

## Nutrient and phytoplankton dynamics in a coastal lagoon strongly affected by coastal upwelling

## Dinámica de nutrientes y fitoplancton en una laguna costera fuertemente afectada por surgencias costeras

Saúl Álvarez-Borrego

Departamento de Ecología  
 Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)  
 Carretera Tijuana-Ensenada Km 103  
 Ensenada, CP 22860, Baja California, México  
 E-mail: [alvarezb@cicese.mx](mailto:alvarezb@cicese.mx)

*Recibido en septiembre de 2002; aceptado en agosto de 2003***Abstract**

San Quintín Bay is a coastal lagoon influenced by the California Current System (CCS) coastal upwelling. Upwelling brings nutrient-rich waters near the bay mouth and tidal currents propagate those waters throughout the bay. Upwelling intensification and relaxation events occur with a period of ~2 weeks, possibly due to the variability of circulation of the CCS. Off San Quintín, the CCS has an offshore component of the flux, causing upwelling intensification events as strong as off Point Conception (34.5°N), with high phytoplankton productivity. At the lagoon's mouth, upwelling is the main cause of variability for all physico-chemical properties except temperature. Semi-diurnal tides are the main cause of variability for temperature. Nutrient remineralization at the sediments and turbulence induced by tidal currents and wind waves increase nutrient concentrations in the lagoon. At the heads of the bay, phytoplankton abundance was ten-fold lower, productivity and chlorophyll concentrations were three-fold lower, chlorophyll content per cell was three-fold higher, and turbidity was higher than at the mouth. The few available data suggest the hypothesis that the effect of ENSO events on phytoplankton biomass depends on the interdecadal regime shifts in the northeastern Pacific. At the lagoon's mouth and adjacent ocean, summer salinities as low as 32.4 suggest the arrival of water parcels that originate in the north, possibly the Columbia River estuarine plume.

*Key words:* coastal lagoon, phytoplankton, nutrients, coastal upwelling, interannual variation.

**Resumen**

Bahía San Quintín es una laguna costera influenciada por surgencias costeras del Sistema de la Corriente de California (SCC). Las surgencias acarrear aguas ricas en nutrientes cerca de la boca de la bahía y las corrientes de marea las propagan a través de toda la bahía. Existen eventos de intensificación y relajamiento de surgencias con un periodo de ~2 semanas, posiblemente debidos a la variabilidad de la circulación del SCC. El SCC tiene un componente de flujo hacia mar adentro frente a San Quintín. Esto causa eventos de intensificación de surgencia tan fuertes como los que se dan frente a Point Conception (34.5°N), con alta productividad fitoplanctónica. En la boca de la laguna las surgencias son la causa principal de variabilidad de todas las propiedades físicas y químicas, con excepción de la temperatura que es afectada principalmente por las mareas semidiurnas. La remineralización de los nutrientes en los sedimentos, y la turbulencia inducida por las corrientes de marea y el oleaje incrementan las concentraciones de nutrientes en la laguna. En los extremos internos de la bahía hay hasta diez veces menos abundancia de fitoplancton, tres veces menos productividad y concentración de clorofila, tres veces más alto contenido de clorofila por célula, y mayor turbidez que en la boca de la bahía. Los pocos datos disponibles sugieren la hipótesis de que el efecto de los eventos de El Niño en la biomasa del fitoplancton depende de los cambios interdecadales de régimen climático en el Pacífico nororiental. En la boca de la laguna y el océano adyacente, salinidades de verano tan bajas como 32.4 sugieren el arribo de parcelas de agua originadas en el norte, posiblemente de la lengüeta estuarina del Río Columbia.

*Palabras clave:* laguna costera, fitoplancton, nutrientes, surgencia costera, variación interanual.

**Introduction**

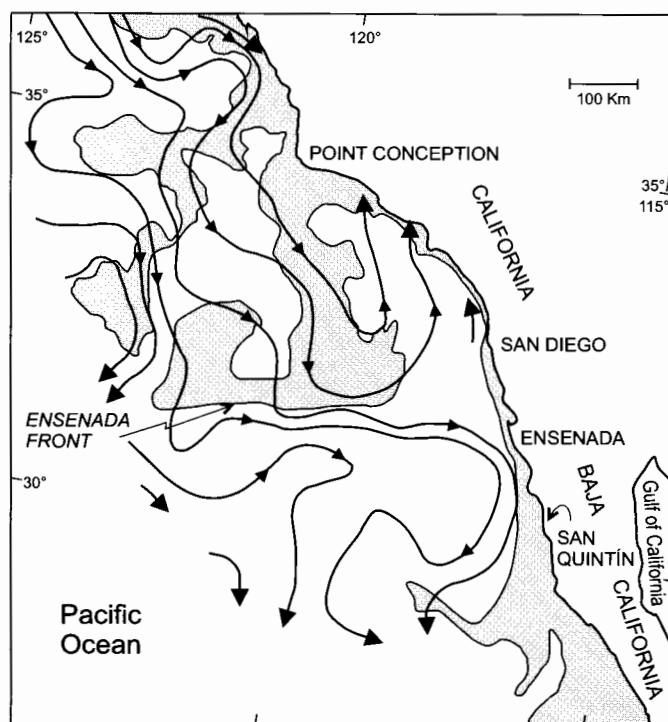
San Quintín Bay is a coastal lagoon where salinity increases from the mouth to the inner reaches due to the high evaporation rate and almost nil freshwater input from rainfall and surface runoff (Chávez-de-Nishikawa and Álvarez-Borrego, 1974; Álvarez-Borrego *et al.*, 1975). According to

**Introducción**

Bahía San Quintín es una laguna costera donde la salinidad se incrementa de la boca hacia su interior debido a la elevada tasa de evaporación y a la ausencia casi total de precipitación pluvial y escurrimientos superficiales (Chávez-de-Nishikawa y Álvarez-Borrego, 1974; Álvarez-Borrego *et al.*, 1975). Según

Kjerfve's (1994) classification, it is a restricted lagoon, with a permanent single connection to the ocean and tides that co-oscillate with tides in the coastal ocean with little reduction of amplitude inside the lagoon. It is influenced by coastal upwelling of the California Current System (CCS), mainly in late spring and summer. The uniqueness of the oceanic area adjacent to San Quintín Bay is that the effect of the oceanic circulation is added to that of the winds to produce very intense upwelling. Off San Quintín, circulation not only has a component parallel to the coast and towards the equator, but it also has a strong offshore component to compensate partially for the onshore flux off Ensenada (fig. 1).

Using ocean color satellite imagery, Peláez and McGowan (1986) defined a sharp zonal boundary, the Ensenada Front, about 160–500 km offshore. It is a persistent characteristic of the region, with colder and higher chlorophyll water towards



**Figure 1.** Simplified information on ocean color obtained by the coastal zone color scanner. Shaded areas have high chlorophyll concentrations and clear areas have low chlorophyll concentrations. The dynamic topography is overdrawn with continuous lines; arrows indicate the direction of geostrophic currents (adapted from Peláez and McGowan, 1986). Notice the Ensenada Front with onshore geostrophic flux, and notice that off San Quintín Bay there is an offshore component of geostrophic flux. There is a high chlorophyll plume off San Quintín Bay, to the south and west.

**Figura 1.** Información simplificada del color del océano obtenida de imágenes de satélite a color. Las áreas sombreadas presentan concentraciones altas de clorofila y las áreas claras tienen concentraciones bajas. La topografía dinámica aparece sobredibujada con líneas continuas; las flechas indican la dirección de las corrientes geostroóficas (adaptadas de Peláez y McGowan, 1986). Se aprecia el Frente Ensenada con un flujo geostroófico hacia la costa, así como un flujo geostroófico hacia mar adentro. Hay una lengüeta de clorofila alta frente a Bahía San Quintín, al sur y oeste.

la clasificación de Kjerfve (1994), se trata de una laguna restringida, con una sola conexión permanente con el mar y con mareas que cooscilan con las mareas del océano costero pero reduciendo ligeramente su amplitud dentro de la laguna; está influenciada por las surgencias costeras del Sistema de la Corriente de California (SCC), principalmente hacia el final de la primavera y durante el verano. La singularidad del área oceánica adyacente a Bahía San Quintín consiste en que el efecto de la circulación oceánica se suma al de los vientos para producir un intenso fenómeno de surgencias. Frente a San Quintín la circulación oceánica no sólo tiene un componente paralelo a la costa y hacia el ecuador, sino que también presenta un fuerte componente mar adentro para compensar parcialmente el flujo del océano hacia la costa que se da frente a Ensenada (fig. 1).

Peláez y McGowan (1986), usando imágenes de satélite a color, definieron un claro frente local, el Frente Ensenada, de alrededor de 160 a 500 km de la costa, que es una característica persistente de la región con aguas más frías y con mayores niveles de clorofila hacia el norte del frente. Éste coincide claramente con un intenso flujo hacia la costa del SCC. Al toparse con la línea de costa, este flujo se divide en dos: un flujo que se dirige al norte, que constituye la intrusión oligotrófica de la Southern California Bight, y otro con dirección al sur. Este último flujo da un giro hacia mar abierto frente a San Quintín, de la misma manera que lo hace el flujo que se aleja de la costa frente a Point Conception, en California. Como se describe más adelante, estos flujos hacia mar abierto producen intensas surgencias costeras. Las surgencias afectan incluso los extremos internos de Bahía San Quintín debido a las corrientes de marea que renuevan sus aguas (Lara-Lara *et al.*, 1980; Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982). Las surgencias ocurren en una secuencia de eventos que se intensifican y relajan con un periodo de ~2 semanas y los eventos más intensos se presentan en julio. Durante un evento de intensificación de surgencia la laguna experimenta un mayor intercambio de agua con el océano y esto puede ser detectado incluso en sus brazos interiores (Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982).

Los primeros estudios sobre Bahía San Quintín se realizaron en 1960/1961, principalmente en relación con su sedimentología y biota bentónica (Barnard, 1962; Dawson, 1962; Gorsline y Stewart, 1962). Los investigadores de la Universidad Autónoma de Baja California empezaron a trabajar en la laguna en 1973, y su principal motivación era el desarrollo de la acuicultura, lo que dio origen a estudios sobre nutrientes y fitoplancton (Chávez-de-Nishikawa y Álvarez-Borrego, 1974; Álvarez-Borrego y López-Álvarez, 1975; Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975). En Bahía San Quintín los macronutrientes no limitan la fotosíntesis del fitoplancton (Álvarez-Borrego y Chec-Barragán, 1976; Silva-Cota y Álvarez-Borrego, 1988). Además de las surgencias y las corrientes de marea, en esta laguna costera existen otros mecanismos naturales de fertilización, tales como la remineralización de nutrientes en la columna de agua y en los sedimentos debida a bacterias, que es resuspendida hacia la

the north of the front. It clearly coincides with an intense onshore flux of the CCS. When meeting the coast, this flux divides into two: a northward flux, which is the oligotrophic intrusion of the Southern California Bight, and a southward flux; the latter flux turns offshore off San Quintín in a similar manner as the offshore flux off Point Conception. These offshore fluxes produce similarly intense coastal upwelling, as is described later. Upwelling affects even the internal extremes of San Quintín Bay because of the tidal currents that renew its waters (Lara-Lara *et al.*, 1980; Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego, 1982). Upwelling occurs in a sequence of intensification and relaxation events with a ~2-week period, the most intense events occurring in July. During an upwelling intensification event the lagoon has greater water exchange with the open ocean and this can be detected even in the inner arms (Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego, 1982).

The first studies of San Quintín Bay were carried out in 1960/1961, mainly on its sedimentology and benthic biota (Barnard, 1962; Dawson, 1962; Gorsline and Stewart, 1962). Researchers from the University of Baja California began working at the lagoon in 1973, and their main motivation was the development of aquaculture, which led to nutrient and phytoplankton studies (Chávez-de-Nishikawa and Álvarez-Borrego, 1974; Álvarez-Borrego and López-Álvarez, 1975; Lara-Lara and Álvarez-Borrego, 1975). Macronutrients are not limiting to phytoplankton photosynthesis in San Quintín Bay (Álvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976; Silva-Cota and Álvarez-Borrego, 1988). Besides upwelling and tidal currents, other natural fertilization mechanisms occur in these coastal lagoons, such as nutrient remineralization in the water column, and in the sediments due to bacteria, with input to the water column by turbulence (Álvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976; Camacho-Ibar and Álvarez-Borrego, 1988).

The objective of this contribution is to review existing data to describe nutrient and phytoplankton dynamics in San Quintín Bay over a wider time scale spectrum than those of the individual contributions, from hours to decades, and within the spatial scale of events in the CCS. Phenomena that were not well-known earlier, such as interannual variations due to El Niño and La Niña events (Torres-Moye and Álvarez-Borrego, 1987; Silva-Cota and Álvarez-Borrego, 1988) and interdecadal variations produced by "cold and warm regimes" in the North Pacific (Chávez *et al.*, 2003), are taken into account.

### Physical description

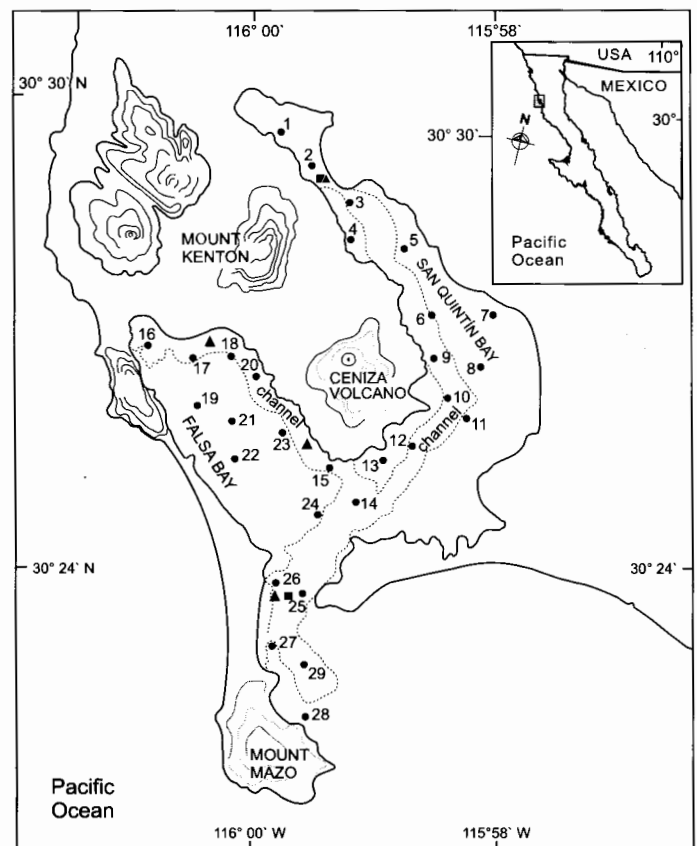
San Quintín Bay is a Y-shaped lagoon of approximately 42 km<sup>2</sup>. The western arm is named Falsa Bay and the eastern arm is named San Quintín Bay (fig. 2). The organic carbon and nitrogen contents in sediments increase broadly towards the bay heads, paralleling the increase in clay content. The lagoon is quite shallow, about 85% of the eastern arm lying in depths of 1.8 m or less at mean high water. Depths greater than this occur in channels that are strongly differentiated from the shallow bay flats by sharp depth changes. In general, the channels

column de agua por la turbulencia (Álvarez-Borrego y Chee-Barragán, 1976; Camacho-Ibar y Álvarez-Borrego, 1988).

