

# 2 Oceanografía de la región de las grandes islas

Saúl Alvarez-Borrego

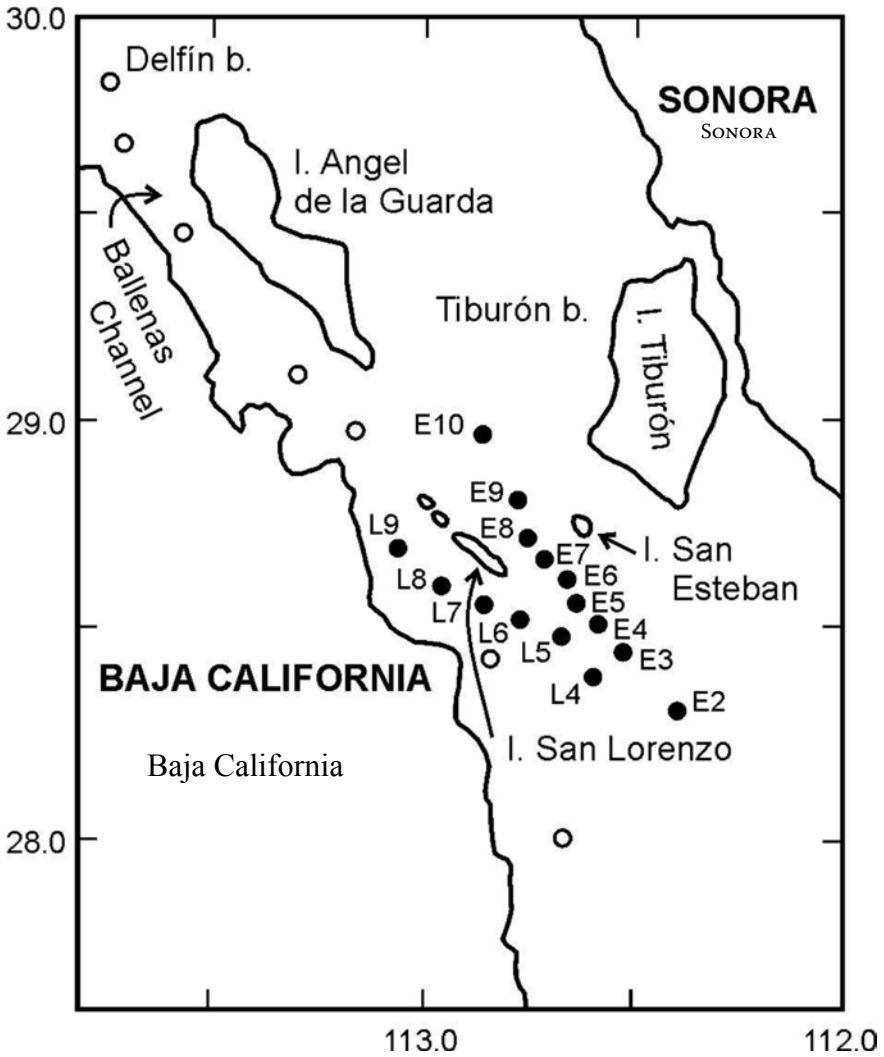
*En la porción interna del Golfo la distribución de temperatura era totalmente diferente. Aún en las partes más profundas había una temperatura de alrededor de 11°C. Esto indica que la porción interior se encuentra separada de la externa por un umbral.....En la porción interior del Golfo, el contenido de oxígeno es mayor que en la externa, encontrándose valores por debajo de  $1 \text{ mL L}^{-1}$  sólo cerca del fondo en algunas partes. El mayor contenido de oxígeno indica que el agua profunda en el interior está formada por mezcla de agua que fluye sobre ese umbral...*

Harold U. Sverdrup, 1941, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California  
Datos del crucero del B/O EW Scripps realizado de febrero a marzo de 1939.

## INTRODUCCIÓN

Desde el primer crucero de EW Scripps en el Golfo de California de febrero a marzo de 1939 se reconoció que la Región de las Grandes Islas del Golfo de California, Isla Tiburón e Isla Ángel de la Guarda (IAG) (fig. 1), tiene características oceanográficas únicas (Sverdrup 1941). Por ejemplo, al sur de IAG y Tiburón la temperatura disminuye regularmente con la profundidad, al igual que en océano abierto, con menos de 2°C debajo de los 2000 m; sin embargo, en el Canal de Ballenas, entre IAG y la Península de Baja California, la distribución vertical de temperatura es totalmente diferente, con valores al-

Figura 1. Región de las Grandes Islas del Golfo de California. (●) Estaciones hidrográficas utilizadas en el estudio sobre flujos de CO<sub>2</sub> entre océano y atmósfera de Hidalgo-González *et al.* (1997). (○) Estaciones hidrográficas donde se midió la distribución vertical de las variables mostradas en la figura 2



rededor de 11°C aún en las partes más profundas. Las menores temperaturas superficiales (Robinson 1973) y las mayores concentraciones de nutrientes y CO<sub>2</sub> (Alvarez-Borrego *et al.* 1978, Hidalgo-González *et al.* 1997) en todo el golfo se encuentran de manera persistente en la Región de las Grandes Islas; las corrientes de marea son muy intensas, con altas tasas de disipación de la energía de las mareas (hasta >0.3 W m<sup>-2</sup>; Argote *et al.* 1995) y la intensa mezcla crea una situación parecida a una constante surgencia. Por ello, la productividad primaria es alta y soporta gran cantidad de aves y mamíferos marinos (Tershy *et al.* 1991). La mezcla generada por las mareas entre las islas San Lorenzo y San Esteban agitan vigorosamente la columna de agua hasta más de 500 m de profundidad, produciendo el efecto neto de transportar aguas más frías y ricas en nutrientes hacia la superficie (Simpson *et al.* 1994). Entre las islas San Lorenzo y San Esteban, la turbulencia causada por las corrientes de marea es tan intensa que se efecto se nota claramente como una hilera de fuertes remolinos que une ambas islas (Cortés-Lara *et al.* 1999).

