



Universidad Autónoma de Baja California



Facultad de Ciencias Marinas

Oceanología

**PRODUCCIÓN PRIMARIA EN LA REGIÓN SUR DE LA CORRIENTE
DE CALIFORNIA DURANTE ENERO Y ABRIL DEL 2003**

Tesis que para obtener el título de Oceanólogo presenta:

Juan Pablo Cantú Ontiveros

Ensenada, Baja California, México

Agosto del 2005

RESUMEN

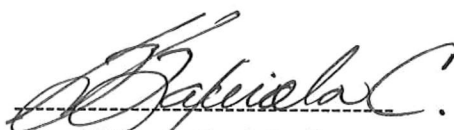
Con base en datos de dos cruceros oceanográficos realizados durante enero y abril del 2003 a bordo del *B.O. Francisco de Ulloa* dentro del programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), se estudió la variación de la producción primaria frente a Baja California. Se realizaron lances de CTD hasta los 1000 m en todas las estaciones de la red IMECOCAL para obtener información sobre la temperatura y la salinidad. Se hicieron 12 experimentos de producción primaria en enero y 11 en abril. Las muestras fueron colectadas con botellas Niskin de 5-litros de capacidad. Los experimentos de producción “*in situ*” se llevaron a cabo en seis diferentes profundidades estimadas a partir de lecturas del disco de Secchi. La muestra de agua correspondiente al 30% de la irradiancia superficial se utilizó en experimentos fotosíntesis-irradiación (curvas P-E). Tanto las muestras de los experimentos “*in situ*” como las de los experimentos P-E fueron inoculadas con 100 μl de ^{14}C e incubadas por ~ 1.5 h. La determinación de clorofila *a* se realizó mediante el método fluorimétrico. Se estimó la producción primaria superficial en toda el área de estudio con el modelo de Platt y Sathyendranath (1988) utilizando datos de clorofila y promedios de parámetros fotosintéticos e información de SeaWIFS. La producción primaria integrada en la zona eufótica (PP_{eu}) durante enero para toda el área de estudio tuvo un promedio de $139 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1} \pm 16 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, mientras que en abril fue de $86 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1} \pm 7 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Los valores más altos de clorofila integrada se presentaron en enero, con un promedio de 95 mgChla m^{-2} . Sin embargo, abril presentó altas concentraciones de clorofila en estaciones cercanas a la costa ocasionados por los eventos de surgencias típicos de este mes y un promedio de 48 mgChla m^{-2} para toda el área. Se observó que los procesos de estratificación fueron menores en enero, con cambios de temperatura ($\Delta T < 1.5^\circ\text{C}$) entre los 0 y 50 m en casi toda el área de estudio. Durante abril el patrón de estratificación se dio en dirección costa-océano con aguas más estratificadas cerca de la costa ($\Delta T > 3^\circ\text{C}$) y menos estratificadas en las regiones más oceánicas ($\Delta T < 0.5^\circ\text{C}$). En enero, los valores promedio de la tasa fotosintética máxima [P^{B}_{m}] así como del coeficiente de máxima utilización de luz [α^{B}] fueron entre tres y dos veces menores que en abril, respectivamente. Estos valores se relacionaron positivamente con la menor estratificación durante el período de invierno. La producción primaria superficial estimada por el modelo de Platt y Sathyendranath explicó el 76% de la varianza para enero, mientras que en abril fue del 83%. Se determinaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la producción primaria de enero y abril del 2003, con una mayor producción durante el invierno.

PRODUCCIÓN PRIMARIA EN LA REGIÓN SUR DE LA CORRIENTE
DE CALIFORNIA DURANTE ENERO Y ABRIL DEL 2003

TESIS QUE PRESENTA:

Juan Pablo Cantú Ontiveros

APROBADA POR:



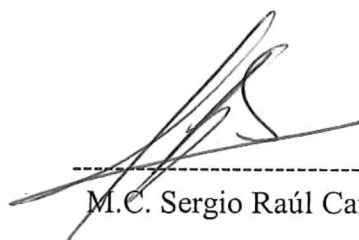
Dr. Gilberto Gaxiola Castro

Director de Tesis



Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa

Sinodal Propietario



M.C. Sergio Raúl Canino Herrera

Sinodal Propietario

Dedicatoria

A ti

Jesucristo, por haberme dado la oportunidad de vivir, de tener una familia tan hermosa y por permitirme realizar este sueño, pero principalmente por haberte mostrado a mi vida y permitirme llamarte papá, por enseñarme a vivir, por haber cambiado mi forma de pensar y ahora darme cuenta que tú eres el camino a seguir. Gracias por tu paciencia y tú incomparable amor. . . .

Abuela, porque siempre estuviste a mi lado, porque nunca demostraste cansancio ni fatiga, por haber guiado cada uno de mis pasos y enseñarme lo hermosa que es la vida cuando tienes alguien que te ama tanto como tú lo haces. Por ser el pilar grande y fuerte de la casa, por corregirme cuando fue necesario, por todos esos sabios consejos que han hecho de mí lo que soy ahora y porque no sólo fuiste una madre sino también mi mejor amiga.

Madre, por haber estado dispuesta a todo para darme lo mejor a mí, y a pesar de todo lo difícil que fue para ti siempre pensaste primero en mí. Muchas gracias por ese gran sacrificio, quiero que sepas que a pesar de que nunca estuvimos juntos siempre te lleve en mi mente y mi corazón. Espero siempre puedas estar orgullosa de mí, te amo.

Tío Beto, por ser la persona que más admiro, por impulsarme a alcanzar mis metas, porque con tu trabajo, responsabilidad y disciplina me inspiraste a luchar para llegar a ser alguien. Además por enseñarme a mostrar humildad y generosidad hacia la vida, por demostrar cada día que el trabajo de un hombre puede mucho. Pero principalmente por haberme formado como a tú hijo.

Yanneli, porque desde que te conocí cambiaste mi vida al mostrar ternura y sencillez en todo lo que hacías. Por todo lo que he aprendido de ti, por enseñarme que en esta vida existen cosas mucho más importantes que pensar en si mismo. Gracias por tu paciencia, comprensión y cariño, por estar siempre conmigo, pero sobretodo gracias por ser lo mejor que he tenido en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Dr. Gilberto Gaxiola Castro por haber dirigido este trabajo, por todas sus enseñanzas, consejos y toda la amistad brindada. Por todas las palabras de aliento y motivación que siempre me ayudaron a continuar y todo el apoyo necesario para la realización de este trabajo. Gracias por ser un buen ejemplo tanto en lo académico como en lo humano.

Al Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa y al M. en C. Raúl Canino Herrera por haber aceptado ser miembros de este comité, por sus valiosas aportaciones y sugerencias en la mejora de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Baja California por la grata experiencia que fue pasar por tus aulas, por haberme formado con un sentido más amplio y crítico que ahora me permiten tener confianza para hacer frente a nuevos retos.

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada por facilitarme los medios y recursos necesarios para la realización de este trabajo.

Al programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) dentro del cual se realizaron los cruceros del presente trabajo, con apoyo del CICESE y del CONACYT bajo el proyecto G 35326-T: “Respuesta del plancton al forzamiento físico de mesoescala en el ecosistema pelágico en la zona sur de la Corriente de California”. Además de la beca otorgada durante un año por el mismo proyecto.

Al Dr. Reginaldo Durazo por haberme proporcionado la información de CTD, así como también los datos de los promedios históricos de los diagramas T-S y a sus comentarios que permitieron mejorar este trabajo.

Al Dr. Antonio Trujillo por su ayuda en el análisis estadístico de este trabajo además por todos los consejos y la disposición mostrada durante mis estudios.

Al Oc. Martín de la Cruz por la colecta y análisis de las muestras enero del 2003, así como también por enseñarme las rutinas de trabajo tanto en cubierta como en laboratorio muchas gracias.

A todo el grupo de PP. (Gilos Boys) T. Leticia Espinosa Carreón, Jushiro Morales Cepeda, Elsa Aguirre Hernández, Martín de la Cruz, M. David Martínez Gaxiola, José Luis Peña Manjares y Benigno Hernández. Sin duda sin toda su experiencia en el tema sin esos comentarios tan acertados y todo el apoyo para el mejoramiento de este trabajo no hubiese sido posible.

Al M.C. Héctor Atilano por todos sus valiosos consejos dentro y fuera de laboratorio, por haber contado con tu apoyo muchas gracias.

A la tripulación del B.O. Francisco de Ulloa. Luis Cárdenas, Moisés Mendoza, Gustavo Castro, Julio Núñez, José Contreras, Román Herrera, Juan F. Moreno porque gracias a todo su apoyo se hizo posible la colecta de muestras. Así como también a todos los que ayudaron a coordinar este trabajo en especial a Daniel Loya, Humberto Moreno, Joaquín García y Roberto Mendoza.

A mis maestros predilectos: Manuel Moreno, Graciela Guerra, Sergio Pou, Ana Maria Iñiguez, Armando Rodríguez Pinal[†], Rafael Hernández Walls, Antonio Trujillo, Martín Hernández Ayón, José Antonio Segovia. Gracias por toda su paciencia y enseñanzas.

A mi Madre, Felipe, Nadia y China que sin duda siempre los llevo en mí corazón y que cada día me inspiran a seguir adelante.

A mis tíos: Alberto (por tu ejemplo), Enriqueta (por tu cariño), Sergio (por tu amistad), Luis (por los retos).

A Tony por recibirme en tu casa cuando recién llegue, por motivarme para seguir adelante y por todas las veces que me ayudaron durante mis estudios.

A mi tía Guadalupe (Pipis) por tu cariño y porque se que siempre estuve en tus oraciones, y a mi tío Renato que me aconsejaste sabiamente desde pequeño, gracias.

A mis primos y primas, que los quiero muchísimo y que a todos los considero como mis hermanos.

A la familia Gaxiola-Nájera que desde el principio me dieron lo mejor, por estar siempre pendientes de mí, por instruirme siempre por caminos de verdad, por haberme adoptado como a un miembro de familia. Pero sobretodo por todo su amor, cariño, paciencia y comprensión. Muchas gracias.

A Néstor, Don Manuel, Sra. Lupita y Samanta por haberme hecho parte de su familia. Por todo su cariño, consejos y todo el apoyo recibido desde mi niñez.

A José Jorge Ríos Mota, Don Jorge, Sra, Tamy, M. Minerva y Georgina por ser también como una familia para mí. Por sus consejos, motivación, confianza y por estar conmigo siempre que los necesite.

A Gustavo Salazar Carmona (popochis), por todo lo que aprendimos juntos, por ser un verdadero amigo, por estar conmigo en momentos difíciles y por todo lo que no dejamos de hacer (gracias).

A Fco. Javier Escalante Almada porque nunca dijiste que no cuando ocupé un paro, por todos las veces que convivimos y estudiamos durante la carrera, pero principalmente gracias por tu amistad.

A Lulú Y Pablo por ser quienes siempre me escucharon, por su amistad y por todas las veces que me apoyaron cuando más los necesite.

A la Familia Nava-Romero por todo el amor que me dieron y por haberme apoyado en la etapa más importante de mi carrera.

A Doña Tere y a su hija Isabel por su cariño, por haberme apoyado durante toda la carrera, por sus consejos y aliento para seguir adelante.

A todos mis amigos y amigas de la carrera: Camilo, Evaristo, Martín, Guillermo, Arturo, Rafael, Felipe, Jorge, Fidel, Charly, Diana, Lizeth, Zaida, Karina, que fueron los mejores y que con ellos me sentí siempre bien.

A dos grandes amigos Jesús Eduardo Hernández Pérez y Miguel Ángel Cuevas principalmente por su amistad pero también por haberme apoyado tanto cuando todo cambio de rumbo en mi vida siempre lo recordare.

A todos los compás de Tj por haberme aceptado cuando recién llegue a Baja California por su amistad y por todas las veces que me apoyaron durante mis estudios.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN.....	i
PAGINA APROBATORIA.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE GENERAL	vii
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. ÁREA DE ESTUDIO	9
IV. OBJETIVO.....	14
V. HIPÓTESIS.....	14
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
VII. RESULTADOS.....	23
VIII. DISCUSIONES.....	44
IX. CONCLUSIONES.....	55
X. BIBLIOGRAFÍA.....	57

Lista de Tablas

Tabla		Página
I	Clorofila integrada (Chl_i [$mgChla\ m^{-2}$]), producción primaria integrada (PP_i [$mgC\ m^{-2}\ h^{-1}$]), tasa fotosintética máxima (P_m^B [$mgC\ (mgChla)^{-1}\ h^{-1}$]), coeficiente de máxima utilización de luz (α^B [$mgC(mgChla\ h)^{-1}/\mu moles\ fotones\ m^{-2}\ s^{-1}$]), y del parámetro fotoadaptativo (E_K [$\mu moles\ fotones\ m^{-2}\ s^{-1}$]) para todas las estaciones muestreadas durante enero y abril del 2003. Los datos con asteriscos (*) no se consideraron para el cálculo de los promedios.	43
II	Promedios regionales de los parámetros fotosintéticos para el cruce de enero y abril del 2003. Tasa fotosintética máxima (P_m^B [$mgC\ (mgChla)^{-1}\ h^{-1}$]) y el coeficiente de máxima utilización de luz (α^B [$mgC(mgChla\ h)^{-1}/\mu moles\ fotones\ m^{-2}\ s^{-1}$]).	44

Lista de Figuras

Figura		Página
1	Localización del área de estudio y estaciones donde se realizaron los experimentos de producción primaria durante enero y abril del 2003. Los números indican las posiciones de las estaciones del programa IMECOCAL. La línea transversal muestra las dos regiones en las cuales se dividió el área de estudio [Región I, Norte y Región II, Central]. El color de fondo es la producción primaria de abril de 1998 estimada a partir del modelo de Cepeda-Morales (2004) con datos de sensores remotos.	11
2	Ejemplo de la relación fotosíntesis-irradiancia (curva P-E). P_m^B es la tasa fotosintética máxima [$\text{mgC} (\text{mgChl}a)^{-1} \text{h}^{-1}$]; α^B es el coeficiente de máxima utilización de luz [$\text{mgC}(\text{mgChl-}a \text{ h})^{-1} / (\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{s}^{-1})$] y $E_K (P_m^B/\alpha^B)$ es el parámetro fotoaclimatación del fitoplancton [$\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$]. La línea continua roja representa el ajuste hiperbólico a partir de la ecuación de Jassby y Platt (1976). Las líneas representan intersecciones y prolongaciones de los parámetros estimados.	20
3	Diagrama de temperatura y salinidad en la región sur de la Corriente de California durante enero y abril del 2003. Los contornos representan líneas de igual densidad referidas como sigma-t. Los recuadros representan las regiones T-S para las diferentes masas de agua, de acuerdo a la clasificación de Kyndiushev (1968). TSW= Agua Tropical Superficial; ESsW= Agua Subsuperficial Ecuatorial; SAW= Agua Subártica; PIW= Agua Intermedia del Pacífico; PDW= Agua Profunda del Pacífico.	25
4	Diagramas de temperatura y salinidad (T-S) de los cruceros (IMECOCAL) para enero (a) y abril (b). En la figura c y d se contrastan los promedios históricos en rojo (CalCOFI 1950-1978; IMECOCAL 1998-2003) y su relación con la media de cada crucero en azul. Las líneas punteadas representan una desviación estándar de la media. Los contornos representan líneas de igual densidad en unidades de sigma-t.	27
5	Distribución espacial de la temperatura a 10m (a) y 50m (b) para enero. Temperatura durante abril a 10m (c) y 50m (d). El intervalo de los contorno es 1°C.	28

6	Salinidad para los cruceros IMECOCAL durante enero a 10m (a) y 50m (b); abril a 10m (c) y 50m (d). El intervalo de los contornos es 0.1.	30
7	Clorofila a 10m para enero (a) y abril (c) (mgChla m^{-3}). Clorofila integrada para enero (b) y abril (d) en (mgChla m^{-2}).	31
8	Secciones verticales para enero del 2003 en las líneas 103, 120 y 130. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (a), (b) y (c). Salinidad (d), (e) y (f). Clorofila (mg Chla m^{-3}) (g), (h) e (i). Los datos de clorofila sólo se tomaron para los primeros 200m de profundidad.	34
9	Secciones verticales para abril del 2003 en las líneas 103, 120 y 130. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (a), (b) y (c). Salinidad (d), (e) y (f). Clorofila (mg Chla m^{-3}) (g), (h) e (i). Los datos de clorofila sólo se tomaron para los primeros 200m de profundidad.	35
10	Diferencia en temperatura (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) entre 0 y 50 metros: (a) enero; (b) abril.	36
11	Perfiles verticales de producción primaria “ <i>in situ</i> ” ($\text{mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) para enero (a) y abril (b) del 2003. Los números indican las estaciones hidrográficas donde se hicieron los experimentos.	37
12	Distribución espacial de la producción primaria integrada ($\text{mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) para enero (a) y abril (b), sobre los contornos de clorofila integrada en la columna de agua (mgChla m^{-2}) para ambos meses.	39
13	Producción primaria integrada en la zona eufótica ($\text{mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) versus clorofila integrada (mgChla m^{-2}) para las estaciones muestreadas durante enero y abril.	40
14	Curvas P-E obtenidas de muestras colectadas al $30\%E_{(\text{PAR})}$ superficial para enero del 2003. La línea continua es el ajuste obtenido con el modelo de Jassby y Platt (1976). Los números dentro de cada recuadro indican las estaciones de muestreo. Los asteriscos representan las estaciones donde la varianza explicada por el modelo fue menor que 80% pero mayor que 70%.	41

- 15 Curvas P-E obtenidas de muestras colectadas al $30\%E_{(PAR)}$ superficial para abril del 2003. La línea continua es el ajuste obtenido con el modelo de Jassby y Platt (1976). Los números dentro de cada recuadro indican las estaciones de muestreo. Los asteriscos representan las estaciones donde la varianza explicada por el modelo fue menor que 80% pero mayor que 70%. 42
- 16 Producción primaria superficial “*in situ*” (PP_{sup} ; $mgC\ m^{-3}\ h^{-1}$) versus producción primaria superficial estimada con el modelo de Platt y Sathyendranath (1988) para las estaciones muestreadas durante enero y abril del 2003. Los puntos dentro de los círculos no se consideraron para el cálculo del coeficiente de determinación. La línea continua indica la relación 1:1. 51
- 17 PP_{sup} ($mgC\ m^{-3}\ h^{-1}$) estimada con el modelo de Platt y Sathyendranath (1988). a) Enero del 2003; b) Abril del 2003. 52
- 18 Serie de tiempo de julio de 1998 a abril del 2003. a) Producción primaria integrada en la zona eufótica. b) Tasa fotosintética máxima (P^B_m). c) Coeficiente de máxima utilización de luz (α^B). El círculo es el promedio y la barra representa una desviación estándar. Los círculos azules destacan los promedios para enero y abril del 2003. 55

INTRODUCCIÓN

La producción primaria y la biomasa del fitoplancton marino medida como clorofila *a* representan variables ecológicas muy importantes para determinar la fertilidad en el océano. Aunque el fitoplancton representa sólo el 1 o 2% de la biomasa vegetal global, estos organismos pueden fijar entre 35 y 45 gigatoneladas de carbono por año (producción anual), lo cual representa entre el 30 y 60% de la fijación anual de carbono en la tierra (Sakshaug et al., 1997). De tal forma que algunos autores (Sarmiento et al., 1990; Antoine et al., 1996) afirman que este flujo es suficiente para mantener una menor concentración superficial de CO₂ en el océano como resultado de la “bomba biológica”. Sarmiento y Siegenthaler (1992) sugirieron que es poco probable que los cambios de largo período del CO₂ antropogénico tuvieran un impacto significativo sobre el flujo de éste en el océano. Por lo tanto, es difícil argumentar que un mejor conocimiento de la magnitud de la “bomba biológica” tendrá un impacto significativo acerca del entendimiento actual sobre el destino del CO₂ antropogénico.