En este trabajo se llevó a cabo una revisión de los datos existentes sobre la dinámica de nutrientes y fitoplancton en Bahía San Quintín, con un espectro temporal más amplio que el de las contribuciones individuales, de horas a décadas, y a la escala espacial de los eventos del SCC. Se tomaron en consideración fenómenos antes poco conocidos, como las variaciones interanuales debidas a los eventos de El Niño y La Niña (Torres-Moye y Álvarez-Borrego, 1987; Silva-Cota y Álvarez-Borrego 1988), y variaciones interdecadales producidas por los "regímenes fríos y calientes" del Pacífico Norte (Chávez *et al.*, 2003).

### Descripción física

Bahía San Quintín es una laguna en forma de Y de alrededor de 42 km<sup>2</sup>. Su brazo oeste es conocido como Bahía Falsa y su brazo este como Bahía San Quintín (fig. 2). El



**Figure 2.** San Quintín Bay. Sampling localities of (●) Chávez-de-Nishikawa and Álvarez-Borrego (1974), (▲) Millán-Núñez *et al.* (1982), and (■) Silva-Cota and Álvarez-Borrego (1988). The discontinuous line shows the channels.

**Figura 2.** Bahía San Quintín. Estaciones de muestreo de (●) Chávez-de-Nishikawa y Álvarez-Borrego (1974), (▲) Millán-Núñez *et al.* (1982), y (■) Silva-Cota y Álvarez-Borrego (1988). La línea punteada muestra los canales.

have depths of 5–7 m, with one record of ~10 m. Except during the few years of heavy rainfall, there are no flowing streams with surface freshwater input to the bay (Barnard, 1962). The mean annual precipitation is 15 cm and the mean annual evaporation is 140 cm; rainfall is restricted to the period from November to March (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). As evidenced by saline intrusion, over-extraction of groundwater for agriculture in recent years has induced a reversal of the normal groundwater flow, making coastal aquifers unlikely sources of nutrients to the lagoon (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2001). Domestic waste is not a significant source of nutrients to the lagoon (Camacho-Ibar *et al.*, 2003).

Tides are the main cause of water circulation and explain up to 97% of measured currents. Bottom friction and wind forcing affect the residual circulation, causing transverse currents and eddies that affect water exchange with the open ocean. Tides are predominantly semidiurnal, with ranges of 2.5 and 1.0 m for spring and neap tides, respectively, throughout the lagoon (Martori-Oxamendi, 1989). Tidal currents of up to 100 cm s<sup>-1</sup> occur in the region near the mouth, decreasing toward the inner reaches to maximum velocities of ~60 cm s<sup>-1</sup> due to volume continuity (Ocampo-Torres, 1980). Vertical distribution of water properties is homogeneous because of turbulence caused by tidal currents (Martori-Oxamendi, 1989).

### Spatial and seasonal variability

Horizontal gradients and seasonal variations of the lagoon's water properties were first defined from monthly samplings in 1973 and 1974 (Chávez-de-Nishikawa and Álvarez-Borrego, 1974; Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Álvarez-Borrego and López-Álvarez, 1975; Lara-Lara and Álvarez-Borrego, 1975; Álvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976). Results based on single instantaneous samplings carried out during 1973/1974 revealed that the lagoon water properties had patchy distributions due, among other things, to the irregular bathymetry, and that there was a great local temporal variation due to tidal currents. Later experiments in which simultaneous time series were generated by sampling every 2 h during several days, confirmed that some properties have clear horizontal gradients. For example, chlorophyll and phytoplankton abundance were in general higher for the mouth than for the inner reaches of the lagoon during the summer of 1979, a non-El Niño year (Millán-Núñez *et al.*, 1982). With relation to the 1973/1974 sampling, only January and July data were used to show the main seasonal and spatial variations, from three regions: the lagoon's mouth and the two internal extremes, Falsa Bay and San Quintín Bay.

In summer, water temperature increased from the mouth to the inner reaches, with highest temperatures in the eastern arm. During the winter of 1973, this gradient reversed, with temperature decreasing from the mouth to the internal extremes because of heat exchange with a cold atmosphere (fig. 3a). Salinity showed a similar pattern in summer and winter of 1973, increasing from the mouth to the inner reaches, with

contenido de carbono y nitrógeno orgánico en sus sedimentos se incrementa ampliamente hacia las cabeceras, en paralelo con el incremento en su contenido de arcillas. La laguna es bastante somera, con profundidades de 1.8 m o menos, en marea alta media, en alrededor de un 85% del brazo este. En los canales, que se encuentran claramente diferenciados de los bajos de la bahía por sus cambios pronunciados de profundidad, se pueden presentar profundidades mayores, generalmente de 5 a 7 m, con un máximo de ~10 m. Salvo en años con lluvias excepcionalmente intensas, no existen aportes de agua dulce por escurrimientos superficiales a la bahía (Barnard, 1962). La precipitación media anual es de 15 cm, la evaporación media anual de 140 cm y el periodo de lluvias es de noviembre a marzo (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). La sobreexplotación de los mantos freáticos para la agricultura, evidenciada por la intrusión salina, ha provocado la inversión del flujo normal de las aguas subterráneas, eliminando a los mantos acuíferos costeros como fuentes de nutrientes para la laguna (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2001). Los efluentes domésticos no constituyen una fuente significativa de nutrientes para la laguna (Camacho-Ibar *et al.*, 2003).

Las mareas son el motor principal de la circulación del agua en la laguna y pueden explicar hasta un 97% de las corrientes medidas. La fricción del fondo y el forzamiento por viento influyen en la circulación residual causando corrientes y remolinos o giros transversales, y afectando el intercambio de agua con el océano. Las mareas son predominantemente semidiurnas, con rangos de 2.5 y 1.0 m en mareas vivas y muertas, respectivamente, a lo largo de toda la laguna (Martori-Oxamendi, 1989). En la zona cercana a la boca, las corrientes de marea llegan a alcanzar velocidades de hasta 100 cm s<sup>-1</sup>, disminuyendo hacia el interior de la laguna hasta ~60 cm s<sup>-1</sup> debido a la continuidad del volumen (Ocampo-Torres, 1980). La distribución vertical de las propiedades del agua es homogénea a causa de la turbulencia generada por las corrientes de marea (Martori-Oxamendi, 1989).

### Variabilidad espacial y estacional

Los gradientes horizontales y las variaciones estacionales de las propiedades de la laguna se definieron por primera vez a través de muestreos mensuales durante 1973/1974 (Chávez-de-Nishikawa y Álvarez-Borrego, 1974; Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Álvarez-Borrego y López-Álvarez, 1975; Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975; Álvarez-Borrego y Chee-Barragán, 1976). Los resultados, basados en muestreos instantáneos sencillos realizados durante 1973/1974, evidenciaron que las propiedades de la laguna tenían distribuciones salteadas debido, entre otras razones a su batimetría irregular, y a que también existía una gran variación temporal local debida a las corrientes de marea. En experimentos posteriores en los que se generaron series de tiempo simultáneas con muestreos cada 2 h durante varios días, se confirmó que algunas propiedades mostraban gradientes horizontales bien definidos. Por ejemplo, la clorofila y la abundancia de fitoplancton fueron generalmente

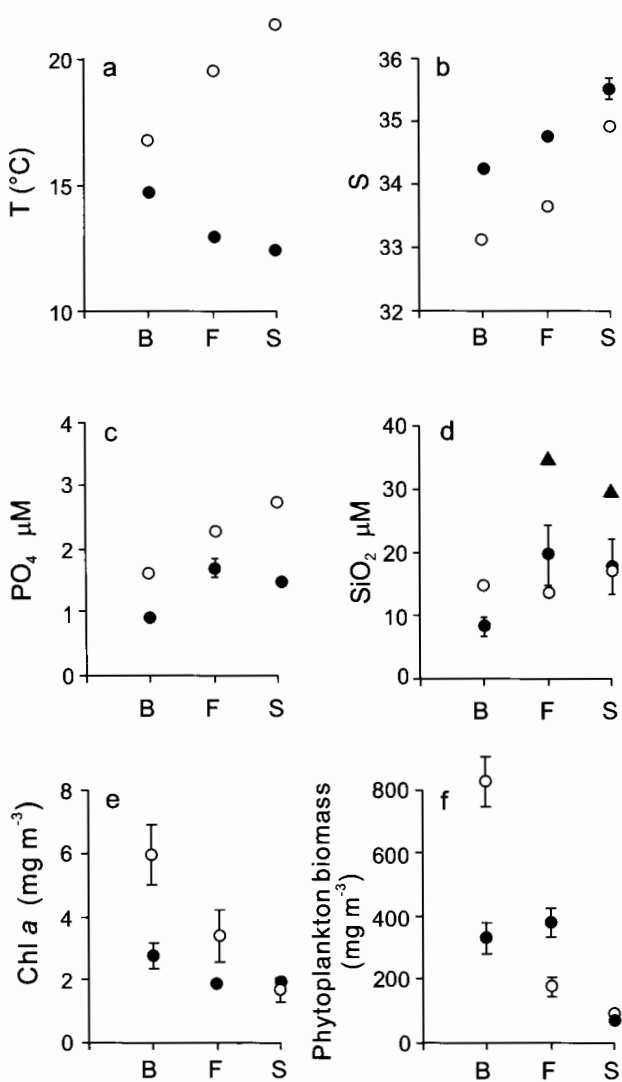
highest values in the eastern arm (up to >35) (fig. 3b). This is an indication of a longer water residence time in San Quintín Bay than in Falsa Bay, both in summer and winter. The greater horizontal salinity gradient for July than for January was due to a higher evaporation rate during summer. In the eastern arm, salinities >37 have been recorded for June, July, August and November (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Camacho-Ibar *et al.*, 2003), possibly due to sampling during upwelling relaxation periods and neap tides that produce high water residence time in the inner reaches of the lagoon.

Summer salinity values were lower than those for winter throughout the lagoon in 1973/1974 (fig. 3b), because of the seasonal variation in the CCS circulation and the possible effect of the Columbia River estuarine plume, as will be discussed later. The arrival of low salinity water parcels from the north is perceived through low summer salinity values off San Quintín Bay and at its mouth, with flood flow. Typical salinity values for the CCS surface waters off northwestern Baja

mayores en la boca que en el interior de la laguna durante el verano de 1979, un año en el que no se manifestó el fenómeno de El Niño (Millán-Núñez *et al.*, 1982). En el muestreo de 1973/1974, con el propósito de mostrar las principales variaciones estacionales y espaciales sólo se usaron datos de enero y julio de tres regiones de la laguna: la boca y las dos cabeceras interiores, Bahía Falsa y Bahía San Quintín.

En el verano la temperatura se incrementó de la boca hacia el interior de la laguna, mostrando temperaturas más elevadas en el brazo este. Durante el invierno de 1973 este gradiente se invirtió, con temperaturas que disminuían de la boca hacia los extremos internos, debido al intercambio de calor con una atmósfera más bien fría (fig. 3a). La salinidad mostró un patrón similar durante el verano y el invierno de 1973, incrementándose de la boca hacia la parte interna de la laguna, con valores superiores en el brazo este (hasta >35) (fig. 3b), lo que indica un mayor tiempo de residencia del agua en Bahía San Quintín que en Bahía Falsa tanto en el verano como en el invierno. El gradiente horizontal de salinidad, mayor en julio que en enero, fue debido a la mayor tasa de evaporación durante el verano. En el brazo este se han registrado salinidades >37 en junio, julio, agosto y noviembre (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Camacho-Ibar *et al.*, 2003), posiblemente debido a muestreos realizados durante periodos de relajamiento de las surgencias y mareas muertas, lo que genera un mayor tiempo de residencia en las partes internas de la laguna.

En 1973/1974, en toda la laguna los valores de salinidad durante el verano fueron menores que los invernales (fig. 3b).



**Figure 3.** Comparison of water properties for January (●) and July (○), at the bay mouth (B), and at the internal extremes of Falsa Bay (F) and San Quintín Bay (S). **(a, b)** Temperature (°C) and salinity (data for January 1973 are from Chávez-de-Nishikawa and Álvarez-Borrego, 1974, and those for July 1973 are from Álvarez-Borrego *et al.*, 1975). **(c, d)** Phosphate and silicate concentrations (data for July 1973 and January 1974 are from Álvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976); ▲ for SiO<sub>2</sub> represent maximum winter values for the internal extremes. **(e)** Chlorophyll a concentration (Chl) (July 1973 and January 1974 data are from Lara-Lara and Álvarez-Borrego, 1975). **(f)** Phytoplankton biomass calculated from cell size (milligrams of organic matter per cubic meter; July 1973 and January 1974 data are from Álvarez-Borrego and López-Álvarez, 1975). The bars represent the standard error (s/n<sup>0.5</sup>), and where not shown it is because the symbol is larger.

**Figura 3.** Comparación de las propiedades del agua en enero (●) y julio (○), en la boca de la bahía (B) y en los extremos internos de Bahía Falsa (F) y Bahía San Quintín (S). **(a, b)** Temperatura (°C) y salinidad (los datos de enero de 1973 son de Chávez-de-Nishikawa y Álvarez-Borrego, 1974, y los de julio de 1973 son de Álvarez-Borrego *et al.*, 1975). **(c, d)** Concentraciones de fosfato y silicato (los datos de julio de 1973 y enero de 1974 son de Álvarez-Borrego y Chee-Barragán, 1976); ▲ para SiO<sub>2</sub> representan los valores máximos de invierno para los extremos internos. **(e)** Concentración de clorofila a (Chl) (los datos de julio de 1973 y enero de 1974 son de Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975). **(f)** Biomasa fitoplanctónica calculada a partir del tamaño de las células (miligramos de materia orgánica por metro cúbico; los datos de julio de 1973 y enero de 1974 son de Álvarez-Borrego y López-Álvarez, 1975). Las barras representan el error estándar (s/n<sup>0.5</sup>); cuando no se muestran es porque el símbolo es mayor.