Mediante imágenes de satélite de 1978 a 1986 se ha mostrado que la variabilidad de la biomasa de fitoplancton no está dominada por los eventos El Niño. Más bien, la intensa mezcla debida a las mareas ocultó los efectos de El Niño 1983–1984 que en cambio fueron muy evidentes en otros ecosistemas costeros del Pacífico Oriental, incluyendo la boca del Golfo de California. El Canal de Ballenas mostró un comportamiento excepcional, con un incremento en la concentración de clorofila *a* hacia fines de 1983 debido al incremento en la biomasa de fitoplancton promovido por la reducción del proceso de mezcla (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994). Con base en el gran número de cetáceos adultos y aves marinas en el Canal de Ballenas en 1983, Tershy *et al.* (1991) sugirieron que esta área pudiera servir como un refugio de alta productividad y abundancia de presas para estos organismos marinos de gran movilidad en años de El Niño. De acuerdo con Velarde y Ezcurra (2000), el censo sistemático de durante 21 años de las aves en Isla Rasa, en la Región de las Grandes Islas, muestran que las gaviotas de Heermann (*Larus heermanni*) han tenido pequeñas fluctuaciones de ~250,000 individuos. Aún en años El Niño (e.g., 1998) la mayoría de los individuos adultos de esta y otras especies de aves marinas estuvieron presentes en sus zonas de anidación. Green-Ruiz y Hinojosa-Corona (1997) estudiaron la zona de desove de la anchoveta (*Engraulis mordax*) en el golfo de 1990 a 1994, y encontraron que en febrero

de 1992, un año de El Niño, las anchovetas solamente desovaron en la Región de las Grandes Islas, y que la mayor abundancia de huevecillos coincidió con las menores temperaturas ( $17-18^{\circ}\text{C}$ ), las cuales fueron  $2-3^{\circ}\text{C}$  mayores que las menores temperaturas allí observadas en 1990–1991.

Topográficamente el Golfo de California está dividido en una serie de cuencas y fosas o trincheras que se hacen más profundas hacia el sur y que están separadas entre sí por cordilleras transversales. El Canal de Ballenas tiene una profundidad máxima de  $\sim 1600$  m, y la Cuenca Tiburón, entre IAG e Isla Tiburón, tiene una profundidad máxima de  $\sim 500$  m (Shepard 1950). El Canal de Ballenas está aislado de la parte central del golfo por una cordillera submarina. La profundidad del pie de esta cordillera es de  $\sim 450$  m. El agua en el Canal de Ballenas es resultado de la mezcla de aguas superficiales y aguas provenientes de la base de la cordillera. La Cuenca Tiburón tiene condiciones hidrográficas similares a las del Canal de Ballenas, pero tiene una comunicación más abierta con el sur del golfo (Alvarez-Borrego y Lara-Lara 1991).

## MASAS DE AGUA, MAREAS Y CIRCULACIÓN

Al sur de IAG e Isla Tiburón el golfo tiene básicamente la misma estructura termohalina que el Océano Pacífico Oriental, pero con modificaciones superficiales debidas a la excesiva evaporación (Sverdrup 1941, Roden 1964); no obstante, por causa de restricciones batimétricas, en la Región de las Grandes Islas sólo se encuentran Agua del Golfo de California (AGC,  $S \geq 35.0$  y  $T > 12^{\circ}\text{C}$ ), y Agua Subsuperficial Subtropical (ASS,  $34.5 < S < 35.0$  y  $9.0 \leq T^{\circ}\text{C} < 18.0$ ; Torres-Orozco 1993). El AGC puede ser Agua Superficial Ecuatorial o ASS que ha sido transformada por evaporación (Roden y Groves 1959). En esta región del golfo no están presentes ni el Agua del Pacífico Intermedio Profundo ni el Agua de Fondo del Pacífico.

El norte del Golfo de California muestra fenómenos de marea espectaculares, con rangos  $>3$  m en la Región de las Grandes Islas. La pequeña diferencia de periodo entre los componentes  $M_2$  y  $S_2$  (componentes principales lunar y solar, respectivamente) produce la variación quincenal de las mareas, la causada por las fases de la luna. Cuando el sol, la luna y la tierra se encuentran alineados (lunas llena y nueva), sus fuerzas gravitacionales combinadas

producen mareas máximas (mareas vivas); cuando se encuentran en cuadratura, las fuerzas del sol y la luna se oponen entre sí y las amplitudes de marea son mínimas (mareas muertas). Así, la mezcla por mareas tiene una modulación quincenal, presentando la mayor intensidad después de mareas vivas y la menor después de mareas muertas (Simpson *et al.* 1994). Todas las corrientes de marea en los estrechos entre islas y entre éstas y las costas de tierra firme, así como en los pasos que conectan las lagunas costeras semi-cerradas con el golfo son fuertes. La velocidad de estas corrientes es variable y depende de la fase lunar y los vientos dominantes, pero al ser medidas con medidores de deriva se han obtenido valores instantáneos excepcionales de hasta  $3 \text{ m s}^{-1}$  en el Canal de Ballenas (6 nudos; Álvarez-Sánchez *et al.* 1984). Estos autores reportaron que con frecuencia los medidores de deriva fueron encontrados siguiendo complicadas trayectorias en forma de remolino en la parte más amplia del canal. Marinone y Lavín (2003) usaron un modelo tridimensional para describir la mezcla y el flujo de marea y residual en el golfo central, y concluyeron que los flujos de pleamar y bajamar ocurren dos veces al día con velocidades de hasta  $60 \text{ cm s}^{-1}$ ; y que las corrientes muestran una fuerte modulación quincenal con corrientes de mareas vivas que duplican las de mareas muertas.

Por medio de un radar espacial se detectaron evidencias de ondas internas en la Región de las Grandes Islas, las cuales estuvieron fuertemente correlacionadas con la intensidad de las mareas locales y cuyo mayor número ocurrió durante las mareas vivas y el menor en mareas muertas. La principal fuente de estas ondas internas se localiza entre las islas San Lorenzo y San Esteban (Fu y Holt 1984). Una serie de tiempo de tres días de la distribución vertical de propiedades químicas y biológicas mostró que, en las capas subsuperficiales entre 40–100 m, estas ondas internas producen oscilaciones en los isogramas con rangos máximos de  $\sim 50 \text{ m}$ , lo que tiene un efecto significativo en la productividad del fitoplancton (Gaxiola-Castro *et al.* 2002).

Las corrientes de marea generan un movimiento de ida y vuelta. La circulación, en contraste, es el sistema de corrientes del que no forman parte las corrientes de marea; es decir, que está integrado por las corrientes residuales una vez que se han descontado las corrientes de marea (corrientes residuales). La circulación resulta de interés debido a que es la responsable del transporte de materiales (e.g., contaminantes, huevecillos, larvas, etc.) de un lugar

a otro. Existe una ganancia neta de calor a través de la superficie del Golfo de California que debe ser exportada al Océano Pacífico (Lavín y Organista 1988). Esto requiere de la exportación oceánica de calor y sal fuera del golfo para alcanzar un equilibrio, e implica que la circulación media anual debe tener una componente profunda que entra al golfo (Bray 1988). Esto tiene importantes implicaciones ecológicas dado que el agua profunda entrante tiene mayores concentraciones de nutrientes inorgánicos (Alvarez-Borrego y Lara-Lara 1991) y más carbono inorgánico disuelto que el agua superficial que sale del golfo. Bray (1988) propuso una circulación de tres capas entre el sur y el norte del Golfo de California, por encima de 500 m, con agua que entra por la capa de fondo, agua que sale en la capa intermedia, y una capa superficial que se revierte estacionalmente. Marinone (2003) usó un modelo tridimensional para concluir que calor y sal fluyen hacia fuera del golfo en los primeros 200 m de la superficie y hacia el interior del golfo a profundidades de 200–600 m, y que la mayor parte del balance de calor en el gofo está definido en los 350 m superiores. El modelo de Marinone (2003) predice un fuerte intercambio entre el norte y el sur del golfo con velocidades superficiales relativamente altas en el área entre las dos Grandes Islas la mayor parte del tiempo, hacia el sur en “invierno” y hacia el norte en “verano”, y muy poco intercambio de agua a través del Canal de Ballenas.

