013). Recuperado en agosto de 2013 de: <http://omm.cicese.mx/>
- Palacios-Hernández, E., Argote, E. M., Amador, B. A. y Mancilla, P. M. (1996). Simulación de la circulación barotrópica inducida por viento en Bahía Sebastián Vizcaíno, B. C. *Atmósfera*, 9 (3), 171-188.
- Rice, D., Wolman, A. and Braham, H. (1984). The gray whale, *Eschrichtius robustus*. *Marine Fisheries Review*, 46, 7–14.
- Santana-Morales O. (2008). Composición específica de elasmobranquios capturados por la pesca artesanal en Bahía Vizcaíno, B.C., México: Análisis de un registro histórico. Tesis de Maestría en Ciencias en Ecología Marina Centro de Investigación Científico y de Educación Superior de Ensenada, BC. 33-35 p.
- Sosa-Ávalos, R., Gaxiola-Castro, G., Mitchell, B. G. y Cepeda-Morales, J. (2010). Parámetros fotosintéticos y producción primaria estimada a partir de

sensores remotos durante 1999. En: G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, Editores, "Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 319-331 p.

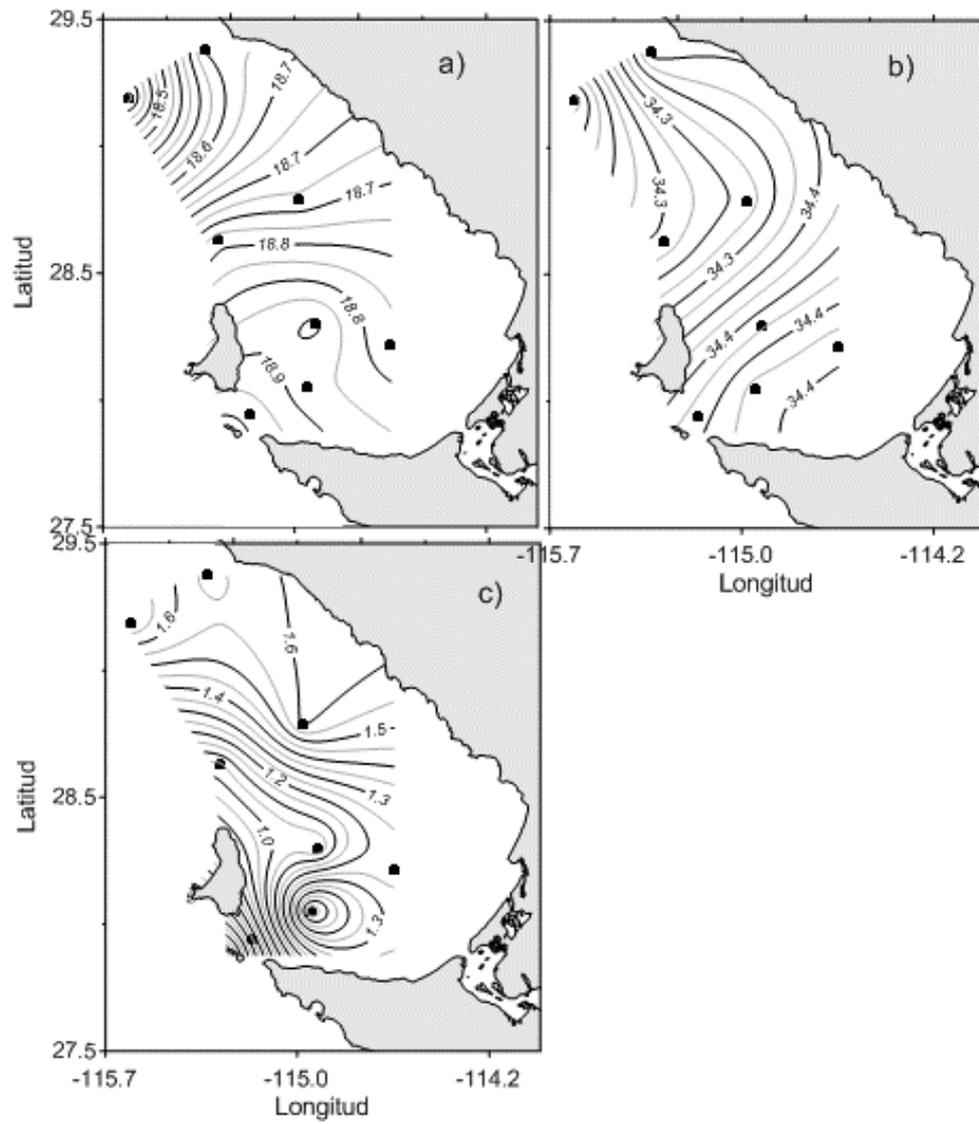
- Venrick, E., Bograd, S., Checkley, D., Cummings, S., Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Hunter, J., Huyer, A., Hyrenbach, K. D., Lavaniegos, B. E., Mantyla, A., Schwing, F. B., Smith, R. L., Sydeman, W. J. and Wheeler, P. A., (2003). The state of the California Current, 2002-2003: tropical and subarctic influences vie for dominance. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 44, 28-60.
- Wells, B. K., Schroeder, I. D., Santora, J. A., Hazen, E. L., Bograd, S. J., Bjorkstedt, E. P., Loeb, V. J., McClatchie, S., Weber, E. D., Watson, W., Thompson, A. R., Peterson, W. T., Brodeur, R. D., Harding, J., Field, J., Sakuma, K., Hayes, S., Mantua, N., Syderman, W. J., Losekoot, M., Thompson, S. A., Largier J., Kim S. Y., Chavez, F. P., Barcelo, C., Warzybok, P., Bradley, R., Jahncke, J., Kim, R., Campbell, G. S., Hildebrand, J. A., Melin, S. R., Delong, R. L., Gomez-Valdes, J., Lavaniegos, B., Gaxiola-Castro, G., Golightly, R. T., Schneider, S. R., Lo, N., Suryan, R. M., Gladics, A. J., Horton, C. A., Fisher, J., Morgan, C., Peterson, J., Daly, E. A., Auth, T. D. and Abell, J. (2013). State of the California Current 2012–13: no such thing as an “average” year. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 54, 37-71.
- Wyllie, J. G. (1960). The water masses of Sebastian Vizcaino Bay. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 8, 83–93.

Anexos

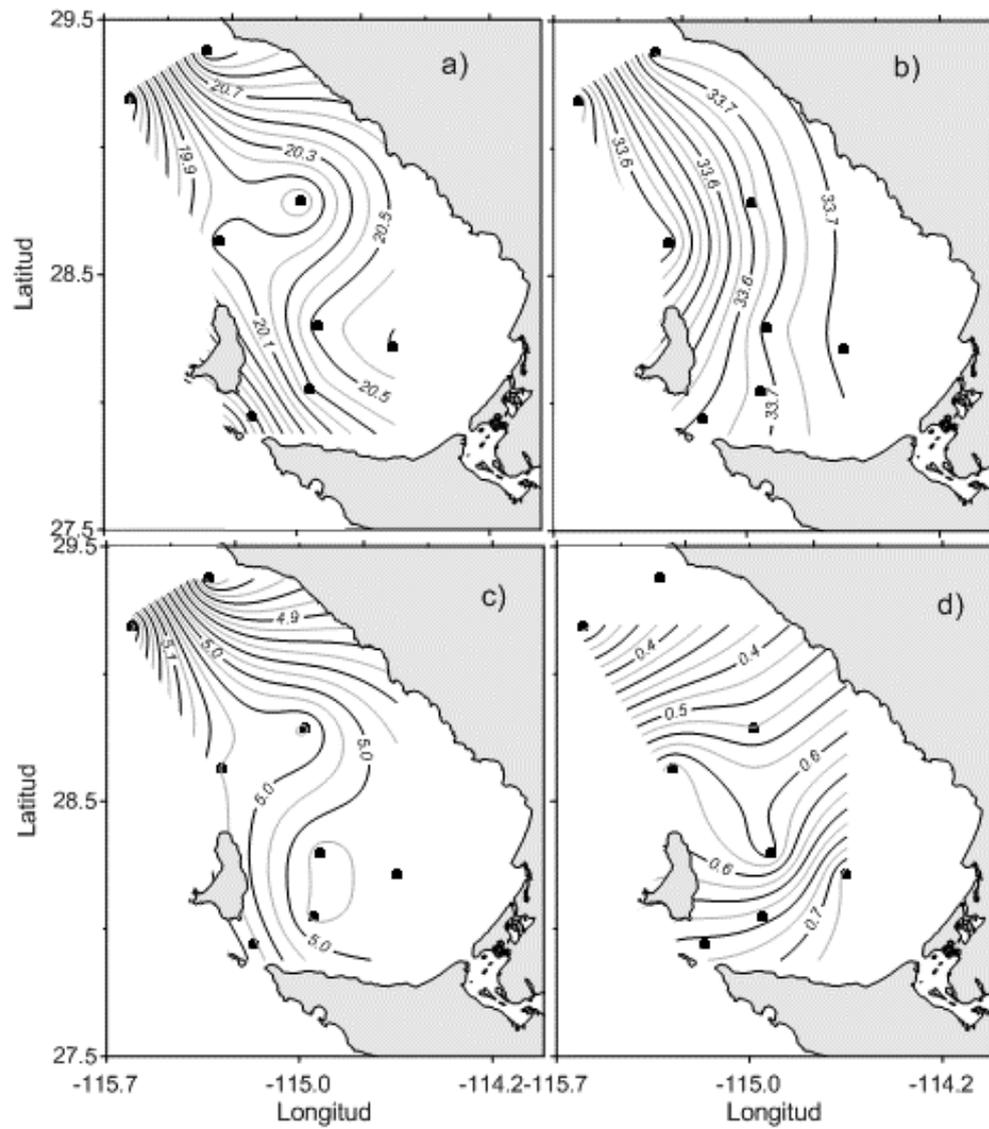
Distribución de las variables *in situ* de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad, oxígeno disuelto (ml l^{-1}) y Chl-a (mg m^{-3}) medidos a 10 m de profundidad de las diferentes campañas oceanográficas del proyecto IMECOCAL durante el período 1997-2012.



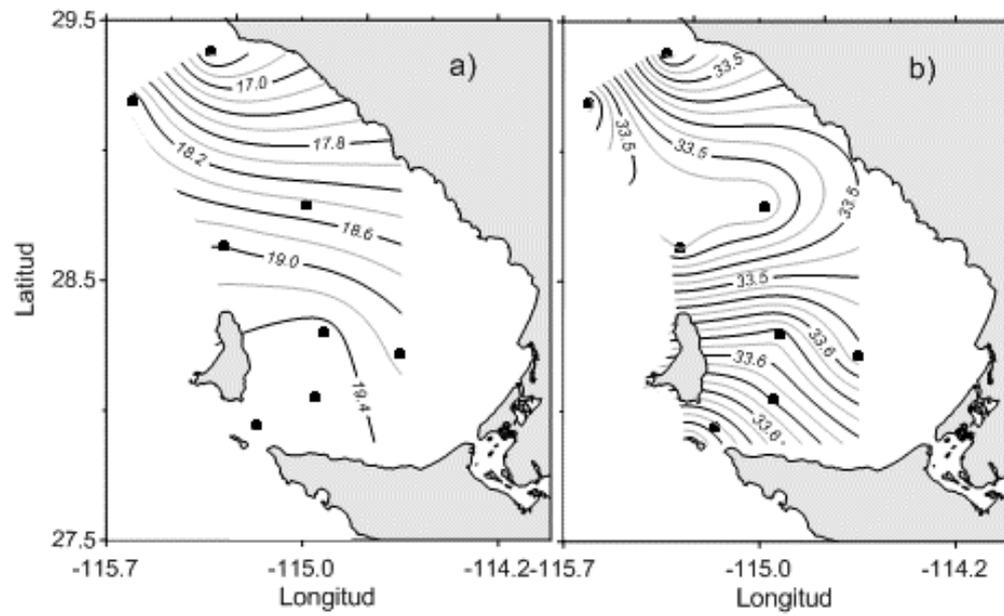
Anexo I. Octubre de 1997 (9710), a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y b) Salinidad.



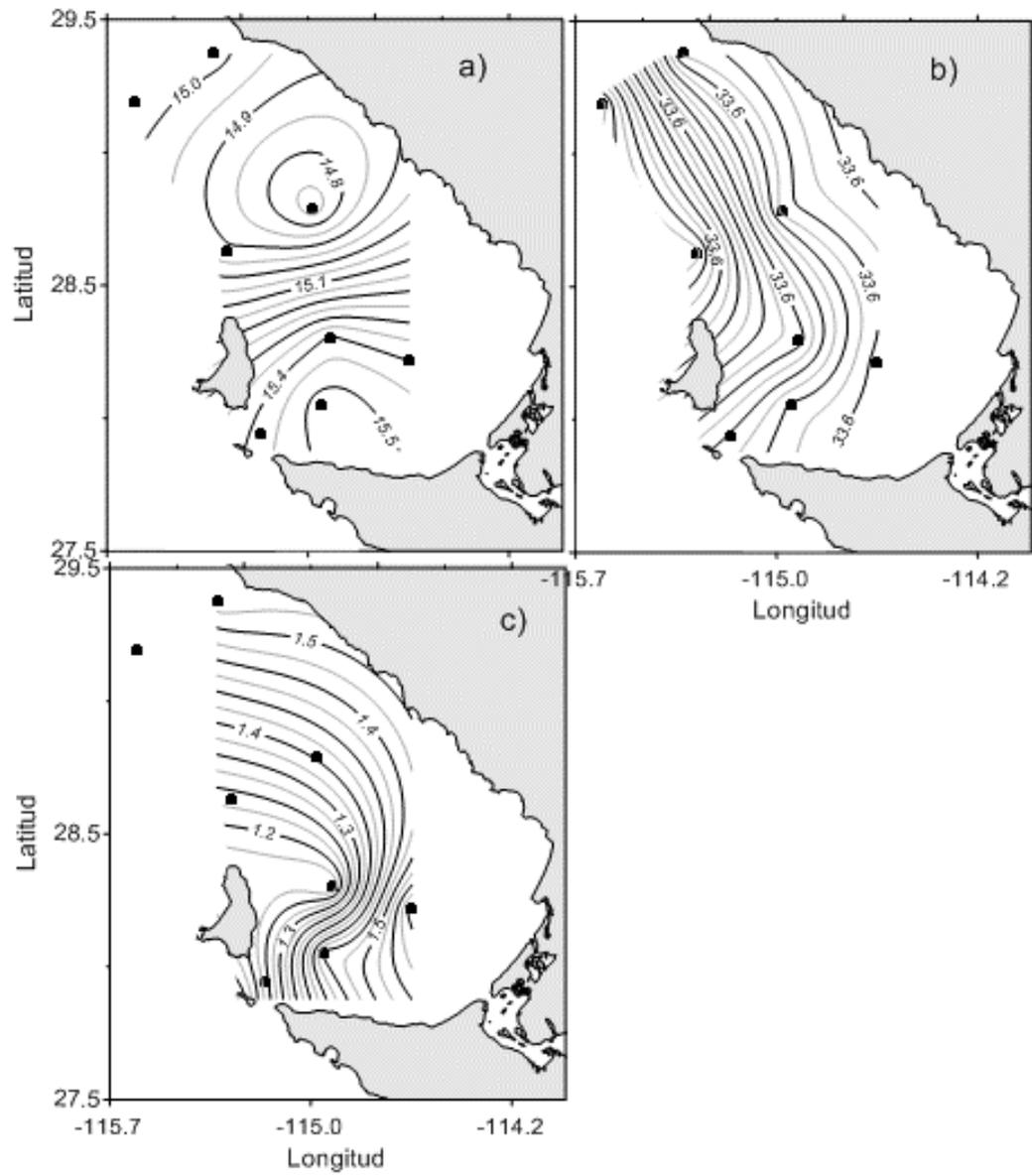
Anexo II. Enero 1998 (9801), a) Temperatura (°C), b) Salinidad y c) chl-a (mg/m³).



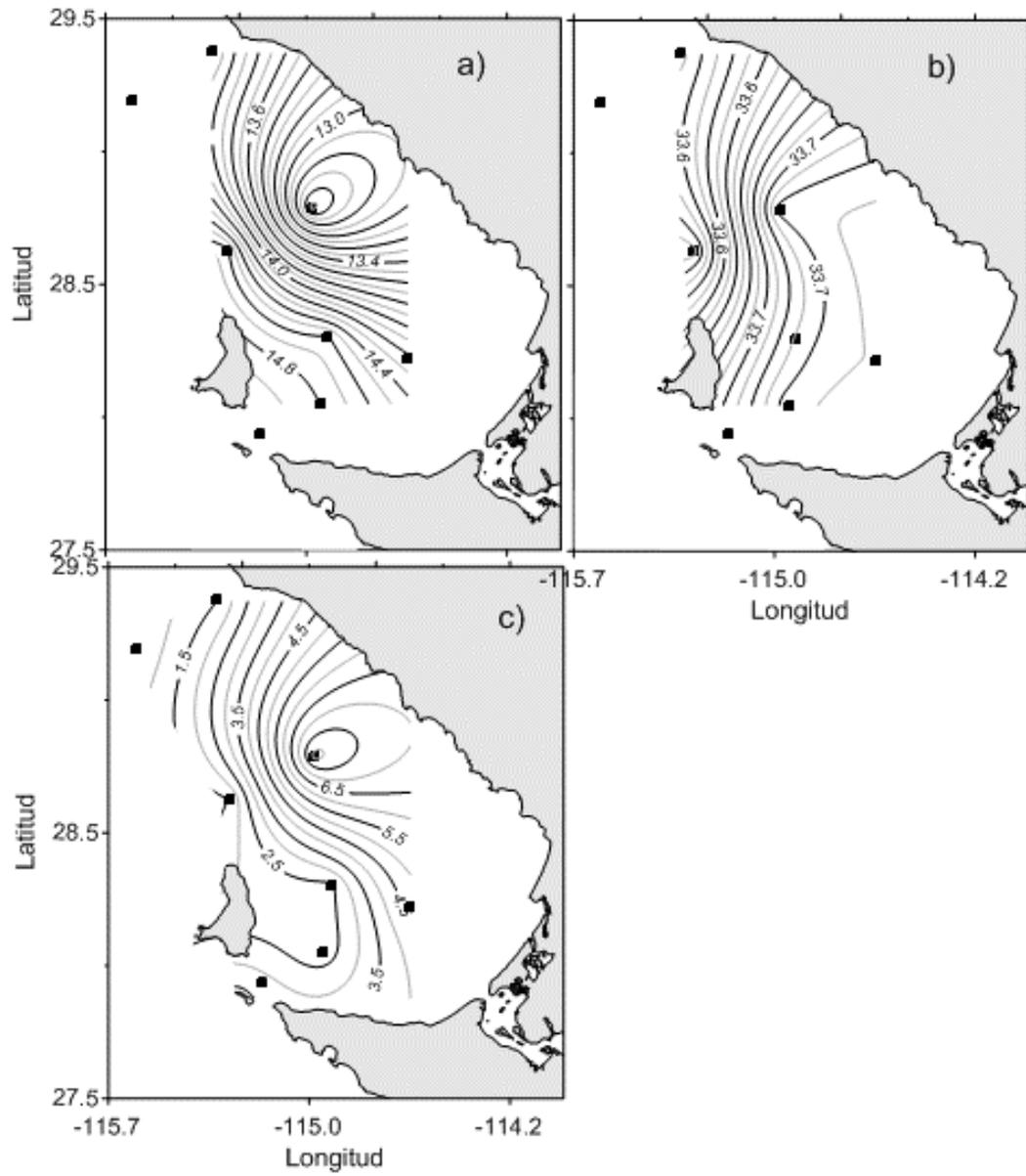
Anexo III. Julio 1998 (9807) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



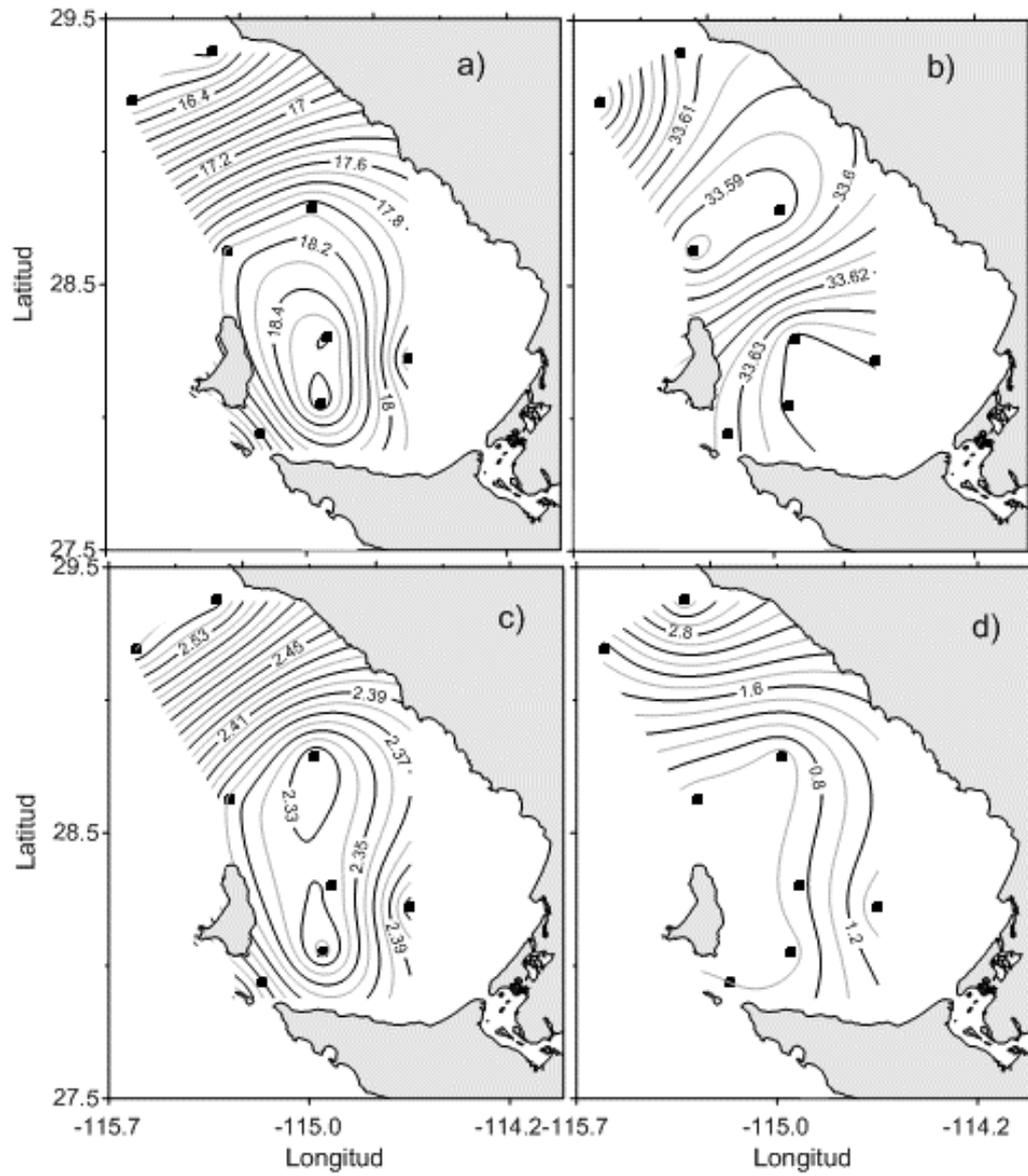
Anexo IV. Octubre de 1998 (9810), a) Temperatura (°C) y b) Salinidad.