California are 33.4–33.6 throughout the year (e.g., CalCOFI Data Report, 1984), but eddies may carry parcels of water with lower salinity. At the mouth of San Quintín Bay, salinity was 33.00 in July 1973 during high tide and, according to the temperature values, within an upwelling relaxation period. The origin of high oceanic winter salinities is to the south of this area. Surface salinities of the CCS increase towards the south to >34 off the tip of the Baja California peninsula, and during winter, inshore surface water flows northwards (Reid, 1960; Hickey, 1979). However, salinity values >34 may be found any time of the year at the lagoon's mouth and adjacent oceanic area with ebb flow, and during spring and summer with upwelling intensification events even with flood flow (e.g., data in Lara-Lara *et al.*, 1980; Camacho-Ibar *et al.*, 2003).

In general, reactive phosphate ( $\text{PO}_4$ ) and dissolved silicon ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , symbolized here as  $\text{SiO}_2$ ) concentrations increased from the lagoon's mouth to the internal extremes in 1973/1974 (Álvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976) (fig. 3c, d). In summer,  $\text{PO}_4$  values clearly increased inward, with highest values in the eastern arm, whereas in winter the gradient was weaker and there was no significant difference between Falsa Bay and San Quintín Bay (fig. 3c). A survey carried on in 1995/1996 by Camacho-Ibar *et al.* (2003) confirms that this general tendency for the  $\text{PO}_4$  spatial change remains essentially the same. Summer  $\text{SiO}_2$  values were similar throughout the bay, about 15  $\mu\text{M}$ , while in winter the  $\text{SiO}_2$  values were both low and very high (up to >30  $\mu\text{M}$ ) in the inner reaches, but the means for the three regions were not significantly different (fig. 3d).

Barnard (1962) hypothesized an input of underground freshwater to explain the high  $\text{SiO}_2$  values from the eastern arm. However, high  $\text{SiO}_2$  values in Falsa Bay would have to be explained in terms of water exchange between the two arms of the bay, which would be complicated. Besides, as Aguirre-Muñoz *et al.* (2001) indicated, over-extraction of groundwater for agriculture in recent years has induced a reversal of the normal groundwater flow. New winter  $\text{SiO}_2$  data are needed to test Barnard's (1962) hypothesis. Maximum  $\text{SiO}_2$  values for the eastern arm for August 1995 and 1996 were ~20  $\mu\text{M}$ , associated with salinities >35 (Ibarra-Obando *et al.*, 2001), and they are similar to the 1973 data. Without the influence of the aquifer, no high  $\text{SiO}_2$  values (>30  $\mu\text{M}$ ) should be detected for the eastern arm if Barnard (1962) is correct. In January, the effect of coastal upwelling, if any, is very low. An alternative explanation for the high  $\text{SiO}_2$  values at the internal extremes (fig. 3d) is the dissolution of exoskeletons of organisms such as diatoms and silicoflagellates deposited in the sediments. This dissolution is much slower than organic matter degradation (Libes, 1992). The intense production of diatoms during spring and summer upwelling events, their introduction to the lagoon's interiors by tidal currents, and their sedimentation was not immediately followed by clear large increments of  $\text{SiO}_2$  values in the water column.

Throughout the lagoon, higher  $\text{PO}_4$  values for July 1973 than for January 1974 (fig. 3c) were due to summer upwelling

Como se discutirá ampliamente más adelante, esto se debió a la variación estacional de la circulación del SCC y posiblemente al efecto de la lengüeta estuarina del Río Columbia. La llegada de parcelas de agua de baja salinidad del norte se percibe por los bajos valores de salinidad registrados frente a Bahía San Quintín en verano y en su boca durante el flujo de marea. Los valores típicos de salinidad de las aguas superficiales del SCC a lo largo del año frente a la costa noroccidental de Baja California, son de 33.4 a 33.6 (e.g., CalCOFI Data Report, 1984), pero algunos remolinos pueden transportar parcelas de agua de baja salinidad. En la boca de Bahía San Quintín, en julio de 1973 con marea alta, y de acuerdo con los valores de temperatura durante un periodo de relajamiento de las surgencias, la salinidad fue de 33.0. El origen de las elevadas salinidades oceánicas invernales se encuentra al sur de esta área. Las salinidades superficiales del SCC se incrementan hacia el sur, por encima de 34 frente a la punta de la península de Baja California, y durante el invierno el agua superficial cercana a la costa fluye hacia el norte (Reid, 1960; Hickey, 1979). Sin embargo, en la boca de la laguna y en el área oceánica adyacente, durante el reflujó de la marea, se pueden encontrar valores de salinidad >34 en cualquier época del año, así como éstos también se pueden presentar aun durante el flujo de marea durante primavera y verano cuando las surgencias se intensifican (e.g., datos en Lara-Lara *et al.*, 1980; Camacho-Ibar *et al.*, 2003).

En general, en 1973/1974 las concentraciones de fosfato reactivo ( $\text{PO}_4$ ) y sílice disuelto ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , simbolizado aquí como  $\text{SiO}_2$ ) se incrementaron de la boca de la laguna hacia sus extremos interiores (Álvarez-Borrego y Chee-Barragán, 1976) (fig. 3c, d). Durante el verano los valores de  $\text{PO}_4$  se incrementaron más claramente hacia adentro, presentando los valores más altos en el brazo este, mientras que en el invierno el gradiente fue menor y no se encontraron diferencias significativas entre Bahía Falsa y Bahía San Quintín (fig. 3c). En un muestreo realizado en 1995/1996, Camacho-Ibar *et al.* (2003) confirmaron que esta tendencia general de la variación espacial del  $\text{PO}_4$  sigue siendo esencialmente la misma. Los valores de  $\text{SiO}_2$  durante el verano fueron de alrededor de 15  $\mu\text{M}$  para toda la bahía, mientras que durante el invierno se presentaron tanto valores bajos como valores muy altos de  $\text{SiO}_2$  (hasta >30  $\mu\text{M}$ ) en el interior de la bahía, aunque los promedios de las tres regiones no presentaron diferencias significativas (fig. 3d).

Barnard (1962) propuso la entrada de agua dulce subterránea al brazo este de la bahía para explicar sus altos valores de  $\text{SiO}_2$ ; sin embargo, los valores elevados de  $\text{SiO}_2$  en Bahía Falsa tendrían que ser explicados en términos del intercambio de agua entre los dos brazos de la bahía, lo cual sería muy complicado. Además, como lo mencionan Aguirre-Muñoz *et al.* (2001), la sobreexplotación de los mantos freáticos para la agricultura en años recientes ha inducido la inversión del flujo normal de las aguas subterráneas. Se requieren más datos de  $\text{SiO}_2$  durante el invierno para probar la hipótesis de Barnard (1962). Los valores máximos de  $\text{SiO}_2$  en el brazo este en agosto de 1995 y 1996 fueron ~20  $\mu\text{M}$ , asociados con



in the adjacent ocean, although as mentioned above, the July sampling was done within a relaxation period. Possibly, there was a larger import of organic matter into the lagoon during summer than during winter. Open Pacific Ocean deep waters have maximum  $\text{PO}_4$  concentrations of  $3.3 \mu\text{M}$  (Libes, 1992), but the highest  $\text{PO}_4$  values reported for the eastern arm of San Quintín Bay are  $>4 \mu\text{M}$  for November (Álvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976) and August (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). The origin of these high values cannot be the adjacent ocean. Álvarez-Borrego and Chee-Barragán (1976) suggested that the high  $\text{PO}_4$  and  $\text{SiO}_2$  values for the internal extremes are a result of the organic matter enrichment of the sediments and its degradation. Tidal currents transport particulate organic matter, mainly phytoplankton, from the adjacent oceanic area into the lagoon's arms, which is deposited on the surface sediments where it is decomposed; however, both pelagic and benthic nutrient regeneration may occur (Knoppers, 1994). The contribution to regeneration by the dissolved organic fraction has been noted to be of significant importance in shallow water sediments (Teague *et al.*, 1988). Álvarez-Borrego and Chee-Barragán (1976) indicated that high  $\text{PO}_4$  values in the internal extremes of San Quintín Bay suggest that more organic matter is being consumed than photosynthesized in the lagoon. Smith and Hollibaugh (1997) reported a similar situation for Tomales Bay in California. Lara-Lara *et al.* (1980) reported large  $\text{PO}_4$  spikes at the mouth of San Quintín Bay caused by intensified winds stirring the bay-bottom sediments into the water column. This is an indication that the sediment released during wind mixing events is a source of inorganic phosphate for the whole lagoon. Besides the direct effect of winds on mixing, a most effective mechanism is wind waves. Using a steady-state three-box model and data from three 2-day samplings within the main channels and with neap tides (August 1995, February 1996 and August 1996), Camacho-Ibar *et al.* (2003) concluded that the lagoon has a net heterotrophic condition and that it is a net exporter of inorganic phosphate, but they mentioned that a high frequency (<2-week) time course study of nutrients is required to evaluate the potential short-term variations in nonconservative nutrient fluxes of this lagoon, affected by the biweekly upwelling cycles during spring and summer.

The lagoon is a net exporter of ammonia (Farfán and Álvarez-Borrego, 1983) and phosphate (Camacho-Ibar *et al.*, 2003) due to the intense remineralization in the system, but it imports nitrite, nitrate, and particulate organic carbon and nitrogen (mostly in the form of diatoms) during upwelling events (Farfán and Álvarez-Borrego, 1983). Nitrogen fixation minus denitrification indicates that San Quintín Bay is a net sink of nitrogen (Camacho-Ibar *et al.*, 2003), but this was the result for only 2-day sampling periods. Usui *et al.* (2001) measured nitrification and denitrification processes in a Japanese estuary using  $^{15}\text{N}$  as a tracer, and reported that the rate of these processes changed with time, sometimes one exceeding the other and vice versa. Ammonia concentration in San Quintín Bay changes irregularly both temporally and spatially, with a range of  $<1$  to  $\sim 5 \mu\text{M}$ , and exceptionally up to  $\sim 8 \mu\text{M}$ , and

salinidades  $>35$  (Ibarra-Obando *et al.*, 2001), y son similares a los datos de 1973. Si Barnard (1962) estaba en lo correcto, sin la influencia del acuífero no se deberían detectar valores elevados de  $\text{SiO}_2$  ( $>30 \mu\text{M}$ ) en el brazo este. En caso de existir, el efecto de las surgencias costeras en enero es muy reducido. Una explicación alterna para los valores elevados de  $\text{SiO}_2$  en las cabeceras (fig. 3d) podría ser la disolución de exoesqueletos de organismos tales como diatomeas y silicoflagelados en los sedimentos. Esta disolución es mucho más lenta que la degradación de la materia orgánica (Libes, 1992). La gran producción de diatomeas durante los eventos de surgencia de primavera y verano, su introducción al interior de la laguna por las corrientes de marea y su sedimentación, no se vieron seguidas de inmediato por grandes incrementos de los valores de  $\text{SiO}_2$  en la columna de agua.

A lo largo de toda la laguna se observaron valores más elevados de  $\text{PO}_4$  en julio de 1973 que en enero de 1974 (fig. 3c), que se debieron a las surgencias de verano en el océano adyacente, no obstante anteriormente se ha mencionado que el muestreo de julio se llevó a cabo durante un periodo de relajamiento. Posiblemente durante el verano se dio una mayor importación de materia orgánica hacia el interior de la laguna que en el invierno. Las aguas profundas del Océano Pacífico presentan concentraciones máximas de  $\text{PO}_4$  de  $3.3 \mu\text{M}$  (Libes, 1992); sin embargo, los valores más altos de  $\text{PO}_4$  reportados para el brazo este de Bahía San Quintín son  $>4 \mu\text{M}$  en noviembre (Álvarez-Borrego y Chee Barragán, 1976) y agosto (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). El origen de estos valores altos no puede estar en el océano adyacente. Álvarez-Borrego y Chee-Barragán (1976) sugirieron que los valores altos de  $\text{PO}_4$  y  $\text{SiO}_2$  en las cabeceras de la laguna son el resultado del enriquecimiento de materia orgánica en los sedimentos y su degradación. Las corrientes de marea transportan materia orgánica particulada, principalmente fitoplancton, del océano adyacente hacia el interior de los brazos de la laguna, la cual se deposita en los sedimentos superficiales donde se descompone; sin embargo, puede existir regeneración tanto pelágica como bentónica de nutrientes (Knoppers, 1994). Se ha notado que la contribución de la fracción orgánica disuelta a la regeneración en los sedimentos de aguas someras es significativa (Teague *et al.*, 1988). Álvarez-Borrego y Chee-Barragán (1976) indicaron que los valores altos de  $\text{PO}_4$  en las cabeceras de Bahía San Quintín sugieren que en esta laguna se consume más materia orgánica de la que se fotosintetiza. Smith y Hollibaugh (1997) indicaron una situación similar en Tomales Bay, California. Lara-Lara *et al.* (1980) reportaron grandes picos de  $\text{PO}_4$  en la boca de Bahía San Quintín debidos a la resuspensión de los sedimentos del fondo de la bahía hacia la columna de agua, causada a su vez por la intensificación del viento, lo que indica que la liberación de sedimentos durante eventos de mezcla por viento constituye una fuente de fosfato inorgánico para toda la laguna. Además del efecto directo del viento, las olas son también un mecanismo de mezcla muy efectivo. Utilizando un modelo de tres cajas en estado estacionario y datos de tres muestreos de dos días en los canales principales y durante

with no clear difference between winter and summer values (Farfán and Álvarez-Borrego, 1983; Osorno-Velázquez, 2000). Nitrite concentration ranged from 0 to 0.42  $\mu\text{M}$ , with a mean of 0.18  $\mu\text{M}$  in June and July 1979, at the mouth (Farfán and Álvarez-Borrego, 1983).

Chlorophyll values were higher at the mouth than in the internal extremes in 1973/1974, and at the mouth they were higher in July than in January, due to the effect of summer upwelling (Lara-Lara and Álvarez-Borrego, 1975) (fig. 3e). In July 1973, high chlorophyll values (up to  $>8 \text{ mg m}^{-3}$ ) in the mouth region indicate that upwelling was in a relaxation period, as also indicated by the relatively high temperature and low salinity values (fig. 3a, b). Phytoplankton populations had already grown when sampling was done. The spatial chlorophyll range was larger for July than for January, but at the internal extremes the chlorophyll means were not significantly different between summer and winter, or between the two extremes for the same season. Mean primary productivity values, estimated with the light-chlorophyll method, were also highest for the mouth and for July ( $1.7 \text{ gC m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ), with values of  $\sim 0.5 \text{ gC m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  for all other cases (not shown) (Lara-Lara and Álvarez-Borrego, 1975); however, these latter authors did not take into consideration the effect of the lagoon's water turbidity on light attenuation and their values might have been overestimated. Primary productivity values generated with the  $^{14}\text{C}$  method (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982) were lower by up to a factor of two. Barnard (1962) reported Secchi disk readings for 1960/1961 of 2–2.7 m for the mouth, 1.2–1.5 m for San Quintín Bay, and  $\sim 1$  m for Falsa Bay. Álvarez-Borrego *et al.* (1977b) reported Secchi disk readings of 2.2–4.0 m for the mouth, for spring and summer of 1975. Osorno-Velázquez (2000) reported 3–3.5 m for the eastern arm and 1–3 m for Falsa Bay, for September 1999 and January 2000; this author explained that the low Secchi readings for Falsa Bay were due to the effect of increased turbidity because of oyster cultures in that arm. However, some of Barnard's (1962) values for this arm, obtained long before any aquaculture project, were as low as those of Osorno-Velázquez (2000). High turbidity in Falsa Bay is caused by the effect of wind waves on the shallow bathymetry. The volcanoes that separate the two arms of the lagoon protect the eastern arm and allow for much smaller waves in San Quintín Bay. These Secchi disk readings are very low and imply strong light attenuation, in some cases up to 50% in the first 0.5 m depth.