Una serie de tiempo de 20 días de las corrientes en el umbral de San Lorenzo resulta consistente con un modelo de intercambio profundo (Badan-Dangon *et al.* 1991). López y García (2003) generaron una serie de tiempo de 9 meses y encontraron una corriente persistente que fluye cerca del fondo, a una profundidad de 340 m, en el umbral que separa la Cuenca Tiburón de la Cuenca Delfin. La corriente fluyó hacia el norte a un promedio de  $27 \text{ cm s}^{-1}$ . Estos autores reportaron que, a profundidades por encima de 260 m, el promedio de corrientes era mucho más variable y débil, pero que derivaban muy abruptamente hacia el NO cerca del fondo; y que las corrientes sobre la plataforma continental eran opuestas a las que fluían sobre el umbral, lo cual resulta consistente con un mecanismo de compensación. El modelo tridimensional de Marinone y Lavín (2003) tuvo como resultado una corriente cercana al fondo en el umbral de San Esteban y San Lorenzo que fluye hacia el noroeste causando una estructura vertical que consta de dos capas en invierno y tres en verano. Esta última consiste en una capa superficial que fluye hacia el norte del

golfo, una intermedia que fluye hacia fuera, y un flujo permanente cercano al fondo hacia el norte. Usando mediciones directas López *et al.* (2005) encontraron corrientes profundas que fluyen hacia el interior del Canal de Ballenas tanto en su entrada sur como en su entrada norte, y esta convergencia en la profundidad implica una divergencia en la superficie, con flujo de agua hacia fuera del canal en ambas entradas, hacia el norte y hacia el sur.

Algunas especies de peces costeros que viven en el litoral rocoso de Baja California muestran una estructura genética bien definida, con divisiones genéticas intraespecíficas en poblaciones que viven al norte y al sur del Canal de Ballenas. Es probable que la circulación oceanográfica restrinja el transporte de huevos y larvas (Riginos 2005). Primero, la existencia de pares de giros con rotaciones ciclónica (al norte) y anticiclónica (al sur) (Pegau 2002) produce corrientes que pueden transportar partículas pasivas del litoral de Baja California mar adentro y hacia aguas profundas; segundo, aunque el flujo de mareas sea masivo en esta región, ocurre muy poco intercambio de agua entre el norte y el centro del golfo a través del Canal de Ballenas, tal y como se ha mencionado; y tercero, López *et al.* (2005) han sugerido la posibilidad de que exista un flujo superficial divergente a través del Canal de Ballenas. Estos mecanismos pueden actuar como barreras correspondientes al límite entre las regiones biogeográficas norte y centro del Golfo de California, a lo largo de la Península de Baja California.

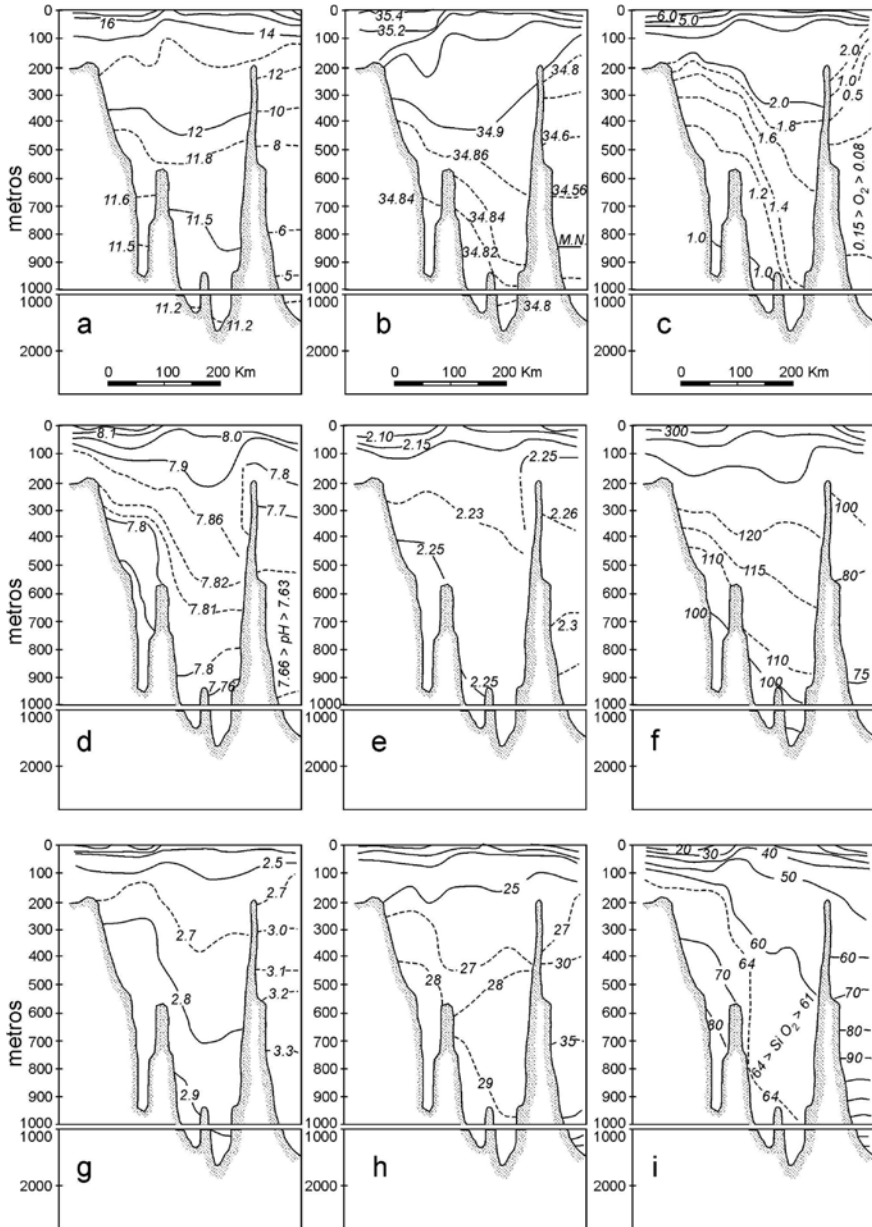
## DISTRIBUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Las características hidrográficas más notables del Canal de Ballenas son sus altas concentraciones de oxígeno, temperaturas y salinidades a grandes profundidades. Comparadas con las condiciones en el sur del golfo, a 1000 m existen diferencias de temperatura, salinidad y oxígeno de 6°C, 0.4 y >1 mL L<sup>-1</sup>, respectivamente. Aquí no se presentan los mínimos de oxígeno y salinidad característicos de la mitad sur del golfo (fig. 2a, b, c). Las condiciones hidrográficas de la Cuenca Tiburón son similares a las del Canal de Ballenas, con valores muy similares de salinidad, temperatura y salinidad a las mismas profundidades. Durante el verano la termoclina en esta región se encuentra bien desarrollada, al igual que en cualquier otra parte del golfo (Roden 1964).