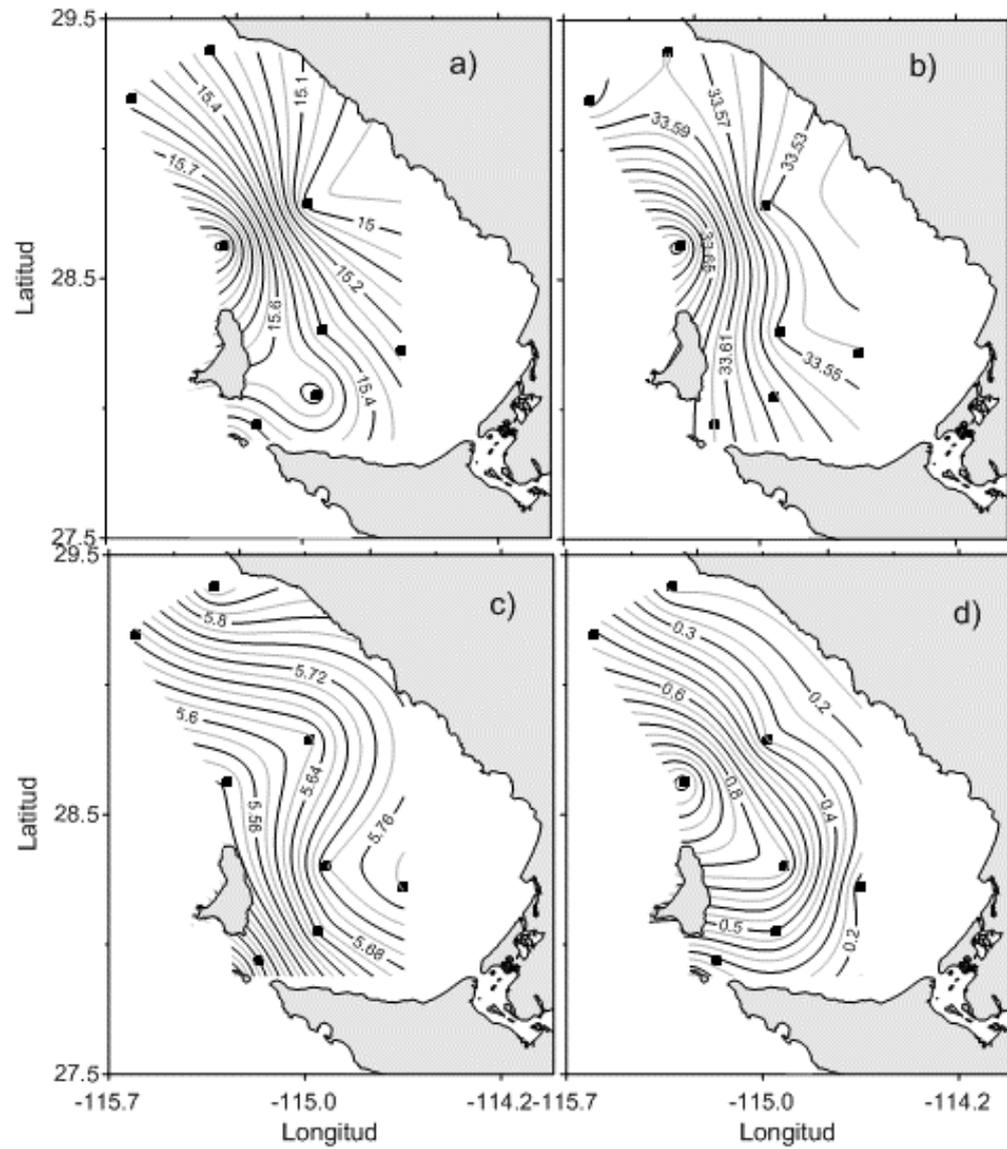
Anexo V. Enero 1999 (9901), a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) Salinidad y c) chl-a (mg/m^3).



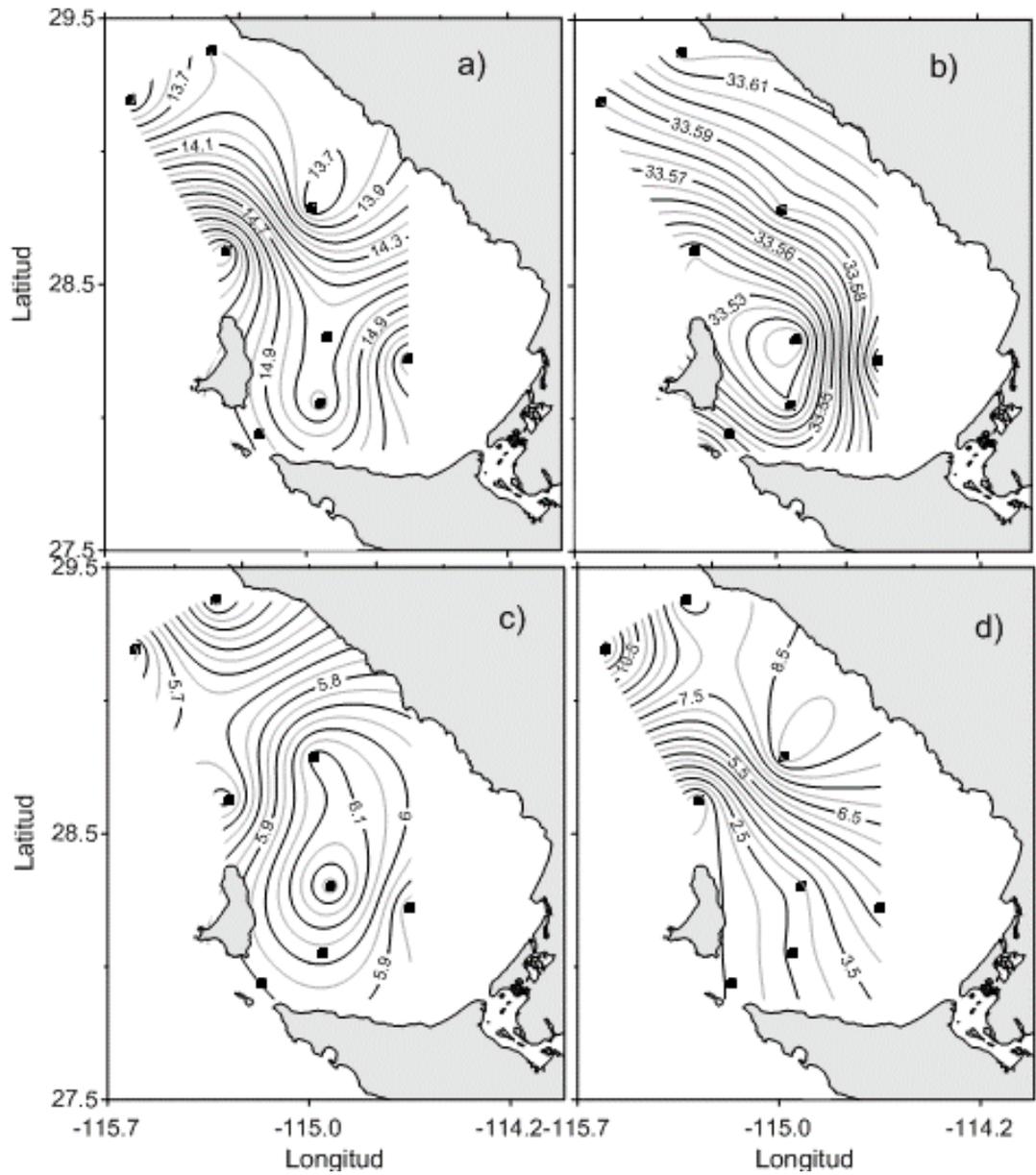
Anexo VI. Abril 1999 (9904), a) Temperatura (°C), b) Salinidad y c) chl-a (mg/m⁻³).



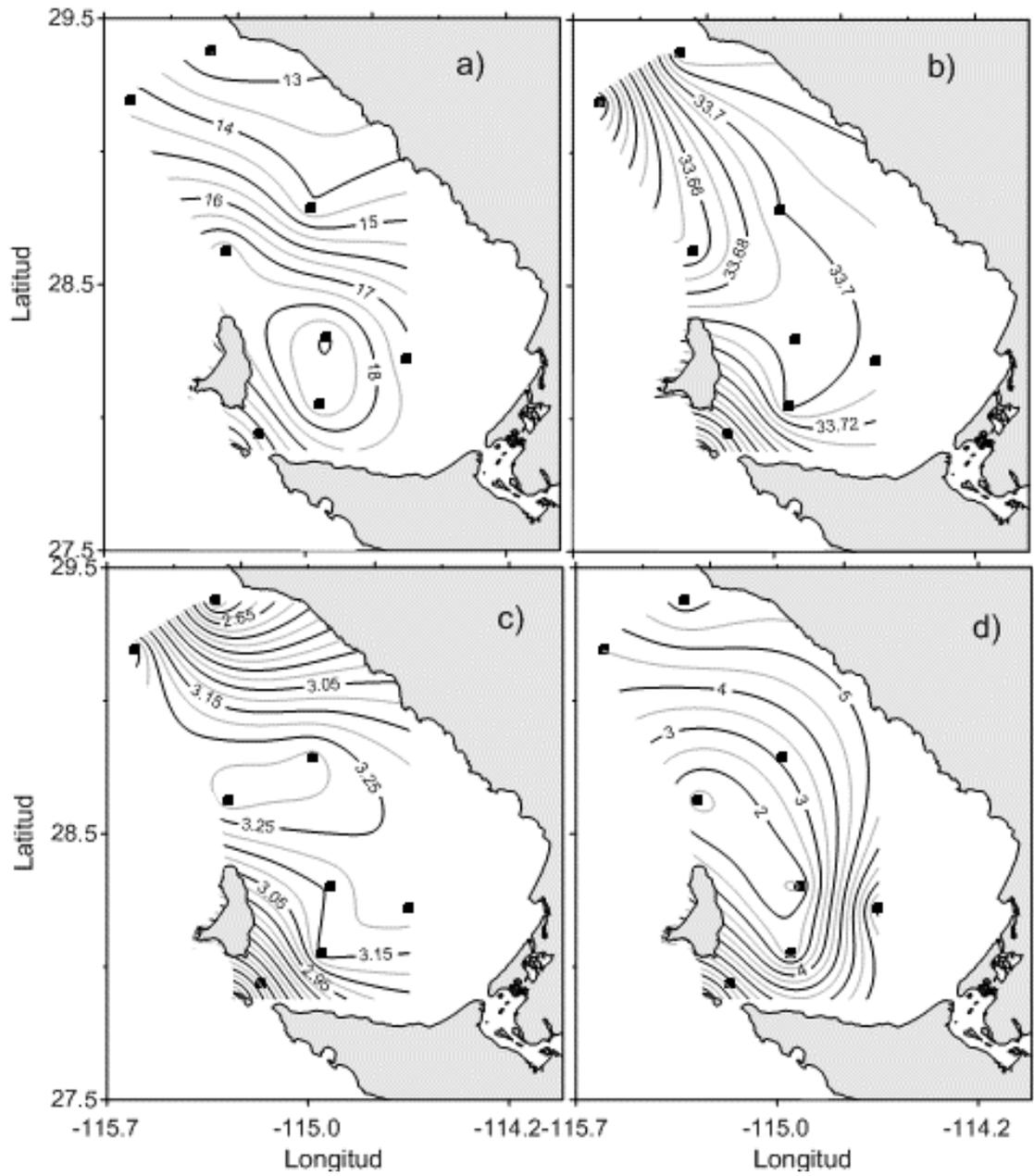
Anexo VII. Julio 1999 (9907) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



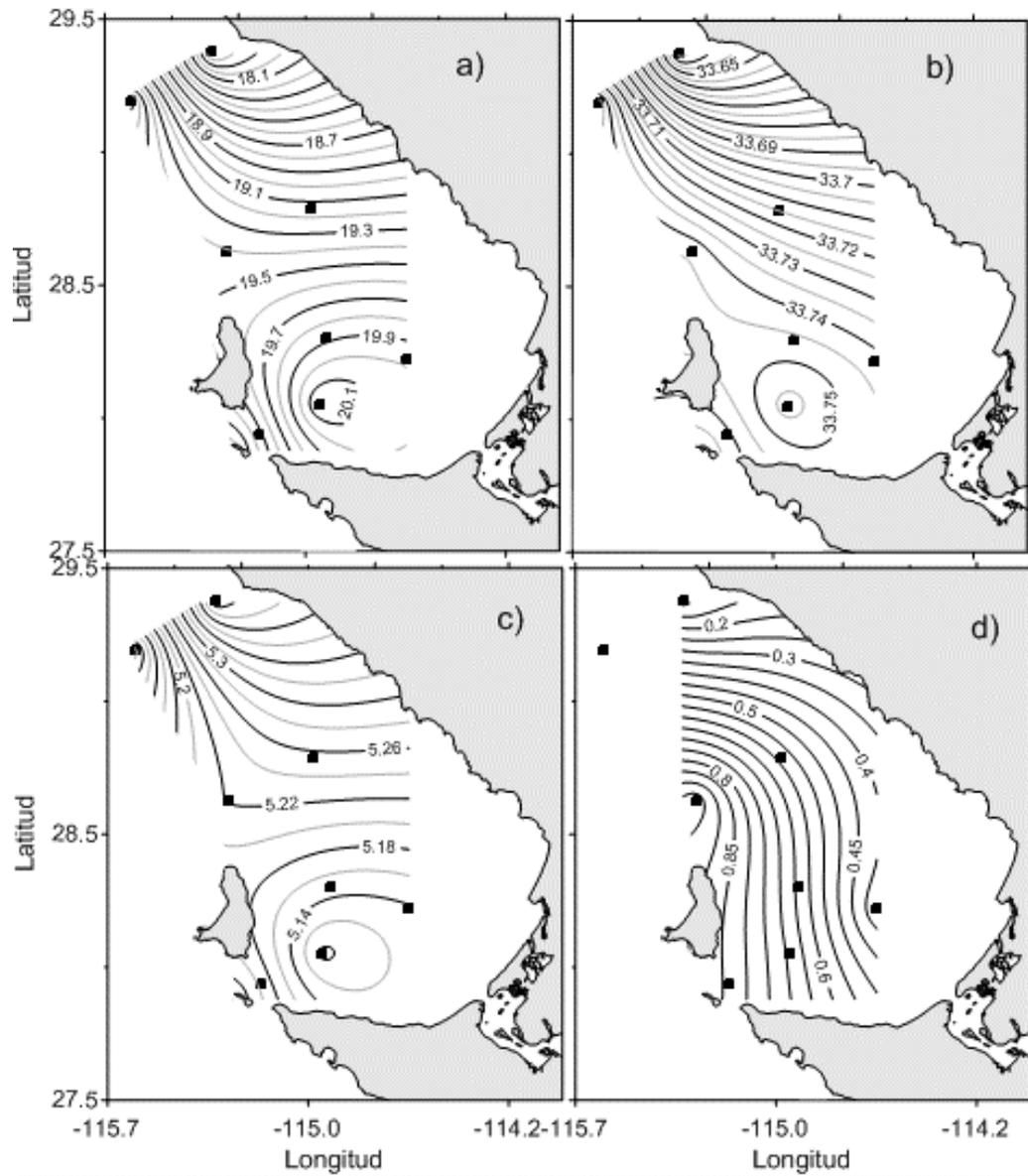
Anexo VIII. Enero 2000 (0001) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



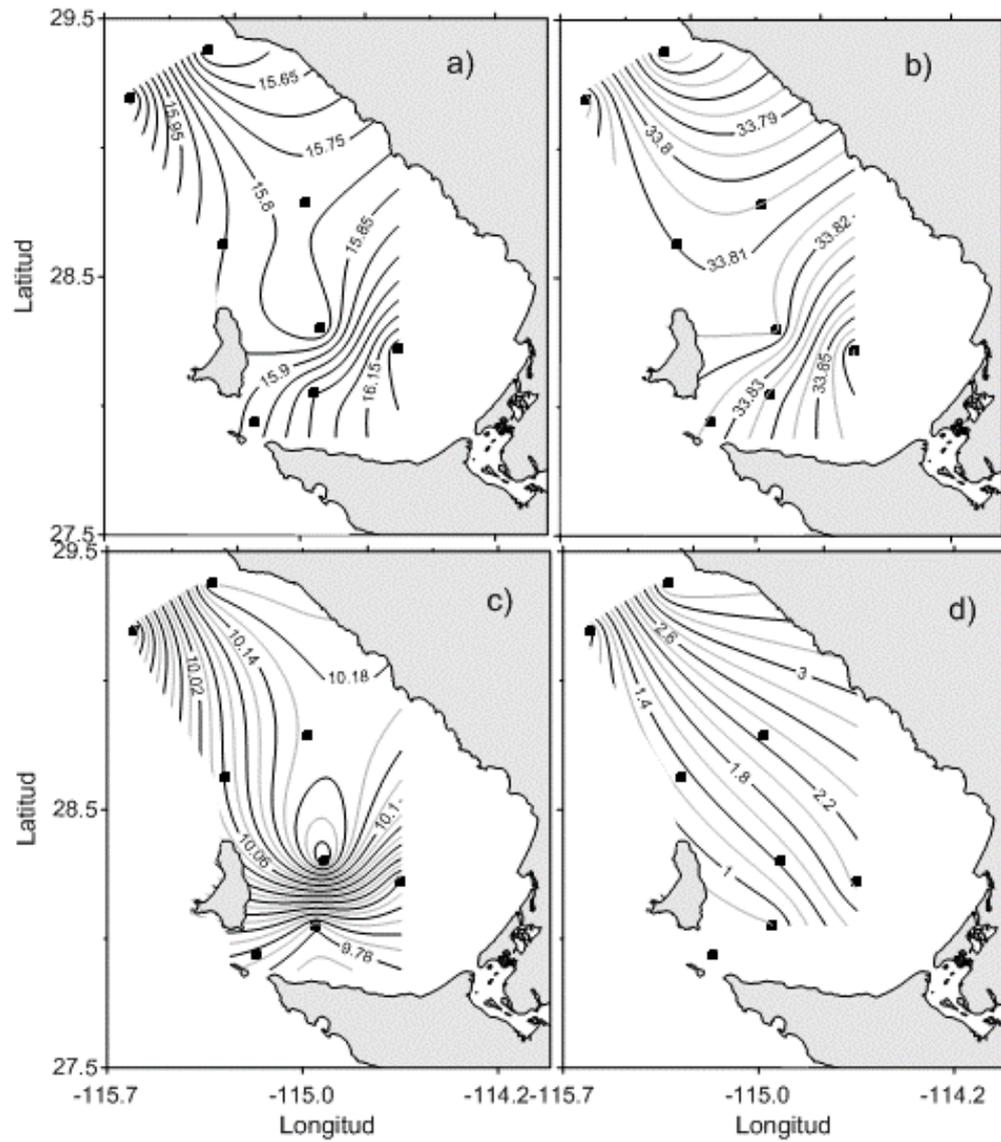
Anexo IX. Abril 2000 (0004) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



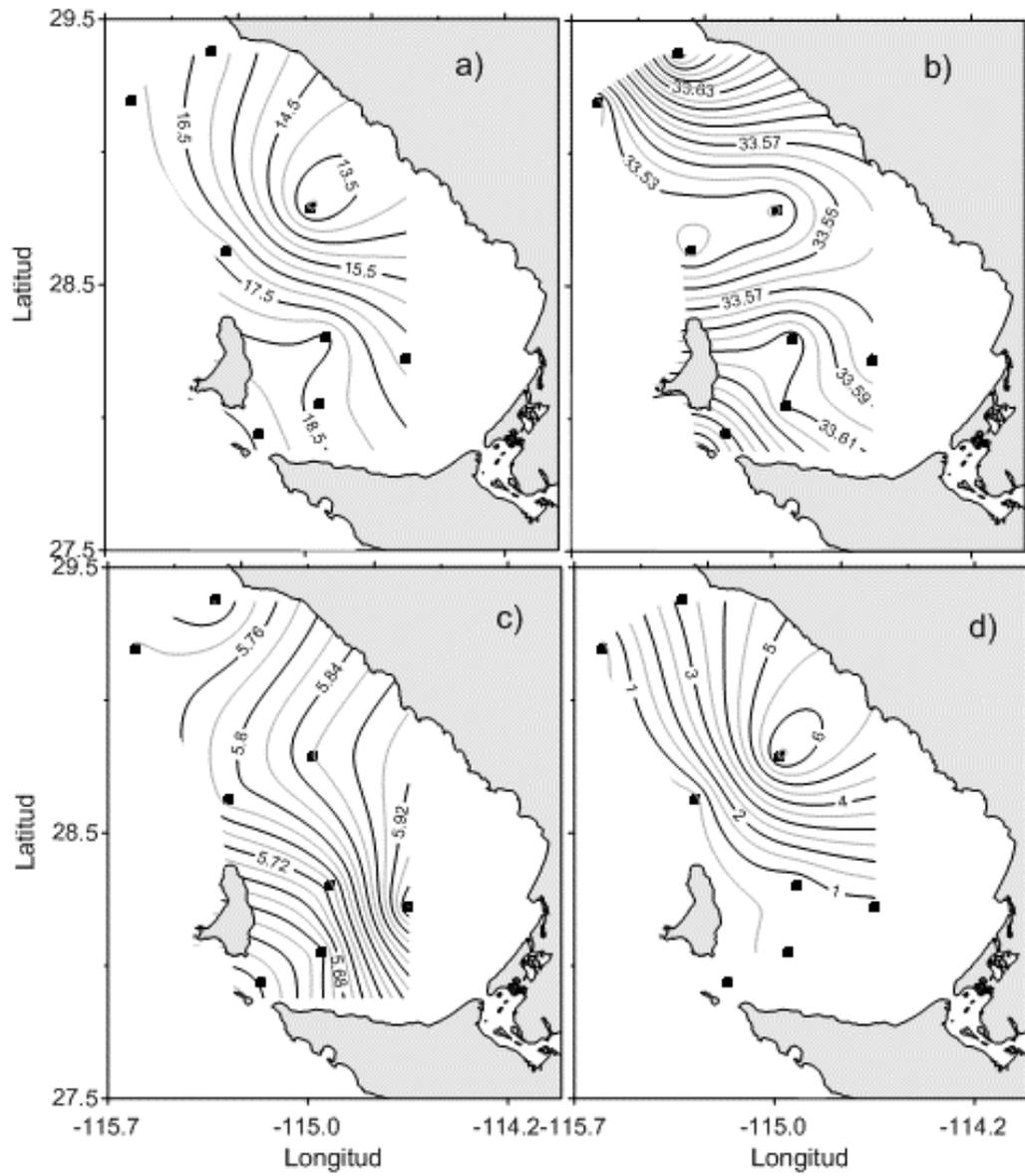
Anexo X. Julio 2000 (0007) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