On 6 July 1977, phytoplankton abundance decreased from the mouth to the eastern extreme (not shown). Diatoms had the strongest decrease, from  $>400 \text{ cells mL}^{-1}$  at the mouth to  $<20 \text{ cells mL}^{-1}$  at the eastern extreme. Diatom abundance at Falsa Bay was intermediate, between the other two. Dinoflagellate abundance was similar for the three places ( $>80 \text{ cells mL}^{-1}$ ), although slightly higher for the mouth, and microflagellate abundance was highest for the mouth ( $\sim 110 \text{ cells mL}^{-1}$ ), decreasing to similarly low values for the two internal extremes ( $<20 \text{ cells mL}^{-1}$ ) (Álvarez-Borrego and Nájera-de-Muñoz, 1979). These values were for samples taken

mareas muertas (agosto de 1995, febrero de 1996 y agosto de 1996), Camacho-Ibar *et al.* (2003) coincidieron en que la laguna tiene un carácter heterótrofo neto y que constituye un exportador neto de fosfato inorgánico, aunque mencionaron que es necesario un estudio de nutrientes de alta frecuencia temporal ( $<2$  semanas) para evaluar potenciales variaciones de corto plazo en los flujos de nutrientes no conservadores de esta laguna afectada por ciclos bisemanales de surgencias durante primavera y verano.

La laguna es un exportador neto de amoníaco (Farfán y Álvarez-Borrego, 1983) y fosfato (Camacho-Ibar *et al.*, 2003) debido a la intensa remineralización en el sistema, pero importa nitrito, nitrato, y carbón y nitrógeno orgánico particulados (principalmente como diatomeas) durante los eventos de surgencia (Farfán y Álvarez-Borrego, 1983). La fijación de nitrógeno menos la denitrificación indica que Bahía San Quintín es un sumidero neto de nitrógeno (Camacho-Ibar *et al.*, 2003), pero este resultado se obtuvo en periodos de muestreo de sólo 2 días. Usui *et al.* (2001) midieron los procesos de nitrificación y denitrificación en un estuario japonés usando  $^{15}\text{N}$  como trazador y mencionaron que las tasas de estos procesos variaban en el tiempo, a veces excediendo una a la otra y viceversa. La concentración de amoníaco en Bahía San Quintín varía irregularmente tanto en el tiempo como en el espacio dentro de un rango de  $<1$  a  $\sim 5 \mu\text{M}$ , y excepcionalmente hasta  $\sim 8 \mu\text{M}$ , sin mostrar diferencias claras entre los valores de invierno y verano (Farfán y Álvarez-Borrego, 1983; Osorno-Velázquez, 2000). El rango de concentración de nitritos en la boca fue de 0 a 0.42  $\mu\text{M}$ , con un promedio de 0.18  $\mu\text{M}$  en junio y julio de 1979 (Farfán y Álvarez-Borrego, 1983).

En 1973/1974 los valores de clorofila en la boca fueron mayores que en las cabeceras, y en la boca fueron mayores en julio que en enero debido al efecto de las surgencias del verano (Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975) (fig. 3e). En julio de 1973 los altos valores de clorofila (hasta  $>8 \text{ mg m}^{-3}$ ) en el área de la boca indican que las surgencias se encontraban en su periodo de relajamiento, lo que también es indicado por las relativamente alta temperatura y baja salinidad (fig. 3a, b). Al tiempo del muestreo las poblaciones de fitoplancton ya se habían desarrollado. El rango espacial de clorofila fue mayor en julio que en enero, pero en las cabeceras internas el promedio de clorofila no fue significativamente diferente entre verano e invierno, ni tampoco entre las dos cabeceras durante la misma estación. Los valores medios de productividad primaria, estimados por el método luz-clorofila, también fueron más elevados en la boca y en julio ( $1.7 \text{ gC m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ), con valores de  $\sim 0.5 \text{ gC m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  en todos los casos (datos no mostrados) (Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975); sin embargo, estos autores no consideraron el efecto de la turbidez del agua de la laguna en la atenuación de la luz y es probable que sus valores estén sobreestimados. Los valores de productividad primaria generados por el método del  $^{14}\text{C}$  (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982) fueron menores hasta por un factor de dos. Barnard (1962) reportó lecturas de disco de Secchi de 2 a 2.7 m en la boca, de 1.2 a 1.5 m en Bahía San Quintín y de



with flood flow and the high diatom abundances were due to an upwelling intensification event during sampling. Minimum surface temperature at the mouth on 6 July 1977 was 12°C, indicative of intense upwelling (Lara-Lara *et al.*, 1980). These phytoplankton abundances do not take into consideration cells <3 µm because the inverted microscope technique did not detect them. Phytoplankton biomass, in milligrams of organic matter per cubic meter, was also clearly higher at the mouth than in the internal extremes in July 1973, with a minimum value in the eastern arm. Values for January 1974 were lower, with similar values for the mouth and Falsa Bay and a minimum value for San Quintín Bay (fig. 3f).

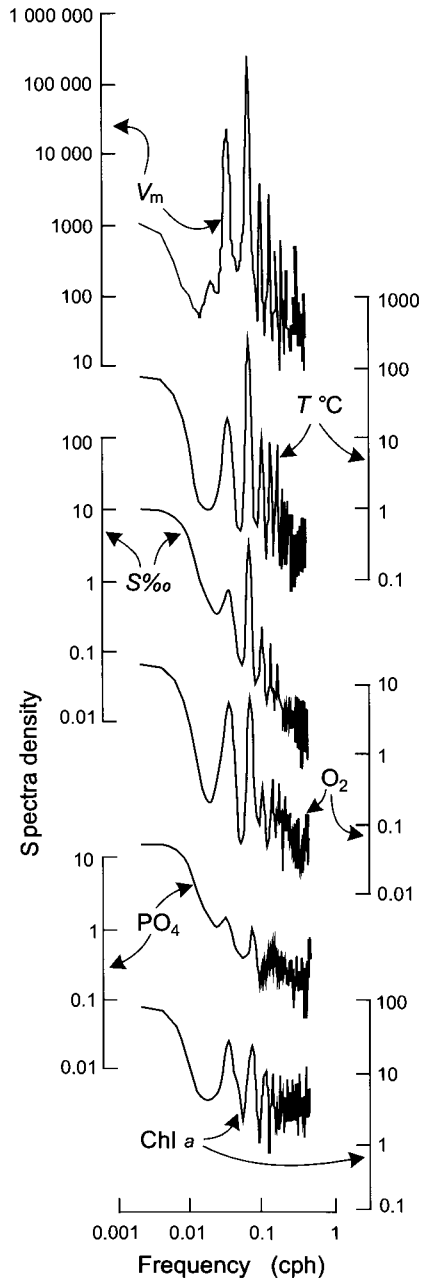
In 1975, time series were generated at the mouth to characterize the short-period variability, sampling every hour during 24 h. Results showed that properties such as chlorophyll change as much as one order of magnitude in only 2 h, but the causes of this variability were not clear (Álvarez-Borrego *et al.*, 1977b). Longer time series of water properties were generated in June and July 1977, at the mouth, sampling every hour during 18 days (Lara-Lara *et al.*, 1980). These data allowed for time series analysis to characterize the main sources of variation. Alternation of upwelling intensification and relaxation events were characterized as a factor causing a 2-week period variation of physical, chemical and biological water properties. Alternation of upwelling events was the main cause of variability for all properties except temperature. Semidiurnal tides were the main cause of variability for temperature. Conservative variables such as temperature and salinity had a semidiurnal component greater than the diurnal one. Most non-conservative variables (e.g., chlorophyll and PO<sub>4</sub>) had equal diurnal and semidiurnal variability components, due to biological processes that strongly depend on the solar radiation cycle (fig. 4). This type of variation was confirmed with the results from the June/July 1979 sampling (Millán-Núñez *et al.*, 1982), and with data from continuous recording thermographs operated during a whole year in 1979 and 1980 (Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego, 1982). The 1979 time series was 10 days long, sampling every 2 h, and it covered four sampling points simultaneously: the mouth, the Y vertex and the two internal extremes.

The effect of the sequence of upwelling intensification and relaxation events on seawater properties at the lagoon's mouth was very clear in the June/July 1979 data (fig. 5). With intense upwelling, temperature was as low as ~11°C (fig. 5a), nitrate concentration (NO<sub>3</sub>) was >12 µM, and diatoms dominated the phytoplankton community (fig. 5b, d). With upwelling relaxation, the water warms up due to an increase in residence time off the bay mouth, presenting ideal conditions for phytoplankton growth; nutrients are used more efficiently and are not being input as fast from deeper waters to the surface, and there is weaker vertical advection and turbulence. After about four days, nutrients such as NO<sub>3</sub> decreased to <1.0 µM, and phytoplankton composition changed from diatoms to dinoflagellates (fig. 5b, d). Chlorophyll concentration had a general tendency to increase from the period of intense

~1 m in Bahía Falsa para 1960/1961. Álvarez-Borrego *et al.* (1977b) registraron lecturas de disco de Secchi de 2.2 a 4.0 m en la boca durante la primavera y el verano de 1975, y Osorno-Velázquez (2000) obtuvo de 3 a 3.5 m para el brazo este y de 1 a 3 m para Bahía Falsa en septiembre de 1999 y enero de 2000. Esta última autora explicó las bajas lecturas de disco de Secchi para Bahía Falsa con base en el efecto del incremento en la turbidez a causa de los cultivos de ostión en el brazo este. Sin embargo, algunos de los valores de Barnard (1962) para este brazo fueron tan bajos como los de Osorno-Velázquez (2000), no obstante haber sido obtenidos mucho antes de que se iniciara cualquier proyecto de acuacultura en esta laguna. En Bahía Falsa la gran turbidez es causada por el efecto de las olas sobre su batimetría somera. Los volcanes que separan ambos brazos de la laguna protegen el brazo este y propician olas de mucho menor tamaño en Bahía San Quintín. Estas lecturas de disco de Secchi son muy bajas e implican una fuerte atenuación de la luz, la cual alcanza hasta un 50% en los primeros 0.5 m de profundidad.

El 6 de julio de 1977, la abundancia de fitoplancton disminuyó de la boca hacia la cabecera este (datos no mostrados). Las diatomeas presentaron la mayor disminución, de >400 cél mL<sup>-1</sup> en la boca a <20 cél mL<sup>-1</sup> en la cabecera este. La abundancia de diatomeas en Bahía Falsa mostraba un valor intermedio entre ambos extremos. La abundancia de dinoflagelados fue similar en las tres áreas (>80 cél mL<sup>-1</sup>), aunque ligeramente más elevada en la boca, y los microflagelados fueron más abundantes en la boca (~110 cél mL<sup>-1</sup>), disminuyendo a valores similarmente bajos en ambas cabecezas (<20 cél mL<sup>-1</sup>) (Álvarez-Borrego y Nájera-de-Muñoz, 1979). Estos valores se obtuvieron de muestras tomadas durante el flujo de la marea, y la gran abundancia de diatomeas se debió a un evento de intensificación de surgencias durante el muestreo. El 6 de julio de 1977, la temperatura superficial mínima en la boca de la bahía fue de 12°C, lo que indicaba la presencia de surgencias intensas (Lara-Lara *et al.*, 1980). Estas abundancias de fitoplancton no consideran las células <3 µm dado que la técnica del microscopio invertido no las detecta. En julio de 1973 la biomasa del fitoplancton, en miligramos de materia orgánica por metro cúbico, fue notablemente mayor en la boca que en las cabeceras internas, presentando un valor mínimo en el brazo este. En enero de 1974 los valores fueron menores, similares en la boca y en Bahía Falsa, y mínimos en Bahía San Quintín (fig. 3f).

Durante 1975 en la boca de la bahía se generaron series de tiempo para caracterizar la variabilidad de periodo corto por medio de muestreos cada hora, durante 24 h. Los resultados mostraron que propiedades tales como la clorofila cambian hasta en un orden de magnitud en tan solo 2 h, pero las causas de esta variabilidad no fueron claras (Álvarez-Borrego *et al.*, 1977b). En junio y julio de 1977 se generaron series de tiempo más largas en la boca de la laguna, muestreando cada hora durante 18 días (Lara-Lara *et al.*, 1980). Estos datos permitieron que su análisis sirviera para caracterizar las fuentes de variación. Se identificó a la alternancia de intensificación y



**Figure 4.** Variance spectra of tidal currents, temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity, dissolved oxygen, phosphate and chlorophyll for the mouth of San Quintín Bay; cph = cycles  $\text{h}^{-1}$  (summer 1977 data from Lara-Lara *et al.*, 1980).

**Figura 4.** Espectros de varianza de corrientes de marea, temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidad, oxígeno disuelto, fosfato y clorofila para la boca de Bahía San Quintín; cph = ciclos  $\text{h}^{-1}$  (datos de verano de 1977 de Lara-Lara *et al.*, 1980).

upwelling to that of relaxation (fig. 5c), but with a very patchy behavior.

The very low temperature values and very high  $\text{NO}_3$  values during upwelling intensification events off San Quintín Bay (fig. 5) are similar to those reported for July 1979 by Simpson (1985) for waters off Point Conception. During summer, off Point Conception the CCS has a flux with equatorward and off-

relajamiento de las surgencias como un factor que causa un periodo de variación de 2 semanas en las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua. La alternancia de los eventos de surgencia fue la principal causa de variabilidad de todas las propiedades, a excepción de la temperatura, siendo las mareas semidiurnas la principal causa de variación de ésta. Las variables conservadoras tales como temperatura y salinidad tuvieron un componente semidiurno mayor que el diurno. La mayoría de las variables no conservadoras (e.g., clorofila y  $\text{PO}_4$ ) tuvieron componentes diurnos y semidiurnos iguales debido a procesos biológicos que dependen fuertemente del ciclo de radiación solar (fig. 4). Este tipo de variación se confirmó con los resultados del muestreo de junio y julio de 1979 (Millán-Núñez *et al.*, 1982), y con datos registrados por termógrafos de manera continua por todo un año de 1979 a 1980 (Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982). La serie de tiempo de 1979 fue de 10 días, con muestreos cada 2 h, y cubrió simultáneamente cuatro puntos de muestreo: la boca de la laguna, el vértice de la Y y las dos cabeceras.