En la época moderna el ciclo biogeoquímico global del carbono no está balanceado. La oxidación neta del carbono orgánico, principalmente como resultado de la combustión del petróleo, excede la tasa de fijación neta de carbono por los organismos fotosintéticos (Houghton et al., 1990). Aún cuando los procesos fotosintéticos ocurren tanto en la tierra como en el océano, hay un 30% de incertidumbre en la tasa de fijación neta del carbono y la biomasa en los dos ambientes. Algunos científicos creen que una

posible solución al exceso de CO₂ antropogénico sería fertilizar con hierro soluble las aguas de las zonas oceánicas con altos nutrientes y baja clorofila, las cuales estimularían el aumento de la producción primaria, lo que consumiría entre un tercio y la mitad de este compuesto (Liebes, 1992; Falkowski y Raven, 1997). Por consiguiente, es muy importante realizar estimaciones precisas de la producción primaria que ayuden a entender mejor la problemática del ciclo del CO₂ a nivel global (Sosa-Avalos, 2002).

Una de las formas más comunes de medir la producción primaria es relacionar la tasa de incorporación de carbono radioactivo ¹⁴C con la irradiancia (Dring y Jewson, 1982; Geider y Orborne, 1992). En este caso se desarrollan experimentos basados en incubaciones de muestras confinadas a diferentes profundidades e intensidades de luz en la columna de agua (producción primaria “*in situ*”), o bien incubaciones a un nivel fijo y diferentes intensidades de luz (curvas fotosíntesis-irradiancia, P-E) (Aalderink y Jovin, 1997). Se han hecho grandes esfuerzos para estimar la producción primaria a escala global con el propósito fundamental de entender mejor los procesos que intervienen en el ciclo biogeoquímico del carbono. Steemann Nielsen y Jensen (1957) fueron los primeros en calcular la producción primaria anual a partir de mediciones con ¹⁴C, con un estimado de 12-15x10⁹ gC año⁻¹. Koblentz-Mishke (1965) calculó una producción primaria total global de 23x10⁹ gC año⁻¹. Más tarde Eppley y Peterson (1979) también calcularon la producción primaria global (27x10⁹ gC año⁻¹) basada en estimaciones a partir de la concentración de clorofila.

El propósito de este trabajo es contribuir al conocimiento de la variabilidad temporal (invierno-primavera) de la producción primaria, así como también de la biomasa del fitoplancton de la región frente a Baja California.

ANTECEDENTES

Las variaciones en las tasas fotosintéticas para un área dada están relacionadas con la cantidad y distribución de la biomasa del fitoplancton. Aunque en ocasiones hay regiones que presentan una misma cantidad de biomasa pero diferentes tasas fotosintéticas y viceversa. La concentración de la clorofila en el océano ha permitido caracterizar la distribución de la biomasa fitoplanctónica en la columna de agua. Esto se debe a que el proceso de la fotosíntesis, bajo cualquier condición de irradiancia, depende principalmente de los pigmentos que absorben la luz. Por convención, el pigmento usado para la relación anterior es la clorofila *a* por estar contenida en todas las clases de algas, excepto en algunas proclorofitas marinas (Cullen, 1982; Falkowski y Raven, 1997). Cullen (1982) reportó que la distribución vertical de la clorofila *a* corresponde cercanamente a los gradientes verticales de nutrientes presentes en el océano.

La distribución espacial y temporal de los pigmentos fotosintéticos vista en imágenes de satélite para la región sur de la Corriente de California fue primeramente identificada por Peláez y McGowan (1986). Estos autores reportaron que en esta región la distribución de los pigmentos fotosintéticos es heterogénea y variable. Sin embargo,

existen estructuras principales de pigmentos que se observan recurrentes en el sistema. Entre ellas se puede describir una región frontera de pigmentos orientada latitudinalmente frente a Ensenada, que en ocasiones presenta ligeros cambios a escalas mensuales que consisten en desplazamientos de la zona frontera latitudinal hacia el suroeste en verano y hacia el noreste en invierno. También, existe una zona de meandros fuera de la costa orientada longitudinalmente en la cual se observan giros. La parte interna de la zona límite longitudinal está caracterizada por estructuras con un alto contenido de pigmentos fotosintéticos, alternando con estructuras de baja concentración de pigmentos localizadas fuera de la costa (Espinosa-Carreón et al., 2004). Al sur de San Diego, California y sur de San Quintín, Baja California se observan cerca de la costa estructuras parecidas a pequeños giros ciclónicos con alto contenido de pigmentos (de 1 a 2 mg m⁻³) (Peláez y McGowan, 1986). A escalas mensuales se observa que las estructuras de pigmentos fitoplanctónicos son más intensas en primavera y verano, y se debilitan en otoño, siendo aún más débiles (con concentraciones bajas de pigmentos) a fines de otoño y principios de invierno. Estos cambios coinciden con el transporte de agua y nutrientes en la Corriente de California, lo cual sugiere una conexión de las estructuras con cambios estacionales en la intensidad de la corriente (Peláez y McGowan, 1986).

En la región central y sur de la Corriente de California la distribución de la clorofila *a* con la profundidad se caracteriza por la presencia de un máximo cuya profundidad es variable (Millán-Nuñez et al., 1996). Al término anterior se le conoce como la

profundidad del máximo de clorofila (DCM, Deep Chlorophyll Maximum). Si el máximo de clorofila se encuentra a la profundidad del 1% de luz superficial, esta puede contribuir en un 10% (máximo) a la producción primaria integrada en la zona eufótica (Millán-Nuñez et al., 1996). Venrick (1998) mostró que en el área de Santa Bárbara, California las mayores concentraciones de los pigmentos estuvieron regularmente por arriba de los 25m de profundidad, con una tendencia máxima anual durante abril y mayo. Esta autora menciona que el valor máximo de la clorofila a en la columna de agua explica el 65% de la variabilidad de la clorofila integrada.

El cálculo de la producción primaria a partir de modelos requiere del conocimiento de la variabilidad regional de los parámetros fotosintéticos (Platt y Sathyendranath, 1988). Desafortunadamente existe muy poca información acerca de la tasa máxima fotosintética [P_m^B] y del coeficiente máximo de utilización de luz [α^B] del fitoplancton en aguas mexicanas. Gaxiola-Castro y Alvarez-Borrego (1986) generaron en enero de 1981 curvas P-E para diez localidades del pacífico mexicano, desde la región adyacente a Punta Eugenia, Baja California, hasta Acapulco, Guerrero. Observaron que no hubo tendencia geográfica alguna en los valores de P_m^B y α^B . Sin embargo, los parámetros presentaron grandes cambios con la profundidad, aún donde la homogeneidad vertical termohalina indicó alta inestabilidad y mezcla en la zona eufótica. Además P_m^B disminuyó con la profundidad debido al acondicionamiento del fitoplancton a irradiancias menores que en la superficie.

Aguirre-Hernández et al. (2004) generaron curvas P-E en la región frente a Baja California durante julio y septiembre de 1998. Estos autores observaron que el valor promedio de P_m^B durante julio fue de $8.2 \text{ mgC}(\text{mg Chl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$ en la zona costera, $4.7 \text{ mgC}(\text{mg Chl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$ en la zona oceánica y un promedio general de $6.4 \text{ mgC}(\text{mg Chl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$ para toda el área de estudio. Durante septiembre P_m^B tuvo valores de 0.51 a 5.5 $\text{mgC}(\text{mg Chl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$ con valores generalmente más bajos que en julio y un promedio de $3.17 \text{ mgC}(\text{mg Chl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$ para toda el área. El coeficiente de máxima utilización de luz [α^B] tuvo un promedio general durante julio de $0.012 \text{ mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1} / \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y de $0.008 \text{ mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1} / \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ durante septiembre.

Sosa-Avalos (2002) obtuvo parámetros fotosintéticos dentro de la región sur de la Corriente de California para el invierno, primavera, verano y otoño de 1999. Este autor calculó promedios de la tasa fotosintética máxima [P_m^B] mayores durante el verano [$5.0 \text{ mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$] y otoño [$5.3 \text{ mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$] y menores para invierno [$2.4 \text{ mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$] y primavera [$3.3 \text{ mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}$]. Los valores relativamente bajos de P_m^B durante invierno y primavera parecen estar relacionados con una menor irradiancia y con bajas temperaturas superficiales del mar (desde 13.0°C a 17.0°C), los cuales podrían tener un efecto en el proceso enzimático de las células. Durante verano y otoño el incremento en la irradiancia y la temperatura superficial del mar (16.2°C a 21.4°C) podrían ser los responsables del aumento de P_m^B , debido también a la fotoaclimatación fisiológica de las células del fitoplancton a altas irradiancias, debido a su permanencia cerca de la superficie como resultado de mayor estratificación. En

general, los valores promedios más bajos del coeficiente de máxima utilización de luz [α^B] se han registrado durante verano [$0.013 \text{ mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1} / \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] y los más altos se observaron en primavera [$0.056 \text{ mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1} / \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]. Sosa-Avalos (2002) señaló que los altos valores de α^B registrados en primavera parecen estar relacionados con la abundancia de diatomeas (*Chaetoceros spp*, *Nitzschia spp*) que dominaron en las estaciones costeras y con algunos dinoflagelados (*Scrippsiella trochoidea*, *Protoperidinium spp*). Los valores bajos de α^B observados durante invierno y verano se determinaron cuando los dinoflagelados fueron el grupo dominante (*Scrippsiella trochoidea*, *Oxytoxum laticeps*, *Oxytoxum varibile*). Las diferencias espaciales y estacionales en la magnitud de este parámetro fotosintético parecen estar relacionadas con la presencia de diferentes poblaciones de fitoplancton (Sosa-Avalos 2002), aunque se requiere mayor experimentación de campo y de laboratorio para probar esta hipótesis.

Espinoza-Carreón (2005) realizó experimentos (curvas P-E) frente a Baja California durante julio y octubre del 2000. Observó que el promedio general de α^B en el área de estudio no presentó variación significativa, con un valor promedio de $0.005 \text{ [mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1} / \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$ en ambos muestreos. Mientras que el promedio general de la tasa fotosintética máxima P_m^B fue mayor en julio con un valor de $4.5 \text{ [mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}]$ y de $2.8 \text{ [mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{ h}^{-1}]$ para octubre.

La producción de materia orgánica también está en función de algunos factores físicos como surgencias, turbulencia y mezcla que provocan resuspensión de partículas hacia la zona eufótica las cuales absorben luz y afectan la distribución del fitoplancton en la columna de agua (Mann y Lazier, 1993). Otro factor principal que limita la productividad primaria es el régimen de luz al que está expuesto el fitoplancton en la columna de agua (Falkowski, 1980). Mann y Lazier (1993) reportaron que la fuerte mezcla vertical seguida de una estratificación permite que exista un transporte de nutrientes desde agua profunda y que se mantenga en la zona superficial. La estratificación de la columna de agua confina al fitoplancton a una zona delimitada en la cual la fotosíntesis diaria excede a la respiración. Existe una relación de alta productividad asociada con relajación de vientos en zonas de surgencia costera, ya que el fitoplancton utiliza los nutrientes transportados hacia la superficie por las surgencias. Por otro lado, Coté y Platt (1983) mencionan que las comunidades más productivas se presentan en discontinuidades de los campos físicos como sistemas de surgencias, áreas sobre la plataforma continental y frentes oceánicos.

El fitoplancton también requiere de compuestos inorgánicos y su disponibilidad en el agua de mar se mide como concentraciones de nutrientes, por ejemplo compuestos nitrogenados, fosfatos y silicatos que en algún momento pueden ser limitantes para su crecimiento (Falkowski, 1980). Cerca de la costa, los nutrientes son abundantes debido al aporte de agua de ríos o por surgencias costeras y pueden dar lugar a una producción fitoplanctónica elevada. Sin embargo, en estas zonas también se presentan cantidades

elevadas de zooplancton, principales consumidores del fitoplancton, controlando en cierta forma los florecimientos fitoplanctónicos (Hartline, 1980).

Estudios de producción primaria realizados anteriormente en la región frente a Baja California señalan que los valores de productividad son mayores durante los meses de verano que en los meses de otoño, debido principalmente a que la profundidad de la nutriclina es más somera durante julio lo cual ocasiona una mayor disponibilidad de nutrientes para el fitoplancton o bien afecta la composición taxonómica del fitoplancton (Aguirre-Hernández et al., 2004).

ÁREA DE ESTUDIO

La Corriente de California (CC) es una de las grandes corrientes limítrofes orientales del giro anticiclónico del Pacífico Norte (Hickey, 1979) que resultan de la asimetría termal en las grandes cuencas oceánicas. El Sistema de la Corriente de California (SCC) y en general la circulación oceánica del Pacífico oriental ha sido descrita por numerosos investigadores. Sverdrup y Fleming (1941) hicieron una de las primeras interpretaciones dinámicas de las corrientes en el área, estableciendo una fuerte conexión entre la circulación oceánica y los vientos superficiales (Parés et al., 1997).

El área de estudio se localiza frente a Baja California entre los 24° N y 32° N de latitud norte y 112° W a 120° W. De acuerdo a Vélez-Muñoz (1981) y a Gómez y

Vélez-Muñoz (1982) la Corriente de California se puede dividir en tres zonas con respecto al tipo de masas de agua: zona del dominio de la masa de Agua Subártica, zona de transición y zona de dominio de masa de Agua Ecuatorial. Gómez y Vélez-Muñoz (1982) sugieren que la zona de influencia Subártica se localiza de San Francisco a Cabo Mendocino, la zona de transición se encuentra frente a Baja California y sur de California y la zona de influencia ecuatorial está frente a Baja California Sur desde Cabo San Lucas hasta Punta Eugenia (Parés et al., 1997). El área de estudio se encuentra entre la zona de transición y la zona de dominio del agua ecuatorial, que cubren la red de estaciones del programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL, fig. 1).

El Sistema de la Corriente de California (CC) está formado por la Corriente Superficial, la Contra Corriente Costera (IC) y por la Contracorriente sub-superficial de California (CU). La CC es una corriente superficial (0-300m de profundidad) la cual fluye hacia el ecuador durante todo el año a lo largo de la costa oeste de América del Norte, formando posteriormente parte de la Corriente Nor-ecuatorial (North Equatorial Current, NEC) (Lynn y Simpson, 1987). El flujo de agua hacia el polo está formado por la Contracorriente Costera o también llamada Corriente de Davidson al norte de Punta Concepción, y la Contracorriente sub-superficial de California, también nombrada como SubCorriente de California. La velocidad promedio de la CC fuera de la costa de California es típicamente menor a 25 cm s^{-1} (Reid y Schwartzlose, 1962).

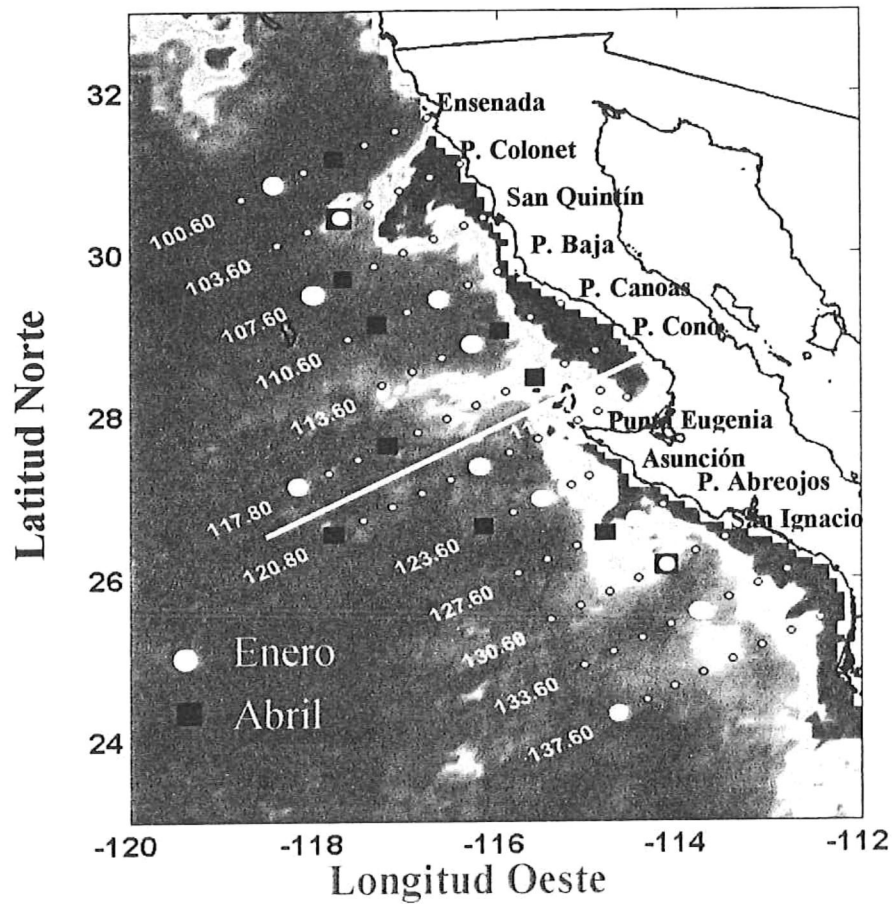


Figura 1. Localización del área de estudio y estaciones donde se realizaron los experimentos de producción primaria durante enero y abril del 2003. Los números indican las posiciones de las estaciones del programa IMECOCAL. La línea transversal muestra las dos regiones en las cuales se dividió el área de estudio [Región I, Norte y Región II, Central]. El color de fondo es la producción primaria de abril de 1998 estimada a partir del modelo de Cepeda-Morales (2004) con datos de sensores remotos.

El SCC está delimitado al norte y al sur por la Corriente Subártica y la Corriente Norecuatorial, respectivamente. La transición de uno a otro sistema se produce en regiones de frentes y mezclas de características muy dinámicas. La frontera sur de la CC es particularmente compleja pues sus aguas se mezclan con las del Golfo de California, que inyecta aguas más calientes y salinas a la zona sur de la Península de Baja California. La CC es sensible a los cambios climáticos interanuales, especialmente a los cambios asociados con el fenómeno de El Niño (Bograd et al., 2001). Los efectos de El Niño dentro de la CC incluyen calentamiento de las aguas locales, incremento de la salinidad, disminución en las surgencias costeras y nivel del mar relativamente alto (Durazo y Baumgartner, 2002).