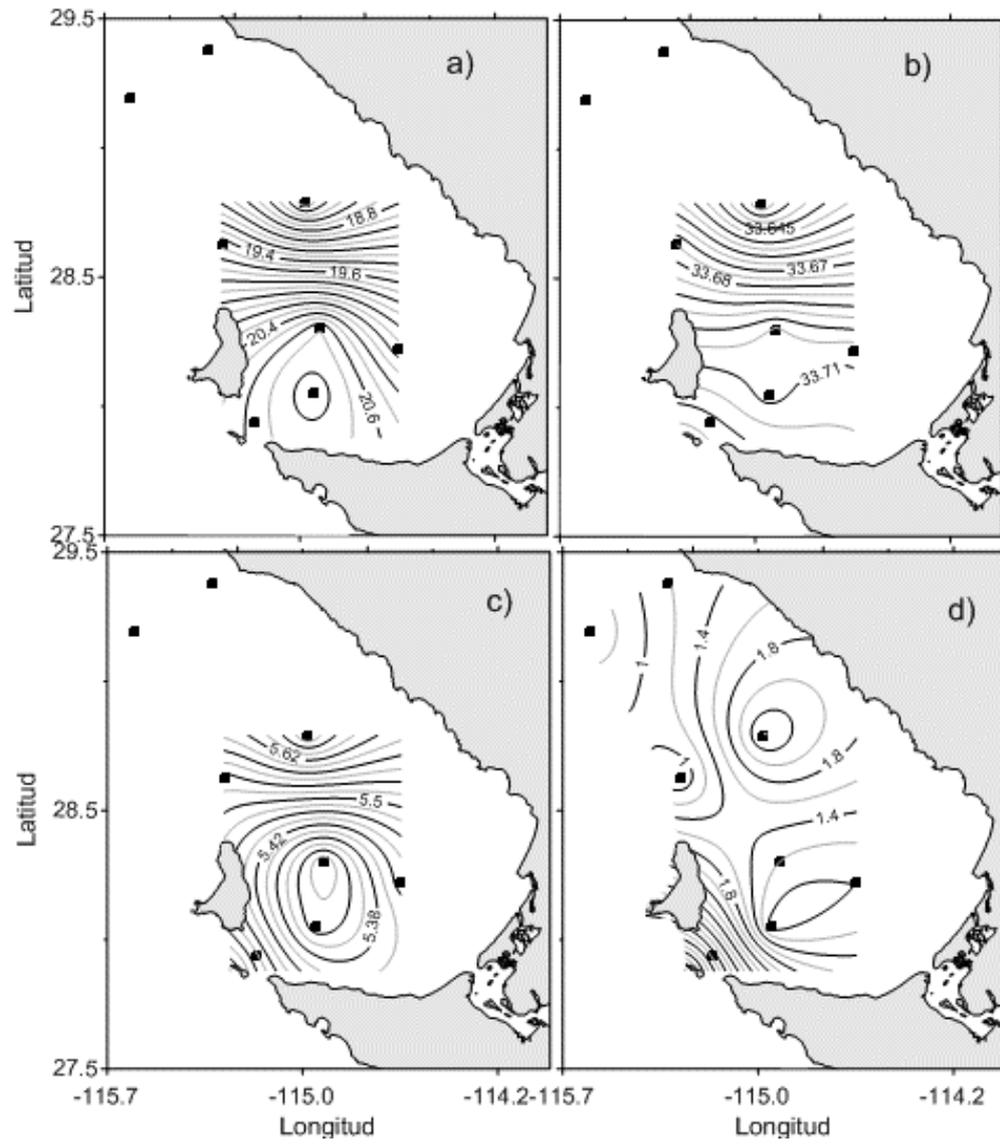
Anexo XI. Octubre 2000 (0010) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



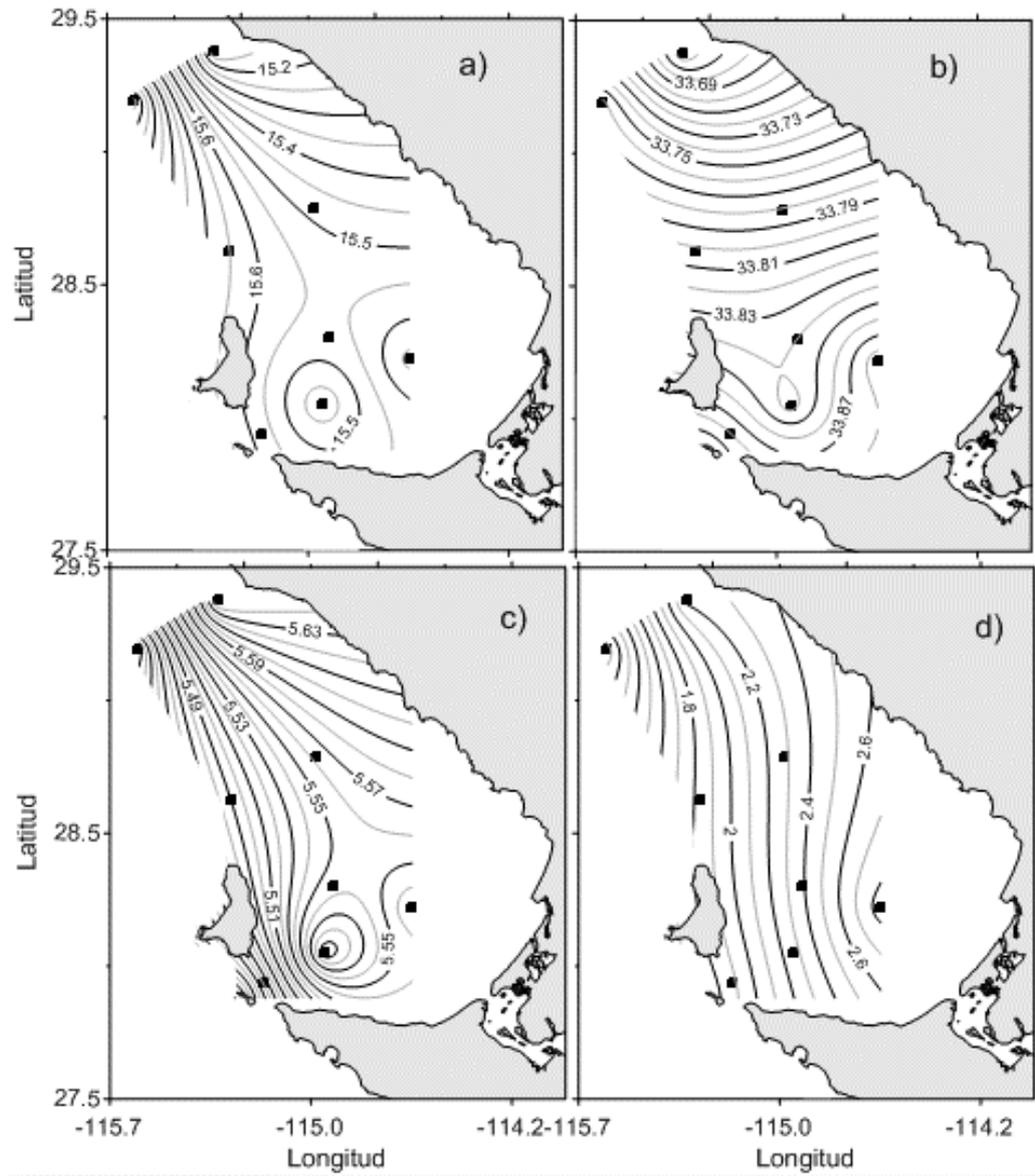
Anexo XII. Enero 2001 (0101) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



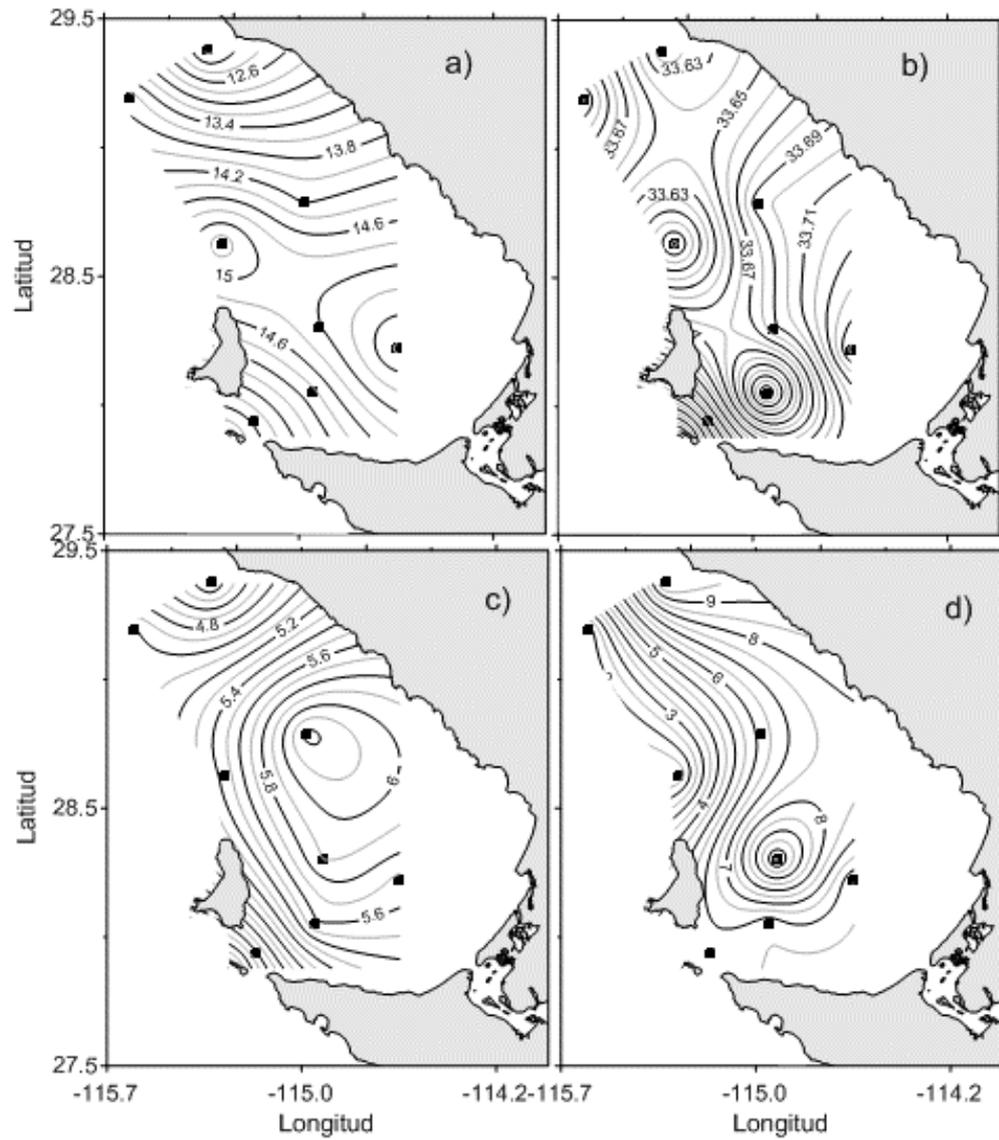
Anexo XIII. Julio 2001 (0107) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



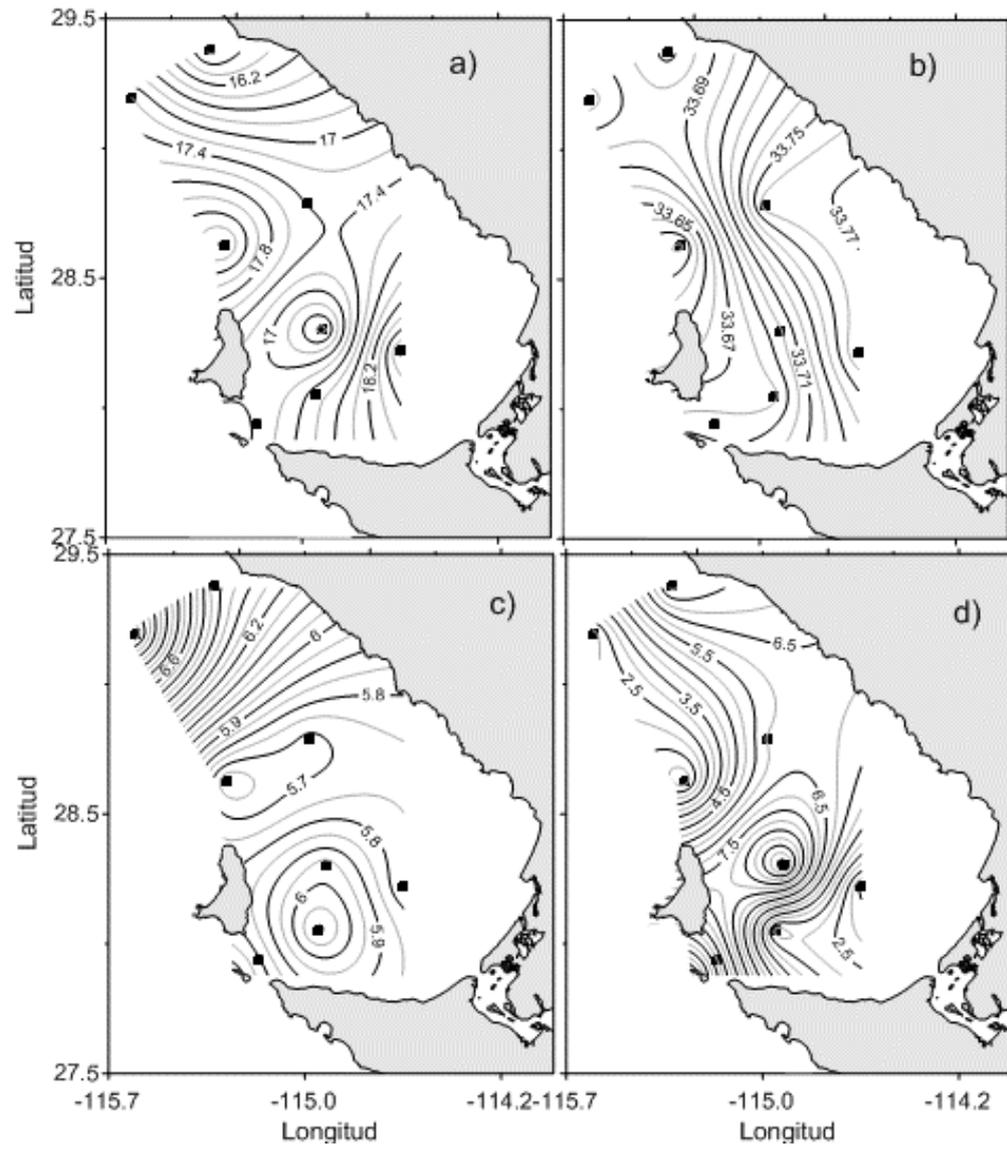
Anexo XIV. Octubre 2001 (0110) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



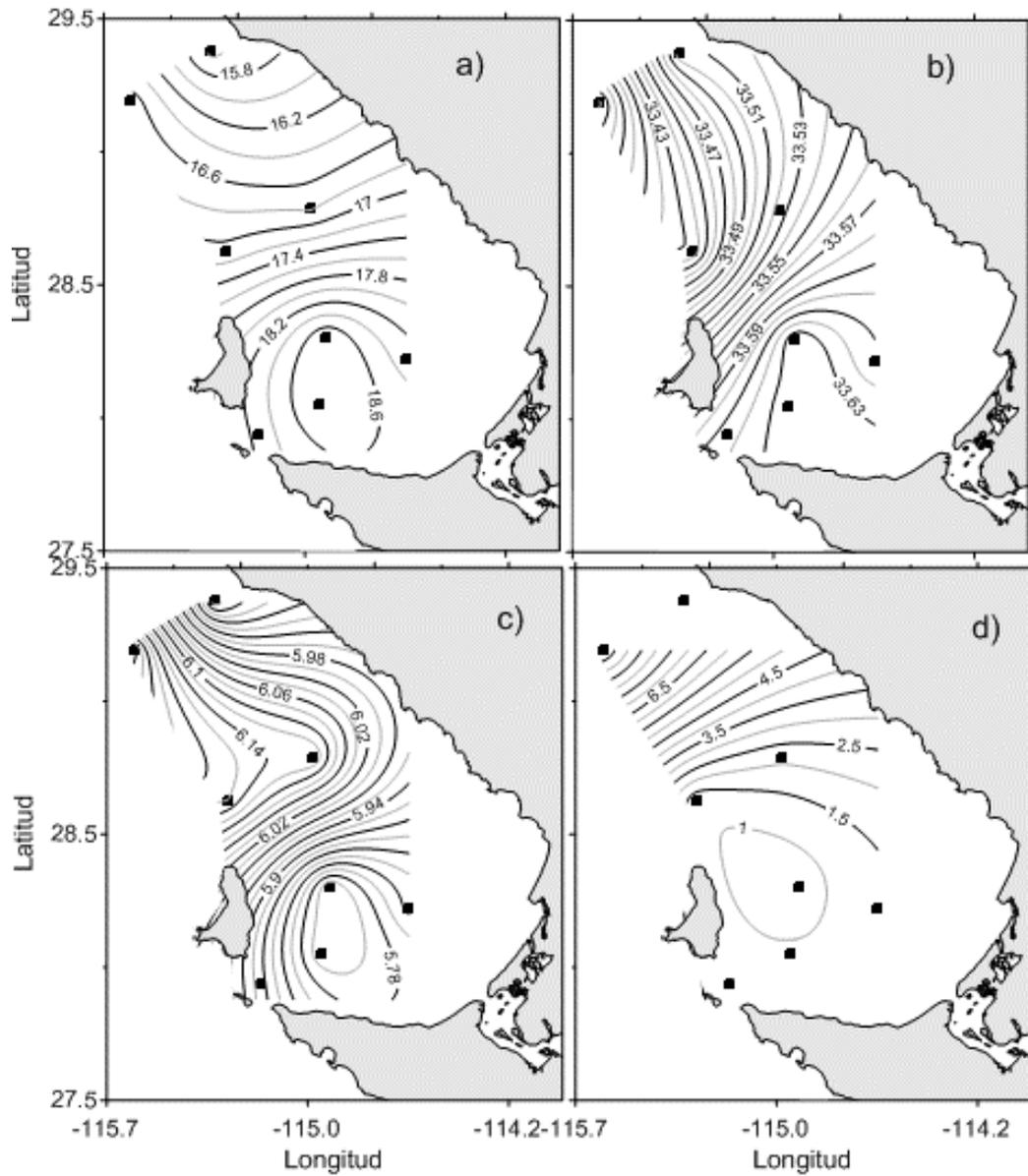
Anexo XV. Enero 2002 (0201) a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) salinidad, c) oxígeno (ml l^{-1}) y d) Chl-a (mg m^{-3}).