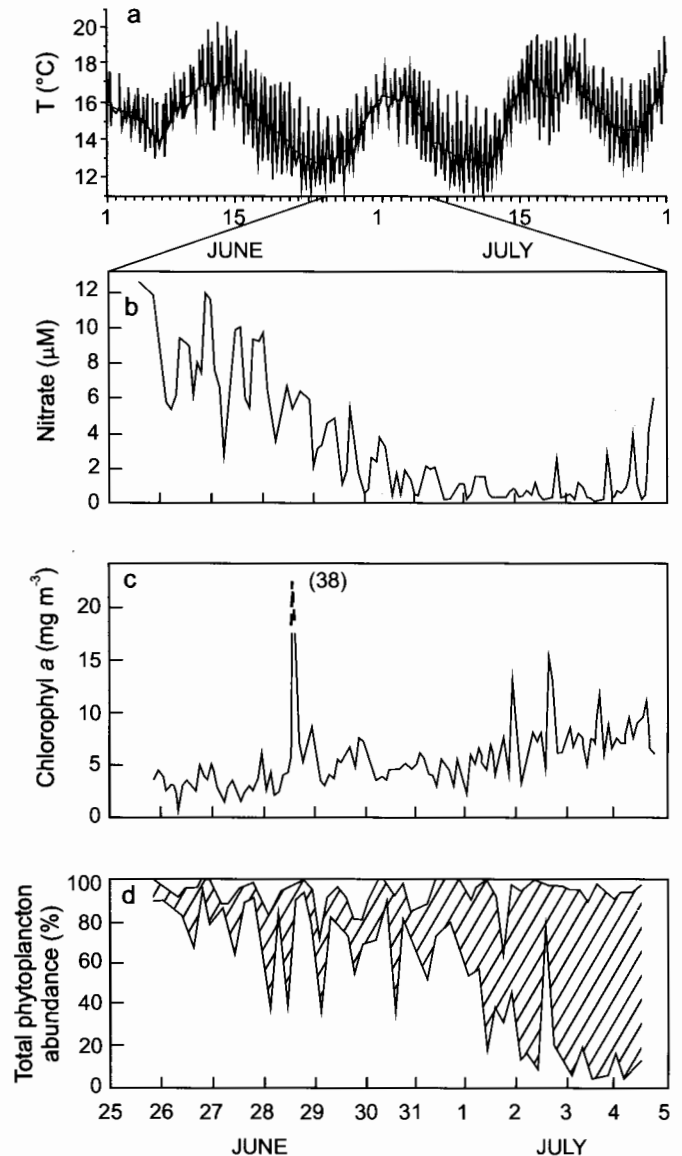
El efecto de la secuencia de intensificación y relajamiento de las surgencias sobre las propiedades del agua de mar en la boca de la laguna fue muy evidente en los datos de junio y julio de 1979 (fig. 5). Durante la intensificación de las surgencias la temperatura bajaba hasta  $\sim 11^{\circ}\text{C}$  (fig. 5a), la concentración de nitratos ( $\text{NO}_3$ ) se elevaba hasta  $>12 \mu\text{M}$ , y las diatomeas dominaban la comunidad fitoplanctónica (fig. 5b, d). Con el relajamiento de las surgencias el agua se calienta debido al incremento del tiempo de residencia frente a la boca, presentando condiciones ideales para el crecimiento del fitoplancton; los nutrientes son utilizados más eficientemente, no son aportados de las aguas profundas a la superficie con tanta intensidad, y la advección vertical y la turbulencia son mucho más débiles. Después de  $\sim 4$  días, nutrientes como el  $\text{NO}_3$  disminuyeron hasta  $<1.0 \mu\text{M}$ , y la composición del fitoplancton cambió de diatomeas a dinoflagelados (fig. 5b, d). La concentración de la clorofila presentó una tendencia general a incrementar del periodo de surgencias intensas al periodo de relajamiento (fig. 5c), pero con un patrón muy discontinuo.

Los muy bajos valores de temperatura y muy altos de  $\text{NO}_3$  durante la intensificación de las surgencias frente a Bahía San Quintín (fig. 5) son similares a los registrados por Simpson (1985) en aguas adyacentes a Point Conception en julio de 1979. Durante el verano, el SCC frente a Point Conception tiene un flujo con componentes hacia el ecuador y mar adentro (fig. 1). La lengüeta de agua fría frente a Point Conception es un fenómeno que se forma por la advección de agua del norte del SCC mar adentro, intensificada por las surgencias costeras (Fiedler, 1984). Simpson (1985) obtuvo valores bajos de temperatura superficial, de hasta  $12^{\circ}\text{C}$ , y valores de  $\text{NO}_3$  de hasta  $14 \mu\text{M}$ . No existen registros de surgencias tan intensas para los puntos geográficos entre Point Conception y Bahía San Quintín, por tanto sería interesante comprobar la hipótesis de que la secuencia de eventos de surgencia adyacente a San Quintín se debe a eventos de intensificación y relajamiento de

shore components (fig. 1). The plume of cold water off Point Conception is a feature formed by offshore advection of CCS water from the north augmented by coastal upwelling (Fiedler, 1984). Simpson (1985) reported surface temperature values as low as 12°C and NO<sub>3</sub> values up to 14 μM. There has been no report of this kind of intense upwelling for geographic points between Point Conception and San Quintín Bay. Consequently, it would be interesting to test the hypothesis that the sequence of upwelling events off San Quintín is due to intensification and relaxation events of the CCS circulation in this oceanic area. Cross-correlation coefficients between coastal surface water temperature and wind velocity time series (1978–1979) for two geographic locations, one between San Quintín Bay and Todos Santos Bay and the other off Todos Santos Bay (200 km to the north), were very low (Barton, 1985), which means that the Ekman drift cannot be considered as the only generator of coastal upwelling off northwestern Baja California. Barton (1985) also reported that, in general, wind and current series were not significantly correlated; this author described equatorward pulses of currents over several days at the location closer to San Quintín Bay, coinciding with drops in sea level and not produced by any unusual change in either local or large-scale winds. There are no wind intensification events with a ~2-week period for the northwestern Baja California coast (Barton, 1985) that could explain the sequence of upwelling as described by Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego (1982) for the area off San Quintín.

Primary productivity (PP) measured with <sup>14</sup>C incubations varied considerably following chlorophyll variability. In both 1977 and 1979, there were large temporal variations in the time series for the bay mouth, even with as little as 3 h difference, due to the patchy phytoplankton distribution (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982) (not shown). In general, data from both years are similar for the mouth, with a mean for noon and surface waters of 27 mgC m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>, or 122 mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> integrated productivity for the water column. At the mouth, PP values decreased to an order of magnitude less at 6 m compared to surface values, although more often they decreased 25–40%. In both internal extremes, while both chlorophyll and PP were about one third compared to values

la circulación del SCC en esta zona oceánica. Barton (1985) reportó muy bajos coeficientes de correlación cruzada entre la temperatura de agua superficial y la serie de tiempo de la velocidad del viento (1978–1979) para dos puntos geográficos, uno entre las bahías de San Quintín y Todos Santos y el otro adyacente a la Bahía de Todos Santos (200 km al norte), lo que indica que el transporte de Ekman no puede ser considerado el único generador de surgencia costera frente a las costas del noroeste de Baja California. Barton (1985) también mencionó que, en general, no había una correlación significativa entre las series de viento y corriente; este autor describió pulsos de corrientes hacia el ecuador durante varios días en la localidad más cercana a San Quintín, que coincidían con descensos en el nivel del mar y que no se producían por algún cambio extraño en los vientos locales o de gran escala. No existen en las costas del noroeste de Baja California eventos de intensificación de viento con un periodo de ~2 semanas (Barton, 1985) que pudieran explicar la secuencia de surgencias como las descritas



**Figure 5.** Summer 1979 time series for the mouth of San Quintín Bay: (a) temperature (°C) from 1 June to 31 July (adapted from Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego, 1982); and from 25 June to 5 July, (b) nitrate, (c) chlorophyll, and (d) percentage of total phytoplankton abundance (shaded area corresponds to the fraction of dinoflagellates, below it the fraction of diatoms and above it the fraction of microflagellates). (Panels b, c, and d were adapted from Millán-Núñez *et al.*, 1982.)

**Figura 5.** Serie de tiempo para el verano de 1979 en la boca de Bahía San Quintín: (a) temperatura (°C) del 1 de junio al 31 de julio (adaptado de Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982); y del 25 de junio al 5 de julio, (b) nitrato, (c) clorofila, y (d) porcentaje de abundancia total de fitoplancton (el área sombreada corresponde a la fracción de dinoflagelados, por debajo corresponde a la fracción de diatomeas y por arriba a la de microflagelados). (Los paneles b, c y d fueron adaptados de Millán-Núñez *et al.*, 1982.)

for the bay mouth, total phytoplankton abundance was only one tenth. This indicates that in the internal extremes, chlorophyll cell content was about triple that of the mouth. This is the result of acclimation of phytoplankton to a lower irradiance regime in the internal extremes due to greater turbidity. It is well known that phytoplankton responds to a lower irradiance regime by increasing its photosynthetic pigment content (Falkowski, 1980). Lara-Lara *et al.* (1980) and Millán-Núñez *et al.* (1982) indicated that PP values for the mouth of San Quintín Bay (up to  $>40 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) are two to three times greater than values for the Gulf of California, for other upwelling areas off the west coast of Baja California and off Oregon, and they mentioned that PP at the bay mouth during summer is similar to the highest PP found in narrow bands of the nearshore Oregon upwelling system.

Based on the high turbidity of the inner arms, relatively high concentrations of inorganic macronutrients, and relatively low PP and chlorophyll values, Millán-Núñez *et al.* (1982) suggested that light may be the main limiting factor for phytoplankton photosynthesis. However, the Colorado River estuary waters are much more turbid than those of San Quintín Bay, and Millán-Núñez *et al.* (1999) reported chlorophyll and PP values of  $>10 \text{ mg m}^{-3}$  and  $>40 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , respectively, for the former. This indicates that light may not limit PP in very turbid waters if turbulence allows for some exposure of phytoplankton cells to high light levels near the water surface. An alternative explanation for low chlorophyll and PP, and high macronutrients in the internal extremes of San Quintín Bay, may be low available iron, as proposed by Martin (1992) and Anderson (2003) for the eastern equatorial Pacific waters and the Southern Ocean. Possibly other nutrient-like metals may also have very low concentration. Lares *et al.* (2002) studied the monthly variability of cadmium concentration in soft tissues of mussels (*Mytilus californianus*) at a pristine rocky shore off San Quintín Bay, and they reported that cadmium was maximum during the upwelling season and minimum in February. The ratio between the maximum and minimum concentrations was 4.6. Cadmium is a nutrient-like trace metal ( $10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$  in rich ocean water) and in the open ocean it has a high correlation with macronutrients (Libes, 1992). Higher cadmium levels during the upwelling season is a clear indication of the high concentrations of nutrient-like metals in upwelled waters off San Quintín Bay. During an upwelling intensification event, nutrient-like metals such as iron are available to induce high PP values and diatom dominance in the mouth region, but due to scavenging by adsorption onto sinking particles under oxic conditions, iron is rapidly removed and made unavailable for photosynthesis, thus limiting PP. Possibly, in the inner reaches of the lagoon there is little iron available in the water column, causing low chlorophyll values despite relatively high values of inorganic nitrogen and  $\text{PO}_4$ .

The ranges in temperature for the summer 1979 and January 1980 time series were very large and greater for the mouth (fig. 6a), because of the more direct influence of the adjacent oceanic area during flood flow and of the lagoon's

por Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego (1982) para el área adyacente a San Quintín.

La productividad primaria (PP) medida con incubaciones de  $^{14}\text{C}$  varió considerablemente siguiendo la variabilidad de clorofila. Tanto en 1977 como en 1979 se presentaron grandes variaciones temporales en las series de tiempo para la boca de la laguna, hasta por una diferencia tan pequeña como 3 h, debido a la desigual distribución del fitoplancton (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982) (no mostrada). En general, los datos de ambos años son similares para la boca, con una media en superficie, al mediodía, de  $27 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , ó  $122 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  de productividad integrada para la columna de agua. En la boca, los valores de PP a 6 m disminuyeron un orden de magnitud en comparación con las aguas superficiales, pero con mayor frecuencia disminuyeron en 25–40%. En ambos extremos internos, aunque los valores de clorofila y PP eran un tercio de los de la boca, la abundancia fitoplanctónica total sólo fue de una décima parte. Esto indica que el contenido celular de clorofila en las cabeceras fue tres veces mayor que en la boca, resultado de la aclimatación del fitoplancton a un régimen de menor irradiancia en los extremos debido a una mayor turbidez. Es bien conocido que el fitoplancton responde a un régimen de menor irradiancia incrementando su contenido de pigmentos fotosintéticos (Falkowski, 1980). Lara-Lara *et al.* (1980) y Millán-Núñez *et al.* (1982) indicaron que los valores de PP para la boca de Bahía San Quintín (hasta  $>40 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) son dos a tres veces mayores que los valores para el Golfo de California, para otras zonas de surgencias adyacentes a la costa occidental de Baja California y frente a Oregon; asimismo, mencionan que la PP en la boca durante el verano es similar al valor más elevado obtenido para este parámetro en el sistema de surgencias cerca de la costa de Oregon.