Los datos de pH son muy consistentes con los de oxígeno. En el Canal de Ballenas no hay un mínimo de pH, y los valores superficiales de este parámetro son los más bajos de todo el golfo, 8.1, disminuyendo a 7.95 a 100 m, y posteriormente de manera monotónica a 7.70 a 1500 m (fig. 2d). El carbono inorgánico disuelto ( $\text{TCO}_2$ ) es máximo en el Canal de Ballenas, con valores de  $\sim 2.13 \text{ mmol kg}^{-1}$ , comparados con  $2.07 \text{ mmol kg}^{-1}$  en la región sur del golfo. Nuevamente, el  $\text{TCO}_2$  tiene un máximo a profundidades intermedias en las regiones centro y sur, mismo que no ocurre en el Canal de Ballenas (fig. 2e). Debido al rápido descenso de pH cerca de la superficie en las regiones centro y sur del golfo, el porcentaje de saturación del carbonato de calcio con respecto a calcita y aragonita disminuye rápidamente hasta la subsaturación a 300 y 70 m respectivamente. Así, minerales al sur de  $28^\circ\text{N}$  sólo la capa superficial se encuentra sobresaturada de estos minerales. La mayor temperatura y mayor pH en el Canal de Ballenas causa sobresaturación de calcita y aragonita hasta los 900 m (fig. 2f) y 130 m, respectivamente (Gaxiola-Castro *et al.* 1978).

En esta región la turbulencia creada por las intensas corrientes de marea actúa como una “bomba física” que transporta  $\text{CO}_2$  de aguas profundas hacia la superficie y la atmósfera. Este es un mecanismo que opera de manera opuesta a la “bomba biológica” que transporta  $\text{CO}_2$  de la superficie a aguas profundas (la fotosíntesis consume  $\text{CO}_2$  en la superficie y después las partículas biogénicas se hunden hacia aguas profundas) Esta región actúa como una fuente continua de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, con mayores flujos de  $\text{CO}_2$  durante las mareas vivas. El mayor valor superficial de presión parcial de  $\text{CO}_2$  ( $\text{pCO}_2$ ) calculado para julio de 1990 en esta área (fig. 1) fue  $>400 \mu\text{atm}$ , comparado con una  $\text{pCO}_2$  atmosférica de  $350 \mu\text{atm}$  (su correspondiente mayor flujo de  $\text{CO}_2$  fue de  $23 \text{ mM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Zirino *et al.* (1997) calcularon la  $\text{pCO}_2$  superficial para un

Figura 2 (página siguiente). Distribución vertical de las propiedades físicas y químicas en el Canal de Ballenas y regiones adyacentes. Las ubicaciones de las estaciones hidrográficas se muestran en la figura 1 (○), a excepción de la estación más al norte. (a) Temperatura ( $^\circ\text{C}$ ), (b) salinidad, (c) oxígeno disuelto ( $\text{mL L}^{-1}$ ), (d) pH, (e) bióxido de carbono total ( $\text{TCO}_2$ ,  $\text{mmoles Kg}^{-1}$ ), (f) porcentaje de saturación de carbonato de calcio con respecto a la calcita, (g) fosfato ( $\mu\text{M}$ ), (h) nitrato ( $\mu\text{M}$ ) y (i) silicato ( $\mu\text{M}$ ). Adaptado de Gaxiola-Castro *et al.* (1978), y de Alvarez-Borrego *et al.* (1978).



transecto que se extendía desde la entrada del golfo hasta una localidad entre IAG e Isal Tiburón, en octubre–noviembre (un periodo de transición entre condiciones de verano e invierno), y reportaron valores de  $p\text{CO}_2$  de hasta  $>550 \mu\text{atm}$  para la Región de las Grandes Islas. Con una columna de agua mucho menos estratificada durante el invierno, son de esperarse mayores flujos de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera que en el verano (Hidalgo-González *et al.* 1997).

En la Región de las Grandes Islas se encuentran las mayores concentraciones superficiales de nutrientes de todo el Golfo de California (Alvarez-Borrego *et al.* 1978). Las concentraciones superficiales de fosfatos, nitratos y silicatos en el Canal de Ballenas fueron de hasta 2.0, 13.0 y 29.0  $\mu\text{M}$ , respectivamente. Allí, y de manera consistente con la distribución vertical de oxígeno, no existen máximos de nutrientes; éstos se incrementan monótonicamente con la profundidad hasta alrededor de 3.0, 30 y 70  $\mu\text{M}$ , respectivamente, a 1500 m. A 1000 m las concentraciones de nutrientes son menores en el Cnal de Ballenas que en el golfo central y sur, con diferencias de 0.6  $\mu\text{M}$  para los fosfatos, 12  $\mu\text{M}$  para los nitratos, y 60  $\mu\text{M}$  para los silicatos (fig. 2g–i) (Alvarez-Borrego *et al.* 1978).

Una característica singular de esta región es que se han encontrado zonas aisladas con concentraciones muy altas de fosfatos a 150–350 m, con valores hasta  $>5 \mu\text{M}$ , lo que implica altas concentraciones de nitrógeno y otros nutrientes inorgánicos reducidos (Cortés-Lara *et al.* 1999). Estos valores excepcionalmente altos de fosfatos se han encontrado durante diferentes crueros en la Región de las Grandes Islas y con frecuencia fueron considerados anómalos. En el Océano Pacífico adyacente y en el sur del golfo los valores máximos de fosfatos a 900–1200 m son de 3.5  $\mu\text{M}$ . Una posible explicación para este fenómeno es que esta turbulenta zona actúa como una “trampa” donde los nutrientes que llegan a la superficie por difusión en remolinos son asimilados por el fitoplancton, luego las partículas biogénicas se hunden al mismo tiempo que ocurren procesos de remineralización por degradación bacteriana, y a profundidades intermedias los “nuevos” nutrientes que están siendo transportados a la superficie se suman a los que resultan de la remineralización (Cortés-Lara *et al.* 1999). Los nitratos y silicatos no muestran las correspondientes altas concentraciones porque la degradación bacteriana produce formas reducidas de nitrógeno inorgánico, y la disolución de los exoesqueletos de diatomeas y otros organismos es lenta.