Las propiedades del agua de la CC observadas frente a Baja California son generalmente atribuidas a la presencia de tres masas de agua, cada una distinguida por características propias de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y contenido de nutrientes (Lynn y Simpson, 1987). Estas masas de agua son: Agua Subártica del Pacífico (“Subarctic Water”, SAW), Agua Superficial Subtropical (“Subtropical Surface Water”, StSW) y Agua del Pacífico Ecuatorial (EPW). El Agua Subártica del Pacífico ingresa al SCC en el norte alrededor de los 48°N y forma un núcleo de agua de baja temperatura y salinidad pero altamente oxigenada, la cual es encontrada entre la superficie y los 100m de profundidad frente a California (Hickey, 1979, Lynn, 1986). El amplio flujo hacia el ecuador del SAW fuera de la costa gira hacia el oeste a los 25° N y entra a formar parte de la Corriente Nor-Ecuatorial (Reid et al., 1958). Frente a Baja

California el SAW incrementa su temperatura y salinidad debido al calentamiento y evaporación latitudinal a lo largo de su trayectoria hacia el ecuador (Durazo y Baumgartner, 2002).

La frontera oeste del SCC está formada por la continuación de la Zona Frontal Subártica (Lynn y Simpson, 1987) marcando una transición abrupta hacia aguas del giro del Pacífico Norte más saladas y con mayor temperatura. El agua al oeste de la transición subtropical fue definida por Roden (1971) como Agua Superficial Subtropical (StSW; 20-28°C, S>34.4). Esta masa de agua podría ser encontrada al oeste-suroeste de Baja California, usualmente fuera de la región muestreada por el IMECOCAL. El Agua de Pacífico Ecuatorial es una masa de agua subsuperficial cálida, salada, baja en oxígeno y con alta concentración de nutrientes la cual se encuentra al norte transportada por la CU (Lynn y Simpson, 1987). Esta se extiende hacia el este del Pacífico Tropical desde aproximadamente 10°S a 20°N y en profundidad desde la parte baja de la termoclina hasta los 800m. Cuando esta agua fluye hacia el norte ingresa a la CU entre los 150 y 500m de profundidad frente al sur de Baja California (Reid et al., 1958).

La región sur del SCC frente a Baja California es considerada como una zona de transición ecológica entre las aguas subtropicales del Pacífico Central y las templadas de la Corriente de California, en donde las larvas de peces de afinidad nortea son reemplazadas por otras de regimenes más cálidos del Pacífico Central y Ecuatorial (Moser y Smith, 1993; McGowan et al., 1996).

Objetivo general

- Determinar la producción primaria en la región sur de la Corriente de California durante el periodo de enero y abril del 2003.
- Explicar los procesos que influyen sobre la producción primaria en la región sur de la Corriente de California durante el periodo de enero y abril del 2003.

Objetivos particulares:

- Determinar la variabilidad espacial de la concentración de clorofila.
- Conocer la variabilidad espacial de los parámetros fotosintéticos de la relación fotosíntesis-irradiancia.
- Aplicar un modelo para estimar la producción superficial en la región IMECOCAL.

Hipótesis

a) La producción primaria es mayor en la región norte de la zona de estudio debido principalmente a que esta región está influenciada por el dominio de Agua Subártica, rica en nutrientes inorgánicos disueltos.

b) Los valores de producción primaria durante primavera son mayores debido a que durante esta época las condiciones son favorables (nutrientes, estratificación, irradiancia, temperatura).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron dos cruceros oceanográficos durante invierno (30 enero-24 de febrero) y primavera (03-24 de abril) del 2003 en la región sur de la Corriente de California dentro del programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL). Ambos cruceros se hicieron a bordo del *B/O Francisco de Ulloa* del CICESE. En el crucero de invierno se realizaron 12 experimentos *in situ* de producción primaria y 11 para el de primavera (fig. 1). La red de muestreo se basa en el plan original de estaciones CalCOFI. Las líneas hidrográficas se encuentran paralelas entre sí y la distancia que existe entre ellas es de 74 km, mientras que la distancia entre las estaciones es de aproximadamente 36 km. Para los fines de este estudio y siguiendo el criterio propuesto por Vélez-Muñoz (1981), el área de estudio fue dividida en dos zonas: zona de transición delimitada como Región I (norte) y zona de dominio ecuatorial delimitada como Región II (central) (fig. 1).

En cada crucero se llevaron a cabo experimentos de producción primaria *in situ* con ^{14}C , además se determinó la concentración de clorofila (Chl-*a*) en muestras extraídas de seis diferentes profundidades (100, 50, 30, 20, 10, y 1% $E_{0(\text{PAR})}$). En las mismas estaciones se hicieron mediciones de luz utilizando un Perfilador de Irradiancia (PRR-600) de la Biospherical Instruments. En cada estación se calculó el coeficiente de atenuación vertical de luz difusa (K_d) por medio de la lectura de un disco de Secchi (LDS) de 30 cm de diámetro y de la ecuación: $K_d = 1.7 / \text{LDS}$. A partir de la ecuación

de Lambert-Beer [$E_{z(\text{PAR})}=E_{0(\text{PAR})}e^{-K_d \cdot Z}$] se calcularon las profundidades de muestreo:

$$Z = \frac{\ln (E_{0(\text{PAR})} / E_{z(\text{PAR})})}{K_d} \quad (1)$$

Donde $E_{z(\text{PAR})}$ es la irradiancia a la profundidad Z , $E_{0(\text{PAR})}$ es la irradiancia en la superficie, K_d es el coeficiente de atenuación vertical de luz difusa y Z es la profundidad a la que fueron colectadas las muestras. Los experimentos de fotosíntesis-irradiancia (curvas P-E) se hicieron a bordo con muestras de la profundidad correspondiente al 30% $E_{0(\text{PAR})}$.

Las muestras de agua fueron tomadas con botellas Niskin de 5-litros de capacidad con ligas de silicón para evitar dañar al fitoplancton, debido a que las ligas de silicón no son tóxicas para las células como las ligas convencionales de hule. Estas botellas fueron acopladas a una roseta General Oceanics integrada con un CTD Sea Bird Electronics modelo SBE 911 PLUS. El CTD cuenta con una unidad submarina modelo SBE 9 y una unidad de control en cubierta SBE 11 plus, la cual permite la comunicación, control de la operación y monitoreo de la señal de los sensores en la unidad SBE 9 con una computadora personal vía cable conductor eléctrico en el malacate del CTD. El agua de cada botella Niskin se colectó en botes de plástico totalmente oscuros para evitar la influencia directa de la luz solar sobre el fitoplancton. Esta agua fue utilizada para llenar tres botellas transparentes de policarbonato de 250ml de capacidad, removiendo antes el

macrozooplancton al pasarlo por una malla de 150 μ m para evitar el pastoreo de estos organismos sobre el fitoplancton durante el experimento. Dos de las tres botellas se consideraron como claras y la tercera fue oscurecida al cubrirla con papel aluminio. Las muestras en las tres botellas fueron inoculadas con 100 μ l de ^{14}C ($\sim 5\mu\text{Ci}$) y se incubaron *in situ* durante ~ 1.5 horas en tubos de acrílico transparente colocándolos a la profundidad de donde se extrajeron. Al mismo tiempo, se llenaron tres botellas transparentes de policarbonato que fueron inoculadas con 100 μ l de ^{14}C , las cuales se consideraron como tiempo cero (T_0) o tiempo inicial. Estas botellas se filtraron inmediatamente después de haber iniciado los experimentos. Después del tiempo de incubación las muestras fueron filtradas a través de filtros de membrana de 0.45 μ m de tamaño de poro y 25mm de diámetro. Los filtros fueron colocados en frascos de vidrio para centelleo de 20ml, adicionando 0.5 ml de HCl al 10% para eliminar el ^{14}C en forma de $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ que no fue asimilado por el fitoplancton durante la incubación. Después de dos horas, se les agregó a cada uno de los frascos 10ml de Ecolite (liquido de centelleo). Las muestras fueron contadas en un contador de centelleo liquido marca Beckman modelo LS-6500 del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). La asimilación de carbono se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Fotosíntesis (mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}) = [(M - T_0) * 24000 * 1.05 (A * t)^{-1}] \quad (2)$$

Donde M son las desintegraciones por minuto (dpm) de la muestra después de la incubación, T_0 son los dpm correspondientes al tiempo cero, A es la actividad específica

del carbono radiactivo agregado ($5\mu\text{Ci} = 11.1 \times 10^6 \text{ dpm}$) y t es el tiempo de incubación. El valor de 24,000 es la concentración del carbono inorgánico promedio (mgC m^{-3}) y 1.05 es la razón de la diferencia de la asimilación por el fitoplancton entre ^{12}C y ^{14}C .

Para generar las curvas P-E, las muestras de la profundidad correspondiente al 30% $E_{0(\text{PAR})}$ se colocaron en 30 botellas planas de plástico de 50 ml de capacidad y fueron inoculadas con $100\mu\text{l}$ de ^{14}C . De las 30 botellas, 27 fueron colocadas en un incubador tipo Morel (Babin et al., 1994) con circulación continua de agua de mar superficial para evitar cambios significativos en la temperatura. El agua utilizada para mantener la temperatura estable dentro del incubador tuvo un incremento no mayor a $\sim 2^\circ\text{C}$ con respecto a la de la entrada, lo cual se supone no afecta a la fisiología de las células durante el experimento. Las tres botellas restantes se consideraron como tiempo cero y se filtraron cuando se encendió la lámpara de tungsteno-halógeno del incubador donde estaban contenidas las 27 botellas iniciales. El resto de las muestras se filtraron después de aproximadamente 1.5 horas de incubación en luz continua. La filtración se realizó a través de un filtro de membrana de $0.45\mu\text{m}$ de tamaño de poro y 25mm de diámetro con un sistema de filtración por vacío. Los filtros tuvieron el mismo tratamiento como se describió anteriormente para los experimentos *in situ*. Los cálculos de carbono asimilado se hicieron de acuerdo a la ecuación 2.

El incubador tipo Morel es una caja rectangular cuyo largo depende del número de las botellas que se desea utilizar en los experimentos P-E, con el fin de obtener lecturas

de muy baja irradiancia ($\sim 0.1\%$) en las botellas más alejadas de la fuente de luz. La parte frontal del incubador cuenta con una ventana de vidrio comercial por donde pasa la luz proveniente de una lámpara de tungsteno-halógeno de 500 Watts de intensidad que se encuentra aproximadamente a 30cm del incubador. Las botellas para el experimento son colocadas en la parte central del incubador y son sometidas a la irradiancia proporcionada por la lámpara de tungsteno-halógeno. El espectro de emisión de esta lámpara no es espectralmente neutro, ya que es fuertemente dependiente de la longitud de onda, con una emisión mínima en el azul y máxima en el rojo (Sosa-Avalos, 2002).

Los parámetros fotosintéticos (α^B y P_m^B) fueron calculados a partir de un ajuste de la producción primaria normalizada por la clorofila [P^B ; $\text{mgC}(\text{mgChl-}a \text{ h})^{-1}$] a la función hiperbólica descrita por Jassby y Platt (1976):

$$P^B = P_m^B \tanh[(\alpha^B E_{L(\text{PAR})}) / P_m^B] \quad (3)$$

Donde α^B es el coeficiente de máxima utilización de luz [$\text{mgC}(\text{mgChl-}a \text{ h})^{-1} / (\mu\text{moles fotones } \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1})$] determinado por la relación lineal entre P^B y la luz de la lámpara en el incubador; $E_{L(\text{PAR})}$ es la irradiancia proveniente de la lámpara de tungsteno-halógeno medida dentro de cada botella y P_m^B es la tasa fotosintética máxima [$\text{mgC}(\text{mgChl-}a)^{-1} \text{h}^{-1}$]. El parámetro fotoadaptativo (E_k ; $\mu\text{moles fotones } \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) fue calculado de la relación P_m^B / α^B , como se muestra en la figura 2.

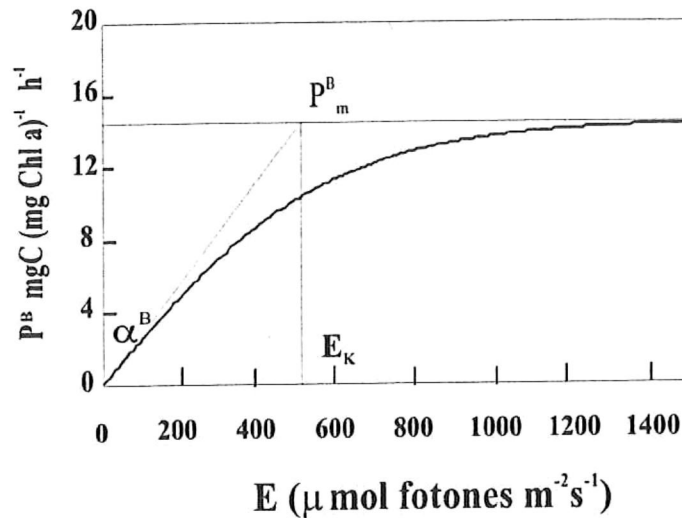


Figura 2. Ejemplo de la relación fotosíntesis-irradiancia (curva P-E). P_m^B es la tasa fotosintética máxima [$\text{mgC} (\text{mgChl}a)^{-1} \text{h}^{-1}$]; α^B es el coeficiente de máxima utilización de luz [$\text{mgC}(\text{mgChl}a)^{-1} / (\mu\text{moles fotones } \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1})$] y $E_K (P_m^B/\alpha^B)$ es el parámetro fotoaclimatación del fitoplancton [$\mu\text{moles fotones } \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]. La línea roja continua representa el ajuste hiperbólico a partir de la ecuación de Jassby y Platt (1976). Las líneas representan intersecciones y prolongaciones de los parámetros estimados.

La clorofila (Chl- a) se determinó en las estaciones de producción primaria a las seis profundidades correspondientes y en todas las estaciones de la red IMECOCAL a las profundidades estándar (0, 10, 20, 50, 100, 150 y 200m de profundidad). Para el análisis de clorofila se colectó un litro de agua de cada nivel, el cual se filtró a través de filtros Whatman GF/F de 25mm de diámetro por medio de un sistema de vacío. Los filtros fueron inmediatamente congelados en nitrógeno líquido para su análisis posterior. La extracción de pigmentos se realizó mediante la técnica propuesta por Venrick y Hayward (1984). Cada filtro se depositó en un frasco de 20ml forrado con papel aluminio y se le agregó 10ml de acetona al 90% y se mantuvo en refrigeración y

oscuridad durante 24 horas para la extracción de la clorofila. Las concentraciones de clorofila y feopigmentos antes y después de acidificar con HCl al 10% se determinaron por el método fluorimétrico con un Fluorómetro Turner Designs (10-005R) de acuerdo con el método descrito por Yentsch y Menzel (1963) y Holm Hansen et al. (1965).

La concentración de pigmentos se calculó mediante la ecuación:

$$\text{Clorofila } a \text{ (mg m}^{-3}\text{)} = (\text{LFC-LFAC}) \textit{Factor} (v) (V^{-1}) \quad (4)$$

$$\text{Feopigmentos (mg m}^{-3}\text{)} = (r \text{ LFAC-LFC}) \textit{Factor} (v) (V^{-1}) \quad (5)$$

Donde LFC es la lectura de la fluorescencia de la clorofila sin acidificar corregida por testigo y dilución; LFAC es la lectura de la fluorescencia de la clorofila después de acidificar corregida por dilución; *Factor* es obtenido de la calibración con clorofila *a* pura libre de feopigmentos dependiendo de la ventana usada; *v* es el volumen de extracción de acetona (ml); *V* es el volumen de la muestra filtrada (l); *r* es la razón de las lecturas sin acidificar y acidificadas (LFC/LFAC) para clorofila *a* libre de feopigmentos.

Debido a que las mediciones de producción primaria fueron hechas solamente en algunos puntos de la red IMECOCAL, se utilizó el modelo semi-analítico descrito por Platt y Sathyendranath (1988) para calcular la producción superficial (P_{sup}) en toda el área de estudio.

$$P_{\text{sup}} = \frac{\text{Chl-}a \alpha^B E_{(\text{PAR})}}{\{ 1 + [(\alpha^B E_{(\text{PAR})}) / P_m^B]^2 \}^{1/2}} \quad (6)$$

Donde Chl-*a* es la concentración de clorofila superficial para cada estación de los cruceros IMECOCAL de enero y abril del 2003; α^B y P_m^B son los promedios regionales de los parámetros fotosintéticos (Tabla II) estimados a partir de las curvas P-E y la ecuación de Jassby y Platt (1976) para los mismos meses; $E_{(\text{PAR})}$ es la luz superficial estimada con datos de SeaWiFS y promediada para los meses de enero y abril desde 1998 al 2003. Estos datos fueron proporcionados por el Dr. Robert Frouin de la Institución SCRIPPS de Oceanografía.

Tomczak y Godfrey (1994) determinaron que la profundidad de capa de mezcla puede ser calculada a partir de una diferencia $<0.5^\circ\text{C}$ entre la temperatura de la superficie y una profundidad dada. En este trabajo se utilizó la diferencia entre la temperatura superficial y a 50m de profundidad (ΔT) para calcular la estructura de la columna de agua. De acuerdo con este criterio, se consideraron como zonas con termoclina más somera aquellas donde $\Delta T > 0.5^\circ\text{C}$ y zonas con termoclina más profunda donde $\Delta T \leq 0.5^\circ\text{C}$.

Procesamiento de datos

Con la finalidad de probar las hipótesis de trabajo, los datos de producción primaria fueron evaluados estadísticamente por medio de un análisis de varianza “ANOVA” no paramétrica de dos vías. Se utilizó la prueba de Kruskal Wallis (1952) para determinar diferencias entre los meses (enero vs. abril) y entre las regiones (Región I vs. Región II), tomando como referencia los promedios mensuales y regionales para el norte y sur de la zona de estudio. El nivel de significancia usado en ambos casos fue de 0.05.

Los parámetros fotosintéticos se estimaron a partir del ajuste de la función hiperbólica propuesta por Jassby y Platt (1976). Para este trabajo sólo se consideraron los parámetros que se ajustaron con un varianza explicada mayor al 70%. La prueba de ajuste y el análisis de datos se realizaron con el programa Estadística versión 6.0.

RESULTADOS

Durante enero y abril del 2003 se observó la presencia de masas de agua con características termohalinas bien definidas (fig. 3), basadas en la clasificación de Kyn'dyushev (1970). Las principales masas de agua presentes en la región fueron el Agua Tropical Superficial (TSW) cuya señal fue más intensa en enero que en abril; Agua subSuperficial Ecuatorial (ESsW) que sólo fue evidente en el mes de enero; Agua Subártica (SAW) la cual se intensificó durante abril, con la señal presente en ambos

meses; Agua Intermedia del Pacífico (PIW) y el Agua Profunda del Pacífico (PDW), las que se mantuvieron sin cambios durante el periodo de estudio.