Con base en la gran turbidez observada en los extremos internos, las relativamente altas concentraciones de macronutrientes inorgánicos, y los valores relativamente bajos de PP y clorofila, Millán-Núñez *et al.* (1982) sugirieron que la luz puede ser el principal factor limitante para la fotosíntesis fitoplanctónica. Sin embargo, las aguas del estuario del Río Colorado son mucho más turbias que las de Bahía San Quintín, y Millán-Núñez *et al.* (1999) registraron valores de clorofila y PP de  $>10 \text{ mg m}^{-3}$  y  $>40 \text{ mgC m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ , respectivamente, para las primeras. Esto indica que la luz puede no limitar la PP en aguas muy turbias si la turbulencia permite cierta exposición de las células a altos niveles de luz cerca de la superficie. Una explicación alterna para los valores bajos de clorofila y PP, con valores altos de macronutrientes en los extremos internos de la laguna, puede ser la baja disponibilidad de hierro, como Martin (1992) y Anderson (2003) propusieron para las aguas del Pacífico ecuatorial oriental y el océano del Sur. Posiblemente, otros metales traza con comportamiento tipo nutriente también tienen concentraciones muy bajas. Lares *et al.* (2002) estudiaron la variabilidad mensual de las concentraciones de cadmio en los tejidos blandos de mejillones (*Mytilus californianus*) en una costa rocosa prístina adyacente a Bahía San Quintín, y

interiors during ebb flow. A more detailed analysis of the summer time series for the mouth reveals that, in general, the lowest temperature values correspond to high tide and upwelling water, and the highest values correspond to low tide and water from the inner reaches (Millán-Núñez *et al.*, 1982). A comparison between the January 1980 temperature means for the inner reaches ( $>15^{\circ}\text{C}$ ) and those from January 1973 ( $<13^{\circ}\text{C}$ ) (figs. 3a, 6a) suggest an interannual variability due to meteorological variation.

The June/July 1979 salinity values ranged from a minimum of 33.4 for the mouth to a maximum of 37.6 for the eastern extreme (fig. 6a); however, unlike temperature, the larger salinity range was that of the eastern extreme. Practically all the salinity range for the eastern extreme was above that for the mouth, and it had little overlap with the one for Falsa Bay (fig. 6a), which is indicative of the much larger water residence time in the eastern extreme

The June/July 1979  $\text{NO}_3$  mean and range for the mouth were much larger than those for the eastern arm of the lagoon, with intermediate values for Falsa Bay (fig. 6b). During upwelling relaxation periods, many relatively high  $\text{NO}_3$  values are found in the internal extremes, between 1.0 and 2.0  $\mu\text{M}$ , at the same time that values at the mouth are often  $<1.0 \mu\text{M}$ . This implies that ammonia oxidation is a source of nitrate in the internal extremes. Ammonia reaches  $>7 \mu\text{M}$  in the water column of the eastern extreme, and it reaches  $\sim 3 \mu\text{M}$  at the mouth and in Falsa Bay (Farfán and Álvarez-Borrego, 1983; Osorno-Velázquez, 2000).

The June/July 1979  $\text{PO}_4$  range was greater for the mouth than for the internal extremes, but the means were statistically the same for the three regions of the lagoon (fig. 6b). The larger number of  $\text{PO}_4$  values  $>1.0 \mu\text{M}$  in Falsa Bay than in the eastern extreme (fig. 5 of Millán-Núñez *et al.*, 1982) may be due to greater turbulence caused by more intense and/or persistent waves in the former. This is consistent with Secchi disk readings at Falsa Bay, which are lower than those of the eastern arm. The June/July 1979 silicate values are consistent with those from 1973/1974 (figs. 3d, 6b).

The June/July 1979 ranges and means of chlorophyll concentration and total phytoplankton abundance were larger at the mouth than in the internal extremes, consistent with the 1973/1974 data (figs. 3e, f; 6c, d). Minimum values of the three locations are similar, but at the mouth maximum values were much larger than those of the internal extremes (fig. 6c, d). Sampling every 2 h during 10 days in June and July 1979, the spatial chlorophyll distribution was clearly very patchy (fig. 5c), but even in the eastern extreme values were often  $>3 \text{ mg m}^{-3}$ .

### Large period variations

Data from San Quintín Bay are very scarce. However, evidence suggests some hypothesis about interannual and interdecadal changes, and about the influence of phenomena at a mesoscale (hundreds of kilometers) and large scale ( $10^3 \text{ km}$ ).

encontraron niveles mayores de este metal durante la época de surgencias y menores en febrero. La razón entre las concentraciones máxima y mínima fue de 4.6. El cadmio es un metal traza tipo nutriente ( $10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$  en agua oceánica rica en nutrientes) y en mar abierto presenta una alta correlación con los macronutrientes (Libes, 1992). La presencia de niveles de cadmio más elevados durante la época de surgencias es una clara indicación de las altas concentraciones de metales tipo nutrientes en las aguas adyacentes a Bahía San Quintín. Durante un evento de intensificación de surgencias, los metales tipo nutriente como el hierro están disponibles para generar valores altos de PP y la predominancia de diatomeas en la boca, pero debido a la adsorción a partículas que se hunden bajo condiciones óxicas, el hierro es rápidamente removido y no está disponible para la fotosíntesis, por tanto, limita la PP. Es posible que se encuentre disponible un poco de hierro en la columna de agua en las cabeceras de la laguna, generando valores bajos de clorofila a pesar de los niveles relativamente altos de nitrógeno inorgánico y  $\text{PO}_4$ .

Los rangos de temperatura para las series de tiempo del verano de 1979 y enero de 1980 fueron muy grandes y mayores en la boca (fig. 6a) a causa de la influencia más directa del área oceánica adyacente durante la marea alta y del interior de la laguna durante la marea baja. Un análisis más detallado de la serie de tiempo del verano para la boca muestra que, en general, las temperaturas mínimas corresponden a la marea alta y a aguas de surgencia, y las máximas corresponden a la marea baja y a agua de los extremos más internos (Millán-Núñez *et al.*, 1982). La comparación de los valores medios de temperatura en los extremos internos para enero de 1980 ( $>15^{\circ}\text{C}$ ) y enero de 1973 ( $<13^{\circ}\text{C}$ ) (figs. 3a, 6a) muestra una variabilidad interanual debida a una variación meteorológica.

La salinidad en junio y julio de 1979 varió de un mínimo de 33.4 en la boca a un máximo de 37.6 en el brazo este (fig. 6a); sin embargo, a diferencia de la temperatura, el mayor rango de salinidad se presentó en el brazo este, en donde casi todo el rango de este parámetro estuvo por encima del de la boca y presentó pocos valores coincidentes con los de Bahía Falsa (fig. 6a), indicando un tiempo de residencia del agua mucho mayor en el extremo este.

Los promedios y rangos de  $\text{NO}_3$  para junio y julio de 1979 fueron mucho mayores en la boca que en el brazo este de la laguna, presentando valores intermedios para Bahía Falsa (fig. 6b). Durante periodos de relajamiento de surgencias, se encuentran valores relativamente altos de  $\text{NO}_3$  en los extremos internos, entre 1.0 y 2.0  $\mu\text{M}$ , al mismo tiempo que los valores en la boca frecuentemente son  $<1.0 \mu\text{M}$ . Esto sugiere que la oxidación de amonio es una fuente de nitrato en los extremos internos. El amonio alcanza valores  $>7 \mu\text{M}$  en la columna de agua del brazo este y de  $\sim 3 \mu\text{M}$  en la boca y en Bahía Falsa (Farfán y Álvarez-Borrego, 1983; Osorno-Velázquez, 2000).

El rango de  $\text{PO}_4$  en junio y julio de 1979 fue mayor para la boca que para los extremos internos, pero las medias fueron estadísticamente iguales para las tres zonas de la laguna

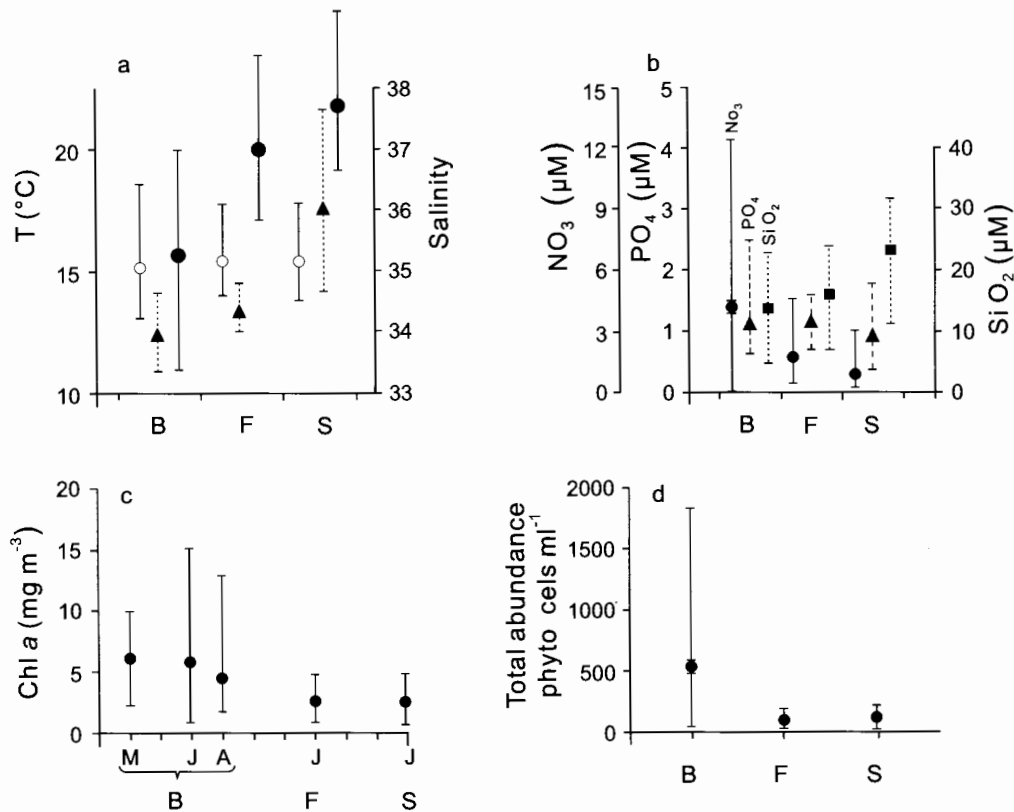


During summer, oceanic phenomena are detected at the mouth with minimum temperature and salinity values (fig. 7a, b). The most interesting data are the minimum and maximum values. Comparing the June/July data from 1973 through 1984 for the mouth and for oceanic waters near the mouth (8 km) (fig. 7), it can be seen that the minimum temperature and salinity values were very different, for example, between 1979, a non-El Niño year, and 1984, an El Niño year (fig. 7a, b).

El Niño events are detected off Baja California one and two years after their manifestation in the equatorial zone. The ENSO event that started to impact the equatorial Pacific at the beginning of 1982 was weakly manifested off southern California in December 1982 and early 1983, and in July 1983, positive temperature anomalies of up to 4°C were detected (Fiedler, 1984). In 1983 and 1984, minimum temperature values at the mouth of San Quintín Bay and 8 km off the bay

(fig. 6b). El mayor número de valores de  $PO_4 > 1.0 \mu M$  en Bahía Falsa que en el brazo este (fig. 5 de Millán-Núñez *et al.*, 1982) puede deberse a la mayor turbulencia generada por olas más intensas y/o persistentes en la primera. Esto concuerda con las lecturas de disco de Secchi de Bahía Falsa, que son menores que las del brazo este. Los valores de silicato para junio y julio de 1979 son consistentes con los de 1973 y 1974 (figs. 3d, 6b).

Los rangos y promedios de la concentración de clorofila y la abundancia total de fitoplancton para junio y julio de 1979 fueron mayores en la boca que en los extremos internos, en concordancia con los datos de 1973 y 1974 (figs. 3e, f; 6c, d). Los valores mínimos de las tres zonas de la laguna son similares, pero los valores máximos en la boca son mucho mayores que en los extremos (fig. 6c, d). Los muestreos que se llevaron a cabo cada 2 h durante 10 días en junio y julio de



**Figure 6.** Ranges for the bay mouth (B), Falsa Bay (F), and San Quintín Bay (S) of (clear symbols represent January and black symbols represent July): **(a)** temperature (●,○) in °C, and salinity (▲); **(b)** nitrate (●), phosphate (▲), and silicate (■); **(c)** chlorophyll a concentration (M, J and A mean May, July and August, respectively); and **(d)** phytoplankton total abundance. The marks close to the symbols represent the standard error ( $s/n^{0.5}$ ); in most cases they do not show because the symbol is larger. Temperature data for July 1979 and January 1980 are from Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego (1982) (a complete month with sampling every hour in each case); salinity, nutrient, chlorophyll, and phytoplankton abundance data for June/July 1979 are from Millán-Núñez *et al.* (1982) (10 days with sampling every 2 h); and chlorophyll data for May and August 1975 are from Álvarez-Borrego *et al.* (1977b) (24 h with sampling every hour).

**Figura 6.** Rangos para la boca de la bahía (B), Bahía Falsa (F) y Bahía San Quintín (S) de (los símbolos claros corresponden a enero y los negros a julio): **(a)** temperatura (●,○) en °C, y salinidad (▲); **(b)** nitrato (●), fosfato (▲), y silicato (■); **(c)** concentración de clorofila a (M, J y A significan mayo, julio y agosto, respectivamente); y **(d)** abundancia total de fitoplancton. Las marcas cerca de los símbolos representan el error estándar ( $s/n^{0.5}$ ); en la mayoría de los casos no se muestran porque el símbolo es mayor. Los datos de temperatura para julio de 1979 y enero de 1980 son de Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego (1982) (un mes completo con muestreos cada hora en todos los casos); los datos de salinidad, nutrientes, clorofila y abundancia de fitoplancton para junio/julio de 1979 son de Millán-Núñez *et al.* (1982) (10 días con muestreos cada 2 h); y los datos de clorofila para mayo y agosto de 1975 son de Álvarez-Borrego *et al.* (1977b) (24 h con muestreos cada hora).