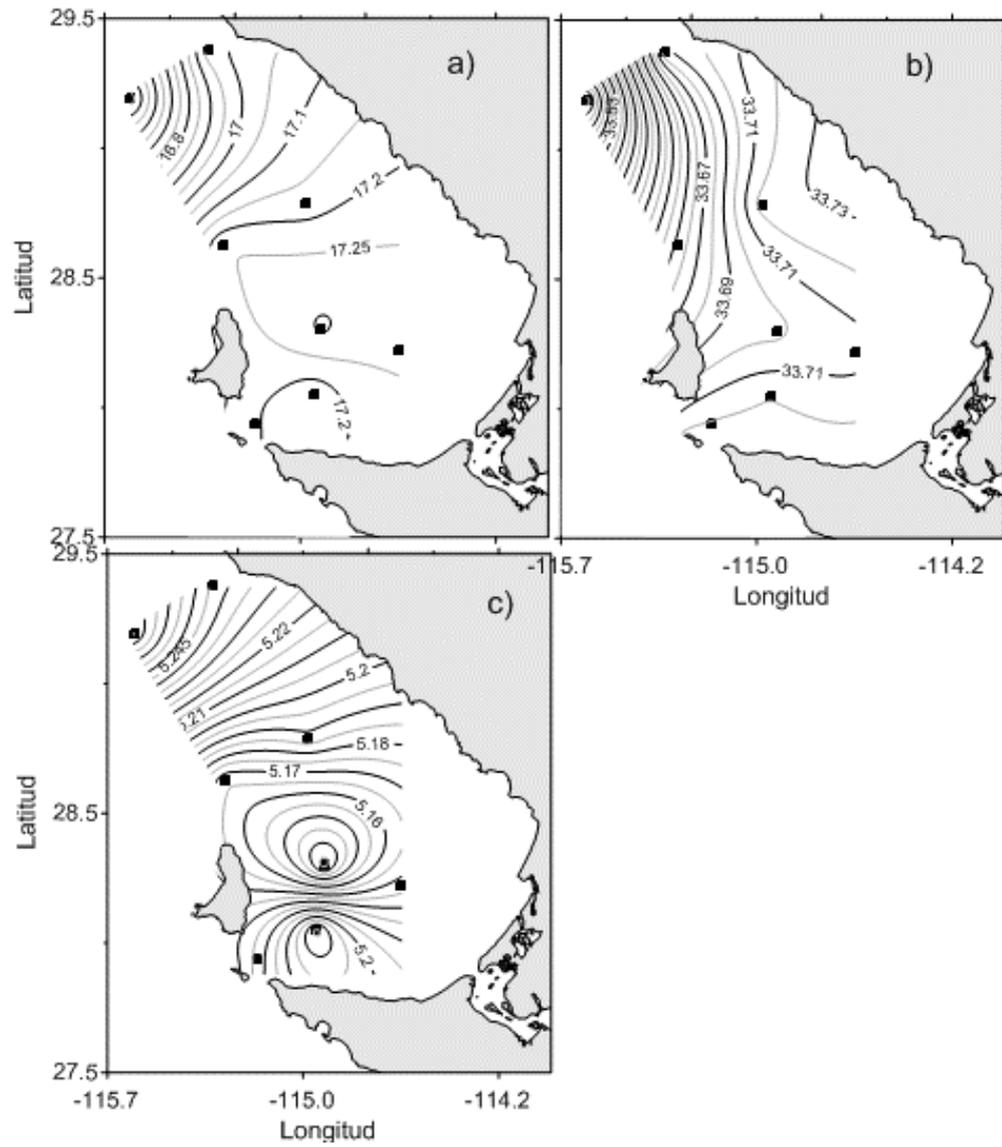
Anexo XVI. Abril 2002 (0204) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



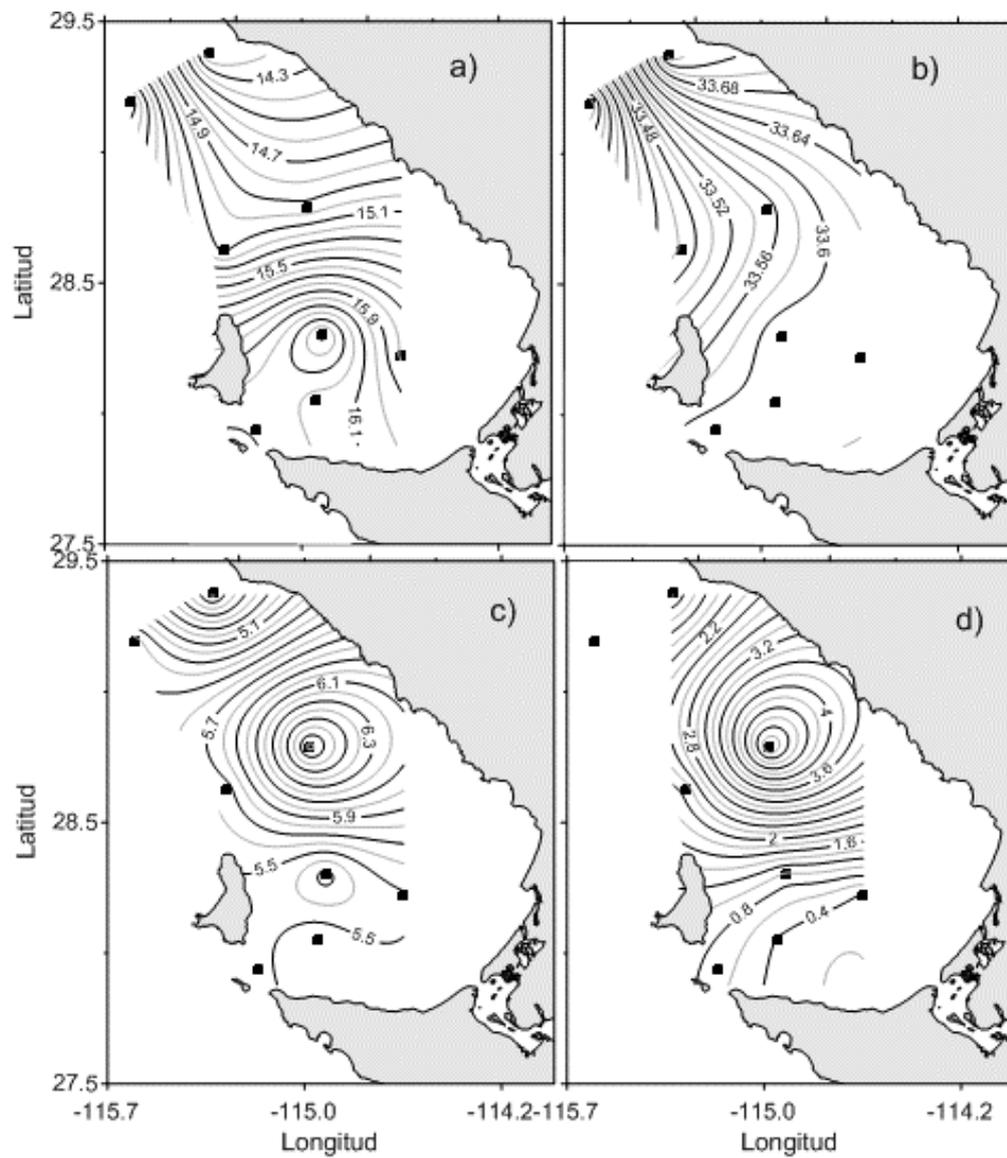
Anexo XVII. Julio 2002 (0207) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



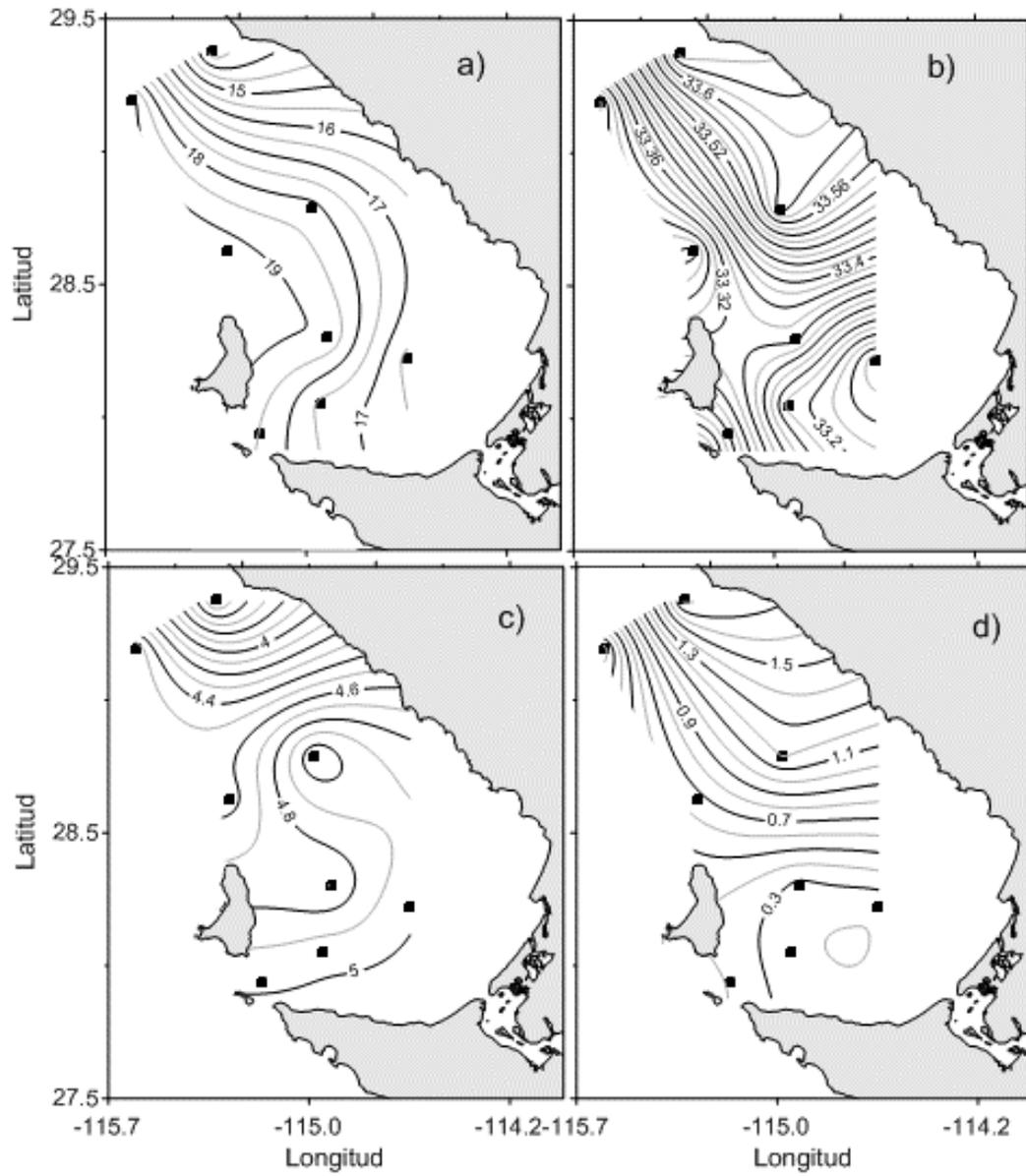
Anexo XVIII. Octubre 2002 (0210) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



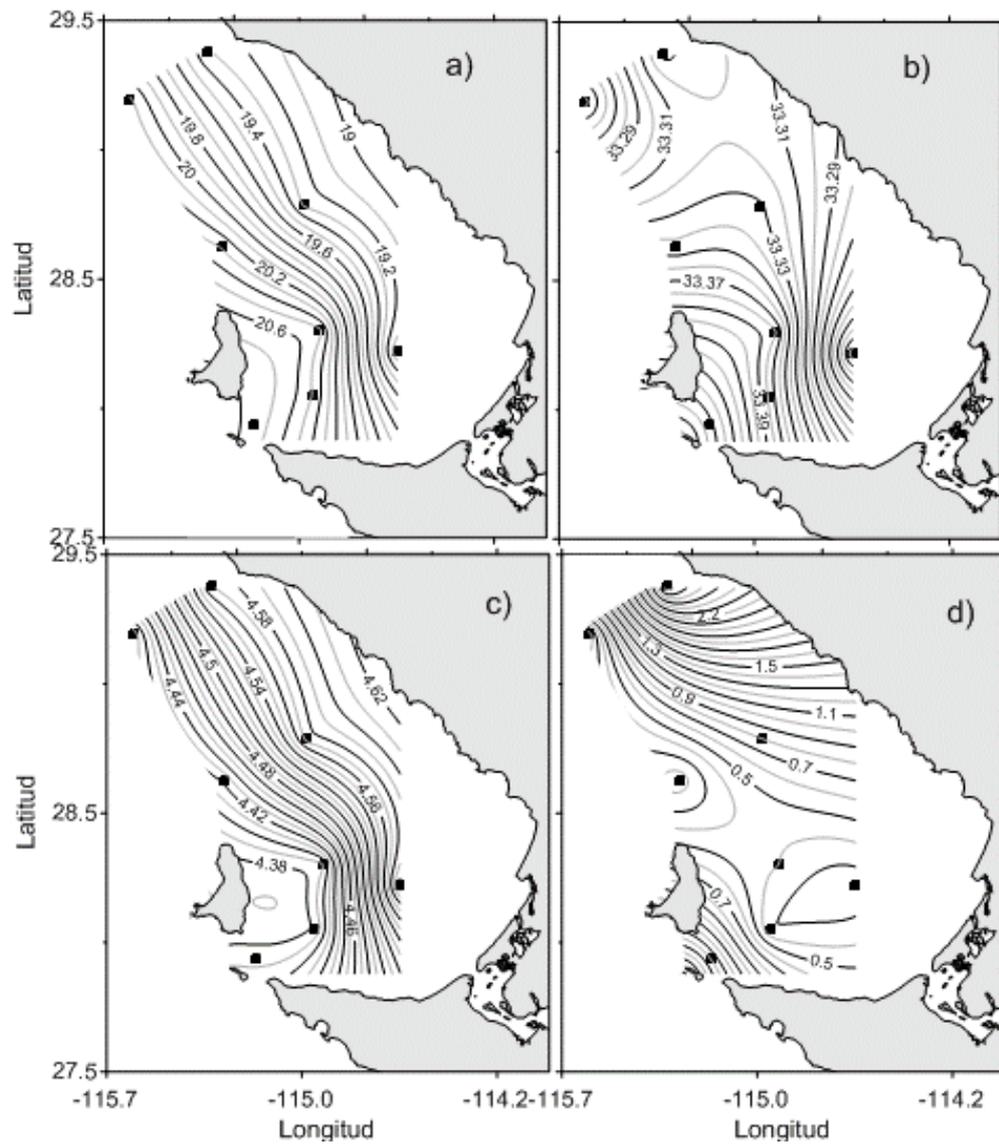
Anexo XIX. Enero 2003 (0301) a) temperatura (°C), b) salinidad y c) oxígeno (ml l⁻¹).



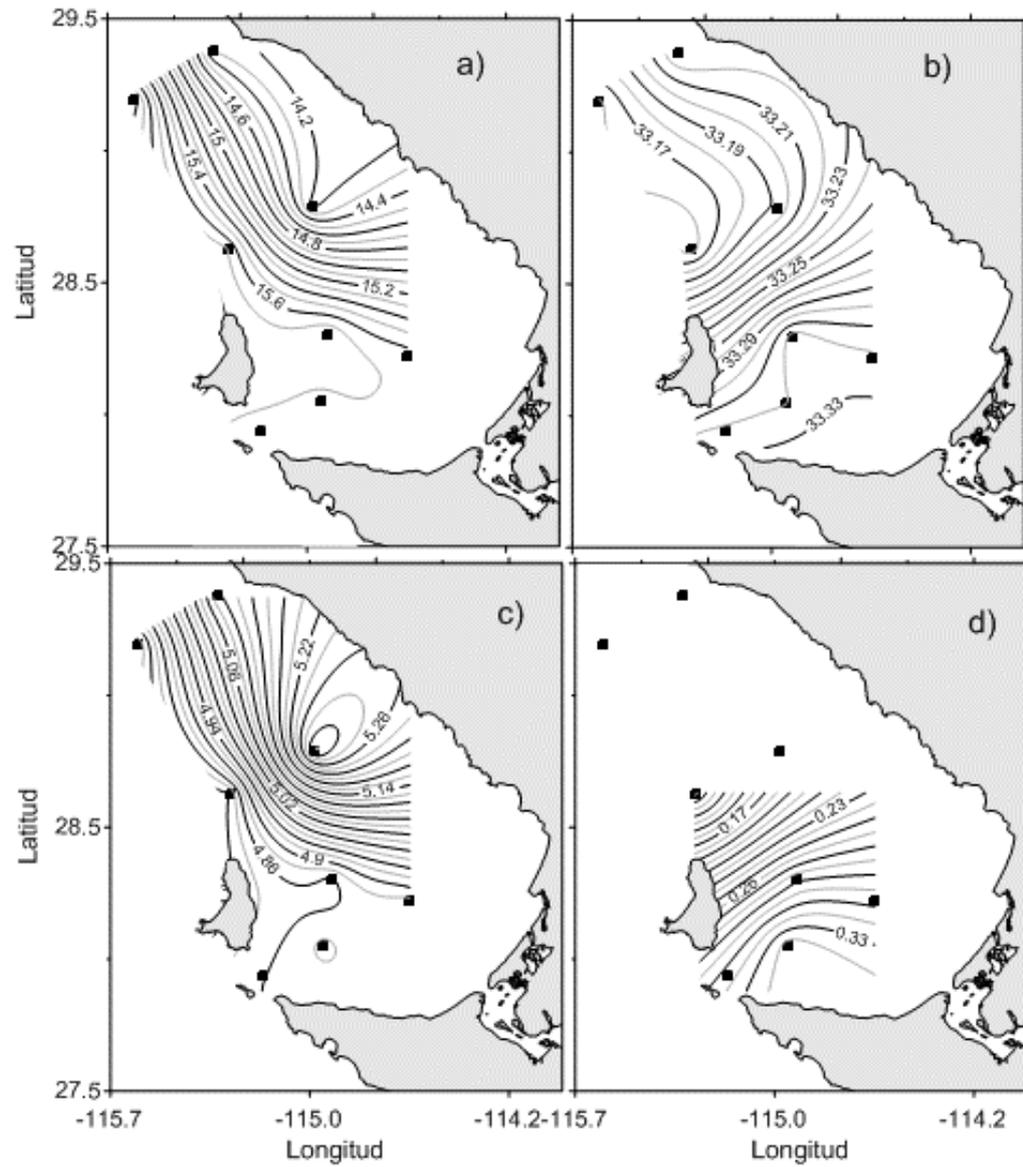
Anexo XX. Abril 2003 (0304) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



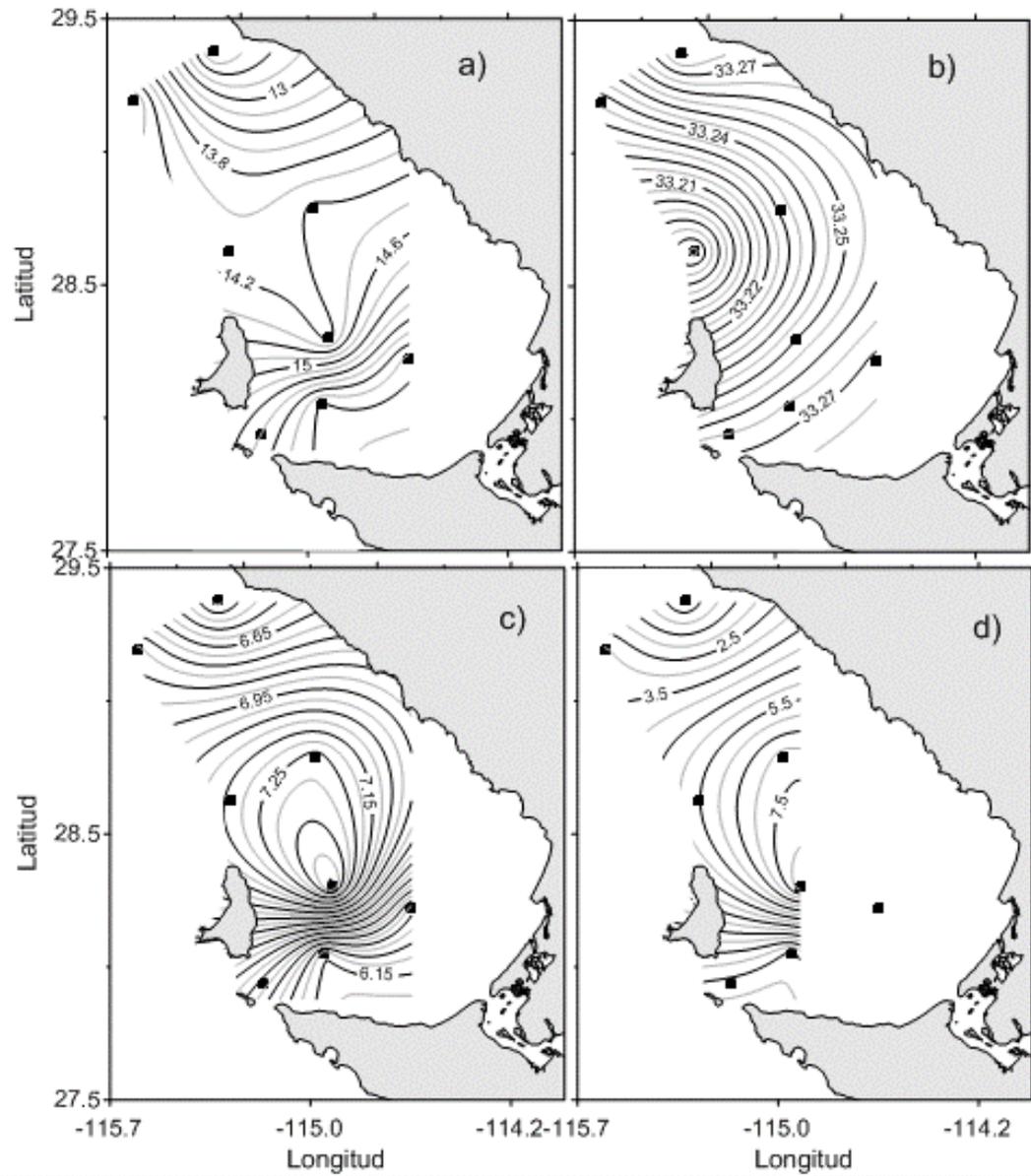
Anexo XXI. Julio 2003 (0307) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



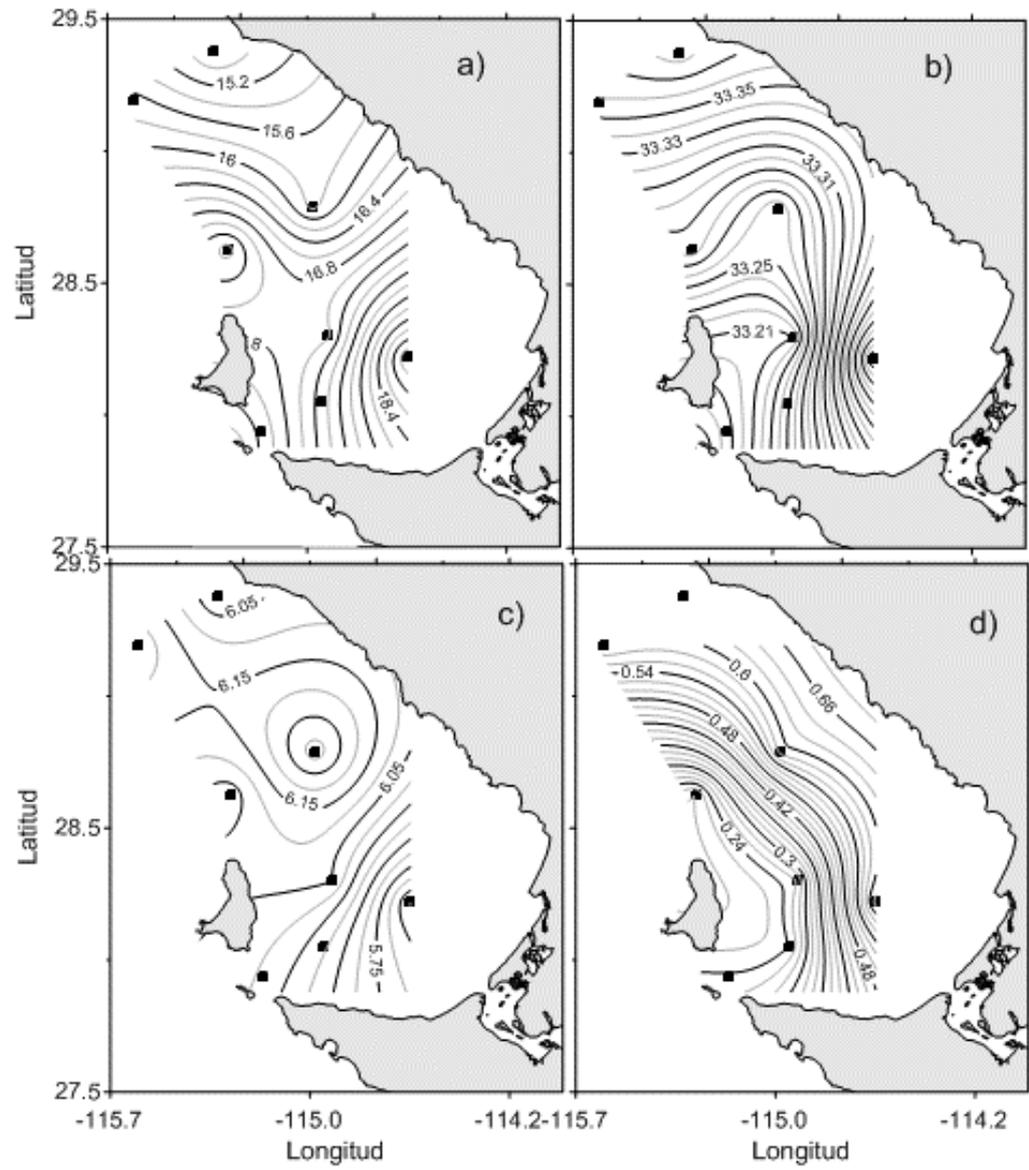
Anexo XXII. Octubre 2003 (0310) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