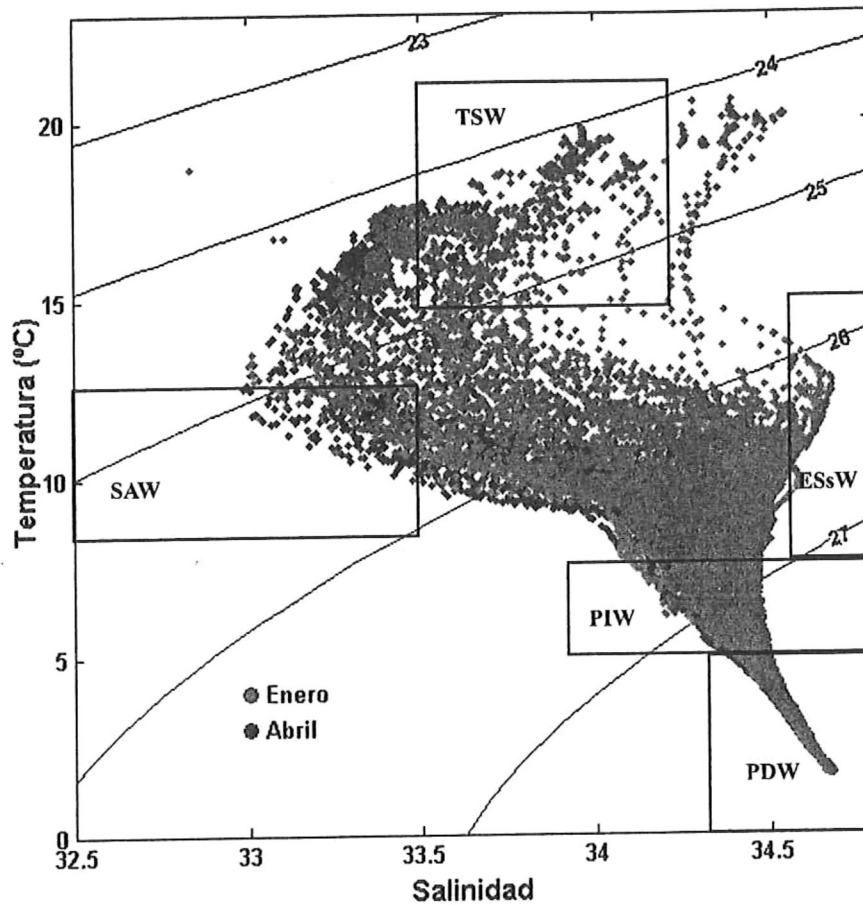


Figura 3. Diagrama de temperatura y salinidad en la región sur de la Corriente de California durante enero y abril del 2003. Los contornos representan líneas de igual densidad referidas como σ_t . Los recuadros representan las regiones T-S para las diferentes masas de agua, de acuerdo a la clasificación de Kyn'dyushev (1970). TSW= Agua Tropical Superficial; ESsW= Agua Subsuperficial Ecuatorial; SAW= Agua Subártica; PIW= Agua Intermedia del Pacífico; PDW= Agua Profunda del Pacífico.

De acuerdo a los regimenes hidrográficos propuestos por Vélez-Muñoz (1981) y por Gómez y Vélez-Muñoz (1982), el área IMECOCAL se dividió en dos grandes regiones (fig. 1): Región I (norte) delimitada por la línea 117 hacia el norte caracterizada principalmente por ser la zona de transición entre el agua de origen subártico y el agua nor-ecuatorial; y Región II (central) delimitada de la línea 120 hacia el sur, influenciada principalmente por una zona de dominio ecuatorial.

El agua superficial (0-50m) más caliente ($>18^{\circ}\text{C}$) y con alta salinidad (>34.5) se presentó en enero, sobre todo en la región central del área de estudio, con una mayor variación para toda zona. Esta variabilidad latitudinal fue acentuada por el ingreso de agua de origen subártico en la región norte y agua de origen nor-ecuatorial en la región central. Los promedios de los diagramas T-S para enero y abril fueron menores que los promedios históricos (figs. 4c y 4d) de los mismo meses, sobre todo para aguas subsuperficiales. Durante abril, esta diferencia fue más evidente y afectó a un mayor porcentaje de la columna de agua (fig. 4d). Este efecto fue ocasionado principalmente por salinidad <33.5 , registrada tanto en enero como en abril del 2003 (fig. 3) como resultado de la intrusión subsuperficial de agua subártica en toda el área de estudio.

La distribución espacial de la temperatura durante enero a 10m y 50m de profundidad presentó un patrón de variación norte-sur (figs. 5a, 5b), con agua más fría en la Región I (norte) del área de estudio. A los 50m se presentó una lengua de agua con temperatura $\sim 15^{\circ}\text{C}$ entre Punta Baja y Punta Canoas, como una extensión de agua proveniente de la

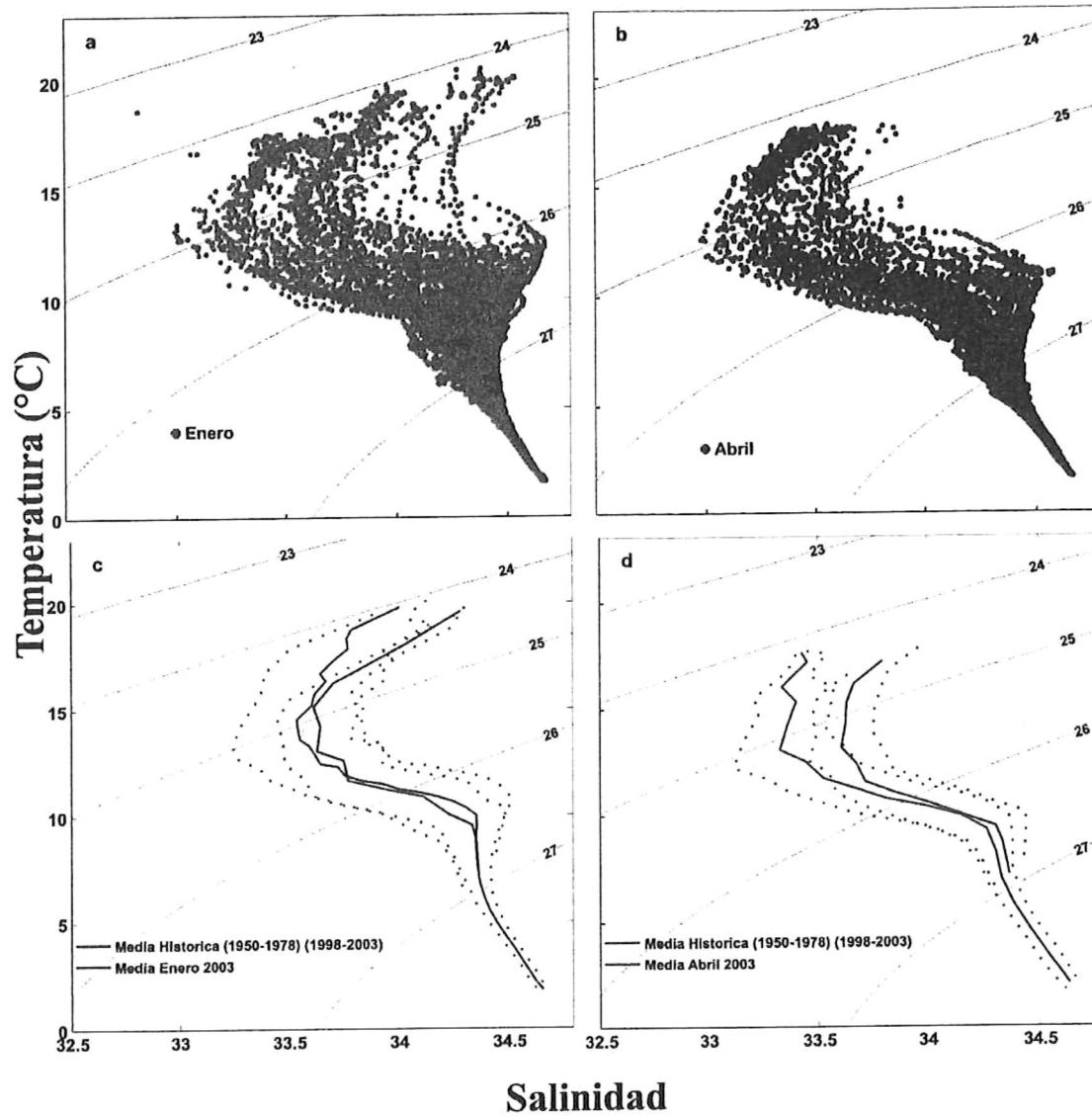


Figura 4. Diagramas de temperatura y salinidad (T-S) de los cruceros (IMECOCAL) para enero (a) y abril (b). En la figura c y d se contrastan los promedios históricos (CalCOFI 1950-1978; e IMECOCAL 1998-2003) en rojo y su relación con la media de cada crucero del 2003 en azul. Las líneas punteadas representan una desviación estándar de la media. Los contornos representan líneas de igual densidad en unidades de sigma-t.

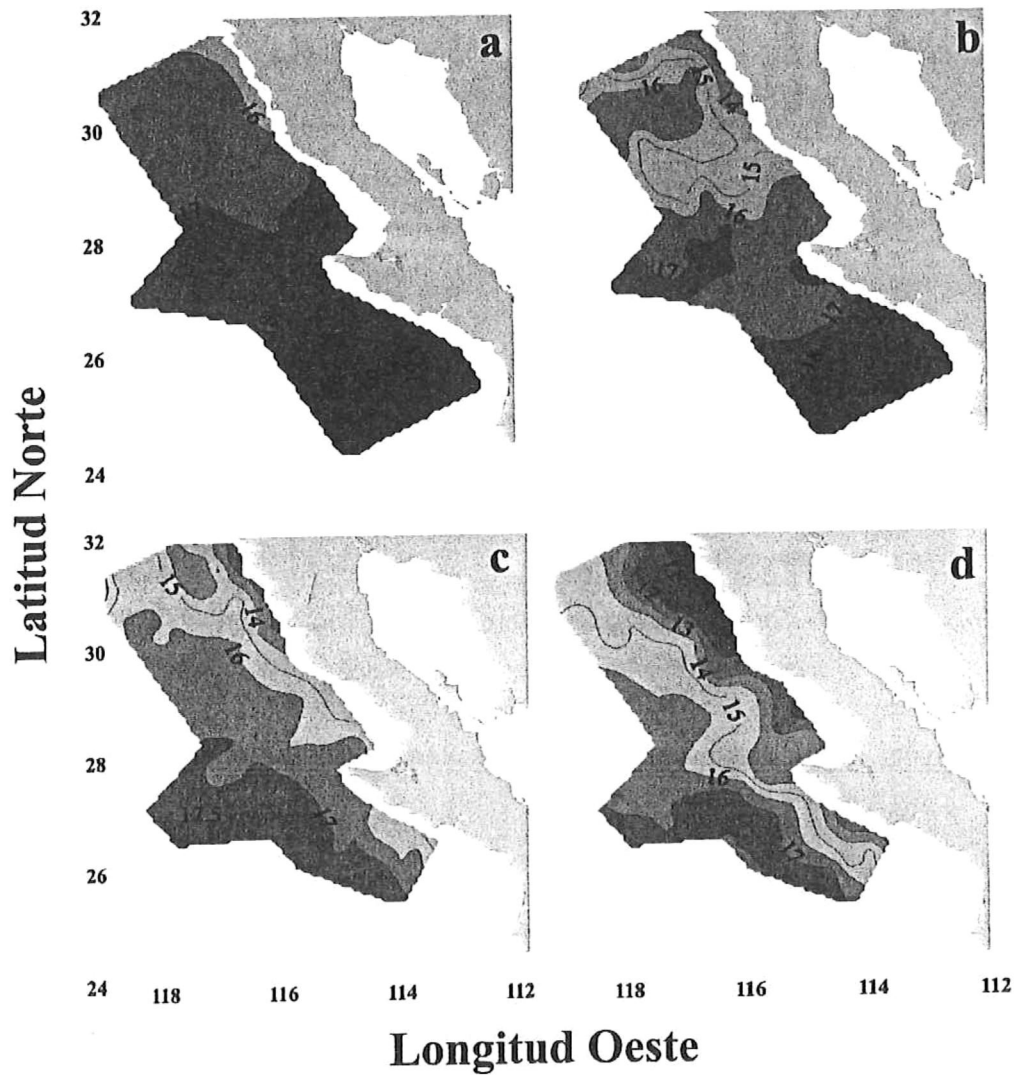


Figura 5. Distribución espacial de la temperatura a 10m (a) y 50m (b) para enero. Temperatura a 10m (c) y 50m (d) durante el mes de abril. El intervalo de los contornos es de 1°C.

zona costera (fig. 5b). En la Región II (central) se observa una fuerte intrusión de agua superficial más caliente ~20°C, con una disminución de 2°C a los 50m (figs. 5a y 5b). En abril, el cambio de temperatura fue en dirección costa-océano (figs. 5c y 5d). La

variación de temperatura superficial durante este mes fue la típica de primavera, con bajas temperaturas ($<13^{\circ}\text{C}$) cerca de la costa, característica de eventos de surgencias.

En la distribución espacial de salinidad (figs. 6a-6d) es notoria la separación de las dos regiones hidrográficas seleccionadas *a priori*, como las regiones I y II, con mayor evidencia para enero. En enero (figs. 6a y 6b) se presentó un patrón similar al de la temperatura, con salinidades menores a 33.5 en la Región I (norte) y mayores a 33.8 en la Región II (central) lo que confirma la presencia de agua más fría y de menor salinidad proveniente del norte y una fuerte intrusión de agua más caliente y con mayor salinidad desde el sur.

En abril se intensificó la influencia del agua de dominio subártico (SAW) hacia el área de estudio con la formación de una extensa lengua de baja salinidad (<33.4) en ambas profundidades (figs. 6c y 6d). También se presentaron valores mayores de salinidad cerca de la costa (33.6-33.8) en la Región II a 10m y 50m de profundidad a causa de los eventos de surgencia característicos de esta estación del año. De acuerdo con la información de la temperatura y la salinidad (figs. 5c, 5d, 6c y 6d) se infiere que la señal de surgencia para abril del 2003 proviene de una profundidad mayor a 50m, lo cual indica un fuerte afloramiento durante este período de estudio.

La distribución espacial de clorofila varió considerablemente entre el crucero de enero y el de abril del 2003 (figs. 7a-d). En general, los valores más altos de clorofila a

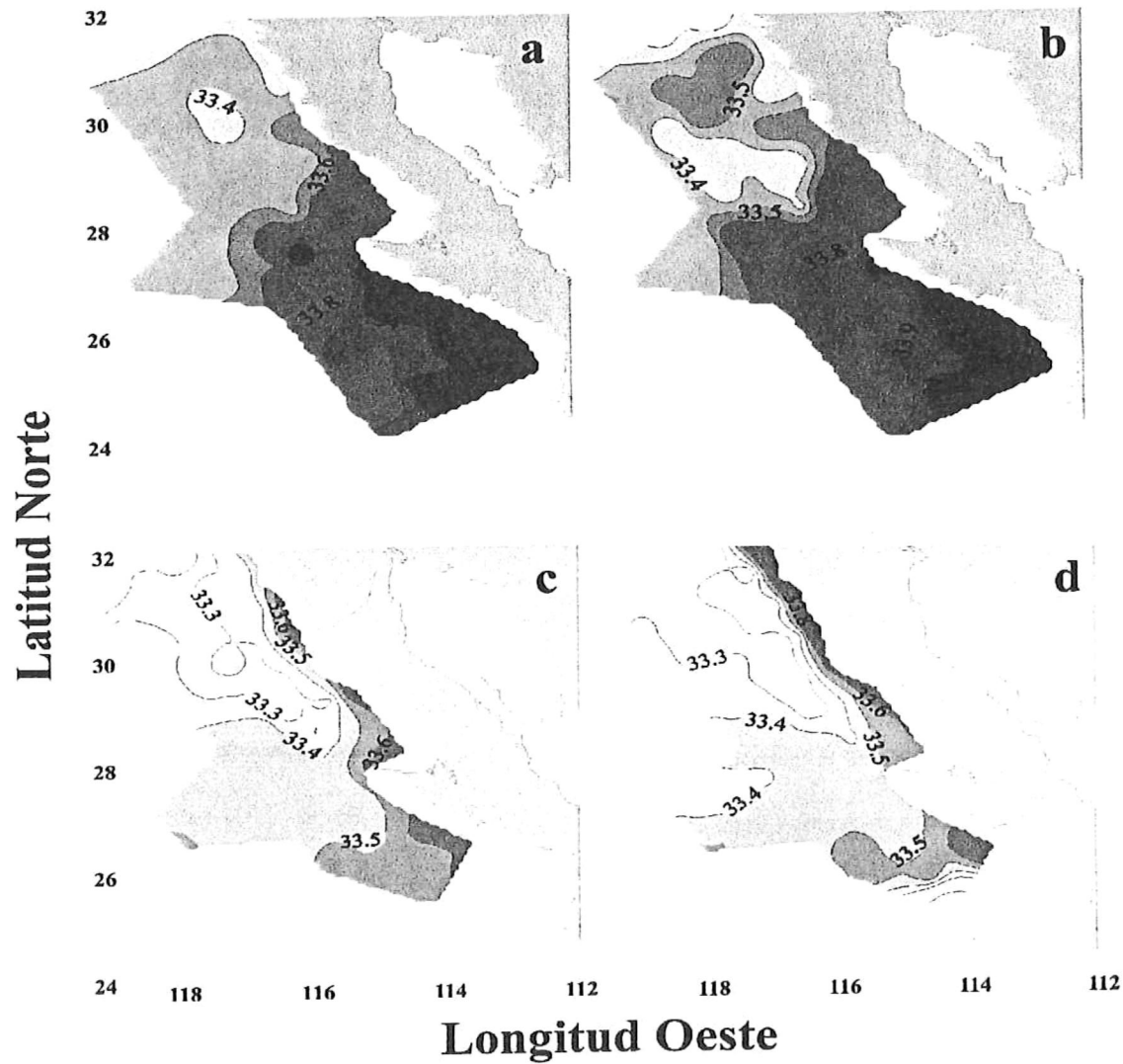


Figura 6. Salinidad para los cruceros IMECOCAL durante enero a 10m (a) y 50m (b); abril a 10m (c) y 50m (d). El intervalo de los contornos es 0.1.

10m y la integrada en la columna de agua (0-200m) se presentaron en enero. Sin embargo, abril mostró altos valores de clorofila en estaciones cercanas a la costa en la Región II, ocasionados por los procesos de surgencia ocurridos durante este mes. La clorofila a 10m para enero tuvo máximos de 4.9 y 4.5 $\text{mgChl}a \text{ m}^{-3}$ en la estación más

cercana a Punta Abrejos (127.35) y para una estación oceánica a la altura de Punta Baja (110.50). Los valores mínimos fueron de $0.2 \text{ mgChl}a \text{ m}^{-3}$ para las estaciones más alejadas de la costa entre Ensenada y Punta Colonet (fig. 7a). El resto del área presentó una variación entre $0.5\text{-}2.0 \text{ mgChl}a \text{ m}^{-3}$.