Delgadillo-Hinojosa *et al.* (2001) reportaron las distribuciones de cadmio (Cd) disuelto en los 1000 m superiores del área que se extiende entre la boca del Golfo de California y las Grandes Islas. El Cd es un micronutriente y típicamente se comporta muy parecido al  $\text{PO}_4$  (Libes 1992). Al igual que para otros nutrientes, las mayores concentraciones superficiales de Cd se encontraron en la Región de las Grandes Islas ( $0.21\text{--}0.35\text{ nmol L}^{-1}$ ), mientras que las menores estuvieron en la boca del golfo ( $0.08\text{--}0.16\text{ nmol L}^{-1}$ ). Las aguas superficiales se encuentran enriquecidas en Cd en comparación con el Océano Pacífico adyacente ( $0.002\text{--}0.003\text{ nmol l}^{-1}$ ), y esto es debido al mismo proceso que incrementa las concentraciones superficiales de micronutrientes.

### *Biomasa y producción del fitoplancton*

La discontinuidad y gran variabilidad del fitoplancton se hicieron evidentes desde los primeros estudios de productividad orgánica en el Golfo de California (Allen 1938). A pesar de la intensa mezcla post mareas vivas, la columna de agua mantiene una fuerte estratificación en verano, con una termoclina que en ocasiones empieza desde la superficie, aunque algunas veces la capa de mezcla tiene hasta 80 m de profundidad. Las variables químicas y biológicas mantienen una estructura vertical aún después de las mareas vivas. Sin embargo, durante la turbulencia estival en el umbral entre las islas San Lorenzo y San Esteban transporta >30% del fitoplancton hacia debajo de la zona eufótica hasta >200 m, disminuyendo la fotosíntesis (Cortés-Lara *et al.* 1999). Este efecto debe ser mucho más fuerte durante el invierno, con mucha menos estratificación cerca de la superficie. En estudios de abundancia fitoplanctónica en el Canal de Ballenas (con la técnica del microscopio invertido), Cortés-Lara *et al.* (1999) y Millán-Núñez y Yentsch (2000) reportaron abundancias máximas en la superficie y cerca de ésta, similares y con valores de  $15\text{--}18 \times 10^3\text{ cel L}^{-1}$ , así como abundancias máximas de dinoflagelados de  $5\text{--}9 \times 10^3\text{ cel L}^{-1}$ , similares para verano e invierno, pero con mucho mayores concentraciones de nutrientes en invierno ( $\text{NO}_3$  superficial hasta  $>16\ \mu\text{M}$ ) que en verano ( $\text{NO}_3$  superficial hasta  $>3\ \mu\text{M}$ ). Esto indica que, con mucho mayores concentraciones de nutrientes y tasas fotosintéticas (ver más abajo), la mayor turbulencia mantiene las abundancias invernales de fitoplancton al mismo nivel que las de verano. El contenido de clorofila *a* por célula (los

valores de clorofila se discuten más abajo) es mayor en el invierno que en el verano debido a las mucho mayores excursiones a aguas más profundas y a la fotoaclimatación a menores niveles de luz durante el invierno. Cortés-Lara *et al.* (1999) reportaron 44 géneros de diatomeas, 18 de dinoflagelados, dos de silicoflagelados y uno de nanoflagelados para el verano, y Millán-Núñez y Yentsch (2000) reportaron 15 de diatomeas, 13 de dinoflagelados y dos de silicoflagelados para el invierno, por lo que la diversidad de fitoplancton parece ser mayor durante el verano.

Gaxiola-Castro *et al.* (2002) estudiaron el efecto de las ondas internas en el fitoplancton en la región con un experimento que duró 48 horas, y encontraron que con las mareas vivas las ondas internas alteraban la estructura de la columna de agua significativamente, con una variación en el campo de la estratificación. Estos autores reportaron que las concentraciones de nutrientes a profundidades  $>20$  m se incrementaban hasta dos veces, aumentando  $>1.0 \mu\text{M}$  para el  $\text{PO}_4$  y  $>7 \mu\text{M}$  para el  $\text{NO}_3$ . Durante el mismo periodo la concentración de clorofila *a* (Cl-*a*) se incrementó en más de 40% entre la superficie y el máximo profundo de Cl-*a*.

Con base en la distribución geográfica de restos de fitoplancton en los sedimentos superficiales, Round (1967) dividió el golfo en cuatro regiones, distinguiéndose notablemente entre ellas la Región de las Grandes Islas. Con base en la forma de los perfiles de Cl-*a*, Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2001) llegaron a una división del golfo muy similar. Estos autores usaron 268 perfiles para generar promedios de variables y parámetros que definen la forma del perfil de Cl-*a* para cada región del golfo. El máximo profundo de Cl-*a* (MPC) es una característica consistente en el océano, la Cl-*a* incrementa con la profundidad dentro de la zona eufótica, de la superficie hacia abajo hasta un punto donde la combinación de luz y niveles de nutrientes es óptima, y a partir de allí la Cl-*a* disminuye debido a la limitación de luz. Millán-Núñez y Yentsch (2000) reportaron zonas discontinuas con valores superficiales de Cl-*a* de  $1\text{--}2 \text{ mg m}^{-3}$  en el Canal de Ballenas, con valores máximos de Cl-*a* subsuperficial excepcionales de hasta  $>4 \text{ mg m}^{-3}$  para el invierno; y Cortés-Lara *et al.* (1999) reportaron también valores superficiales de hasta  $>2 \text{ mg m}^{-3}$ , pero con frecuencia por debajo de  $1 \text{ mg m}^{-3}$  y tan bajos como  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$  para el verano. Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2001) reportaron que el promedio de Cl-*a* superficial ( $3.1 \pm 0.3 \text{ mg m}^{-3}$  para el invierno, y  $0.8 \pm 0.2$

mg m<sup>-3</sup> para el verano) y la Cl-*a* integrada para toda la columna de agua, son mayores en la Región de las Grandes Islas que en las regiones centro y sur del golfo, y son similares a las del norte del golfo. Debido a la turbulencia y los altos niveles de nutrientes cerca de la superficie, la profundidad media del MPC es de tan sólo  $14.1 \pm 1.6$  m en el invierno, y de  $19.8 \pm 3.2$  m en el verano. Durante el invierno, aún con una capa superficial muy homogénea, el perfil de Cl-*a* mantiene su forma con un MPC debido a una variable física que tiene un gradiente vertical muy fuerte, la luz.

Alvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) revisaron los datos disponibles de <sup>14</sup>C y encontraron muy pocos puntos geográficos con experimentos que permitan una estimación de la producción integrada de toda la zona eufótica en nuestra región de interés y de cruceros de 1960–1986. Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004) usaron datos satelitales del color del océano para estimar los promedios de producción fitoplanctónica total y nueva para las regiones y estaciones del año definidas en su contribución de 2001. La producción primaria total del océano ( $P_T$ ) tiene dos componentes, la producción nueva y la regenerada ( $P_T = P_{nueva} + P_r$ ). La producción nueva ( $P_{nueva}$ ) es la fracción de la producción primaria total que es sostenida por el aporte externo o “nuevo” de nutrientes (Dugdale y Goering 1967). Las células fitoplanctónicas usan los nutrientes reciclados dentro de la zona eufótica para la producción regenerada ( $P_r$ ). Eppley y Peterson (1979) supusieron que  $P_{nueva}$  cuantitativamente equivalente a la materia orgánica que puede ser exportada de la producción total en la zona eufótica sin afectar el sistema de producción. Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2001) dividieron el año en dos estaciones: fría y cálida. La estación fría comprende de fines de noviembre a fines de junio, el resto del año es considerado la estación cálida. Sin embargo, junio y noviembre son meses de transición y, debido a la variabilidad interanual, en algunos años todo noviembre puede corresponder a la temporada fría. El rango de los promedios superficiales de Cl-*a* derivados de satélite para la Región de las Grandes Islas en las estaciones frías de 1997–2001 fue de 0.45–0.83 mg m<sup>-3</sup>. La producción total integrada para la zona eufótica (gC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> o tonC km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) calculada a partir de estos datos de Cl-*a* resulta similar a las de otras regiones del golfo. El rango fue de 1.45–1.73 para el invierno y no se vio afectada significativamente por El Niño 1997–1998 que si afectó la región de la boca del golfo. Los valores

para el verano también resultaron similares para todo el golfo y fueron sólo ~25% de los valores invernales. La producción nueva integrada fue ~0.77 del valor total para invierno, y ~0.67 de la producción total del verano. Así, en todo el Golfo de California existe una fuerte estacionalidad tanto para la producción primaria total como para la nueva (Hidalgo-González y Alvarez-Borrego 2004). Valdez-Holguín y Lara-Lara (1987), basados en incubaciones con  $^{14}\text{C}$ , reportaron también valores similares de producción integrada para todo el golfo. La mayor zona eufótica en las regiones del sur del golfo explica el hecho de que a pesar de los mayores valores de  $\text{Cl-}a$  en la Región de las Grandes Islas, el promedio de producción integrada es similar para todas las regiones del golfo. No obstante, la mayor parte de la producción primaria en la Región de las Grandes Islas se concentra en los primeros 15–20 m, comparados con los 30–37 m para las regiones del sur del golfo, lo que es factor ecológico significativo para la transferencia de energía a niveles tróficos más altos.

En el modelo usado por Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004), las incertidumbres en las estimaciones de la producción total integrada en promedio se deben principalmente a incertidumbres en los parámetros fotosintéticos que describen la fisiología del fitoplancton, y éstas pueden causar un error estándar de ~19%. Otras variables tales como la  $\text{Cl-}a$  superficial y el coeficiente de atenuación vertical de la luz pueden causar, cada una, errores estándar de ~2–3%. Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004) indicaron que la comparación rigurosa de las series de tiempo de producción total integrada derivadas de datos de satélites con los resultados de incubaciones con  $^{14}\text{C}$  es difícil debido a las diferentes características espacio temporales de estas mediciones. Sin embargo, es interesante comparar ambos tipos de datos. Alvarez-Borrego y Lara-Lara reportaron 16 valores puntuales de producción derivados de  $^{14}\text{C}$  para el invierno y para la Región de las Grandes Islas con un promedio de  $2.1 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , comparado con nuestro rango de  $1.45\text{--}1.73 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Estos autores no reportan valores para la estación cálida en la región de estudio. Millán-Núñez *et al.* (1993) reportaron valores de  $^{14}\text{C}$  de producción total integrada en cinco localidades de la región de estudio para un crucero en noviembre de 1987, con un promedio de  $1.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , lo cual se encuentra dentro del rango reportado por Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004) para la estación fría. Los altos valores de producción total

estimado por Millán-Núñez *et al.* (1993) indican que noviembre de 1987 fue parte de la estación fría. A pesar de las grandes diferencias en sus escalas espacial y temporal, ambos métodos proporcionan promedios muy cercanos y, dadas las incertidumbres de nuestras estimaciones derivadas de datos de satélite, las diferencias no son significativas.

Berman (1975) usó experimentos de incubación en la Región de las Grandes Islas para estimar que hasta 66% del  $^{14}\text{C}$  asimilado se encontraba en células de fitoplancton que podían pasar por filtros con poros de 3  $\mu\text{m}$ . No obstante, Valdez-Holguín y Lara-Lara (1987) encontraron que en esta región con frecuencia la contribución del microfitoplancton (células  $>20\ \mu\text{m}$ ) es mayor que la del nanofitoplancton (células  $<20\ \mu\text{m}$ ).

## LAS AGUAS CERCA DE LA COSTA

Hay muy poca información acerca de las propiedades físicas, químicas y biológicas de las aguas costeras. Gillmartin y Revelante (1978) reportaron valores de  $^{14}\text{C}$  de productividad de 1–8  $\text{mgC m}^{-3}\ \text{h}^{-1}$  para las aguas superficiales de Bahía de los Ángeles (BLA), comparados con los promedios de 4.7–8.2  $\text{mgC m}^{-3}\ \text{h}^{-1}$  derivados por Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2004) de datos de satélite para las aguas superficiales de toda la Región de las Grandes Islas (valores que fueron usados para sus estimaciones de producción integrada pero no publicados en detalle para cada profundidad). Para la primavera de 1989, Cajal-Medrano *et al.* (1992) reportaron valores de productividad primaria de  $^{14}\text{C}$  de 6–36  $\text{mgC m}^{-3}\ \text{h}^{-1}$  en las aguas superficiales de Puerto Don Juan, una pequeña laguna costera en la parte sur del Canal de Ballenas, al sureste de BLA (centrada en 28°56'40"N, 113°27'O). Estos últimos altos valores de productividad fueron asociados con altas concentraciones superficiales de  $\text{NO}_3$  (5.5–17.1  $\mu\text{M}$ ). Millán-Núñez (1988) reportó un evento de marea roja en BLA que ocurrió en agosto de 1987, con concentraciones de  $2 \times 10^6\ \text{cel L}^{-1}$  de *Gonyaulax polygramma*, y abundancias normales de otros siete géneros de dinoflagelados and ocho de diatomeas. Esta marea roja causó gran mortalidad de peces en las playas.