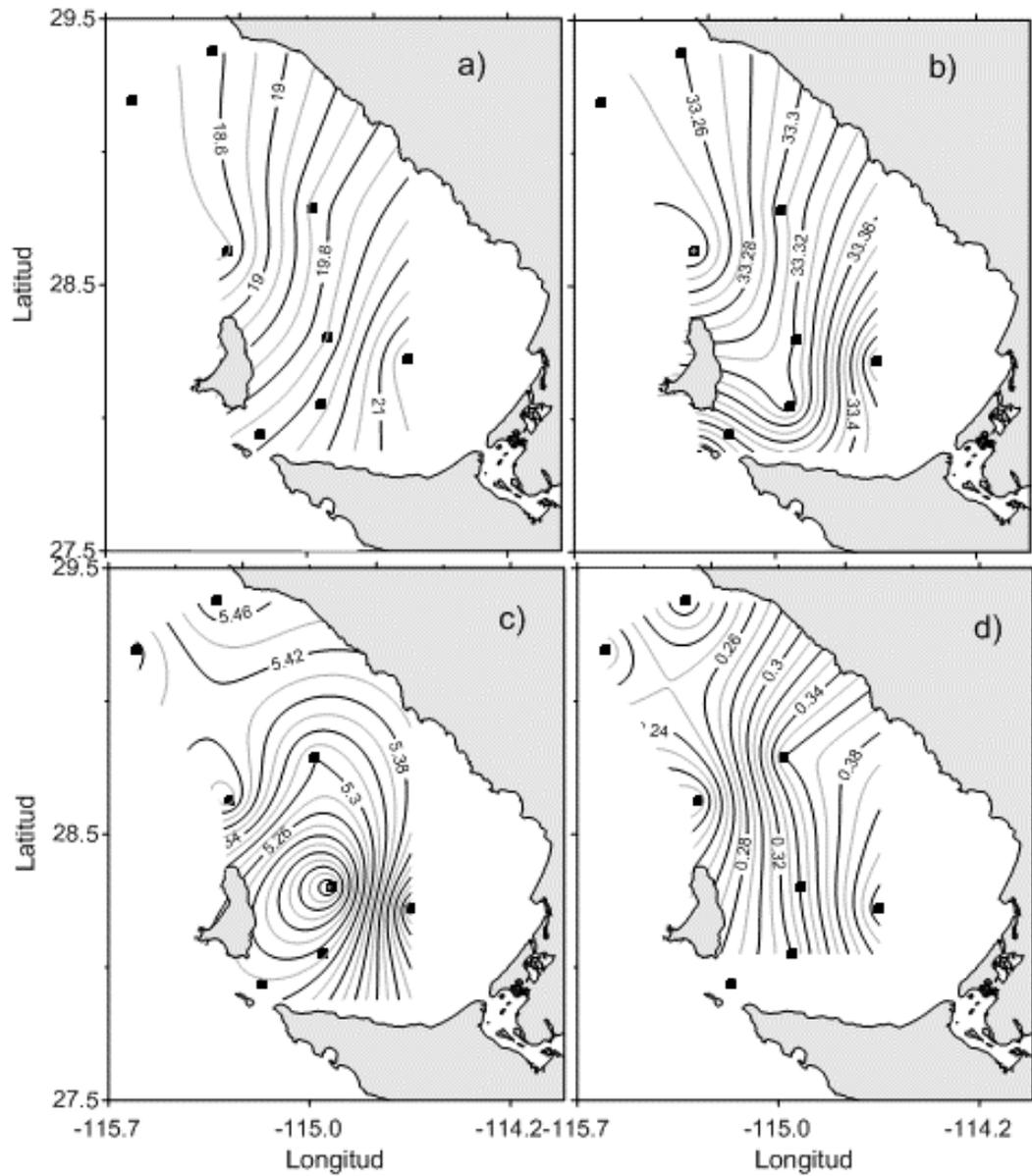
Anexo XXIII. Enero 2004 (0401) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



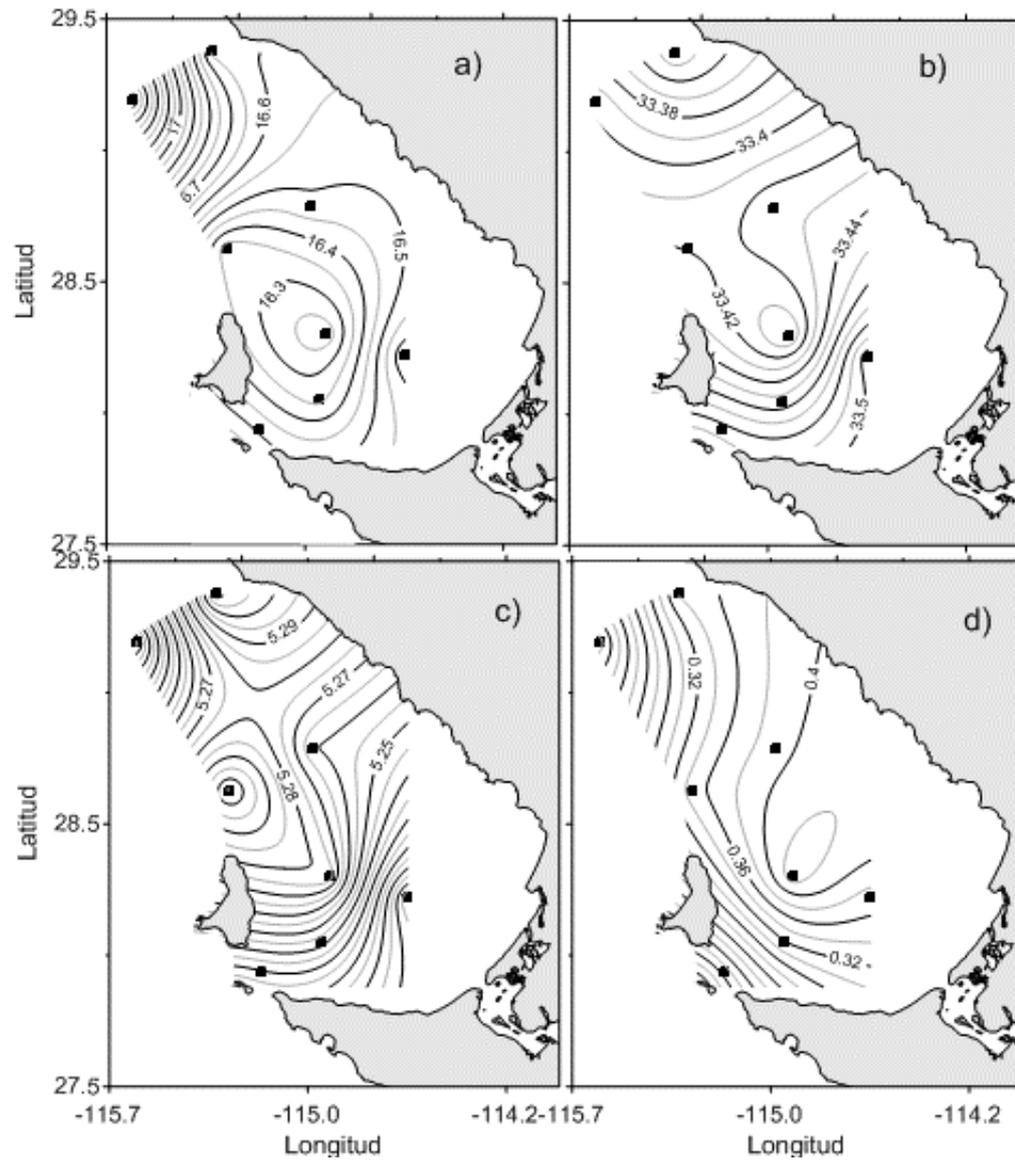
Anexo XXIV. Abril 2004 (0404) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



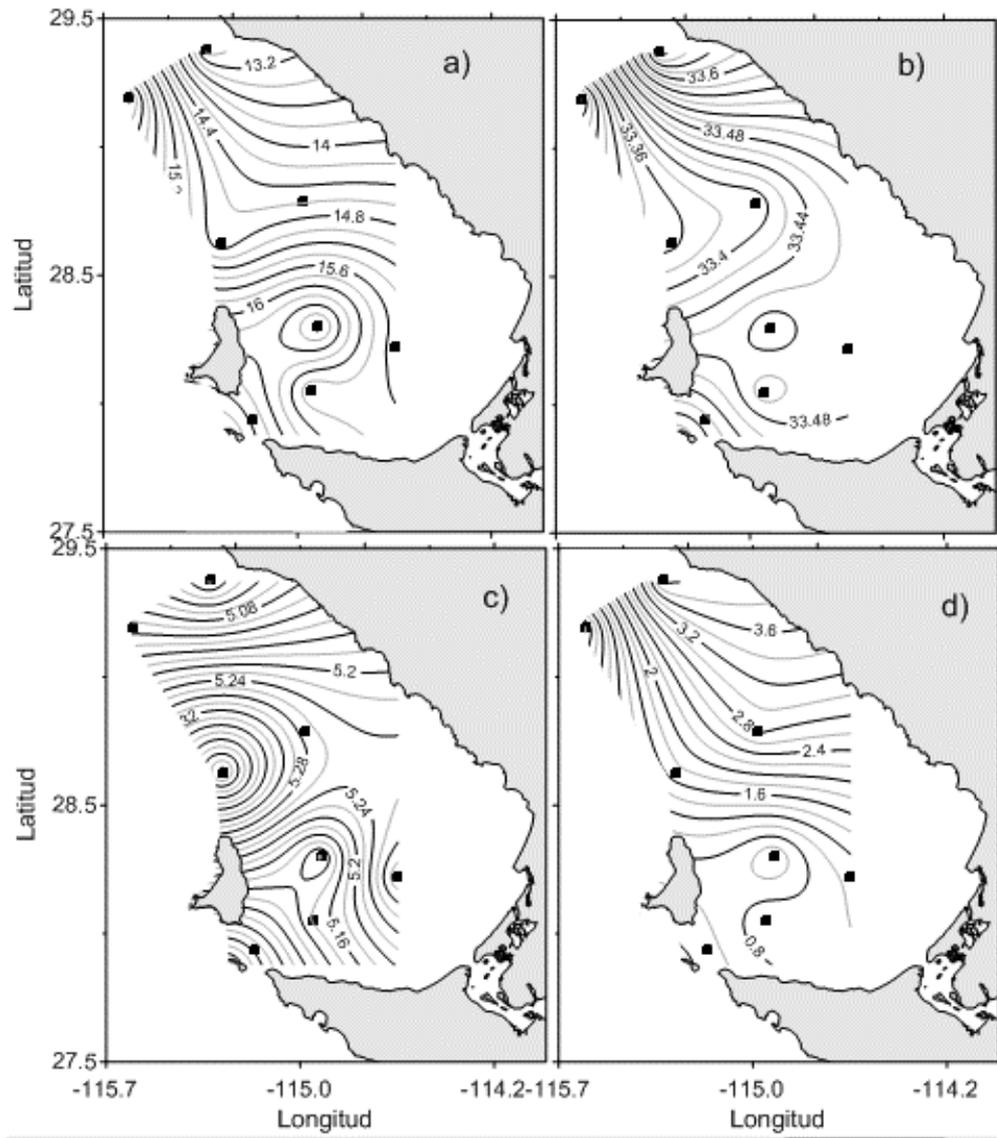
Anexo XXV. Julio 2004 (0407) a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) salinidad, c) oxígeno (ml l^{-1}) y d) Chl-a (mg m^{-3}).



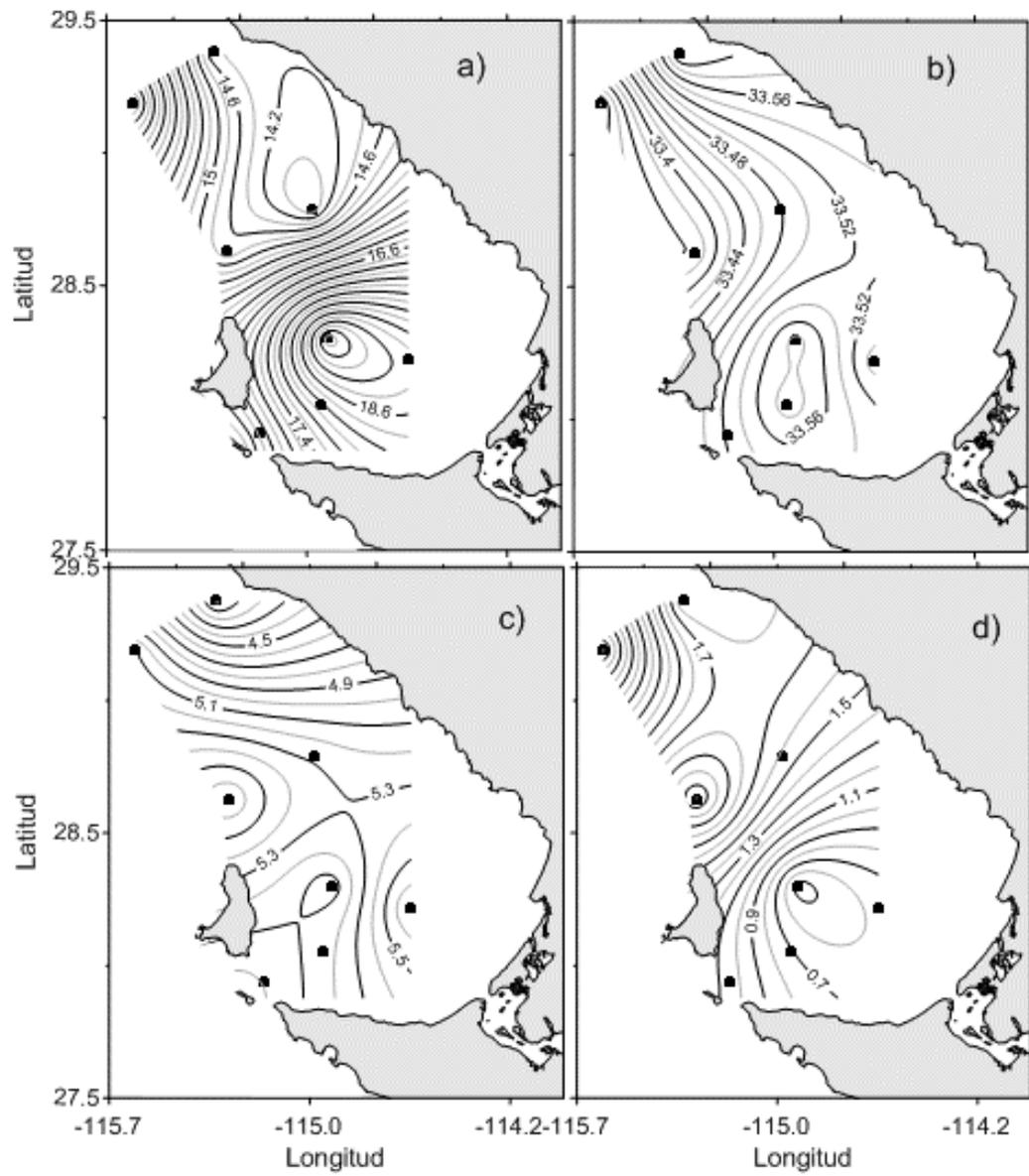
Anexo XXVI. Octubre 2004 (0410) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



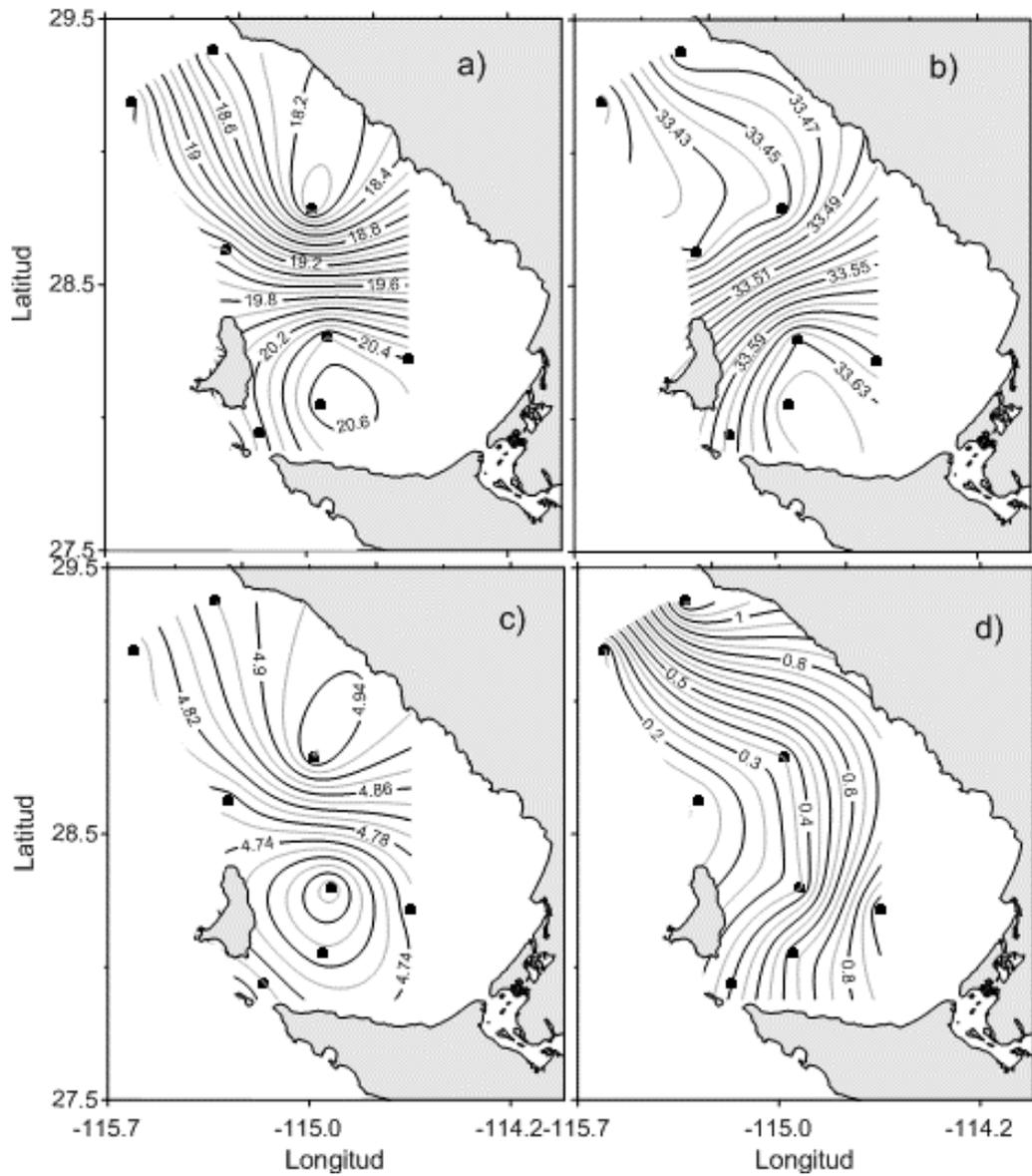
Anexo XXVII. Enero 2005 (0501) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



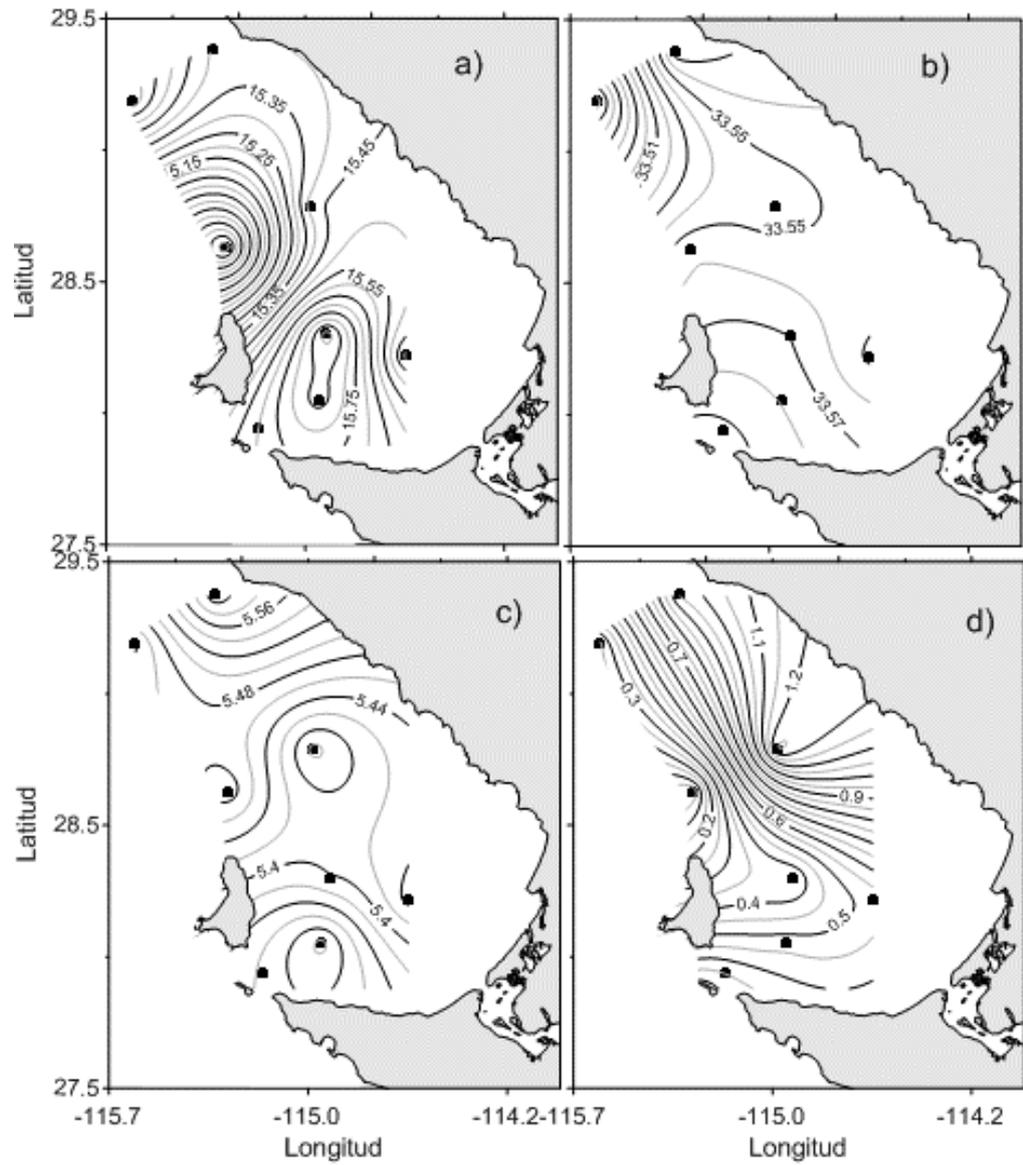
Anexo XXVIII. Abril 2005 (0504) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