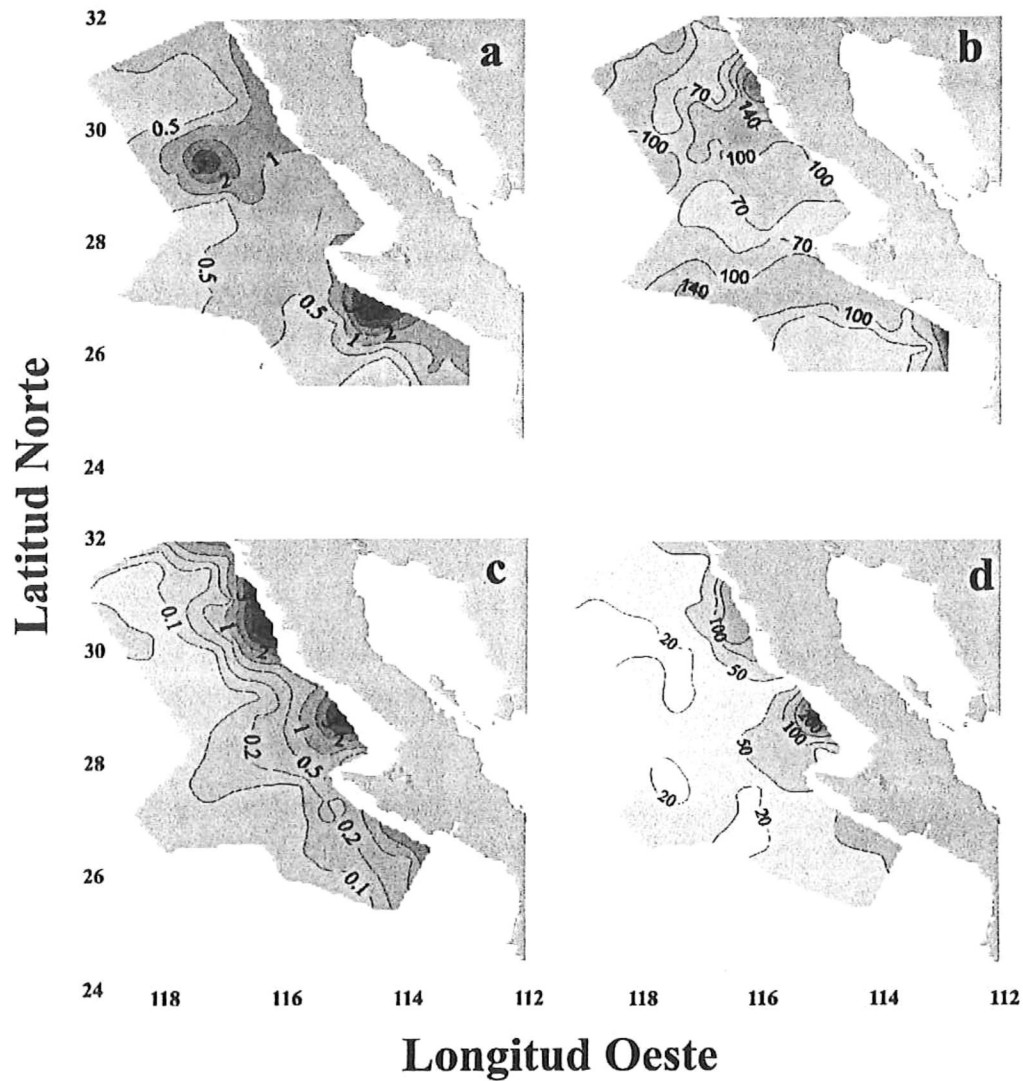


Figura 7. Clorofila a 10m para enero (a) y abril (c) ($\text{mgChl}a \text{ m}^{-3}$). Clorofila integrada para enero (b) y abril (d) en ($\text{mgChl}a \text{ m}^{-2}$).

El promedio de clorofila a 10m en enero fue de $0.73 \text{ mgChla m}^{-3}$ para la Región I y de $0.96 \text{ mgChla m}^{-3}$ para la Región II. La clorofila integrada (fig. 7b) de enero tuvo un promedio para la Región I de 92 mgChla m^{-2} , mientras que la biomasa integrada para la Región II fue de 98 mgChla m^{-2} .

La variación espacial de la clorofila medida a 10m durante abril (fig.7c) mostró máximos para tres estaciones costeras aledañas a San Quintín, Punta Cono y Punta Colonet, respectivamente. Los valores mínimos de $0.5 \text{ mgChla m}^{-3}$ se observaron en dos estaciones oceánicas entre Punta Cono y Punta Eugenia. Los promedios de clorofila integrada en abril (fig. 7d) fueron mayores en la Región I, con valores de 53 mgChla m^{-2} y menores para la Región II de 38 mgChla m^{-2} .

La distribución vertical de temperatura (0-500m) para enero tuvo una variación latitudinal, con agua de mayor temperatura ($>19^{\circ}\text{C}$) y salinidad (>34) en la Región II y cerca de la costa (figs. 8c,8f), mientras que la región norte (figs. 8a y 8d) se vio influenciada por agua más fría ($<17^{\circ}\text{C}$) y de menor salinidad (<33.5). Esta misma tendencia se presentó también en la distribución espacial de salinidad y temperatura (figs. 5a, 5b, 6a, 6b). En la distribución vertical de clorofila entre 0-200m se observó que a la altura de Punta Colonet (fig. 8g) la variación de clorofila fue de $0.2\text{-}0.5 \text{ mgChla m}^{-3}$ en toda la sección. Las localidades de Punta Eugenia (fig. 8h) y San Ignacio (fig. 8i) presentaron una variación de entre $0.1\text{-}2.0 \text{ mgChla m}^{-3}$ con máximos cerca de la costa y en las estaciones más alejadas de la costa.

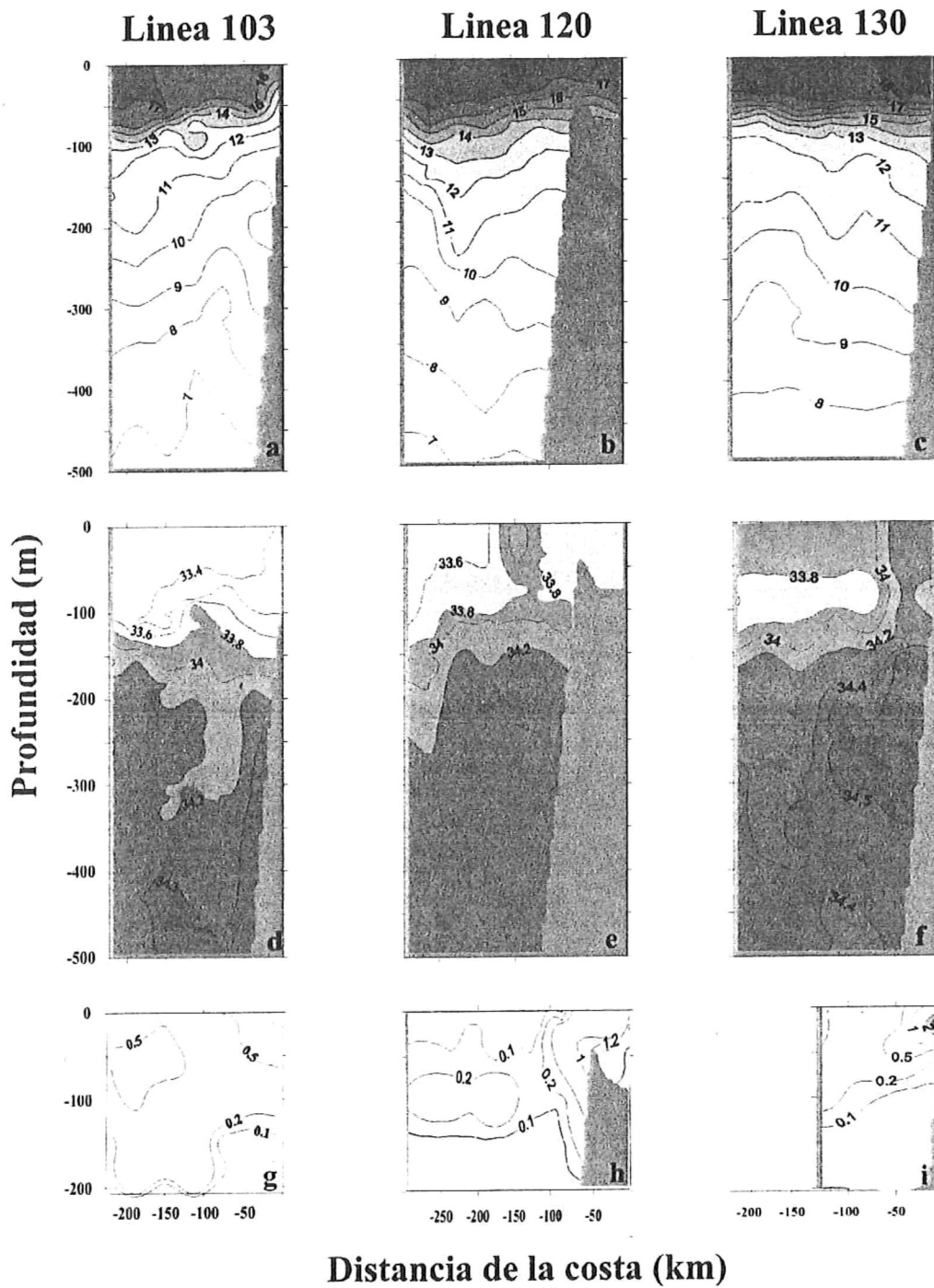


Figura 8. Secciones verticales para enero del 2003 en las líneas 103, 120 y 130. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (a), (b) y (c). Salinidad (d), (e) y (f). Clorofila (mgChla m^{-3}) (g), (h) e (i). Los datos de clorofila sólo se tomaron para los primeros 200m de profundidad.

En abril del 2003 el proceso dominante fue el de las surgencias, con agua fría cercana a la costa característico de la primavera, observándose un levantamiento en las isotermas en toda área (figs. 9a, 9b, 9c). Este proceso se hizo también evidente en la distribución vertical de salinidad (figs. 9d, 9e, 9f), donde las isohalinas se levantaron hacia la superficie cerca de la costa con una mayor intensidad en la línea 103 (fig. 9d). En esta línea se destaca también la presencia de agua superficial con baja salinidad <33.5 , como resultado de la fuerte intrusión de la SAW en la Región I durante abril del 2003.

Al igual que en enero los máximos de clorofila obtenidos durante abril del 2003 se observaron en las estaciones costeras. Frente a Punta Colonet el valor de clorofila fue de $4.0 \text{ mgChl}a \text{ m}^{-3}$ (fig. 9g), mientras que frente a Punta Eugenia (fig. 9h) y San Ignacio (fig. 9i) tuvieron máximos de 1.5 y $2.0 \text{ mgChl}a \text{ m}^{-3}$ respectivamente. Este patrón es el mismo que se observó en la distribución de clorofila medida a 10m (fig 7c), lo que corrobora la señal de los eventos de surgencia ocurridos durante este mes. La clorofila fuera de la costa presentó valores de entre $0.2\text{-}0.5 \text{ mgChl}a \text{ m}^{-3}$, mientras que los mínimos se observaron debajo de los 100m con valores $\sim 0.1 \text{ mgChl}a \text{ m}^{-3}$.

La distribución espacial de la diferencia de temperatura ($\Delta T = T_0 - T_{50}$) entre la superficie (0m) y 50m para enero y abril del 2003 (figs. 10a,10b) no mostró una tendencia específica. Destaca la presencia de dos zonas de mayor estratificación con valores $\sim 1.5^\circ\text{C} \Delta T$, una frente a Punta Baja y la otra frente a Asunción. El resto del área

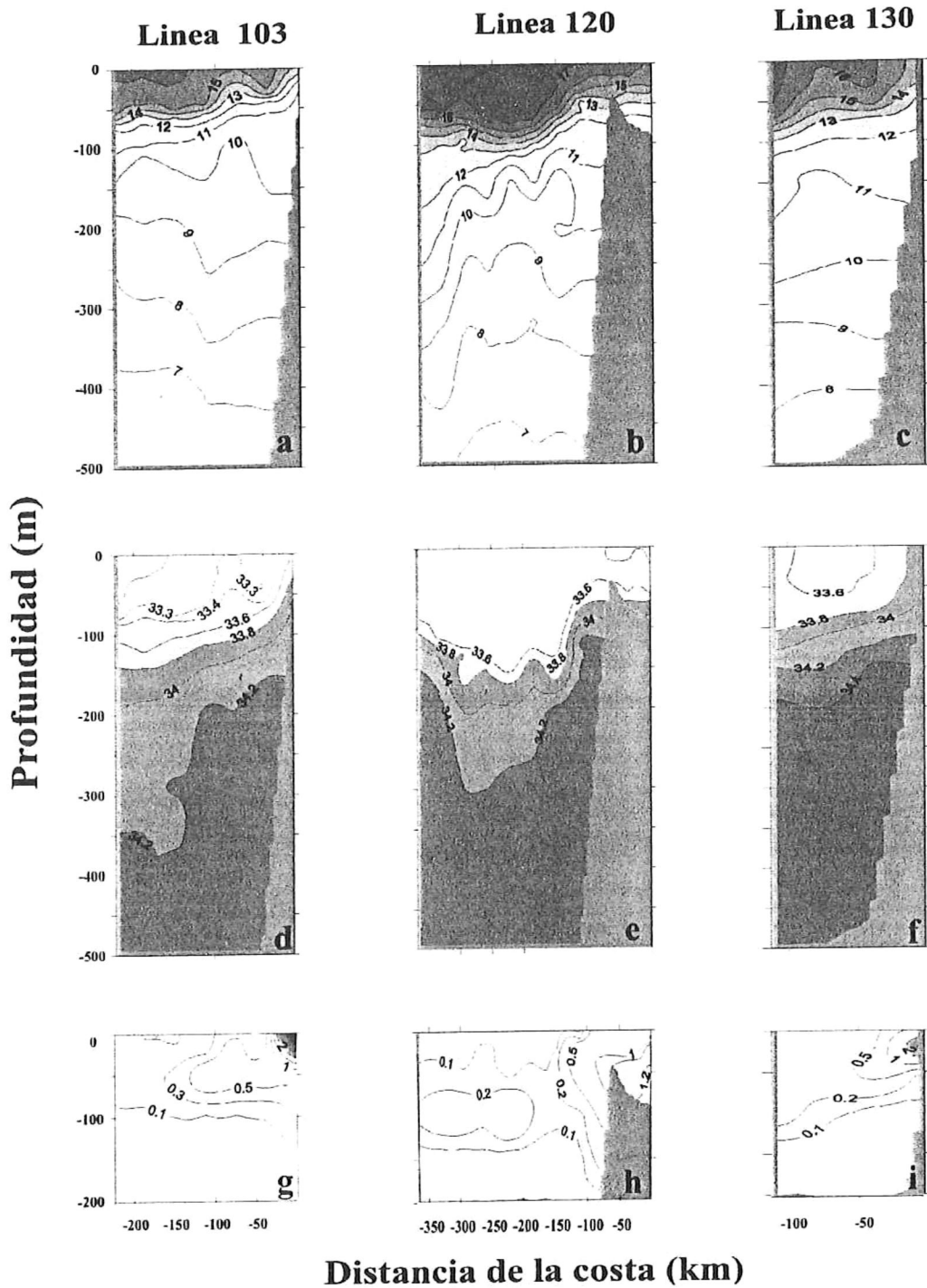


Figura 9. Secciones verticales para abril del 2003 en las líneas 103, 120 y 130. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (a), (b) y (c). Salinidad (d), (e) y (f). Clorofila (mgChla m^{-3}) (g), (h) e (i). Los datos de clorofila sólo se tomaron para los primeros 200m de profundidad.

de estudio presentó una termoclina más profunda, con valores en $\Delta T \leq 0.5^\circ\text{C}$. El promedio en ΔT para la Región I fue de 1.2°C , mientras que el de la Región II fue de 1.0°C . El patrón de variación en el mes de abril se caracterizó por un marcado gradiente en dirección costa-océano, con una termoclina más somera cerca de la costa y valores de $\Delta T \sim 4^\circ\text{C}$. La termoclina fue menos somera hacia fuera de la costa, observándose valores de $\Delta T \sim 2^\circ\text{C}$. Este comportamiento se intensificó en las estaciones más lejanas a la costa, donde la profundidad de la termoclina fue mayor que en el resto del área, observándose valores de $\Delta T < 0.5^\circ\text{C}$. Los promedios regionales durante abril fueron de 1.6 y 1.1°C en las Regiones I y II, respectivamente.

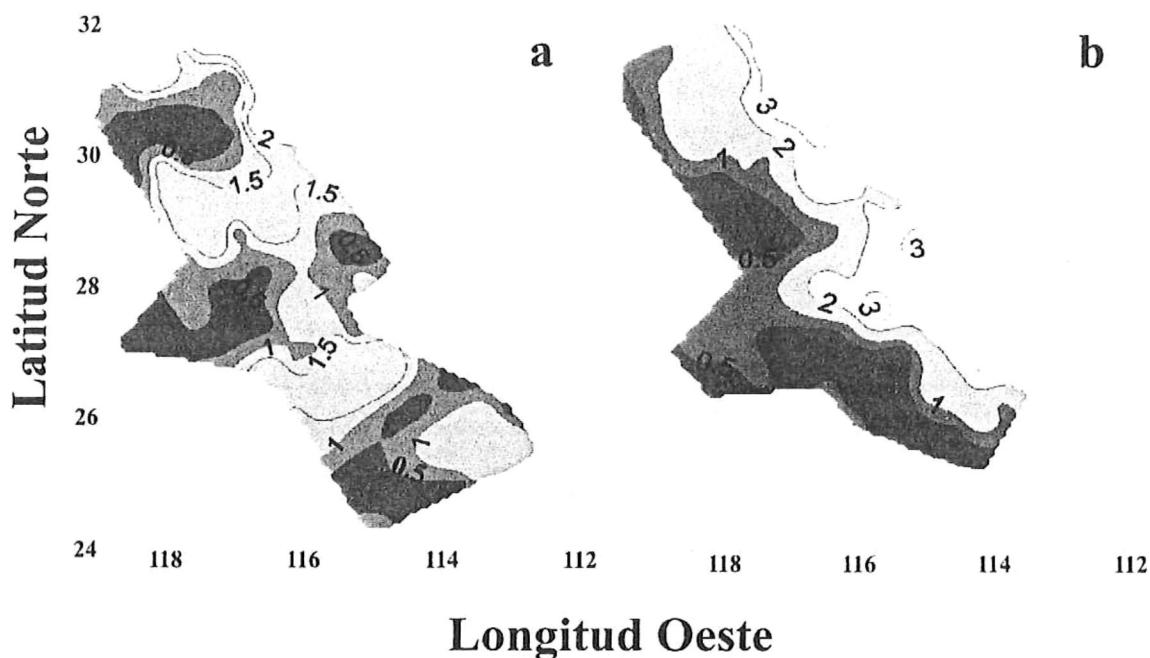


Figura 10. Diferencia en temperatura (ΔT , $^\circ\text{C}$) entre 0 y 50 metros: (a) enero; (b) abril.

En general, la distribución vertical de la producción primaria “*in situ*” fue muy similar para enero y abril (figs. 11a,11b), con máximos subsuperficiales y mínimos cercanos al 1% $E_{(PAR)}$. Sin embargo sobresalen valores máximos subsuperficiales en enero (6.3 y 5.5 $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$) al nivel del 10% $E_{(PAR)}$ en las estaciones 113.45 y 123.50. Las estaciones menos productivas fueron las localizadas en las zonas oceánicas del área de estudio y en la región central, con valores entre 0.8-1.2 $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$. Los valores mínimos (0.2-0.4 $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$) se observaron para las muestras del 1% de $E_{(PAR)}$. El resto de las estaciones tuvieron valores entre 1.5 y 2.5 $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$.

La producción primaria “*in situ*” obtenida durante abril presentó un máximo de 4.0 $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$ en la estación 130.40 (fig. 11b). La estación 130.40 fue la más costera donde se realizaron experimentos de producción primaria en abril y donde se observó la mayor concentración de clorofila integrada (126 mgChla m^{-2}). El resto de las estaciones presentaron un comportamiento similar, con máximos subsuperficiales entre 1.5 y 2.0 $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$ y mínimos al 1% $E_{(PAR)}$ de $\sim 0.3 \text{ mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$.