Gutiérrez-Galindo *et al.* (1999) estudiaron las concentraciones de Cu, Mn, Zn, Al, Cd, Ag, As y Se en los tejidos blandos de mejillones (*Modiolus capax*) recolectados en tres localidades del Golfo de California: Punta Es-

trella (cerca de San Felipe), BLA y Santa Rosalía. Se ha propuesto el uso de organismos centinelas, como los mejillones, para ser utilizados como indicadores biológicos cuantitativos de contaminación por metales pesados en los ambientes marinos. En los mejillones de BLA se encontraron concentraciones de Cu, Mn, Zn, Al y Se. El Cd, un metal tipo nutriente que, como ya se ha mencionado, se comporta muy parecido al fosfato, presentó sus más altas concentraciones en los mejillones recolectados en BLA, lo cual sería de esperarse en áreas de intensas surgencias y/o, no obstante sus concentraciones fueron menores que las encontradas en mejillones recolectados en el litoral pacífico de la Península de Baja California. Los niveles de Ag fueron consistentemente bajos, con concentraciones intermedias en los organismos recolectados en BLA. El As no mostró diferencias estadísticamente significativas entre localidades. En Santa Rosalía operó una importante mina de Cu desde principios del siglo XX, lo que explica las altas concentraciones de este metal en los mejillones allí recolectados. Punta Estrella recibe material sedimentario del Río Colorado, lo que explica las relativamente altas concentraciones de Al, Mn y Se en los organismos que crecen allí (Gutiérrez-Galindo *et al.* 1999). Por otra parte, las concentraciones de estos metales pesados en los mejillones de BLA indican que las aguas de la Región de las Grandes Islas están libres de impactos antropogénicos y de los efectos de los aportes de ríos.

### *Resumen*

Las mayores temperaturas superficiales y las mayores concentraciones superficiales de nutrientes y CO<sub>2</sub> en el Golfo de California se encuentran de manera persistente en la Región de las Grandes Islas. En esta región las corrientes de marea son muy fuertes y se da una mezcla intensa, que dan como resultado constantes surgencias. Por esta razón, la productividad primaria es alta y soporta gran cantidad de aves y mamíferos marinos. Además, esta mezcla debida a las mareas actúa como una “bomba física” que transporta continuamente CO<sub>2</sub> de aguas profundas a la superficie y la atmósfera en la región, cuyos mayores flujos ocurren durante las mareas vivas y en invierno. Los valores de productividad primaria en aguas superficiales de Bahía de los Ángeles, medidos con <sup>14</sup>C, varían entre 1 y 8 mgC

$\text{m}^{-3} \text{h}^{-1}$ , los valores medios derivados de imágenes de satélite para las aguas superficiales de toda la Región de las Grandes Islas se sitúan entre 4.7 y 8.2  $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$ . Mediante imágenes de satélite se ha mostrado que la variabilidad en la biomasa de fitoplancton en esta región no está dominada por El Niño. El agua en el Canal de Ballenas proviene de la mezcla de aguas superficiales y aguas tan profundas como el umbral. El Canal de Ballenas se caracteriza por altas concentraciones de oxígeno, temperaturas y salinidades a gran profundidad. Aquí no ocurren los mínimos profundos de oxígeno y salinidad característicos de la mitad sur del golfo. La Cuenca Tiburón presenta condiciones hidrográficas similares a las del Canal de Ballenas, pero está más comunicada con el sur del golfo. Las ondas internas que ocurren en la Región de las Grandes Islas tienen una gran correlación con la intensidad de las mareas locales. Las series de tiempo de la distribución vertical de las propiedades químicas y biológicas muestran que, en las capas subsuperficiales con profundidades de 40 a 100 m, estas ondas internas producen oscilaciones en los isogramas con intervalos máximos de ~50 m, lo que tiene un efecto significativo en la productividad del plancton.

### *Abstract*

The lowest surface temperatures and the highest surface nutrient and  $\text{CO}_2$  concentrations in the entire Gulf of California are persistently found in the Midriff Island region. Tidal currents are very strong in this region and intense mixing occurs creating a situation similar to constant upwelling. Thus, primary productivity is high and this area supports large numbers of sea birds and marine mammals. Furthermore, this tidal mixing acts as a "physical pump" that continuously carries  $\text{CO}_2$  from deep waters to the surface and the atmosphere in this region, with greatest  $\text{CO}_2$  fluxes during spring tides and winter. Primary productivity values of the surface waters of Bahía de los Ángeles, measured with  $^{14}\text{C}$ , are in the range 1–8  $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$ , and satellite-derived average values for the surface waters of the whole Midriff Island region are 4.7–8.2  $\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$ . Using satellite imagery, it has been shown that variability of phytoplankton biomass in this region is not dominated by El Niño events. The water in Ballenas Channel comes from mixing between the surface and sill

depths. The outstanding hydrographic features of Ballenas Channel are high oxygen concentrations, temperatures and salinities at great depths. The deep oxygen and salinity minima, characteristic of the southern half of the gulf, do not occur here. Tiburón Basin has hydrographic conditions similar to those of Ballenas Channel, but it has more open communication with the southern gulf. Internal waves in the Midriff Island region are highly correlated with the strength of local tides. Time series of the vertical distribution of chemical and biological properties show that, in the subsurface layers with depths 40-100 m, these internal waves produce oscillations of the isograms with maximum ranges of ~50 m, and this has a significant effect on phytoplankton productivity.

## REFERENCIAS

- Allen WE. 1938. The Templeton Crocker expedition to the Gulf of California in 1935: the phytoplankton. *Am. Micr. Soc. Trans.* 67: 328–335.
- Alvarez-Borrego S, Rivera JA, Gaxiola-Castro G, Acosta-Ruiz MJ, Schwartzlose RA. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Cienc. Mar.* 5: 21–36.
- Alvarez-Borrego S, Lara-Lara JR. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. En: JP Dauphin, BR Simoneit (eds.), *The Gulf of California and peninsular province of the Californias*. Am. Assoc. Petr. Geol., Memoir 47. pp. 555–567.
- Álvarez-Sánchez LG, Badan-Dangon A, Robles JM. 1984. Lagrangian observations of near-surface currents in Canal de Ballenas. *CalCOFI Rep.* 25: 35–42.
- Argote ML, Amador A, Lavin MF, Hunter JR. 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 100: 16103–16118.
- Badan-Dangon A, Hendershott MC, Lavín MF. 1991. Underway Doppler current profiles in the Gulf of California. *Eos Trans. AGU* 72: 217–218.
- Berman T. 1975. Size fractionation of natural aquatic populations associated with autotrophic and heterotrophic carbon uptake. *Mar. Biol.* 33: 215–220.
- Bray NA. 1988. Thermohaline circulation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 93: 4993–5020.
- Cajal-Medrano R, Millán-Núñez R, Santamaría-del-Ángel E. 1992. Photosynthetic quotients in the Gulf of California during autumn 1987 in the central region and spring 1989 in Puerto Don Juan. *Cienc. Mar.* 18: 1–16.