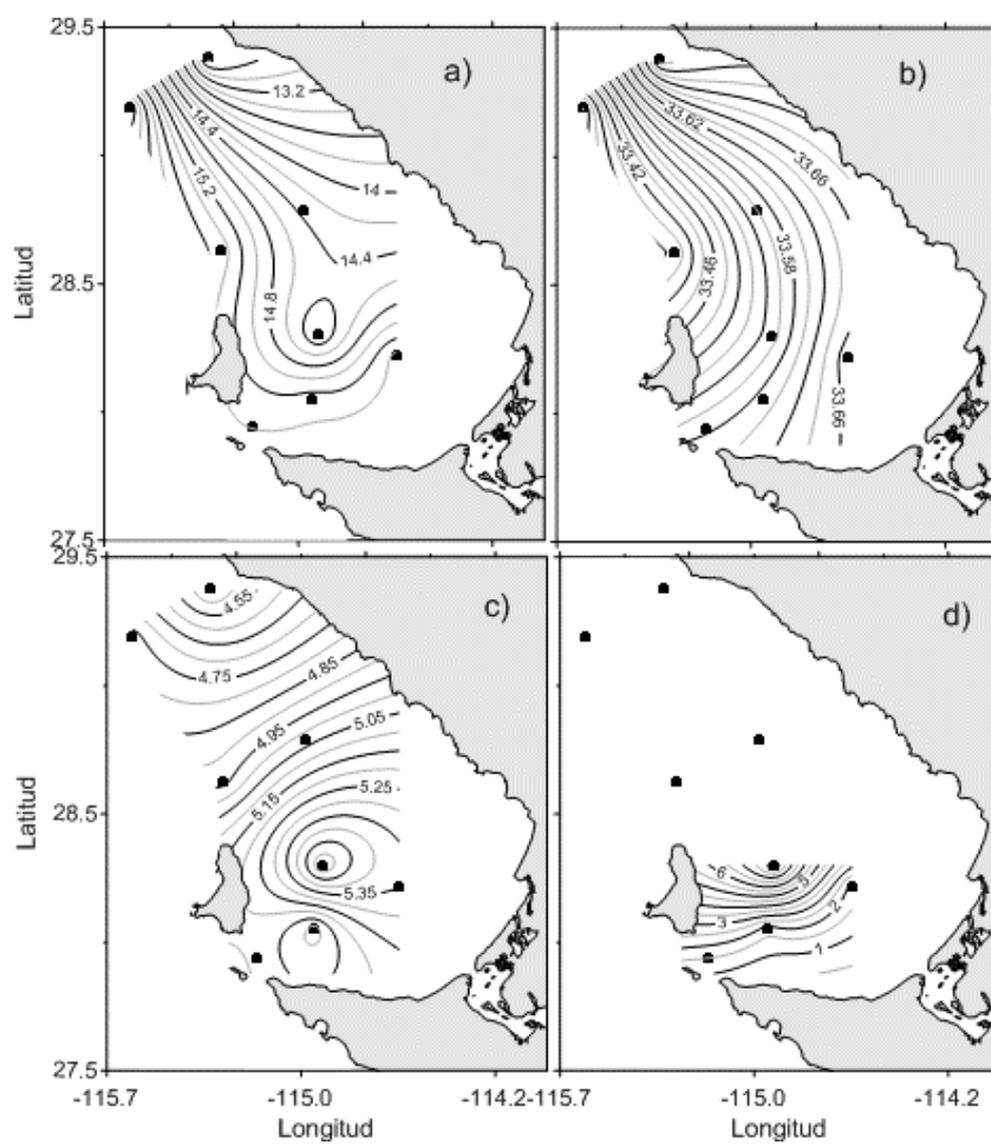
Anexo XXIX. Julio 2005 (0507) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



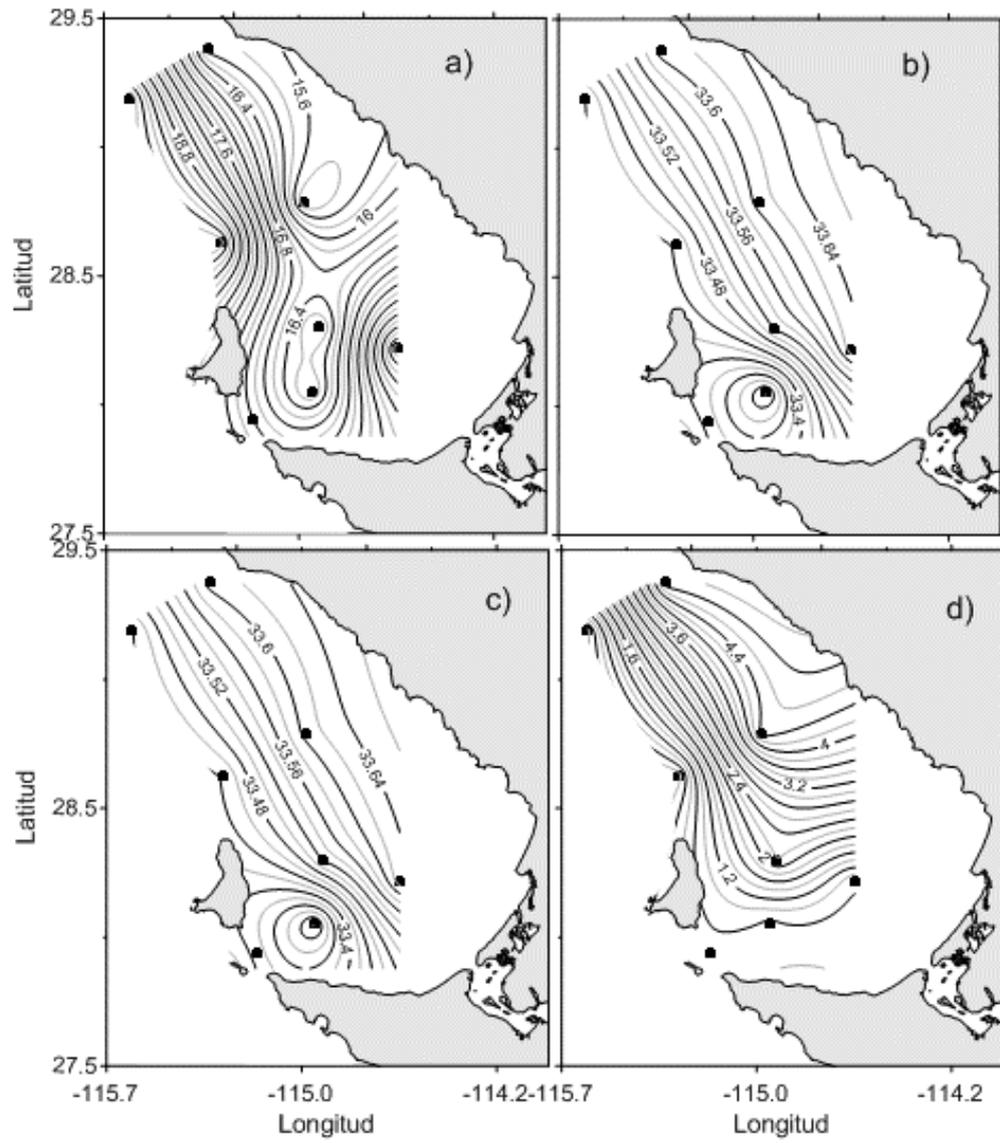
Anexo XXX. Octubre 2005 (0510) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



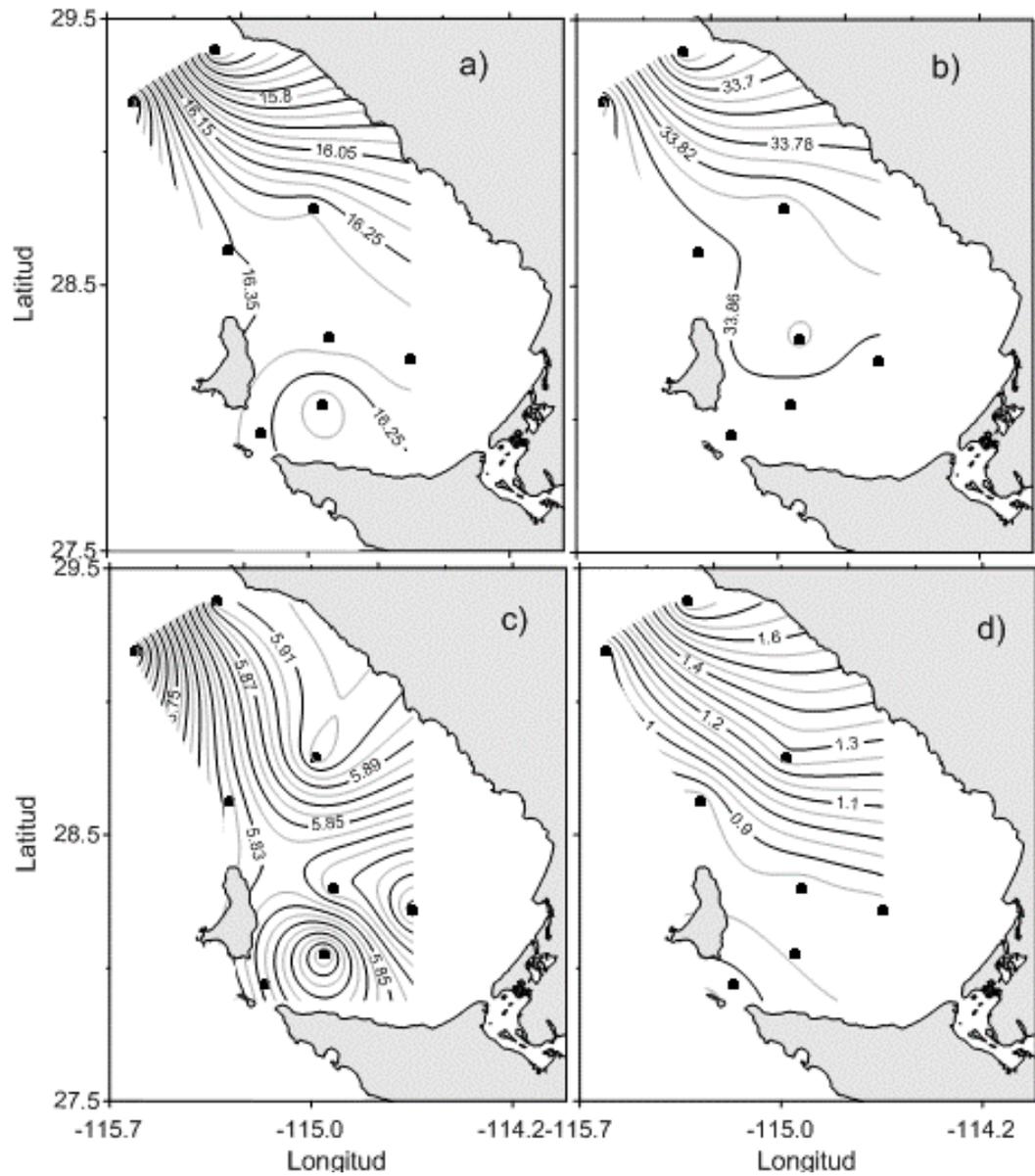
Anexo XXXI. Enero 2006 (0601) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



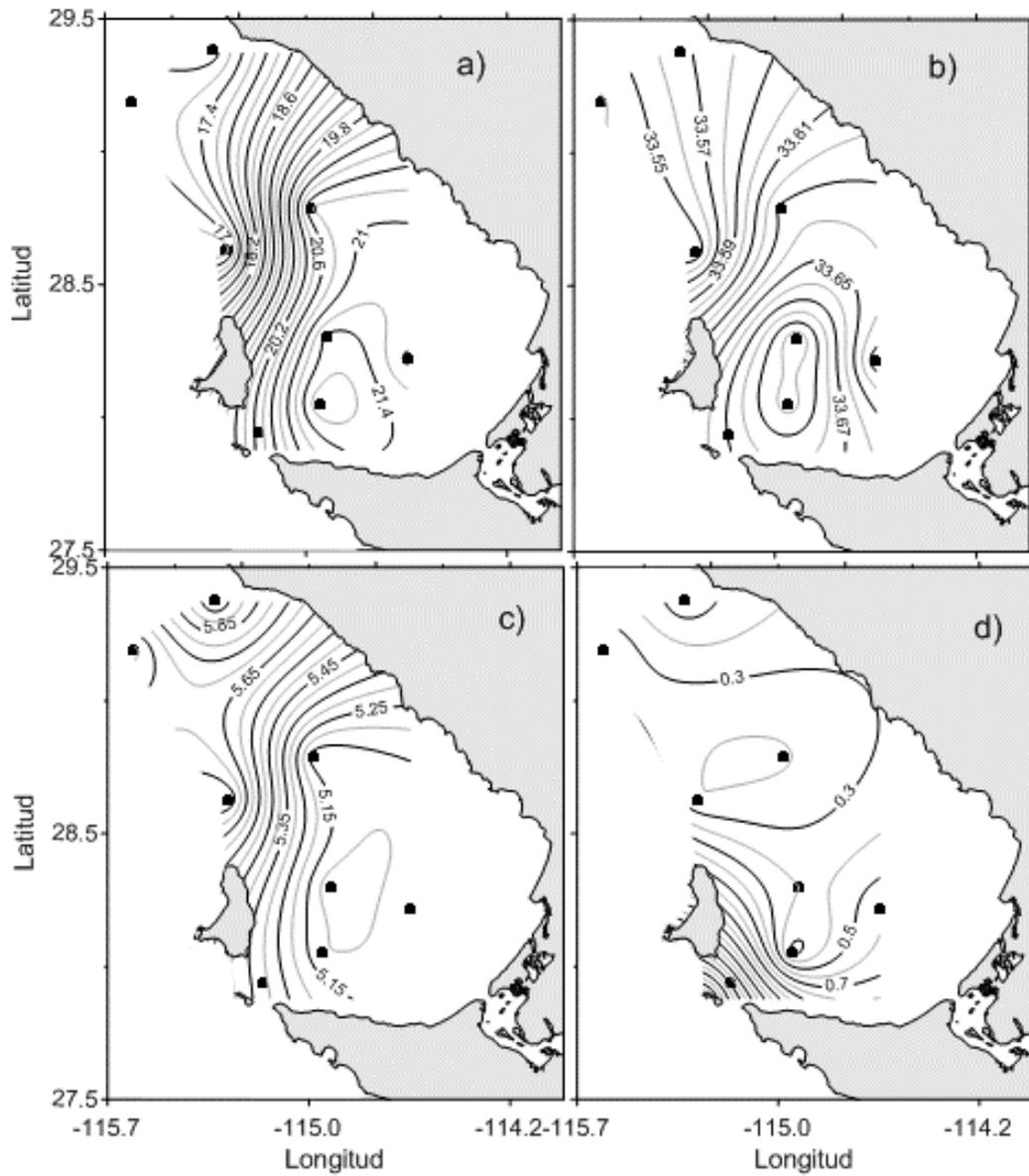
Anexo XXXII. Abril 2006 (0604) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



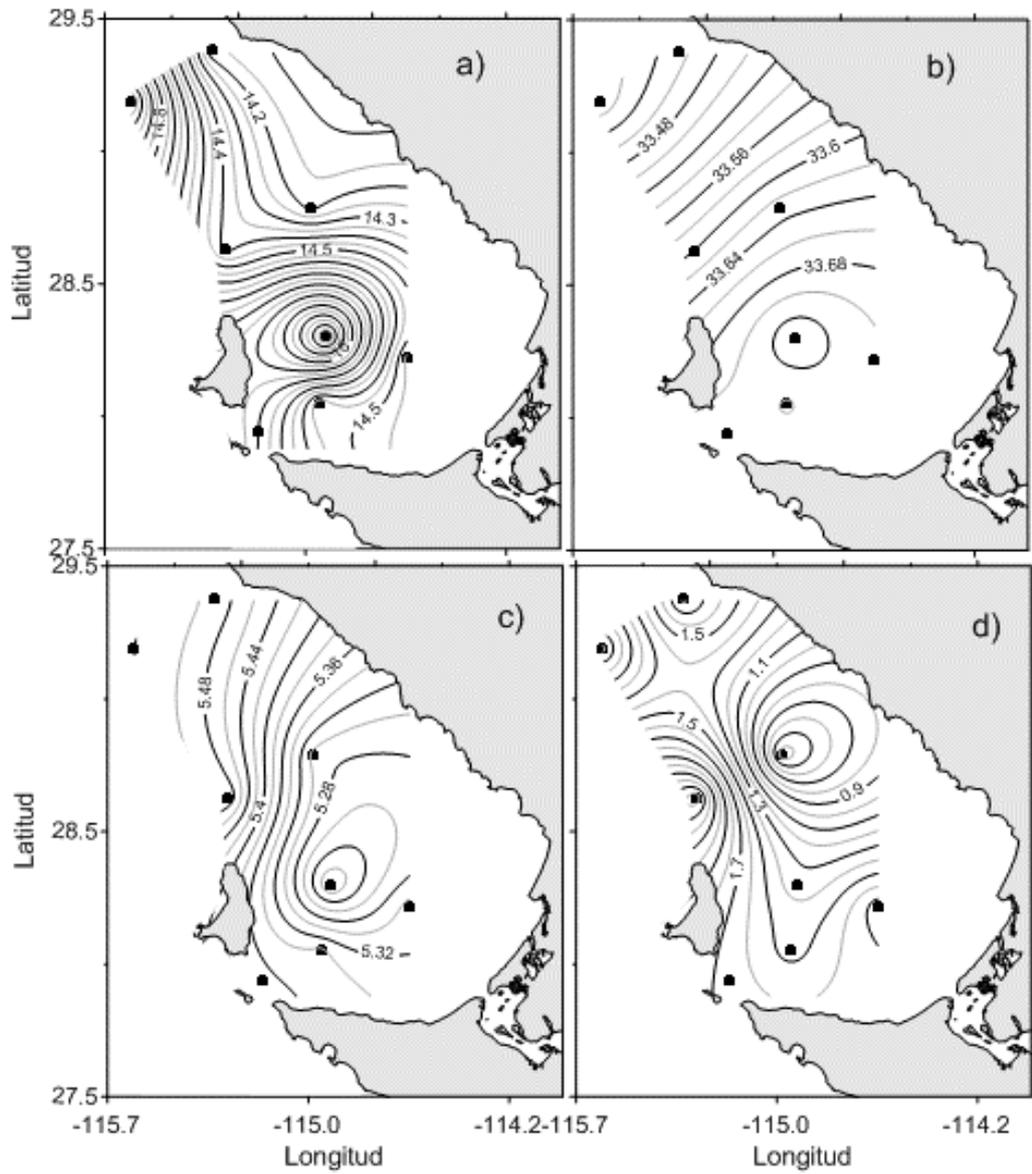
Anexo XXXIII. Julio 2006 (0607) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



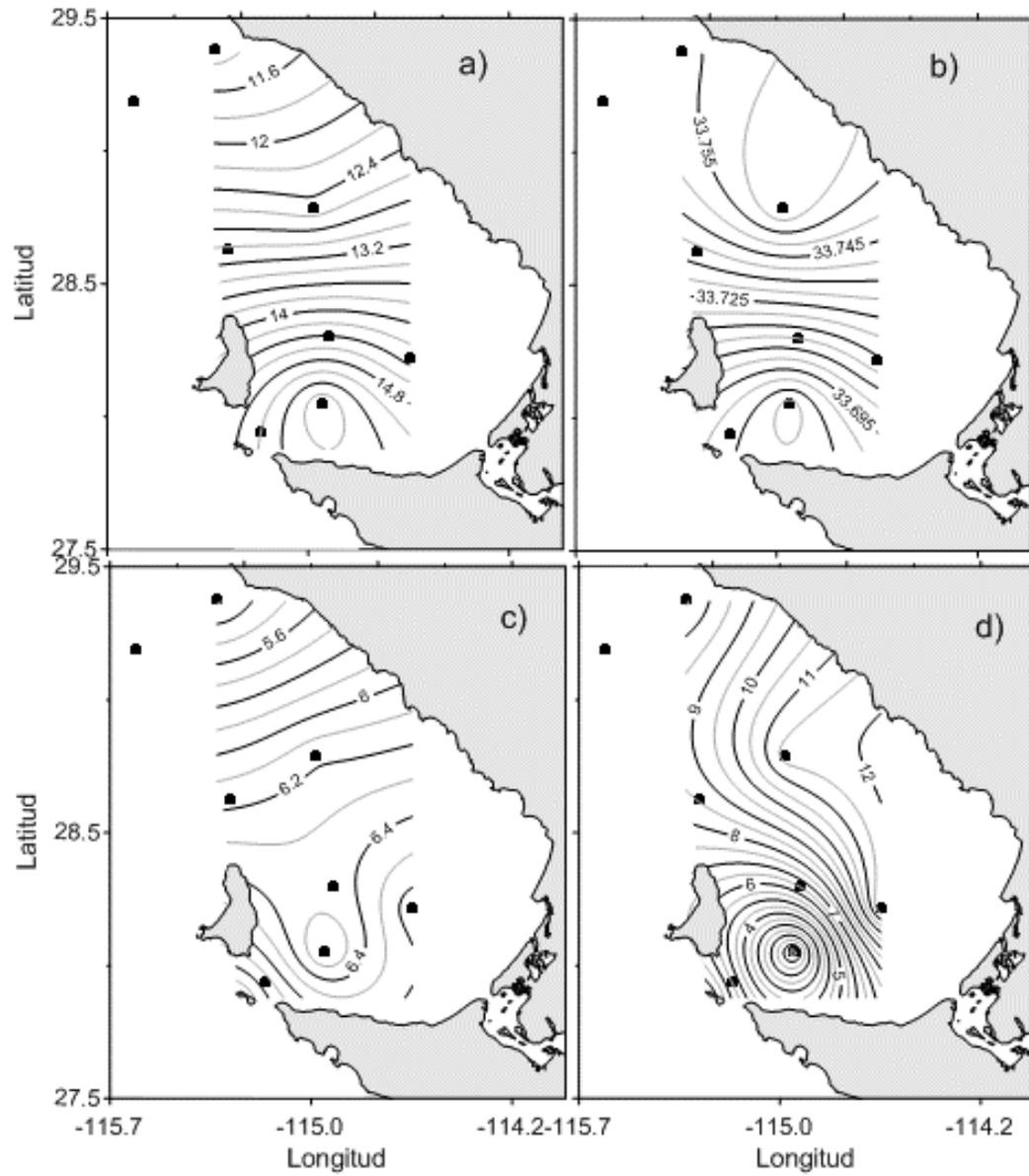
Anexo XXXIV. Enero 2007 (0701) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