La producción primaria integrada (PP_{eu}) de enero mostró mínimos (70-80 $\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$) tanto en las estaciones más sureñas como en las más oceánicas, así como máximos (240-255 $\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$) en las estaciones cercanas a la costa (fig. 12a). PP_{eu} de este mes fue ligeramente mayor en la Región I, con una producción promedio de 146 $\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$ con relación a la PP_{eu} observada en la Región II (133 $\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

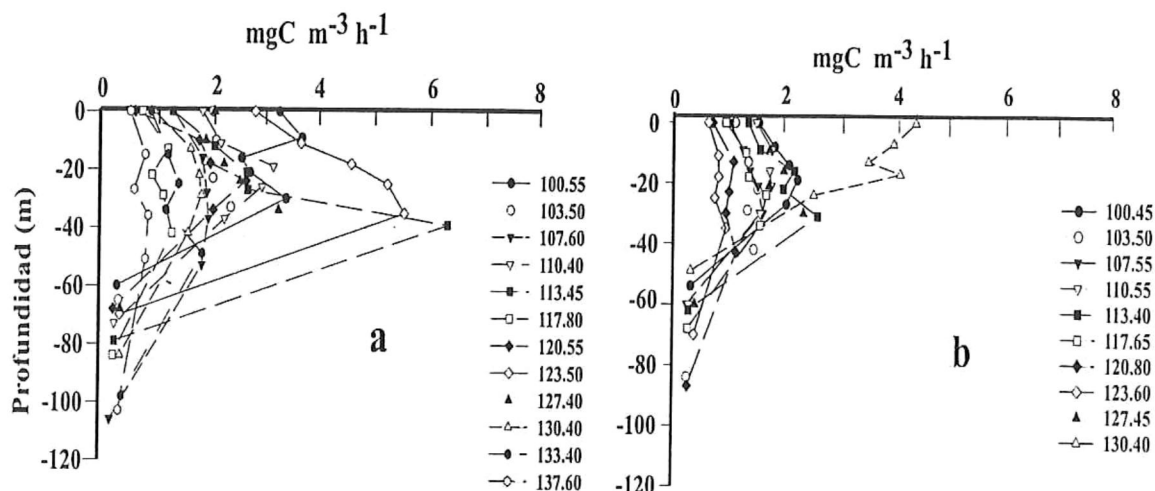


Figura 11. Perfiles verticales de producción primaria “*in situ*” ($\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$) para enero (a) y abril (b) del 2003. Los números indican las estaciones hidrográficas donde se hicieron los experimentos.

Los valores de PP_{eu} medidos durante abril mostraron una menor variación, ya que durante primavera el intervalo en toda el área estuvo entre los $70\text{-}120 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (fig. 12b). Frente a Punta Abrejos (estación 130.40) se obtuvo el valor más alto en producción primaria ($126 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), similar a la obtenida para enero. Se observó también otro máximo costero en Punta Canoas con un valor en producción de $105 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Las estaciones menos productivas fueron oceánicas, correspondientes a las líneas frente a San Quintín y Punta Eugenia, con $69 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y $74 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Los promedios de PP_i en abril fueron muy similares en la Región I y en la Región II, con valores de producción de $\sim 80 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en ambas regiones.

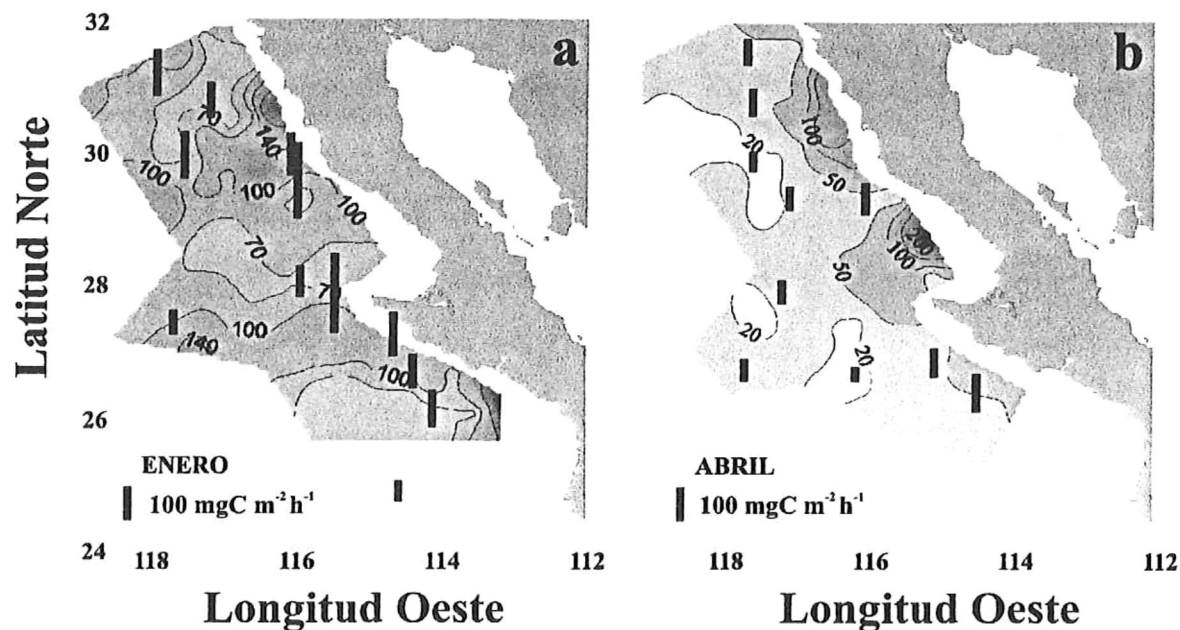


Figura 12. Distribución espacial de la producción primaria integrada ($\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$) para enero (a) y abril (b), sobre los contornos de clorofila integrada en la columna de agua ($\text{mgChl}a \text{m}^{-2}$) para ambos meses.

La relación entre la clorofila integrada y la producción integrada en la columna de agua no presentó una tendencia lineal, sino parece ajustarse más apropiadamente a una curva hiperbólica (fig. 13). Los valores de clorofila integrada en enero no fueron menores a $40 \text{ mgChl}a \text{m}^{-2}$, con una tendencia opuesta a la observada en abril. Son notorios los altos valores de PP_{eu} durante enero ($>200 \text{ mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$) en estaciones localizadas en la región costera norte y otra en la región oceánica central.

De las curvas P-E realizadas en enero del 2003 se obtuvieron parámetros fotosintéticos que se ajustaron apropiadamente al modelo (Jassby y Platt, 1976) en 10 de las 12 estaciones (fig. 14). El ajuste fue satisfactorio ($r^2 \geq 0.70$) para los 11 experimentos

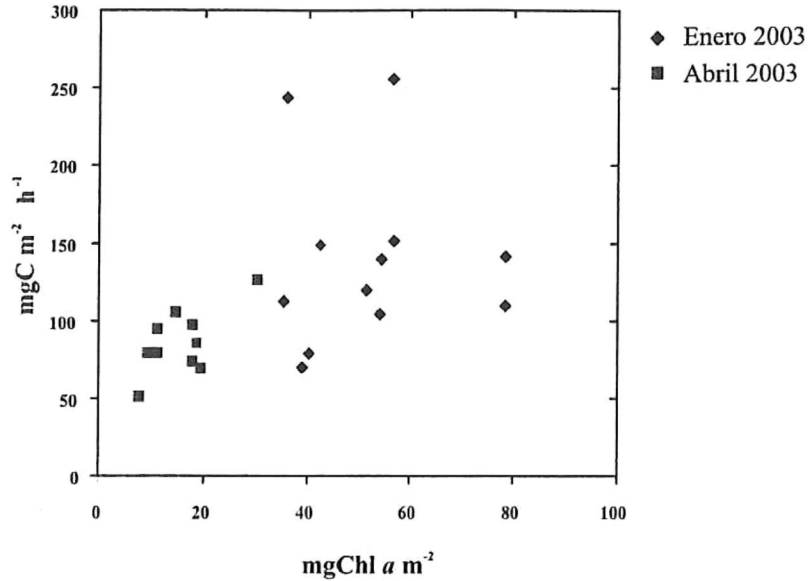


Figura 13. Producción primaria integrada en la zona eufótica ($\text{mgC m}^{-2} \text{h}^{-1}$) versus clorofila integrada ($\text{mgChl} a \text{m}^{-2}$) para las estaciones muestreadas durante enero y abril.

realizados en abril del 2003 (fig. 15). El promedio de P_m^B para enero fue de $3.84 \text{ mgC} (\text{mgChl} a)^{-1} \text{ h}^{-1}$ y de $10.4 \text{ mgC} (\text{mgChl} a)^{-1} \text{ h}^{-1}$ para abril (Tabla I). El coeficiente de máxima utilización de luz (α^B) durante enero presento valores promedio de $0.015 \text{ mgC}(\text{mgChl} a \text{ h})^{-1}/\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y de $0.039 \text{ mgC}(\text{mgChl} a \text{ h})^{-1}/\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ durante abril (Tabla I). La mayor variación entre los parámetros fotosintéticos se observó entre meses (enero-abril), ya que la variación entre regiones (Norte-Central) no fue significativa ($p < 0.05$).

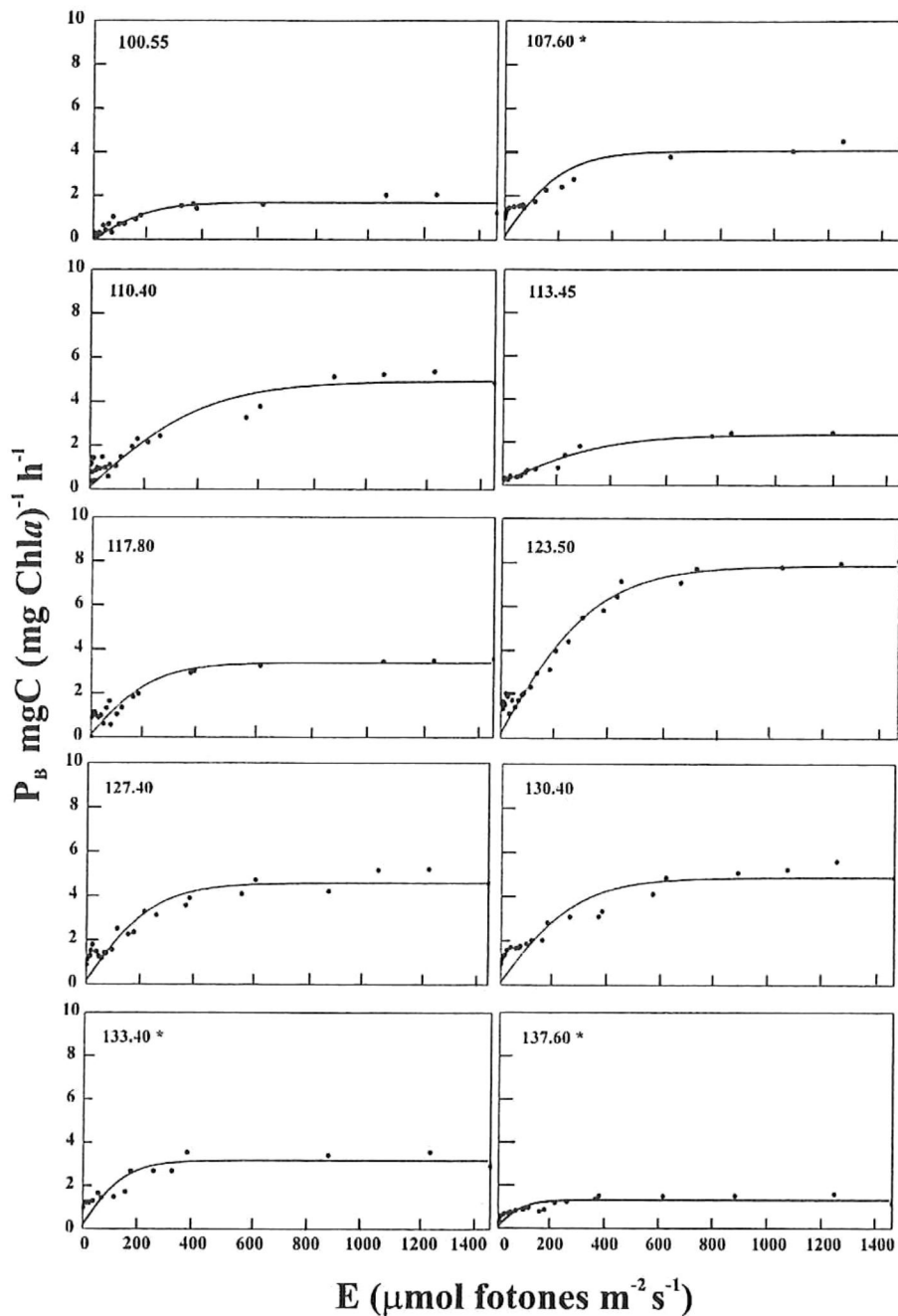


Figura 14. Curvas P-E obtenidas de muestras colectadas al 30% $E_{(\text{PAR})}$ superficial para enero del 2003. La línea continua es el ajuste obtenido con el modelo de Jassby y Platt (1976). Los números dentro de cada recuadro indican las estaciones de muestreo. Los asteriscos representan las estaciones donde la varianza explicada por el modelo fue menor que 80% pero mayor que 70%.

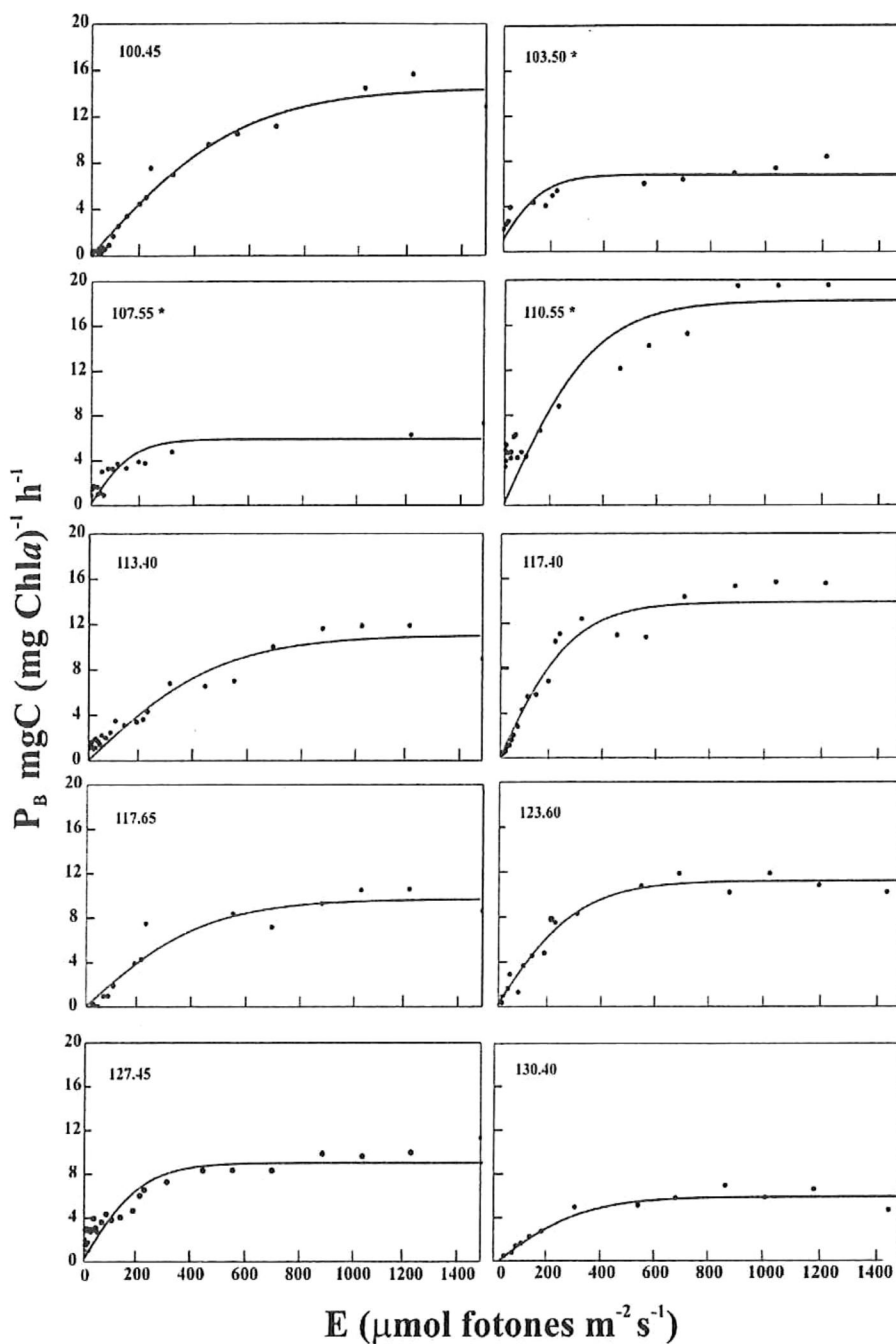


Figura 15. Curvas P-E obtenidas de muestras colectadas al $30\%E_{(\text{PAR})}$ superficial para abril del 2003. La línea continua es el ajuste obtenido con el modelo de Jassby y Platt (1976). Los números dentro de cada recuadro indican las estaciones de muestreo. Los asteriscos representan las estaciones donde la varianza explicada por el modelo fue menor que 80% pero mayor que 70%.

Tabla I. Clorofila integrada (Chl_i [$mgChla\ m^{-2}$]), producción primaria integrada (PP_i [$mgC\ m^{-2}\ h^{-1}$]), tasa fotosintética máxima (P_m^B [$mgC\ (mgChla)^{-1}\ h^{-1}$]), coeficiente de máxima utilización de luz (α^B [$mgC(mgChla\ h)^{-1}/\mu moles\ fotones\ m^{-2}\ s^{-1}$]), y del parámetro fotoadaptativo (E_K [$\mu moles\ fotones\ m^{-2}\ s^{-1}$]) para todas las estaciones muestreadas durante enero y abril del 2003. Los datos con asteriscos (*) no se consideraron para el cálculo de los promedios.