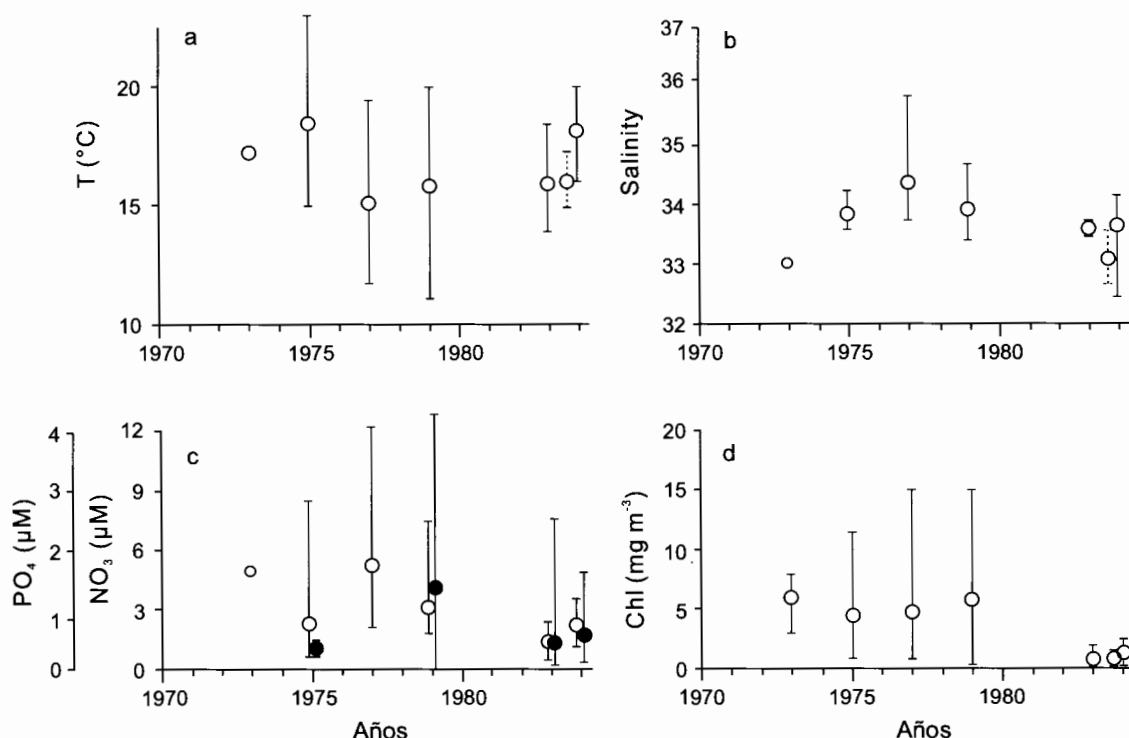
were between 3.5°C and 5.0°C higher than the 1979 minimum, a non-El Niño year (fig. 7a). Minimum salinities in 1983 and 1984 had a behavior opposite to that of minimum temperatures, fluctuating between 32.4 and 32.65 in 1984 compared to 33.4 in 1979 (fig. 7b). These low minimum salinities for 1983 and 1984 are a clear indication of the suppressed upwelling during El Niño. Maximum nutrient values decreased in 1983 and 1984 to less than half the 1979 values (fig. 7c), and maximum chlorophyll values (fig. 7d) and diatom abundance decreased in 1983 and 1984 one order of magnitude relative to those for 1977 and 1979 (Torres-Moye and Álvarez-Borrego, 1985, 1987; Silva-Cota and Álvarez-Borrego, 1988).

The 1972 and 1976 ENSO events had a very strong negative impact on Peru's anchovy fishery (Barber *et al.*, 1985). These events may have affected the San Quintín Bay area in 1973 and 1977, but the few data from the mouth do not reveal the effect with clarity. Only the July 1973 salinity (33.0) tends to be similar to the 1984 minimum salinities. Based on the

1979 mostraron una distribución espacial de clorofila en forma de manchas (fig. 5c), y aun en el brazo este los valores frecuentemente eran  $>3 \text{ mg m}^{-3}$ .

### Variaciones de periodo largo

Los datos para Bahía San Quintín son escasos; sin embargo existen evidencias que sugieren algunas hipótesis sobre cambios interanuales e interdecadales, así como sobre la influencia de fenómenos a mesoescala (cientos de kilómetros) y a gran escala ( $10^3 \text{ km}$ ). Durante el verano se detectan fenómenos oceánicos en la boca con valores mínimos de temperatura y salinidad (fig. 7a, b). Los datos más interesantes son los valores mínimo y máximo. La comparación de los datos de junio y julio de 1973 a 1984 de la boca y de las aguas oceánicas cerca de la boca (8 km) (fig. 7) muestra que los valores de temperatura y salinidad son muy diferentes, por ejemplo, entre 1979, un año no Niño, y 1984, un año Niño (fig. 7a, b).



**Figure 7.** Interannual changes of the mouth July ranges and means of: **(a)** temperature (°C) (1973 data from Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; 1975 data from Álvarez-Borrego *et al.*, 1977a, corresponding to August; 1977 data from Lara-Lara *et al.*, 1980; 1979 data from Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego, 1982; 1984 data from Silva-Cota and Álvarez-Borrego, 1988). **(b)** Salinity (same as for temperature but 1979 data are from Millán-Núñez *et al.*, 1982). **(c)** Nutrients (same as the latter but 1973 data are from Álvarez-Borrego and Chee-Barragán, 1976); PO<sub>4</sub> (○) and NO<sub>3</sub> (●). **(d)** Chlorophyll (same as the latter but 1973 data are from Lara-Lara and Álvarez-Borrego, 1975). The 1983 data and those represented with pointed lines at the left of 1984 are from Torres-Moye and Álvarez-Borrego (1985, 1987) for a location 8 km off the bay mouth. The marks close to the symbols represent the standard error ( $s/n^{0.5}$ ); in most cases they do not show because the symbol is larger.

**Figura 7.** Cambios interanuales en rangos y promedios registrados en la boca en julio de: **(a)** temperatura (°C) (datos de 1973 de Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; datos de 1975 de Álvarez-Borrego *et al.*, 1977a, correspondientes a agosto; datos de 1977 de Lara-Lara *et al.*, 1980; datos de 1979 de Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982; datos de 1984 de Silva-Cota y Álvarez-Borrego, 1988). **(b)** Salinidad (igual que para temperatura pero los datos de 1979 son de Millán-Núñez *et al.*, 1982). **(c)** Nutrientes (igual que el anterior pero los datos de 1973 son de Álvarez-Borrego y Chee-Barragán, 1976); (○) PO<sub>4</sub> y (●) NO<sub>3</sub>. **(d)** Clorofila (igual que el anterior pero los datos de 1973 son de Lara-Lara y Álvarez-Borrego, 1975). Los datos de 1983 y los representados con líneas punteadas a la izquierda de 1984 son de Torres-Moye y Álvarez-Borrego (1985, 1987) para una localidad a 8 km de la boca de la bahía. Las marcas cerca de los símbolos representan el error estándar ( $s/n^{0.5}$ ); en la mayoría de los casos no se presentan porque el símbolo es mayor.

salinity values, it may be deduced that the relatively high temperature values from the mouth in July 1973 were taken during flood flow (salinity and temperature samples were taken simultaneously). The 1977 salinity and temperature minima are indicative of intense upwelling, very similar to that of 1979. The 1973 and 1977 chlorophyll values (fig. 7d) represent healthy and abundant phytoplankton communities, and this contrasts with the 1983/1984 values. A possible explanation for the lack of effect from the 1973 and 1977 ENSO events on the area off San Quintin Bay is that in 1972 and 1976 the North Pacific had a "cold regime" that lasted up to 1976, after which there was a change to positive temperature anomalies throughout 1999 (Stephens *et al.*, 2001). Rainfall generally increases in Baja California as a result of ENSO events; however, the 1972/1973 event did not cause a significantly higher rainfall than the long-term mean (S. Reyes-Coca, CICESE, pers. comm.), which also shows the effect of interdecadal variations on other geophysical variables. In other words, in this geographic area, the effect of ENSO events on primary production possibly depends on the North Pacific interdecadal oscillation.

Water parcels at the mouth with salinity <33.0 (down to 32.4) in 1984 (fig. 7b), have their origin to the north of this oceanic area. Petersen *et al.* (1986) studied the physical and biological characteristics of the waters over the Southern California Bight shelf (isobaths 8–75 m) for the period from June 1978 to December 1984, and reported surface salinities as low as 33.2 for 1982, 32.8 for 1983, and 33.4 for 1984, and they indicated that this low salinity waters had to come from the north. The subarctic water that feeds the CCS has surface salinities from a little more than 33.0 to 33.5 in June (Park, 1967), and from a little less than 33.6 to 34.0 during spring (Álvarez-Borrego, 1970). Interannual variation may occur due to the variability of precipitation, but its study is out of the scope of this contribution. One feasible source for these low salinities (<33.0) in the area adjacent to San Quintin Bay is a mixture of subarctic water and the Columbia River estuarine plume (Columbia River mouth is at 46°10' N). Due to the Coriolis effect, this plume should turn north, but the CCS transports it to the south and southwest during summer, so that at the latitude of Newport, Oregon (~180 km from the river mouth), its low salinity (~27) core is about 110 km from the coast (Pak *et al.*, 1970). Off Oregon, the largest CCS meridional transport is to the south in July, and there is transport to the north during winter at irregular intervals (Stevenson *et al.*, 1969; Hickey, 1979). The Columbia River discharges 77% of the total drainage into the Pacific between British Columbia and California (Hickey, 1979). Surface salinity summer distributions shown by Reid (1960) only depict the Columbia River plume, with no significant impact of other rivers and with relatively high salinities near the coast due to upwelling. Reid (1960) reported salinities as low as 33.2 for August 1955 in the area off Point Conception (34°35' N), ~380 km from the coast, with values around 33.6 closer to the coast. Some water parcels with low salinity could be transported to the south and then to the coast by the summer

Los eventos de El Niño frente a Baja California se detectan uno o dos años después de su manifestación en la zona ecuatorial. El evento ENOS que primero afectó el Pacífico ecuatorial a principios de 1982 se manifestó débilmente frente a California en diciembre de 1982 y principios de 1983, y en julio de 1983 se detectaron anomalías positivas de temperatura de hasta 4°C (Fiedler, 1984). En 1983 y 1984 las temperaturas mínimas en la boca de Bahía San Quintín y a 8 km de la costa fueron entre 3.5°C y 5.0°C más altas que el mínimo registrado en 1979, un año no Niño (fig. 7a). Los valores mínimos de salinidad en 1983 y 1984 tuvieron un comportamiento distinto a los mínimos de temperatura, oscilando entre 32.4 y 32.65, en 1984 en comparación con 33.4 en 1979 (fig. 7b). Estas bajas salinidades en 1983 y 1984 son una clara indicación de la supresión de las surgencias durante El Niño. Los valores máximos de nutrientes para 1983 y 1984 disminuyeron hasta la mitad de los valores para 1979 (fig. 7c), y los valores máximos de clorofila (fig. 7d) y la abundancia de diatomeas en 1983 y 1984 disminuyeron en un orden de magnitud con respecto a los de 1977 y 1979 (Torres-Moye y Álvarez-Borrego, 1985, 1987; Silva-Cota y Álvarez-Borrego, 1988).

Los eventos ENOS de 1972 y 1976 tuvieron un impacto muy negativo sobre la pesquería de anchoveta peruana (Barber *et al.*, 1985). Estos eventos posiblemente afectaron el área de Bahía San Quintín en 1973 y 1977, pero los pocos datos existentes para la boca no muestran este efecto con claridad. Sólo la salinidad (33.0) para julio de 1973 es similar a las salinidades mínimas de 1984. Con base en estos valores de salinidad, es posible deducir que la temperatura relativamente alta en la boca en julio de 1973 se registró durante marea alta (las muestras de salinidad y temperatura fueron tomadas simultáneamente). Los valores mínimos de salinidad y temperatura en 1977 son indicativos de las surgencias intensas similares a las de 1979. Los valores de clorofila de 1973 y 1977 (fig. 7d) indican comunidades fitoplánctónicas sanas y abundantes, y contrastan con los valores de 1983/1984. Una posible explicación para la ausencia del efecto de los eventos ENOS de 1973 y 1977 en el área adyacente a Bahía San Quintín es que en 1972 y 1976 el Pacífico Norte tuvo un "régimen frío", que duró hasta 1976; después, hubo un cambio a anomalías de temperatura positivas de 1976 a 1999 (Stephen *et al.*, 2001). En Baja California generalmente se presenta un incremento en la precipitación durante los eventos ENOS; sin embargo, durante el evento de 1972/1973 la precipitación no se incrementó significativamente por encima del promedio de largo plazo (S. Reyes-Coca, CICESE, com. pers.), lo que también indica el efecto de variaciones interdecadales sobre otras variables geofísicas. En otras palabras, en esta área geográfica el efecto de eventos ENOS sobre la productividad primaria posiblemente dependa de la Oscilación Interdecadal del Pacífico Norte.

Las parcelas de agua con salinidad <33.0 (hasta 32.4) en la boca en 1984 (fig. 7b) se originaron al norte de esta área oceánica. Petersen *et al.* (1986) estudiaron las características físicas y biológicas de las aguas sobre la plataforma de la Southern California Bight (isóbatas de 8 a 75 m) en el periodo de junio

onshore flux off Ensenada, and then to both San Quintín Bay and the Southern California Bight by coastal currents as shown in figure 1. Salinities as low as <33.0 may occur in relatively isolated water parcels that are possibly formed from meanders and eddies, but they would need to avoid mixing by turbulent diffusion to a certain extent in order to maintain their characteristics. These low salinity water parcels have to be relatively scarce at low latitudes, such as off San Quintín Bay, and that is why they are often not detected during cruises, when sampling localities are far apart. Of the samples collected during several days in July 1984 from the same locality, 8 km off the mouth of San Quintín Bay, 35% had salinities <33.0 (Torres-Moye and Álvarez-Borrego, 1987). The relatively abundant presence of these low salinity water parcels in 1984 off the bay mouth indicates that with the beginning of El Niño relaxation there could have been a more intense flux of the CCS towards the equator.

An alternative possibility is that these low salinity water parcels came directly from the subarctic, without the effect of the Columbia River plume, and were due to lower salinities in the subarctic because of high precipitation during those years; this is something that needs exploration. Finally, if these low salinity water parcels originate from the Columbia River estuarine plume, there are some implications concerning genetic flux between the two coastal water bodies by means of spores, eggs, etc. Furthermore, during the 1960s and up to 1971, the Columbia River estuary was a major source of radioactivity, carrying some 25,000 curies per month to the sea, due to the operation of nine plutonium reactors at Hanford. The radioactive plume could be clearly traced in the ocean 350 km to the southwest of the river mouth with  $^{51}\text{Cr}$  (Osterberg *et al.*, 1965). The half-life of  $^{51}\text{Cr}$  is only 0.08 years, but some radioisotopes of large half-life (such as  $^{60}\text{Co}$ ) may have reached the sediments of San Quintín Bay. This is of course a remote possibility since there is a high dilution factor due to mixing with subarctic water, and because metals can be removed by scavenging. Nevertheless, natural concentrations of radioisotopes are in the range of  $10^{-6}$  to  $10^{-29}$  g g $^{-1}$  in ocean sediments (Libes, 1992), and the possibility of alteration of very low natural concentrations should be taken into account in future studies at San Quintín Bay.

### Acknowledgements

The constructive comments and suggestions of Sergio Sañudo-Wilhelmy (Marine Sciences Research Center at Stony Brook University, New York) and two anonymous reviewers greatly helped to improve the manuscript. The drawings were produced by J.M. Domínguez and F. Ponce.