- Cortés-Lara MC, Alvarez-Borrego S, Giles-Guzmán AD. 1999. Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de nutrientes y fitoplancton en dos regiones del Golfo de California, en verano. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 49: 193–206.
- Delgadillo-Hinojosa F, Macías-Zamora JV, Segovia-Zavala JA, Torres-Valdés S. 2001. Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Mar. Chem.* 75: 109–122.
- Dugdale RC, Goering JJ. 1967. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.* 12: 196–206.
- Eppley RW, Peterson BJ. 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature* 282: 677–680.
- Fu LL, Holt B. 1984. Internal waves in the Gulf of California: observations from a space-borne radar. *J. Geophys. Res.* 89: 2053–2060.
- Gaxiola-Castro G, Alvarez-Borrego S, Schwartzlose RA. 1978. Sistema del bióxido de carbono en el Golfo de California. *Cienc. Mar.* 5: 25–40.
- Gaxiola-Castro G, Alvarez-Borrego S, Nájera-Martínez S, Zirino, AR. 2002. Internal waves effect on the Gulf of California phytoplankton. *Cienc. Mar.* 28: 297–309.
- Gilmartin M, Revelante N. 1978. The phytoplankton characteristics of the Barrier Island lagoons of the Gulf of California. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 7: 29–47.
- Green-Ruiz YA, Hinojosa-Corona A. 1997. Study of the spawning area of the Northern anchovy in the Gulf of California from 1990 to 1994, using satellite images of sea surface temperatures. *J. Plankton Res.* 19: 957–968.
- Gutierrez-Galindo EA, Villaescusa-Celaya JA, Arreola-Chimal A. 1999. Bioaccumulation of metals in mussels from four sites of the coastal region of Baja California. *Cienc. Mar.* 25: 557–578.
- Hidalgo-González RM, Alvarez-Borrego S, Zirino A. 1997. Mixing in the region of the Midriff Islands of the Gulf of California: Effect on surface pCO<sub>2</sub>. *Cienc. Mar.* 23: 317–327.
- Hidalgo-González RM, Alvarez-Borrego S. 2001. Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanol. Acta* 24: 19–28.
- Hidalgo-González RM, Alvarez-Borrego S. 2004. Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep-Sea Res. II* 51: 739–752.
- Lavín MF, Organista S. 1988. Surface heat flux in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 92: 2901–2906.

- Libes SM. 1992. *An introduction to Marine Biogeochemistry*. Wiley, New York, 734 pp.
- López M, García J. 2003. Moored observations in the northern Gulf of California: A strong bottom current. *J. Geophys. Res.* 108, No. C2, 3048, doi: 10.1029/2002JC001492.
- López M, Candela J, Argote ML. 2005. Origen y circulación del agua profunda en el norte del Golfo de California. *Geos* 25: 136.
- Marinone SG. 2003. A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 108, No. C10, 3325, doi: 10.1029/2002JC001720.
- Marinone SG, Lavín MF. 2003. Residual flow and mixing in the large islands regions of the central Gulf of California. En: OU Velasco Fuentes, J Sheinbaum, JL Ochoa de la Torre (eds.), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, Amsterdam. Pp. 213–236.
- Millán-Núñez R, Cajal-Medrano R, Santamaría-del-Ángel E, Millán-Núñez E. 1993. Primary productivity and chlorophyll *a* in the central part of the Gulf of California (Autumn 1987). *Cienc. Mar.* 19: 29–40.
- Millán-Núñez E. 1988. Red tide in Bahía de los Ángeles. *Cienc. Mar.* 14: 51–55.
- Millán-Núñez E, Yentsch CM. 2000. El Canal de Ballenas, Baja California, como ambiente favorable para el desarrollo de fitoplancton. *Hidrobiológica* 10: 91–100.
- Pegau WS, Boss E, Martínez A. 2002. Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophys. Res. Lett.* 29: 10.1029/2001GL014076.
- Riginos C. 2005. Cryptic vicariance in Gulf of California fishes parallels vicariant patterns found in Baja California mammals and reptiles. *Evolution* 59: 2678–2690.
- Roden GI. 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. En: TH Van Andel, GG Shor Jr (eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: a symposium*, Am. Ass. Petr. Geol., Memoir 3: 30–58.
- Roden GI, Groves GW. 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.* 18: 10–35.
- Round FE. 1967. The phytoplankton of the Gulf of California. Part I. Its composition, distribution and contribution to the sediments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1: 76–97.
- Robinson MK. 1973. *Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperatures in the Gulf of California, Mexico*. San Diego Soc. Nat. Hist., Memoir 5, San Diego, 97 pp.
- Santamaría-del-Ángel E, Alvarez-Borrego S, Muller-Karger FE. 1994. The 1982–1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.* 99: 7423–7431.

- Shepard FP. 1950. Submarine topography of the Gulf of California, Part 3 of the 1940 EW Scripps cruise to the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Memoir* 43, 32 pp.
- Simpson JH, Souza AJ, Lavín MF. 1994. Tidal mixing in the Gulf of California. En: KJ Beven, PC Chatwin, JH Millbank (eds.), *Mixing and Transport in the Environment*, John Wiley & Sons Ltd, London. Pp. 169–182.
- Sverdrup HU. 1941. The Gulf of California: preliminary discussion on the cruise of the E.W. Scripps in February and March 1939. *6<sup>th</sup> Pacific Sci. Cong. Proc.* (3): 161–166.
- Tershy BR, Breese D, Alvarez-Borrego S. 1991. Increase in cetacean and seabird numbers in the Canal de Ballenas during an El Niño-Southern Oscillation event. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 69: 299–302.
- Torres-Orozco E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría en Ciencias, CICESE, Ensenada, 79 pp.
- Valdez-Holguín JE, Lara-Lara JR. 1987. Primary productivity in the Gulf of California: Effects of El Niño 1982-1983 event. *Cienc. Mar.* 13: 34–50.
- Velarde E, Ezcurra E. 2000. Breeding dynamics of Heermann's Gulls. En: TJ Case, ML Cody, E Ezcurra (eds.), *Island Biogeography in the Sea of Cortez*, Univ. Oxford Press. Pp. 313–325.
- Zirino A, Hernández-Ayón JM, Fuhrmann RA, Alvarez-Borrego S, Gaxiola-Castro G, Lara-Lara JR, Bernstein RL. 1997. Estimate of surface pCO<sub>2</sub> in the Gulf of California from underway pH measurements and satellite imagery. *Cienc. Mar.* 23: 1–22.