Crucero	Estación	Chl_i	PP_i	P_m^B	α^B	E_K	
Enero	100.55	43	149	1.7	0.008	211	
	103.50	35	112	-	-		
	107.60	57	151	4.1	0.018	227	
	110.40	54	139	4.9	0.012	412	
	113.40	36	243	2.4	0.008	169	
	117.80	40	79	3.4	0.014	242	
	120.55	54	104	-	-		
	123.50	56	255	7.9	0.026	302	
	127.40	78	141	4.6	0.018	254	
	130.40	78	109	4.9	0.017	286	
	133.40	51	120	3.2	0.020	159	
	137.60	39	70	1.3	0.013	102	
	Media		51.75	139.33	3.84	0.015	236.4
Error Estándar		4.21	16.54	0.61	0.002	27.34	
Abril	100.45	19	85	14.5	0.025	725	
	103.50	11	94	6.8	0.040	170	
	107.55	19	69	5.9	0.036	148	
	110.55	10	79	18.2	0.053	364	
	113.40	15	105	11.1	0.022	553	
	117.40	58*	425*	13.9	0.050	278	
	117.65	11	79	9.7	0.022	485	
	120.80	18	74	7.6	0.084	95	
	123.60	8	51	11.6	0.038	289	
	127.45	18	97	9.0	0.042	226	
	130.40	30	126	5.87	0.018	294	
	Media		16	86	10.4	0.039	330
	Error Estándar		2.0	6.6	1.19	0.006	57

El promedio de P_m^B durante enero fue de $3.29 \text{ mgC (mgChla)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en la Región I y de $4.36 \text{ mgC (mgChla)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en la Región II. El promedio de abril fue de $11.43 \text{ mgC (mgChla)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para la Región I y de $8.52 \text{ mgC (mgChla)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en la Región II (Tabla II). El coeficiente de máxima utilización de luz (α^B) de enero presentó un promedio en la Región II de $0.018 \text{ mgC(mgChla h)}^{-1}/\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y de $0.012 \text{ mgC(mgChla h)}^{-1}/\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en la Región I (Tabla II). Abril presentó valores de $0.034 \text{ mgC(mgChla h)}^{-1}/\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $0.045 \text{ mgC(mgChla h)}^{-1}/\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para las regiones I y II respectivamente (Tabla II).

Tabla II. Promedios regionales de los parámetros fotosintéticos para el crucero de enero y abril del 2003. Tasa fotosintética máxima (P_m^B [$\text{mgC (mgChla)}^{-1} \text{ h}^{-1}$]) y el coeficiente de máxima utilización de luz (α^B [$\text{mgC(mgChla h)}^{-1}/\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]).

Crucero	Zona	P_m^B	α^B
Enero	Norte	3.29 ± 1.5	0.012 ± 0.004
	Central	4.36 ± 2.4	0.018 ± 0.005
Abril	Norte	11.43 ± 4.4	0.034 ± 0.013
	Central	8.52 ± 2.4	0.045 ± 0.028

DISCUSIÓN

La intrusión de la masa de agua del subártico (SAW) con baja salinidad y temperatura observada durante enero y abril del 2003 para la región frente a Baja California había sido previamente reportada durante julio del 2002 para la región de Oregon y norte de California por Bograd y Lynn (2003). Estos autores caracterizaron la presencia de esta masa de agua por presentar anomalías negativas en temperatura y salinidad; así como también altas concentraciones de oxígeno disuelto y nutrientes inorgánicos. La intrusión de agua de origen subártico se extendió hacia la zona frente a Baja California durante los meses posteriores al verano del 2002 e inclusive la señal de la SAW fue notoria en abril del 2003 (figs. 5 y 6). Los promedios históricos de los diagramas T-S (CalCOFI 1950-1978; Imecocal 1998-2003) de los meses de enero y abril comparados con el perfil promedio de enero y abril del 2003 muestran que estos datos se encuentran desfasados con respecto al perfil histórico (figs. 4c y 4d). Este desfase se debe principalmente a los bajos valores de salinidad observados en estos meses, sobre todo en aguas superficiales y subsuperficiales de la zona de estudio.

La NOAA-EUA pronosticó condiciones El Niño en el área del Pacífico ecuatorial para finales del 2003 (www.cpc.ncep.noaa.gov). Estas condiciones frente a Baja California estarían caracterizadas por anomalías positivas de temperatura y salinidad, ocasionadas por una fuerte intrusión de agua de origen nor-ecuatorial (Venrick et al., 2003). Durazo et al. (2005) describen que no hay suficiente información para concluir

si los vientos débiles observados a lo largo de la costa durante el 2003 eran un efecto de El Niño o simplemente una consecuencia de la variabilidad de la región. Estos autores señalan también que los datos hidrográficos apoyan que no hubo condición de El Niño fuerte frente a Baja California durante el 2003 y que las anomalías positivas de temperatura y salinidad observadas parecerían estar más ligadas a la circulación local (remolinos) y probablemente a un forzamiento físico similar al del 2002. Además, señalan que el flujo de la CU (SubCorriente de California), que estuvo bien desarrollado a los 200db, permite sugerir que El Niño se manifestó solamente en profundidad, lo que implicaría anomalías positivas de temperatura y salinidad entre los 200 y 300m de profundidad. De acuerdo a los T-S para enero del 2003 se observó que el perfil promedio de enero del 2003 estuvo ligeramente desfasado hacia la derecha del perfil típico entre ~200-300m de profundidad (fig. 4c). En la distribución espacial de temperatura de las figuras 5a y 5b se observa la señal del agua de mayor temperatura cercana a la superficie, mientras que en las figuras 6a y 6b se nota la presencia de agua de mayor salinidad. Estos valores de temperatura y salinidad son similares a las que se midieron frente a Baja California durante El Niño de enero de 1998 (Durazo y Baumgartner, 2002). La fuerte intrusión de agua de origen subártico durante este mes pudo haber sido responsable de que la señal superficial de El Niño de enero del 2003 no fuera tan evidente como la que se presentó en 1998. Un posterior análisis volumétrico de las masas de agua ayudaría a comprobar esta hipótesis.

La alta concentración de clorofila *a* en superficie y subsuperficie medida durante enero del 2003 es el resultado de un enriquecimiento de nutrientes inorgánicos en la zona eufótica de toda el área de estudio, quizás como un resultado de la intrusión de agua de origen subártico. Cullen (1982) reportó que la distribución vertical de clorofila *a* frente a la zona sur de California corresponde cercanamente a los gradientes de nutrientes presentes en el océano. El máximo de clorofila medida a 10m y la integrada en la columna de agua de la región frente a Punta Baja durante enero estuvo asociado a la presencia de un giro ciclónico descrito previamente por Venrick et al. (2003) para el mismo periodo de muestreo. Este evento trasportó agua subsuperficial rica en nutrientes inorgánicos disueltos con baja temperatura y baja salinidad hacia la superficie (figs. 5b 6b), lo que ocasionó el aumento en la concentración de clorofila.

Las condiciones durante abril se caracterizaron principalmente por presentar altas concentraciones de clorofila cerca de la costa (fig.12b), causada por los eventos de surgencia observados en este periodo (Venrick et al., 2003). Estos procesos se caracterizaron por presentar aguas superficiales de menor temperatura (13-15°C) y de mayor salinidad (33.5-33.8), sobre todo en las zonas costeras. Las relativamente bajas concentraciones de clorofila ($<50 \text{ mgChl}a \text{ m}^{-2}$) fuera de la costa en abril fueron el resultado de una mayor profundidad de la termoclina (nutriclina), así como también debidos a los cambios en la composición de los grupos taxonómicos inferidos a partir de altos α^B calculados en este período. Sosa-Avalos (2002) concluyó que el fitoplancton

pequeño (picoplancton) es responsable de valores mayores en α^B medidos frente a Baja California.

El aumento en la PP_{eu} durante enero fue el resultado de una termoclina más somera, lo que favoreció el aporte de nutrientes hacia la zona eufótica. Este mes estuvo además caracterizado por estructuras físicas de diferentes escalas (giros, meandros, frentes), lo que representó un período con características muy heterogéneas. Un fenómeno anómalo fue la fuerte intrusión de la SAW por el norte y la señal subsuperficial de agua más caliente y salada por el sur del área de estudio. La relativa baja producción promedio de abril comparada con la de enero pudo deberse a una alta estratificación cercana a la costa y a una termoclina más profunda fuera de la costa. La disminución de biomasa y de producción primaria durante abril parece también ser el resultado de la alta biomasa de zooplancton medida durante este período (Durazo et al., 2005).

Los valores relativamente bajos de P_m^B observados durante enero del 2003 podrían estar relacionados con una menor estratificación, lo cual transportó fitoplancton de aguas más profundas fotoaclimatado a bajas irradiancias hacia la superficie. Gaxiola Castro et al. (2002) reportaron para el Golfo de California que el fitoplancton transportado por mezcla vertical y expuesto a irradiancias más altas cerca de la superficie, tuvo bajos valores de P_m^B . Durante enero del 2003 se obtuvieron los menores valores del parámetro fotoadaptativo ($E_K = 236 \mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$) frente a Baja California, lo que indica

que el fitoplancton estaba acondicionado a bajas irradiancias promedio en la columna de agua (Tabla I).

El aumento de los valores de P_m^B de abril del 2003 está relacionado con el incremento en la irradiancia al que estuvieron sujetas las células del fitoplancton, ya que durante este periodo se observó una columna de agua más estratificada cerca de la costa lo cual causó que el fitoplancton permaneciera durante más tiempo cerca de la superficie. Esto fue corroborado por los mayores valores del parámetro fotoadaptativo ($E_k = 330 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Tabla I) observados durante abril, donde las células crecieron a mayores irradiancias. Babin et al. (1996) señalaron que en sitios eutróficos y mesotróficos del Océano Atlántico los nutrientes fueron abundantes y los parámetros fotosintéticos no cambiaron significativamente con la profundidad al igual que la concentración de pigmentos, mientras que en los sitios oligotróficos las células de fitoplancton vivieron limitadas por nutrientes adaptadas a altas irradiancias mostrando altos valores de P_m^B y de E_k . Geider (1993) observó también cambios en P_m^B entre los diferentes tamaños de células del fitoplancton, donde las diatomeas más grandes tuvieron bajos P_m^B , ambas colocadas a la misma irradiancia de crecimiento. Sin embargo, Gaxiola-Castro y Alvarez-Borrego (1991) y Cullen et al. (1992) no reportaron cambios en P_m^B con el aumento de nutrientes y concluyeron que este parámetro cambia principalmente debido a variaciones del régimen de irradiancia del fitoplancton.

Las variaciones en los valores de α^B están relacionadas con cambios en Φ_m (eficiencia cuántica) y en los coeficientes de absorción específicos del fitoplancton (a_{ϕ}^B) (Geider, 1993). Por lo tanto, α^B está principalmente relacionado con cambios en la composición de la comunidad fitoplanctónica. Sosa-Avalos (2002) reportó para la región IMECOCAL que valores altos de α^B están asociados con una mayor abundancia de células pequeñas como cianobacterias y proclorofitas (picoplancton), las que también pudieron ocasionar un aumento en los valores de P_m^B observados durante abril. Lo anterior se relaciona con estos resultados, ya que tanto los valores de α^B como de P_m^B fueron mayores para el mes de abril del 2003, período en el que se observó una menor concentración de pigmentos fotosintéticos en toda el área de estudio, debido a un posible aumento en la abundancia del picoplancton.

La varianza explicada por el modelo de Platt y Sathyendranath (1988) (MPS) para estimar la producción primaria superficial (PP_{sup}) fue del 76% para enero y del 83% en abril (fig. 16). La PP_{sup} estimada a partir del MPS presentó un intervalo de variación de $1-5 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ para toda el área de estudio durante enero. En la estación aledaña a Punta Abrejos se estimó una producción de $\sim 20 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (fig. 17a), relacionada con los altos valores de clorofila observados en la zona ($>5.0 \text{ mgChla m}^{-3}$), así como también con el aumento de los valores de α^B [$0.018 \text{ mgC (mgChla h)}^{-1} / (\mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1})$]. En este mes la producción primaria superficial promedio para la región I estimada a partir del modelo fue 12% menor que la medida, mientras que en la región II fue 26% mayor.

El intervalo de variación de la PP_{sup} durante abril presentó un patrón de variación costa-océano, influenciado principalmente por los cambios en la distribución espacial de clorofila. PP_{sup} tuvo un intervalo de variación entre $0.5-20 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, y con valores superiores a $6 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en toda la zona costera (fig. 17b). Estos valores se deben principalmente a las altas concentraciones de clorofila observadas en la costa, ocasionados principalmente por los eventos de surgencia ocurridos en este periodo.

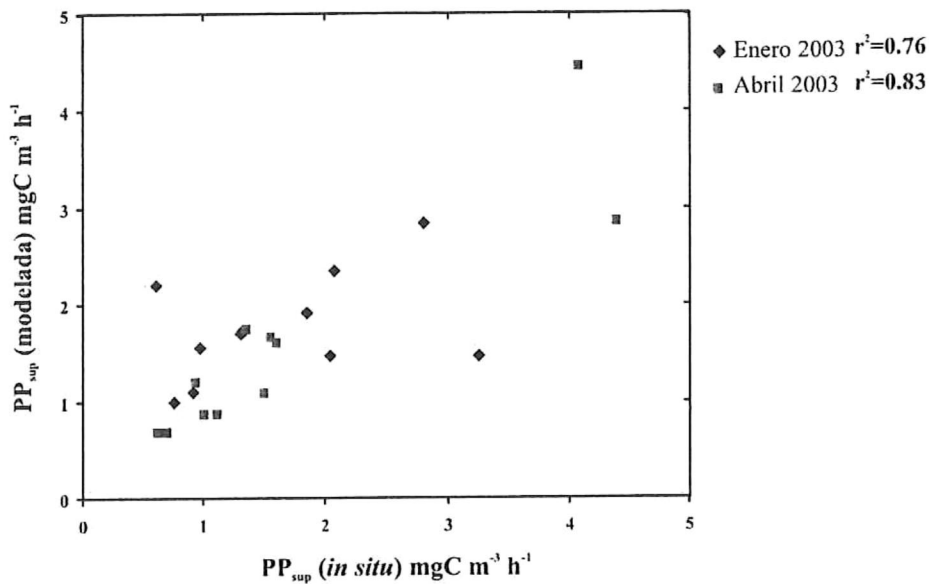


Figura 16. Producción primaria superficial “*in situ*” (PP_{sup} ; $\text{mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) versus producción primaria superficial estimada con el modelo de Platt y Sathyendranath (1988) para las estaciones muestreadas durante enero y abril del 2003. Los puntos dentro de los círculos no se consideraron para el cálculo del coeficiente de determinación. La línea continua indica la relación 1:1.

La PP_{sup} fue 2% mayor para la región I y 20% menor en la región II. Se observa que la mayor variabilidad de la producción modelada se presentó en la región II (central) del área de estudio, siendo esta también la que mostró la mayor variabilidad tanto en la concentración de clorofila como en la de los parámetros fotosintéticos. Es en esta zona donde ocurre la transición entre el dominio de la masa de agua de origen subártico y el agua de origen nor-ecuatorial, lo que propicio los mayores cambios de las propiedades físicas (disponibilidad de nutrientes, mezcla, etc.) y biológicas (composición de grupos taxonómicos y propiedades fisiológicas) en la región frente a Baja California.

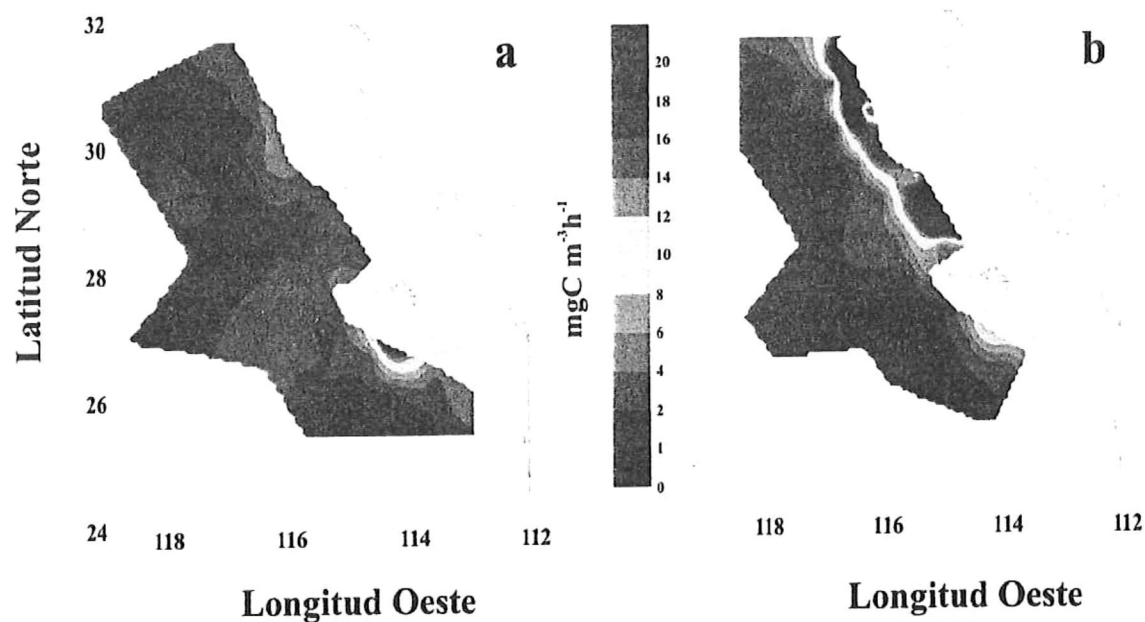


Figura 17. PP_{sup} ($\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$) estimada con el modelo de Platt y Sathyendranath (1988). a) Enero del 2003; b) Abril del 2003.

La variabilidad observada en la serie de tiempo de la PP_{eu} *in situ* para la región IMECOCAL desde julio de 1998 hasta abril del 2003 (fig. 18a) muestra una tendencia con valores promedios absolutos menores durante 1998 como consecuencia del ENSO, hasta un incremento durante 1999 (La Niña) y valores promedio máximos en enero del 2003. Durazo y Baumgartner (2002) describen que El ENSO de 1998 se caracterizó por transportar agua cálida y con mayor salinidad hacia la región, induciendo calentamiento en la capa superficial e incrementando el nivel medio del mar. Este proceso hizo más profunda la termoclina (nutriclina) y redujo el aporte de nutrientes hacia la zona eufótica (Z_{eu}) como resultado del incremento de la estratificación en la columna de agua (Chavez, 1996; Chavez *et al.*, 2002). Los valores de producción de enero del 2003 son mayores en relación a todos los cruceros anteriores, debido principalmente a que el enero del 2003 se caracterizó por presentar condiciones anómalas de temperatura y salinidad comparada con los eneros anteriores (1998-2002). La señal observada evidenció la intrusión de agua de origen subártico en el área de estudio. La intrusión anómala de esta agua aunada a la menor estratificación ocurrida ocasionaron un enriquecimiento de la zona eufótica, con las altas concentraciones de clorofila ($>70 \text{ mgChla m}^{-2}$) y de producción primaria en toda la región. En abril del 2003 se presentó una disminución en PP_{eu} en relación a la enero, sin embargo los valores de PP_{eu} fueron más altos que la mayoría de los datos de la serie de tiempo y sólo fueron similares a los ocurridos durante abril y octubre de 1999 cuando se presentó la Niña en la región (Lavaniegos *et al.*, 2002). La alta PP_{eu} observada durante abril y octubre de 1999 estuvo relacionada con fuertes surgencias costeras en el SCC (Bograd *et al.*, 2000), la cual tuvo el valor más alto

del índice de afloramiento de los últimos 54 años (Schwing et al. 2000). Esto parece anunciar el inicio de un nuevo régimen frío para la región de la CC a partir del año 1999-2000 (Peterson y Schwing, 2003; Hernández-de-la-Torre et al., 2003). Miller (1996) señaló que durante La Niña 1999 se intensifican los procesos de mezcla, lo que generó una termoclina más somera y un incremento en el transporte de aguas frías y ricas en nutrientes hacia la zona eufótica.