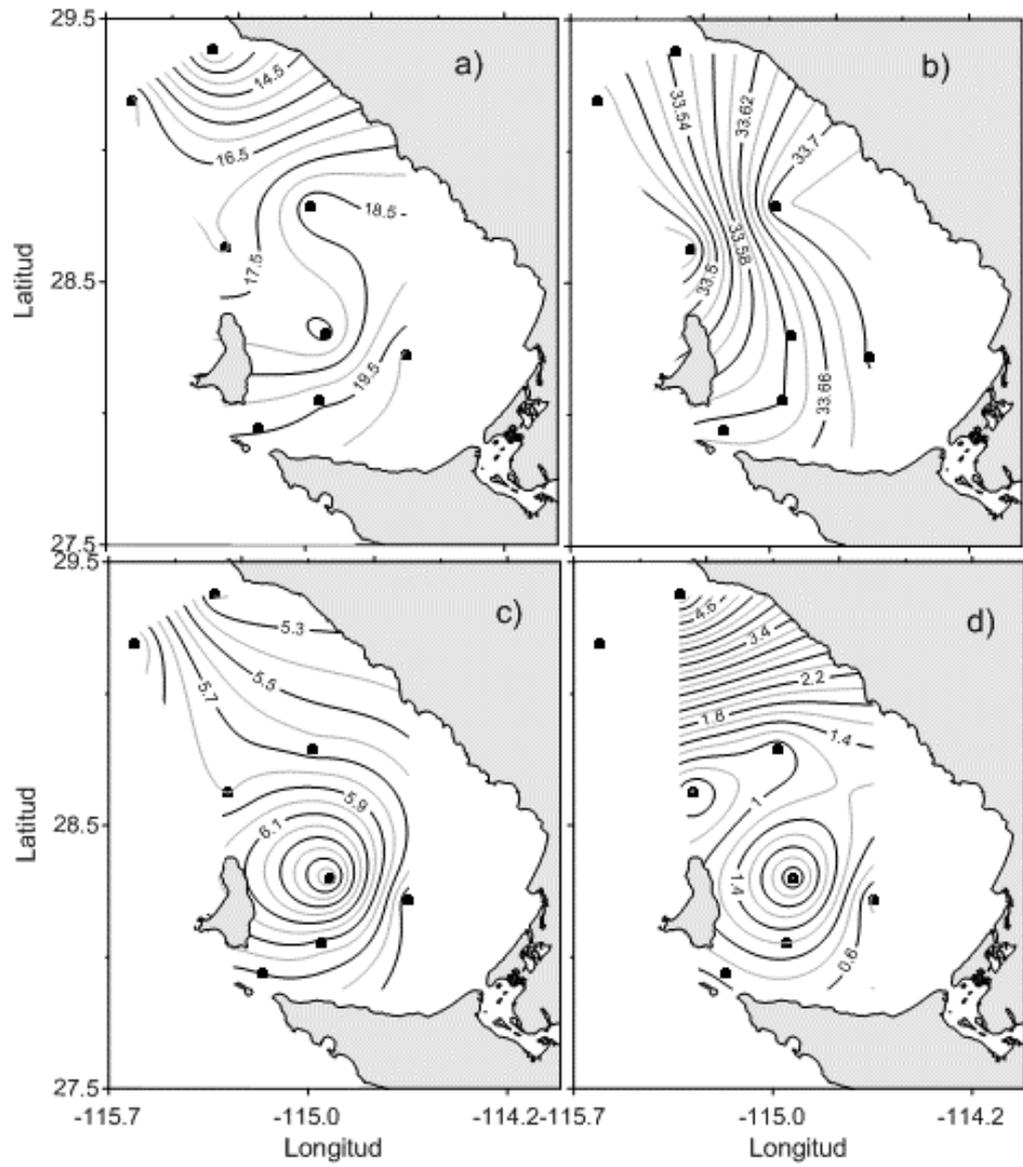
Anexo XXXV. Julio 2007 (0707) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



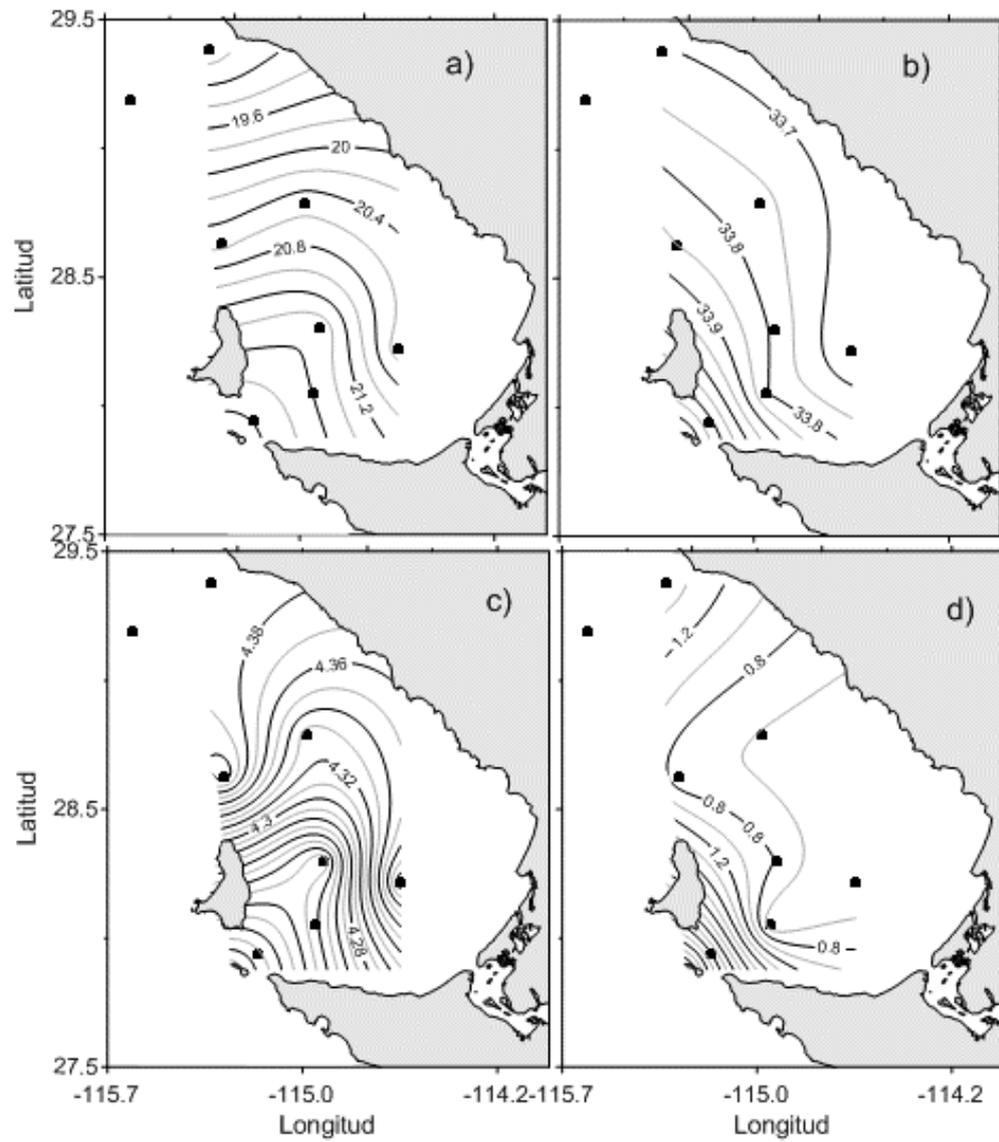
Anexo XXXVI. Enero 2008 (0801) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



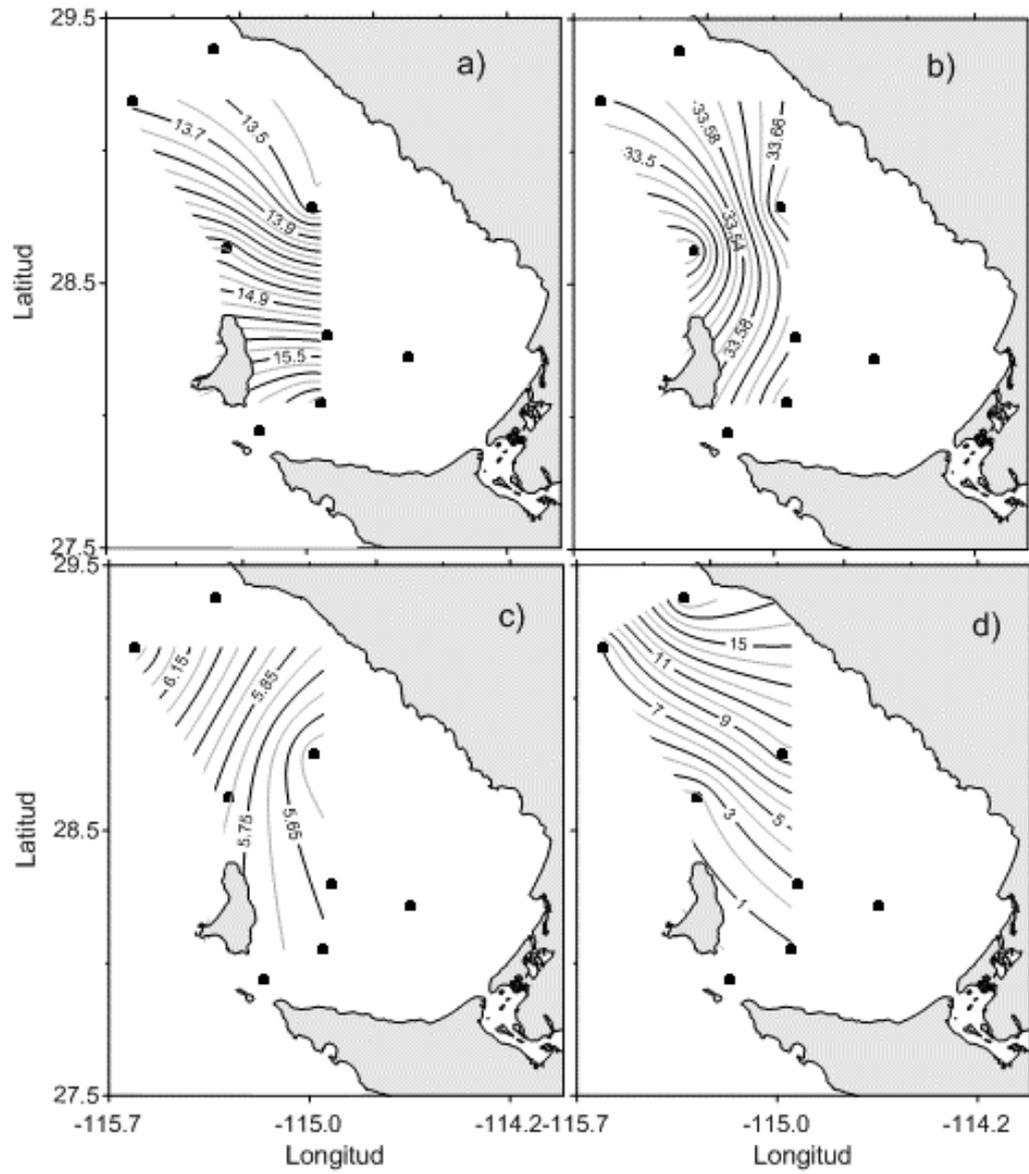
Anexo XXXVII. Abril 2008 (0804) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



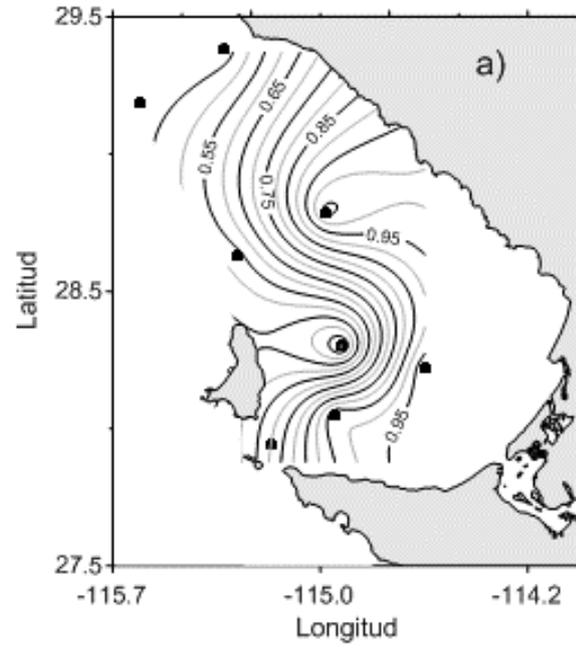
Anexo XXXVIII. Julio 2008 (0807) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



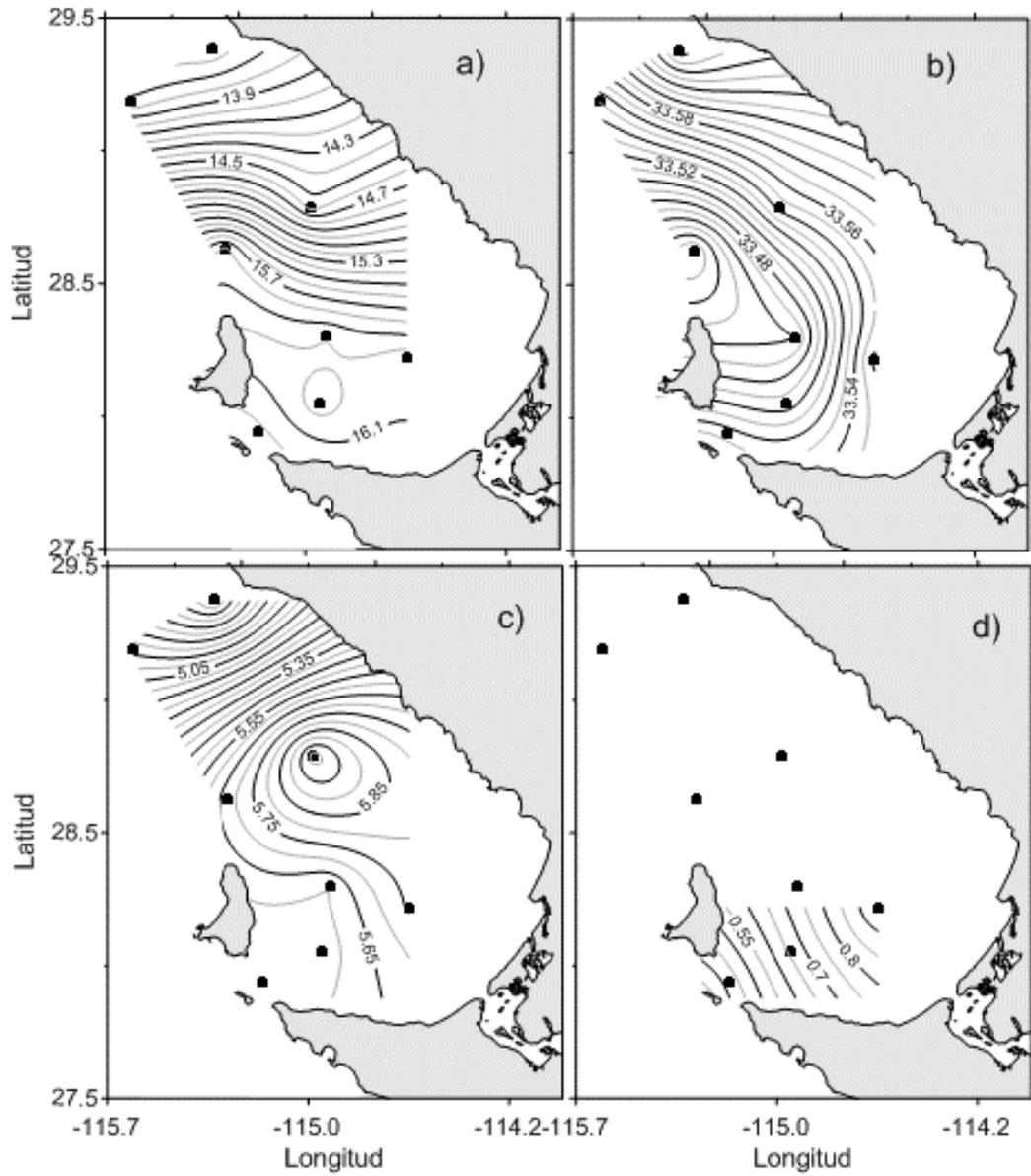
Anexo XXXIX. Octubre 2008 (0810) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



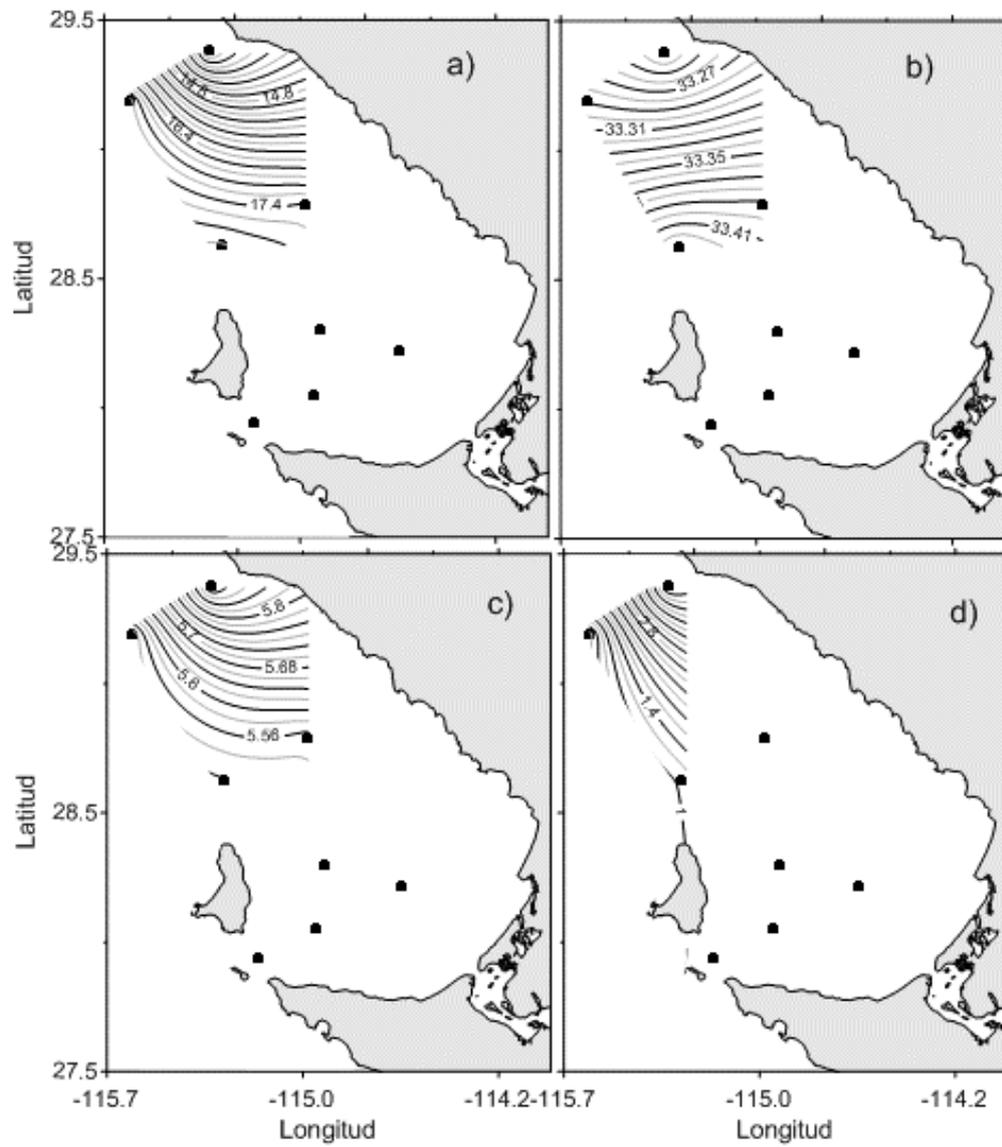
Anexo XL. Abril 2009 (0904) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



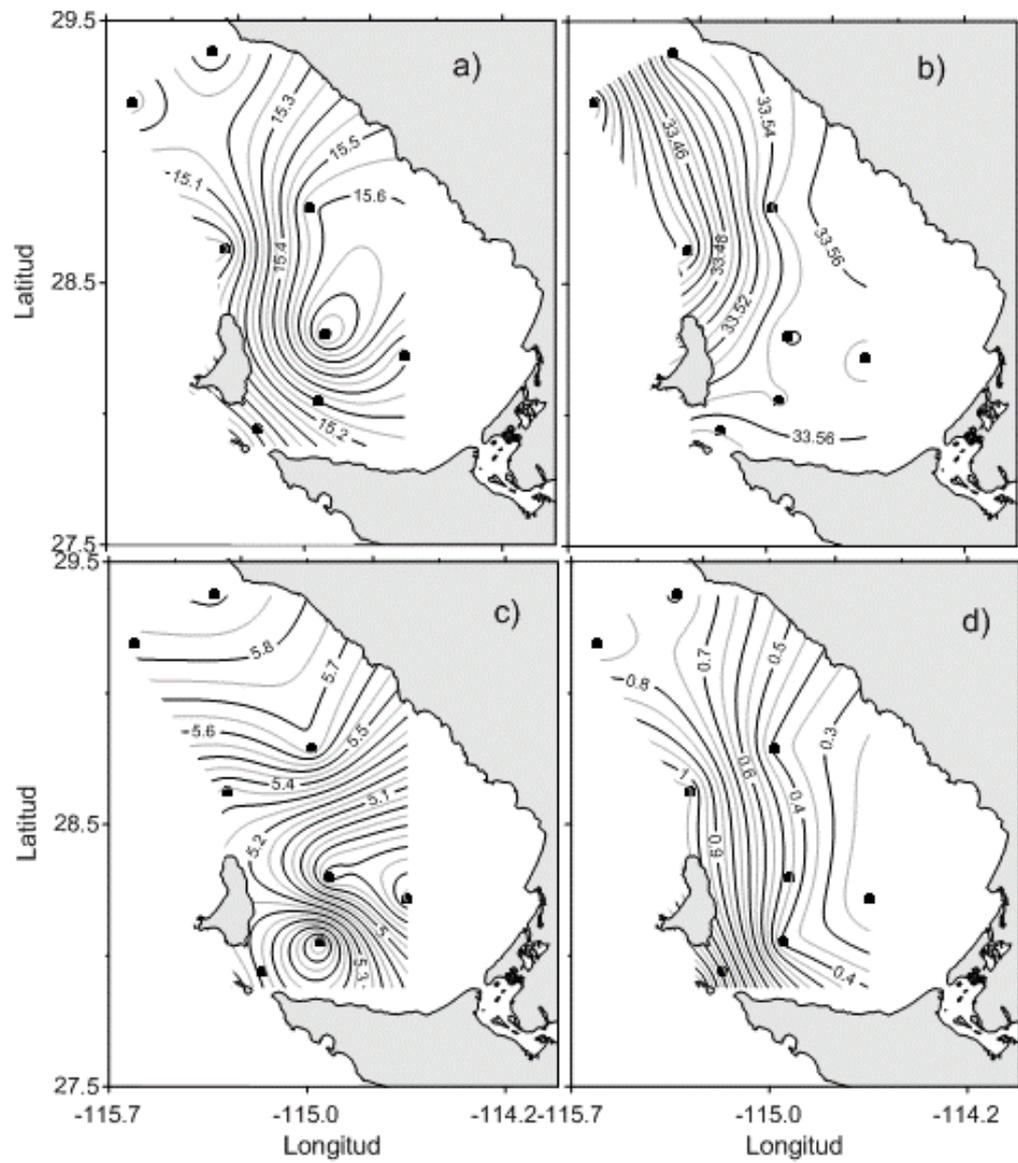
Anexo XLI. Octubre 2009 (0910) a) Chl-a (mg m-3).