### References

- Aguirre-Muñoz, A., Buddemeier, R.W., Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D., Ibarra-Obando, S.E., Massey, B., Smith, S.V. and Wulff, F. (2001). Sustainability of coastal resources in San Quintín, Mexico. *Ambio*, 30: 142–149.

de 1978 a diciembre de 1984, y registraron algunas salinidades superficiales tan bajas como 33.2 para 1982, 32.8 para 1983 y 33.4 para 1984, e indicaron que estas aguas bajas en salinidad tenían que venir del norte. El agua subártica que alimenta el SCC tiene salinidades superficiales de poco más de 33.0 a 33.5 en junio (Park, 1967), y de poco menos de 33.6 a 34.0 en primavera (Álvarez-Borrego, 1970). Es posible que ocurran variaciones interanuales debidas a la variabilidad de la precipitación, pero su estudio está fuera del alcance de este trabajo. Un posible origen para estas bajas salinidades (<33.0) en el área adyacente a Bahía San Quintín se pudiera encontrar en la mezcla de agua subártica con la lengüeta estuarina del Río Columbia (la boca de este río se localiza en los 46°10' N). Debido al efecto de Coriolis, esta lengüeta debería desviarse hacia el norte, pero el SCC la transporta hacia el sur y suroeste durante el verano, por lo que a la latitud de Newport, Oregon (~180 km de la boca del río), el núcleo de baja salinidad (~27) se encuentra a unos 110 km de la costa (Pak *et al.*, 1970). Frente a Oregon, el mayor transporte meridional del SCC en julio se dirige hacia el sur, mientras que en el invierno, a intervalos regulares, existe transporte hacia el norte (Stevenson *et al.*, 1969; Hickey, 1979). El 77% del aporte total de los ríos al Océano Pacífico entre Columbia Británica y California proviene del Río Columbia (Hickey, 1979). Las distribuciones superficiales de salinidad en verano presentadas por Reid (1960) sólo representan la lengüeta del Río Columbia, sin ningún impacto significativo de otros ríos y con salinidades relativamente altas cerca de la costa a causa de las surgencias. Reid (1960) registró salinidades tan bajas como 33.2 en agosto de 1955 en el área de Point Conception (34°35' N), alrededor de 380 km de la costa, con valores de ~33.6 más cerca de la costa. Como se muestra en la figura 1, algunas parcelas de agua de baja salinidad pueden ser transportadas hacia el sur y luego hacia la costa por el flujo de verano frente a Ensenada, y posteriormente hacia Bahía San Quintín y la Southern California Bight por corrientes costeras. Se pueden encontrar salinidades bajas de <33.0 en parcelas de agua relativamente aisladas que posiblemente se formen por giros, pero para mantener sus características necesitarían evitar hasta cierto grado la mezcla por difusión turbulenta. Estas parcelas de agua baja en salinidad tienen que ser relativamente escasas a latitudes bajas como la de San Quintín, y por eso con frecuencia no son detectadas durante los cruceros cuando los sitios de muestreo están alejados uno del otro. De las muestras que se recolectaron durante varios días en julio de 1984 de la misma localidad, a 8 km de la boca de Bahía San Quintín, 35% presentaron salinidades <33.0 (Torres-Moye y Álvarez-Borrego, 1987). La presencia en 1984 de estas parcelas de agua baja en salinidad relativamente abundantes en las inmediaciones de la boca de la laguna indica que a principios del relajamiento de El Niño pudo haber existido un flujo más intenso del SCC hacia el ecuador.

Otra explicación es que estas parcelas de agua de baja salinidad provienen directamente del subártico, sin sufrir el efecto de la lengüeta del Río Columbia, y que se deben a menores salinidades en el subártico a raíz de la considerable precipitación que se dió durante esos años; esto es algo que se

- Álvarez-Borrego, S. (1970). Chemico-oceanographical parameters of the central North Pacific Ocean. M.Sc. thesis, Oregon State University, Corvallis, 84 pp.
- Álvarez-Borrego, S. y López-Álvarez, C. (1975). Distribución de biomasa de fitoplancton por grupos taxonómicos en Bahía San Quintín, B.C., a través de un ciclo anual. Reporte para el Instituto Nacional de Pesca de la SIC, y para la Dirección General de Acuicultura de la SRH. Unidad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada.
- Álvarez-Borrego, S. y Chee-Barragán, A. (1976). Distribución superficial de fosfatos y silicatos en Bahía San Quintín, B.C. *Cienc. Mar.*, 3(1): 51–61.
- Álvarez-Borrego, S. and Nájera-de-Muñoz, S. (1979). Phytoplankton time series from two coastal lagoons of Baja California. *Cienc. Mar.*, 6: 75–88.
- Álvarez-Borrego, J. and Álvarez-Borrego, S. (1982). Temporal and spatial variability of temperature in two coastal lagoons. *CalCOFI Rep.*, XXIII: 188–197.
- Álvarez-Borrego, S., Ballesteros-Grijalva, G. y Chee-Barragán, A. (1975). Estudio de algunas variables físicoquímicas superficiales en Bahía San Quintín, en verano, otoño e invierno. *Cienc. Mar.*, 2(2): 1–9.
- Álvarez-Borrego, S., Acosta-Ruiz, M.J. y Lara-Lara, J.R. (1977a). Hidrología comparativa de las bocas de dos antiestuarios de Baja California. *Cienc. Mar.*, 4(1): 1–11.
- Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J.R. y Acosta-Ruiz, M.J. (1977b). Parámetros relacionados con la productividad orgánica primaria en dos antiestuarios de Baja California. *Cienc. Mar.*, 4(1): 12–22.
- Anderson, R.F. (2003). What regulates the efficiency of the biological pump in the Southern Ocean? *U.S. JGOFS News*, 12: 1–4.
- Barber, R.T., Chávez, F.P. and Kogelschatz, J.E. (1985). Biological effects of El Niño. In: M. Vegas (ed.), *Seminario Regional de Ciencia, Tecnología y Agresión Ambiental: El fenómeno "El Niño"*. Contec Press, Lima, Perú, pp. 399–438.
- Barnard, L. (1962). Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California, 1960–61. *General. Pac. Nat.*, 3: 249–274.
- Barton, E.D. (1985). Low-frequency variability of currents and temperatures on the Pacific continental shelf off northern Baja California, 1978 to 1979. *Cont. Shelf Res.*, 4: 425–443.
- CalCOFI Data Report (1984). Physical, Chemical and Biological data, Cruises 8404, 8405, 8406. SIO Reference 84–25. Scripps Institution of Oceanography, UCSD, La Jolla, 224 pp.
- Camacho-Ibar, V.F. and Álvarez-Borrego, S. (1988). Nutrient concentrations in pore waters of intertidal sediments in a coastal lagoon: Patchiness and temporal variations. *Sci. Total Environ.*, 75: 325–339.
- Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D. and Smith, S.V. (2003). Non-conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintin Bay, Mexico. *Estuaries* 26(5): 1220–1237.
- Chávez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E. and Niquen, M. (2003). From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299: 217–221.
- Chávez-de-Nishikawa, A. y Álvarez-Borrego, S. (1974). Hidrología de la Bahía de San Quintín, Baja California, en invierno y primavera. *Cienc. Mar.*, 1(2): 31–62.
- Dawson, E.Y. (1962). Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California, 1960–61. *Marine and marsh vegetation. Pac. Nat.*, 2: 275–280.
- Falkowski, P.G. (1980). Light-shade adaptation in marine phytoplankton. In: P.G. Falkowski (ed.), *Primary Productivity in the Sea*. Plenum Press, New York, pp. 99–119.
- Farfán, B.C. and Álvarez-Borrego, S. (1983). Variability and fluxes of nitrogen and organic carbon at the mouth of a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 17: 599–612.
- necesita investigar. Finalmente, si estas parcelas de agua tienen su origen en la lengüeta del Río Columbia, ello tiene implicaciones en el flujo genético que se da mediante esporas, huevos, etc. entre estos dos cuerpos de agua costeros. Además, durante la década de los sesenta y hasta 1971, el estuario del Río Columbia fue una fuente mayor de radioactividad, transportando unos 25,000 curies por mes al mar, debido a la operación de nueve reactores de plutonio en Hanford. La lengüeta radiactiva se podía trazar claramente en el océano hasta 350 km al suroeste de la desembocadura del río con <sup>51</sup>Cr (Osterberg *et al.*, 1965). La vida media del <sup>51</sup>Cr es de tan sólo 0.08 años, pero algunos radioisótopos de vida media larga (como el <sup>60</sup>Co) pueden haber llegado a los sedimentos de Bahía San Quintín. Claro que esto es una posibilidad remota ya que hay un elevado factor de dilución debido a la mezcla con el agua subártica, y porque los metales pueden ser asimilados por organismos. No obstante, las concentraciones naturales de radioisótopos varían de 10<sup>-6</sup> a 10<sup>-29</sup> g g<sup>-1</sup> en los sedimentos oceánicos (Libes, 1992), por lo que en futuros estudios sobre Bahía San Quintín debería de tomarse en cuenta la posibilidad de un cambio en sus pequeñas concentraciones naturales.

#### Agradecimientos

Agradezco las críticas constructivas de Sergio Sañudo-Wilhelmy (Marine Sciences Research Center de Stony Brook University, Nueva York) y de dos revisores anónimos; el manuscrito mejoró significativamente gracias a sus sugerencias. El trabajo de dibujo fue realizado por J.M. Domínguez y F. Ponce.

Traducido al español por Manuel Gardea-Ojeda y Christine Harris.

- Fiedler, P.C. (1984). Satellite observations of the 1982–1983 El Niño along the U.S. Pacific coast. *Science*, 224: 1251–1254.
- Gorsline, D.S. and Stewart, R.A. (1962). Benthic marine exploration of Bahía de San Quintín, Baja California, 1960–61. *Marine and quaternary geology. Pac. Nat.*, 2: 281–319.
- Hickey, B. (1979). The California Current System: Hypothesis and facts. *Prog. Oceanogr.*, 8: 191–279.
- Ibarra-Obando, S.E., Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D. and Smith, S.V. (2001). Upwelling and lagoonal ecosystems of the dry Pacific coast of Baja California. In: U. Seeliger and B. Kjerfve (eds.), *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. Springer, Berlin, pp. 315–329.
- Kjerfve, B. (1994). Coastal Lagoon Processes. In: B. Kjerfve (ed.), *Coastal Lagoon Processes*, Elsevier, Amsterdam, pp. 1–15.
- Knoppers, B. (1994). Aquatic primary production in coastal lagoons. In: B. Kjerfve (ed.), *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier, Amsterdam, pp. 243–286.
- Lara-Lara, J.R. y Álvarez-Borrego, S. (1975). Ciclo anual de clorofilas y producción orgánica primaria en Bahía San Quintín, B.C. *Cienc. Mar.*, 2(1): 77–97.
- Lara-Lara, J.R., Álvarez-Borrego, S. and Small, L.F. (1980). Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. *J. Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 11: 613–637.



- Lares, M.L., Flores-Muñoz, G. and Lara-Lara, J.R. (2002). Temporal variability of bioavailable Cd, Hg, Zn, Mn, and Al in an upwelling regime. *Environ. Pollut.*, 120: 595–608.
- Libes, S.M. (1992). *An Introduction to Marine Biogeochemistry*. John Wiley, New York, 733 pp.
- Martin, J.H. (1992). Iron as a limiting factor in oceanic productivity. In: P.G. Falkowski and A.D. Woodhead (eds.), *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*. Plenum Press, New York, pp. 123–138.
- Martori-Oxamendi, J.I. (1989). Variabilidad de la circulación y sus causas en Bahía San Quintín, B.C. Tesis de maestría en ciencias, CICESE, Ensenada, 110 pp.
- Millán-Núñez, R., Álvarez-Borrego, S. and Nelson, D.M. (1982). Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 15: 317–335.
- Millán-Núñez, R., Santamaria-del-Angel, E., Cajal-Medrano, R. and Barocio-León, O.A. (1999). The Colorado River Delta: A high primary productivity ecosystem. *Cienc. Mar.*, 25: 509–524.
- Ocampo-Torres, F.J. (1980). Análisis de mareas y predicción de velocidad mediante un modelo unidimensional en Bahía San Quintín, B.C. Tesis profesional, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, 94 pp.
- Osorno-Velázquez, A.I. (2000). Impacto del cultivo de moluscos filtroalimentadores en el fitoplancton y calidad del agua de Bahía San Quintín. Tesis de maestría en ciencias, CICESE, Ensenada, 48 pp.
- Osterberg, C., Cutshall, N. and Cronin, J. (1965). Chromium-51 as a radioactive tracer of Columbia River water at sea. *Science*, 150: 1585–1587.
- Pak, H., Beardsley, Jr., G.F. and Park, P.K. (1970). The Columbia River as a source of marine light-scattering particles. *J. Geophys. Res.*, 75: 4570–4578.
- Park, P.K. (1967). Chemical features of the subarctic boundary near 170°W. *J. Fish. Res. Board Canada*, 24: 899–908.
- Peláez, J. and McGowan, J.A. (1986). Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. *Limnol. Oceanogr.*, 31(5): 927–950.
- Petersen, J.H., Jahn, A.E., Lavenberg, R.J., McGowen, G.E. and Grove, R.S. (1986). Physical-chemical characteristics and zooplankton biomass on the continental shelf off southern California. *CalCOFI Rep.*, XXVII: 36–52.
- Reid, J.L. (1960). Oceanography of the northeastern Pacific Ocean during the last ten years. *CalCOFI Rep.*, VII: 77–90.
- Silva-Cota, S. and Álvarez-Borrego, S. (1988). The “El Niño” effect on the phytoplankton of a north-western Baja California coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 27: 109–115.
- Simpson, J.J. (1985). Air-sea exchange of carbon dioxide and oxygen induced by phytoplankton. Methods and interpretation. In: A. Zirino (ed.), *Mapping Strategies in Chemical Oceanography*. American Chemical Soc., Washington, D.C., pp. 409–450.
- Smith, S.V. and Hollibaugh, T. (1997). Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. *Ecol. Monogr.*, 67: 509–533.
- Stephens, C., Levitus, S., Antonov, J. and Boyer, T.P. (2001). On the Pacific Ocean regime shift. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 3721–3724.
- Stevenson, M., Pattullo, J.G. and Wyatt, B. (1969). Subsurface currents off the Oregon coast as measured by parachute drogues. *Deep-Sea Res.*, 16: 449–461.
- Teague, K.G., Madden, C.J. and Day, J.W. Jr. (1988). Sediment-water oxygen and nutrient fluxes in a river-dominated estuary. *Estuaries*, 11: 1–9.
- Torres-Moye, G. and Álvarez-Borrego, S. (1985). The 1983 “El Niño” effects on nutrients and summer phytoplankton of western Baja California coastal waters. *Cienc. Mar.*, 11: 107–113.
- Torres-Moye, G. and Álvarez-Borrego, S. (1987). Effects of the 1984 El Niño on the summer phytoplankton of a Baja California upwelling zone. *J. Geophys. Res. (Oceans)*, 92(C13): 14383–14386.
- Usui, T., Koike, I. and Ogura, N. (2001). N<sub>2</sub>O production, nitrification and denitrification in an estuarine sediment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 52: 769–781.