La serie de tiempo de la tasa fotosintética máxima (P_m^B) (fig. 18b) y del coeficiente de máxima utilización de luz (fig. 18c) muestran mayor variabilidad en comparación con la serie de tiempo de la PP_{eu} . A pesar de que la tendencia entre P_m^B y α^B es similar entre el periodo comprendido del 2000 al 2003 se presentaron discrepancias entre 1998 y 1999. Estas diferencias aún fueron más notorias durante enero del 2003, ya que a pesar de que se registró el máximo PP_{eu} de toda la serie IMECOCAL los valores de P_m^B y α^B fueron menores a los obtenidos en abril, cuando PP_{eu} disminuyó en comparación con enero del 2003. Esto sugiere que no necesariamente se mantiene una relación lineal entre de los parámetros fisiológicos del fitoplancton y los cambios en la producción primaria. Por lo tanto, cuando se realizan relaciones entre producción primaria y las variables asociadas es poco probable encontrar una asociación directa entre solamente un sólo factor de los involucrados en el proceso fotosintético (luz, clorofila, parámetros fotosintéticos, nutrientes), sino que los cambios en producción primaria responden a la variación de un conjunto de los factores antes señalados.

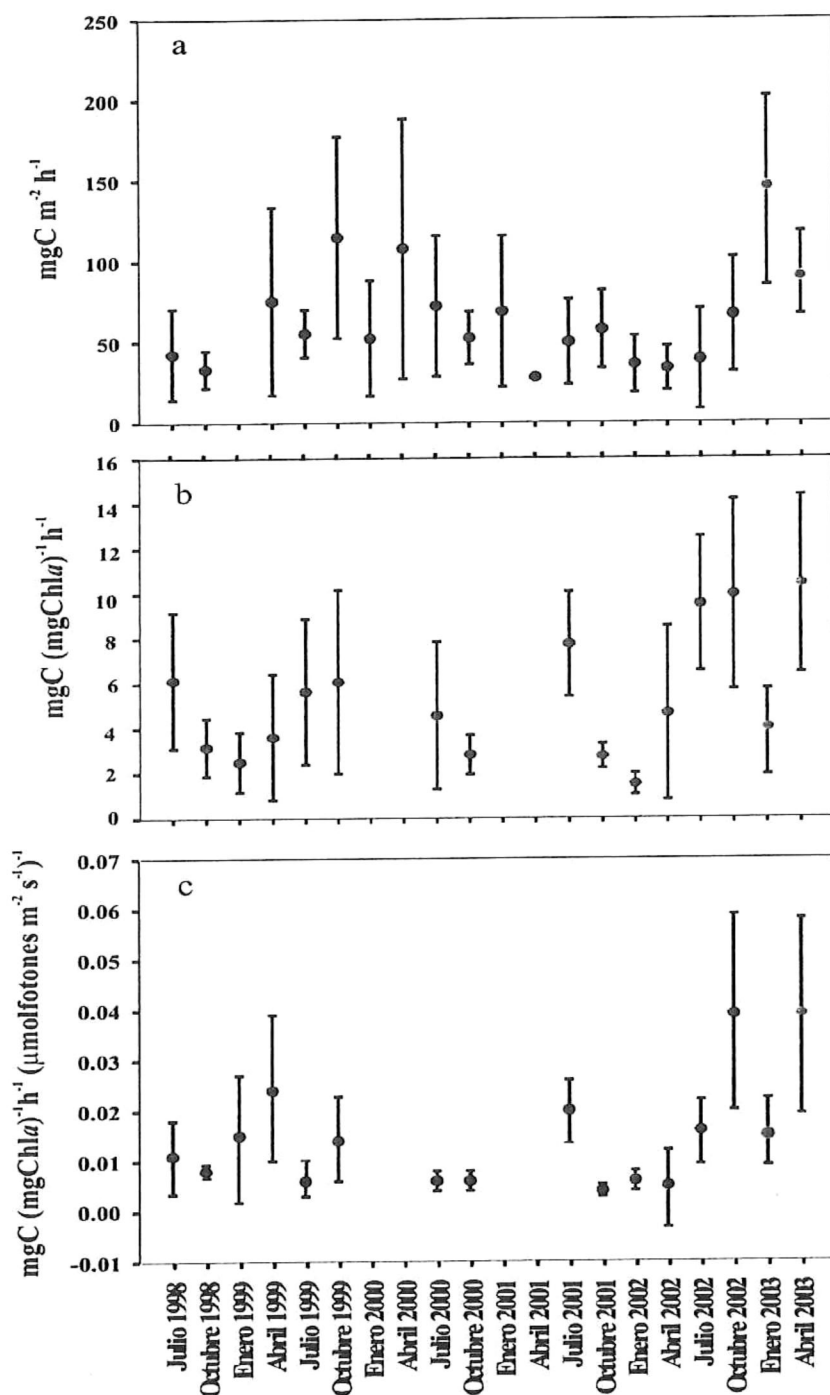


Figura 18. Serie de tiempo de julio de 1998 a abril del 2003. a) Producción primaria integrada en la zona eufótica. b) Tasa fotosintética máxima (P^B_m). c) Coeficiente de máxima utilización de luz (α^B). El círculo es el promedio y la barra representa una desviación estándar. Los círculos azules destacan los promedios para enero y abril del 2003. Datos tomados de 18 campañas IMECOCAL de 1998-2002.

CONCLUSIONES

- La intrusión de la SAW observada durante enero y abril del 2003 frente a Baja California estuvo presente en la Corriente de California y en el área frente a California al menos desde julio del 2002, como fue reportada por Bograd y Lynn (2003) y por Murphree et al. (2003). Esta agua se extendió hasta frente a Punta Eugenia, Baja California sur, donde estuvo presente en las primeras capas del océano. El agua Subsuperficial Ecuatorial solamente se encontró durante enero del 2003 en la región central, al sur de Punta Eugenia.
- La alta concentración de clorofila observada durante enero del 2003 se debió a la posición más somera de la termoclina en casi toda la zona de estudio, asociada a procesos físicos (giros, frentes, meandros) para esta época del año. En abril la clorofila a 10m e integrada presentó los máximos en la zona costera, caracterizada por baja temperatura y alta salinidad debido a los eventos de surgencia típicos de primavera.
- Los más altos valores de P_m^B registrados durante abril se debieron principalmente a la mayor estratificación de la columna de agua fuera de la costa, con el fitoplancton fotoaclimatado a mayores irradiancias.

- Los altos valores de PP_{eu} registrados durante enero del 2003 fueron ocasionados por la menor estratificación de la columna de agua, así como también a las altas concentraciones de clorofila observadas en este mes. El promedio de la PP_{eu} para este mes fue el más alto de toda la serie de tiempo de IMECOCAL.

- La PP_{eu} promedio durante enero fue significativamente mayor que la de abril, sin una diferencia significativa entre las regiones norte y central. La relativa baja producción primaria promedio en abril estuvo asociada principalmente a la disminución de la biomasa fitoplanctónica observada fuera de la costa, así como también a la presencia de especies fitoplanctónicas más pequeñas (picoplancton). Sin embargo, la PP_{eu} de este mes solamente fue menor a la medida durante La Niña 1999.

- El modelo propuesto por (Platt y Sathyendranath, 1988) explicó el 76% de la varianza en la producción primaria superficial para enero y el 83% para abril.

BIBLIOGRAFÍA

- Aalderink, R. H. y R. Jovin. 1997. Estimation of the photosynthesis/irradiance (P/I) curve parameters from light and dark bottle experiments. *J. of Plankton Res.*, 19, 1713-1742.
- Aguirre-Hernández, E., G. Gaxiola-Castro, S. Najera-Martinez, T. Baumgartner, M. Kahru y B. G. Mitchell. 2004. Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: summer and autumn 1998. *Deep-Sea Res. II*, 51, 799-816.
- Antoine, D., J.M. André y A. Morel. 1996. Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. *Global Biogeochem. Cycles*, 10, 57-69.
- Babin, M., A. Morel y R. Gagnon. 1994. An incubator designed for extensive and sensitive measurement of phytoplankton photosynthetic parameters, *Limnol. Oceanogr.*, 39, 694-702.
- Babin, M., A. Morel, H. Claustre, A. Bricaud, Z. Kolber y P. G. Falkowski. 1996. Nitrogen and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems, *Deep-Sea Res.*, 43, 1241-1272.
- Bograd, S.J., P.M. Digiacomo, R. Durazo, T. L. Hayward, K. D. Hyrenbach, R. J. Lynn, A. W. Mantyla, F. B. Schwing, W. J. Sydeman, T. Baumgartner, B. Lavaniegos y C. S. Moore. 2000. The state of the California Current, 1999-2000: Forward to a new regime? *CalCOFI Rep.*, 41, 26-52.
- Bograd, S. J., T. K. Chereskin y D. Roemmich. 2001. Transport of mass, heat, salt and nutrients in the southern California Current System: Annual cycle and interannual variability. *J. Geophys. Res.*, 106, 9255-9275.
- Bograd, S. J. y Lynn. 2003. Anomalous subarctic influence in the southern California Current during 2002. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 8020, doi:10.1029/2003GLO17446, 2003.
- Cepeda-Morales, C. A. 2004. Aplicación de un modelo para estimar la producción primaria por sensores remotos en la región sur de la Corriente de California: Evaluación y consideraciones. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B.C. 84pp.

- Chavez, F.P. 1996. Forcing and biological impact of onset of the 1992 El Niño in central California . *Geophys. Res. Lett.*, 23, 265-268.
- Chavez, F.P., J.T. Pennington, , C.G. Castro, J. P. Ryan, R. P. Mishisaki, B. Schlining, P. Walz, K. R. Buck, A. McFayden, and C. A. Collins. 2002. Biological and chemical consequences of the 1997-98 El Niño in Central California waters. *Progr. Oceanogr.*, 54, 205-232.
- Coté, B. and T. Platt. 1983. Utility of the light-saturation curve as an operational model for quantifying the effects of environmental conditions on phytoplankton photosynthesis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 18,57-66.
- Cullen, J. 1982. The Deep Chlorophyll Maximum: Comparing Vertical Profiles of Chlorophyll a. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 39,791-803.
- Cullen , J. J., X. Yang y H. L. MacIntyre. 1992. Nutrient limitation and marine photosynthesis. En: P. G. Falkowski y A. D. Woodhead (eds.). *Primary productivity and biogeochemical cycles*. Plenum Press, New York, pp. 69-88.
- Durazo, R. y T. R. Baumgartner. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progr. Oceanogr.*, 54, 7-31.
- Durazo, R., G. Gaxiola-Castro, B. Lavaniegos, R. Castro-Valdez, J. Gomez-Valdez y A. Mascarenhas. 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002-2203: A weak El Niño and Subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas* (sometido).
- Dring, M. J. y D. H. Jewson. 1982. What does ^{14}C uptake by phytoplankton really measure? A theoretical modeling approach. *Proc. R. Soc. Lond.*, 214, 351-368.
- Eppley, R. W. y B. J. Peterson. 1979. Particulate organic matter flux and planctonic new production in the deep ocean. *Nature*, 282, 677-680.
- Espinosa-Carreón, T. L., P. T. Strub, E. Beier, F. Ocampo-Torres y G. Gaxiola-Castro 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California, *J. Geophys. Res.*, 109, C03039, doi:10.1029/2003JC002105.
- Espinosa-Carreón 2005. Producción primaria oceánica con relación a procesos físicos de mesoescala en la región sur de la Corriente de California. Tesis Doctoral. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. B.C. (en proceso).
- Falkowski, P. G. 1980. *Primary Productivity in the sea*: New York: Plenum Press, New

York. 531 pp.

- Falkowski, P. G. y J. A. Raven. 1997. Aquatic photosynthesis. Blackwell Science. 375 pp.
- Gaxiola-Castro, G. y S. Alvarez-Borrego. 1986. Photosynthesis-irradiance relationship for winter phytoplankton in waters off México. *Oceanologica Acta*, 9,497-501.
- Gaxiola-Castro, G. y S. Alvarez-Borrego. 1991. Relative assimilation numbers of phytoplankton across a seasonally recurring front in the California Current off Ensenada. *CalCOFI Rep.*, 32, 91-96.
- Geider, R. J. y B. A. Orborne. 1992. Algal Photosynthesis. Chapman and may. New York. 256 pp.
- Geider, R. J. 1993. Quantative phytoplankton physiology: implications for primary production and phytoplankton growth. *ICES Marine Science Symposia*, 197, 52-62.
- Gómez, J., Vélez-Muñoz, H. S., 1982. Variaciones estacionales de temperatura y salinidad en la región costera de la Corriente de California. *Ciencias Marinas*, 8, 167-176.
- Hartline, B. K. 1980. Coastal upwelling: physical factors feed fish. *Science*, 208, 38-40.
- Hernández-de-la-Torre, B., G. Gaxiola-Castro, S. Alvarez-Borrego, J. Gómez-Valdéz y S. Nájera-Martínez. 2003. Interannual variability of new production in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Res. II*, 50, 2423-2430.
- Hickey, B. M. 1979. The California current system-hypotheses and facts. *Prog. Oceanogr.*, 8,191-279.
- Holm-Hansen, O., J. Lorenzen, R. W. Holmes y J. D. H. Strickland. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll, *J. Cons. Int. Explore. Mer.*, 30, 3-15.
- Houghton, J. T., G. J. Jenkins y J. J. Epehaums. 1990. Climate change: The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, New York, 416pp.
- Jassby, A. D. y T. Platt. 1976. Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton, *Limnol. Oceanogr.*, 21, 540-547.
- Kyn'dyushev, V. I. 1970. Seasonal variations of water masses in the California region of the Pacific Ocean. *Oceanology*, 10,456-464.

- Koblentz-Mishke, O. J. 1965. Magnitude of primary production of the Pacific Ocean. *Oceanology*, 5, 325-337.
- Lavaniegos, B. E., L. C. Jiménez-Pérez y G. Gaxiola-Castro. 2002. Plankton response to El Niño 1997-1998 and La Niña 1999 in the southern region of the California Current. *Prog. Oceanogr.*
- Liebes, S. M. 1992. *An introduction to Marine Biogeochemistry*. John Wiley and Sons, Inc. New York. 734 pp.
- Lynn, R. J. 1986. The Subarctic and northern subtropical fronts in the eastern North Pacific Ocean in spring. *J. Geophys. Oceanogr.*, 16, 209-222.
- Lynn, R. J. y J. J. Simpson. 1987. The California current system: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, 92, 12947-12966.
- Mann, K. A. y J. N. R. Lazier. 1993. *Dynamics of Marine Ecosystems. Biological, Physical Interactions in the oceans*. 2da. Edition. Boston, Oxford: Blackwell. 466 pp.
- McGowan, J. A., D. B. Chelton y A. Conversi. 1996. Plankton patterns, climate and change in the California Current. *CalCOFI Rep.*, 37, 45-68.
- Millán-Núñez, R., S. Alvarez-Borrego y C. Trees. 1996. Relationship between deep chlorophyll maximum and surface chlorophyll concentration in the California Current System. *CalCOFI Rep.*, 37, 241-249.
- Miller, A. 1996. Recent advances in California Current modeling: Decadal and interannual thermocline variations. *CalCOFI Rep.*, 37, 69-79.
- Moser, H.G. y P.E. Smith. 1993. Larval fish assemblages of the California Current region and their horizontal and vertical distributions across a front. *Bull. Mar. Sci.*, 53, 645-691.
- Murphree, T., S.J. Bograd, F. B. Schwing y B. Ford. 2003. Large-scale atmosphere-ocean anomalies in the northeast Pacific during 2002. *Geophys. Res. Lett.*, doi:1029/2003GLO17303, 2003.
- Parés-Sierra, A., M. López y E.G. Pavía. 1997. *Oceanografía Física del Océano Pacífico Nororiental*. En: *Contribuciones a la Oceanografía Física de México*. M. F. Lavín, (Edt.). Monografía No. 3 Unión Geofísica Mexicana, 1-24.

- Peláez, J. y J. McGowan. 1986. Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. *Limnol., Oceanogr.*, 31, 927-950.
- Peterson, W. T. y F. B. Schwing. 2003. A new climate regime in northeast Pacific ecosystems. *Geophys. Res. Lett.*, 30(17), doi:10.1029/2003GLO17528, 2003: OCE 6. AGU.
- Platt, T. y S. Sathyendranath. 1988. Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science*, 241,1613-1620.
- Reid, J. L., G. I. Roden y J. G. Wyllie. 1958. Studies of the California current system. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.*, 6,27-56.
- Reid, J. L., y R. A. Shwartzlose. 1962. Direct measurement of the Davison current off central California. *J. Geophys. Res.*, 67,2491-2497.
- Roden, G. I. 1971. Aspects of the transition zone in the Northeastern Pacific. *J. Geophys. Res.*, 76,3462-3475.
- Sakshaug, E., A. Bricaud, Y. Dandonneau, P. G. Falkowski, D.A. Kiefer, L. Legendre. A. Morel, J. Parslow, y M. Takahashi. 1997. Parameters of photosynthesis: definitions, theory and interpretation of results. *J. of Plankton Res.*, 19,1637-1670.
- Sarmiento, J. L., G. Thiele, R. M. Key y W. S. Moore. 1990. Oxygen and nitrate new production and remineralization in the North Atlantic subtropical gyre. *J. Geophys. Res.*, 95,18303-18315.
- Sarmiento, J. L., y U. Siegenthaler. 1992. New production and the global carbon cycle. En: P. G. Falkowski y A. D. Woodhead (eds.). *Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea*. Plenum Press, New York, 317-332.
- Schwing, F. B., C. S. Moore, S. Ralston y K. M. Sakuma. 2000. Record coastal upwelling in the California Current in 1999. *CalCOFI Rep.*, 41,148-160.
- Sosa-Avalos, R. 2002. Estimación de la producción primaria frente a Baja California por sensores remotos. Tesis Doctoral. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada , B.C. 153pp.
- Steeman Nielsen, E. y E. A. Jensen. 1952. The autotrophic production of organic matter in the oceans. *Galathea Rep.*, 1,49-124.
- Sverdrup, H. U. y R. H. Fleming. 1941. The waters off southern California March to July 1937. *Bull. Scipps Inst. Oceanogr. Univ. Calif., La Jolla*, 4,261-378.

- Tomczak, M., y J. S. Godfrey. 1994. *Regional Oceanography: An Introduction*. Pergamon Press, New Cork, 422pp.
- Vélez-Muñoz, H. S., 1981. Análisis cuantitativo de la variabilidad estacional y espacial de las masas de agua de 0 a 500m en la región de la Corriente de California. Tesis Profesional, Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada B.C., México 165pp.
- Venrick, L. E. 1998. The phytoplankton of the Santa Barbara: patterns of chlorophyll and species structure and their relationships with those of surrounding stations. *CalCOFI Rep.*, 39,124-132.
- Venrick, E. L. y T. L. Hayward. 1984. Determining chlorophyll on the 1984 CalCOFI surveys. *CalCOFI Rep.*, 25, 74-79.
- Venrick, E., S. Bograd, D. Checkley, S. Cummings, R. Durazo, G. Gaxiola-Castro, J. Hunter, A. Huyer, K.D. Hyrenbach, B.E. Lavaniegos, A. Mantyla, F.B. Schwing, R.L. Smith, W.J. Sydeman, and P.A. Wheeler 2003. The State of the California Current, 2002-2003: Three events vie for dominance. *CalCOFI Reports*, in press.
- Yentsch, C. S. y D. W. Menzel. 1963. A method for the determination of phytoplankton, chlorophyll and phaeophytin by fluorescence, *Deep Sea Res.*, 10,221-231.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>.