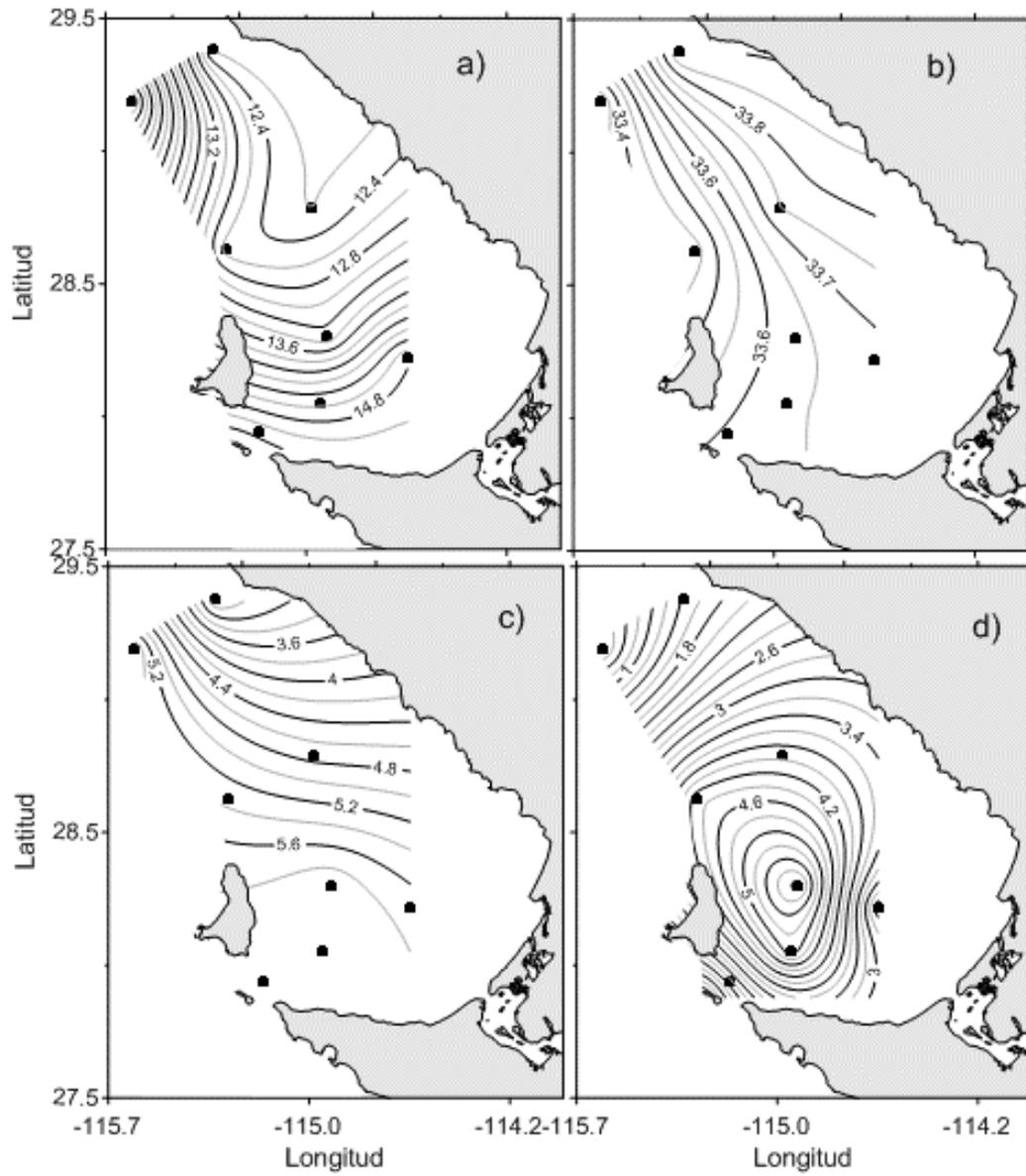
Anexo XLII. Abril 2010 (1004) a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) salinidad, c) oxígeno (ml l^{-1}) y d) Chl-a (mg m^{-3}).



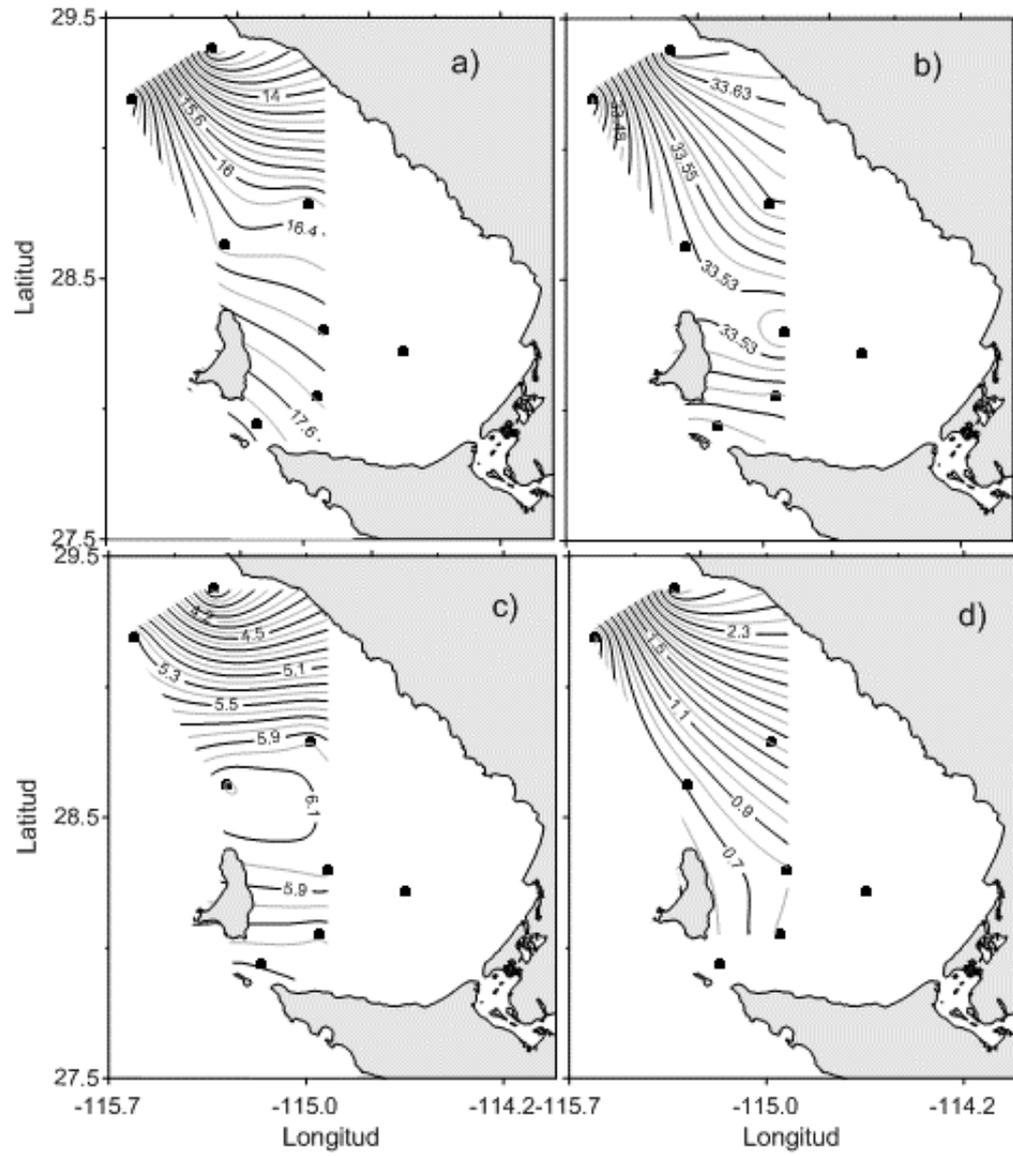
Anexo XLIII. Octubre 2010 (1010) a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) salinidad, c) oxígeno (ml l^{-1}) y d) Chl-a (mg m^{-3}).



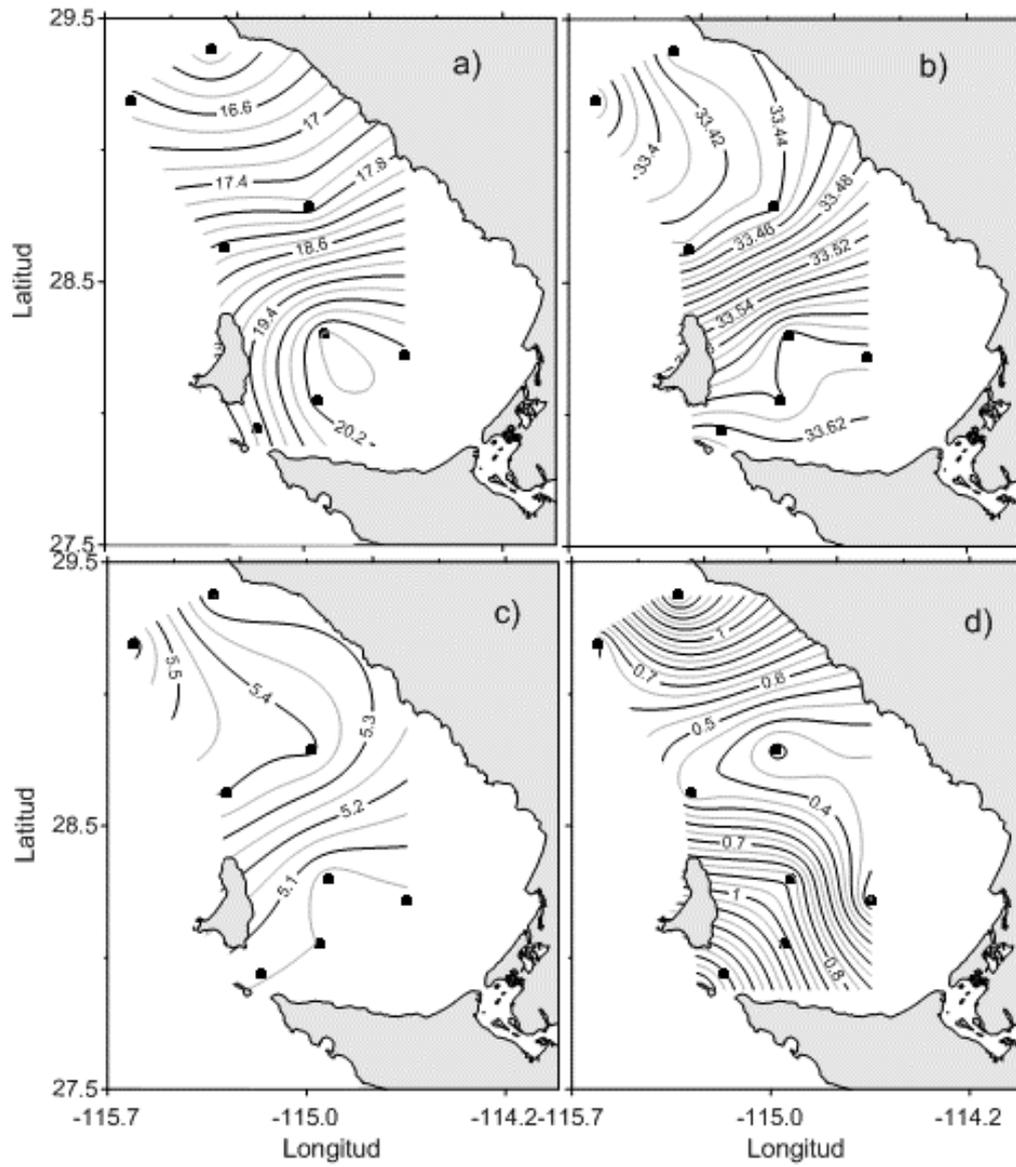
Anexo XLIV. Enero 2011 (1101) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



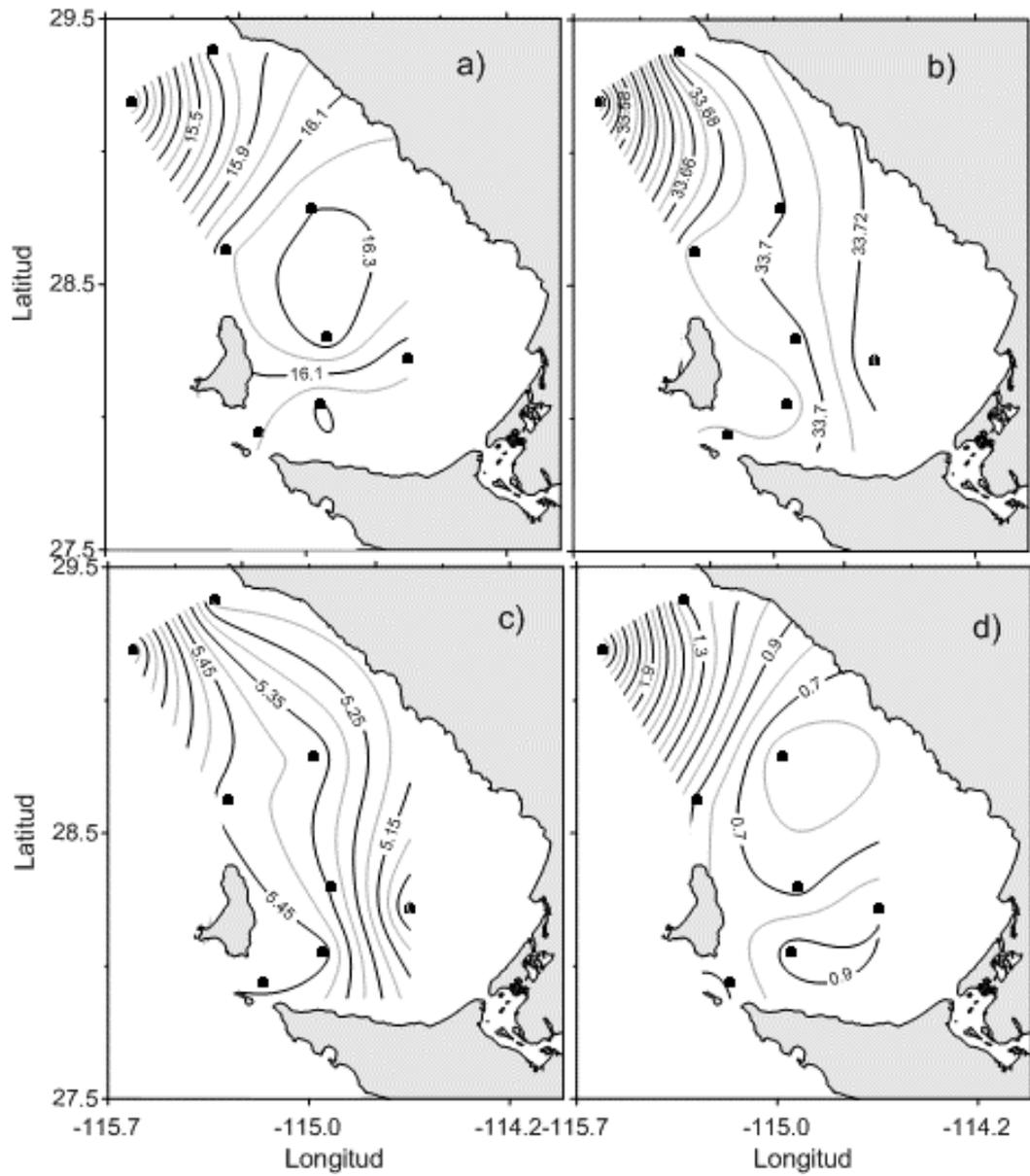
Anexo XLV. Abril 2011 (1104) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



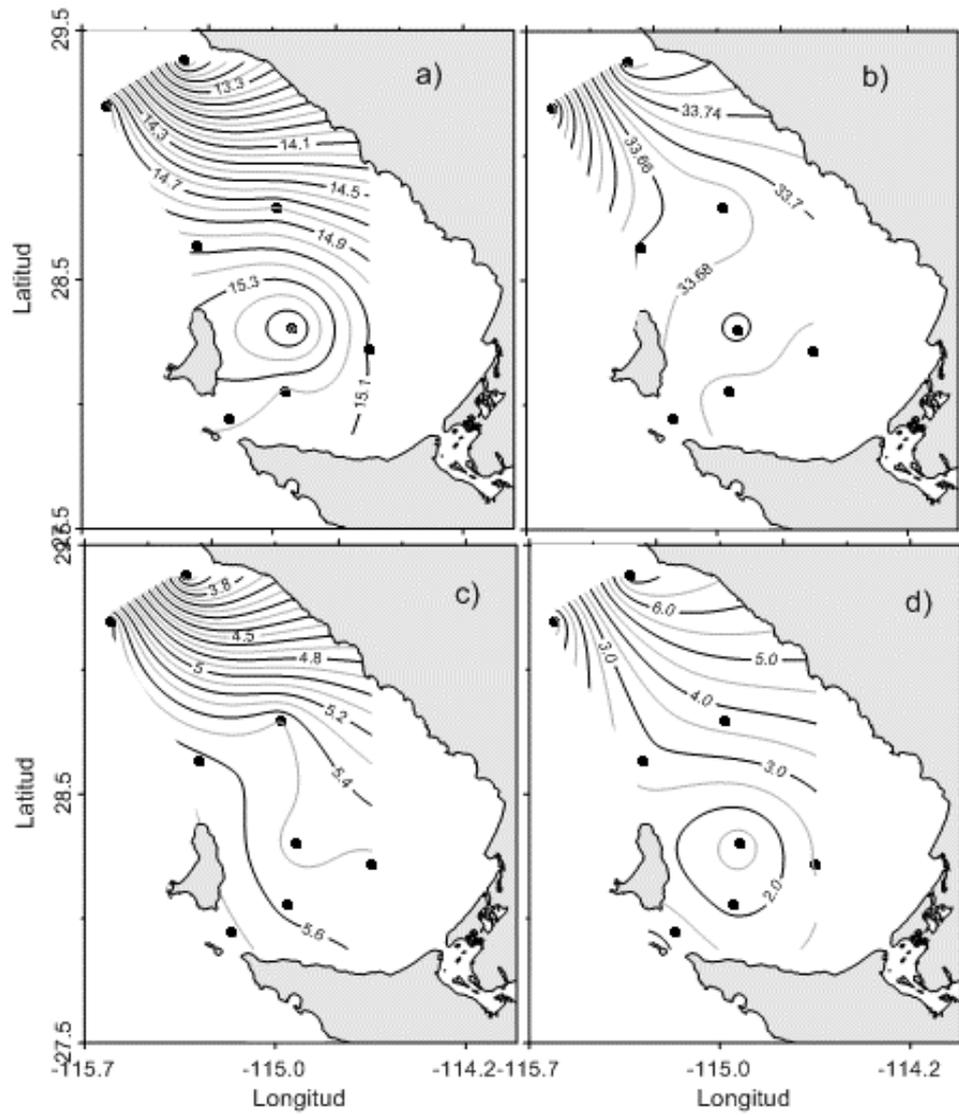
Anexo XLVI. Julio 2011 (1107) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



Anexo XLVII. Octubre 2011 (1110) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



Anexo XLVIII. Enero 2012 (1201) a) temperatura (°C), b) salinidad, c) oxígeno (ml l⁻¹) y d) Chl-a (mg m⁻³).



Anexo XLIX. Abril 2012 (1204) a) temperatura (°C), b) salinidad y c) oxígeno (ml l⁻¹).