

SERIES DE TIEMPO DE VARIABLES FISICOQUIMICAS EN LAS
BOCAS DE DOS ANTIESTUARIOS DE BAJA CALIFORNIA

por:

JOSE ANTONIO ZERTUCHE GONZALEZ

SAUL ALVAREZ BORREGO

Centro de Investigaciones Científica y
de Educación Superior de Ensenada, B. Cfa.
Espinoza 843
Ensenada, B.C., México

RESUMEN.

Del 1 al 7 de febrero, y del 20 de junio al 7 de julio, se realizaron muestreos cuasicontínuos en las bocas del Estero de Punta Banda y de Bahía San Quintín, respectivamente. Cada hora, día y noche, se tomaron muestras de agua superficial para determinación de salinidad, oxígeno disuelto y fosfato inorgánico. Además se determinó la temperatura, marea y variables meteorológicas. En Bahía San Quintín los rangos de variación de salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y fosfato son mayores que en el Estero. Las surgencias en San Quintín son responsables por lo menos parcialmente de ésto y otros efectos tales como: temperaturas mínimas menores en San Quintín que en el Estero; salinidades máximas mayores en San Quintín; oxígenos mínimos menores en San Quintín; y fosfato en general mayor en San Quintín. Bahía San Quintín es mucho más fértil que el Estero de Punta Banda. Los coeficientes de correlación lineal entre estas variables son muy bajos. El más alto coeficiente se obtuvo para marea-temperatura en San Quintín con $R = -0.74$. Las frecuencias más significativas son diurnas y semi-diurnas de acuerdo con las mareas y el ciclo de irradiación solar.

SERIES DE TIEMPO EN DOS ANTIESTUARIOS

ABSTRACT.

Quasi-continuous samplings were done at the mouths of two coastal lagoons of Baja California peninsula, Estero de Punta Banda and San Quintín Bay. From February first through seventh, and from June twentieth through July seventh, respectively, every hour day and night, surface water samples were taken to determine salinity, dissolved oxygen and inorganic phosphate. Also, we measured water temperature, tides and meteorological variables. In San Quintín Bay, salinity, temperature, oxygen and phosphate variation ranges are higher than those of Estero de Punta Banda. Upwelling off the mouth of San Quintín Bay is responsible for this. Upwelling is also what causes temperature and oxygen minima to be smaller, and salinity and phosphate maxima to be greater, in San Quintín than in Estero de Punta Banda. The linear correlation coefficients between these variables are very low. The highest coefficient was obtained for tides vs. temperature in San Quintín, with $R = -0.74$. The most significant frequencies are semidiurnal and diurnal, according to those of tides and the cycle of solar radiation. San Quintín Bay is much more fertile than the Estero.

INTRODUCCION.

En lagunas costeras existe una gran variabilidad de condiciones ambientales en función del tiempo. Alvarez Borrego, Acosta Ruíz y Lara Lara (1977) hicieron estudios de variación diaria de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, marea, temperatura del aire y vientos, en las bocas del Estero de Punta Banda y Bahía San Quintín, en primavera y verano de 1975. Trataron de relacionar los cambios de estas variables entre sí, pero concluyeron que series de tiempo de sólo 24 ó 26 horas son muy cortas para ver con claridad las tendencias de cambio y la interrelación. Por ello, decidimos hacer un muestreo relativamente largo en cada una de estas lagunas, para obtener un conjunto de datos que nos permitiera hacer un análisis estadístico más adecuado. En particular en Bahía San Quintín, si se quiere analizar el efecto de los eventos de surgencia, es necesario contar con series de tiempo del orden de tres semanas.

Acosta Ruíz y Alvarez Borrego (1974) y Chávez de Nishikawa y Alvarez Borrego (1974) han presentado con anterioridad descripciones de estos dos cuerpos de agua, por lo cual no

es necesario repetirlo aquí. Brevemente, el Estero de Punta Banda es una laguna costera localizada a lo largo de la orilla sureste de la Bahía de Todos Santos (Fig. 1). Su boca se encuentra aproximadamente a 8 millas náuticas del mar abierto. Fuera de la Bahía de Todos Santos, al suroeste de Punta Banda se encuentra una zona de surgencias. La boca del Estero no es mayor de 150 m en mareas bajas. Bahía San Quintín se localiza a 200 km al sur de Ensenada, Baja California Norte. En el mar abierto inmediatamente al sur de la entrada de la Bahía ocurren surgencias intensas en verano (Dawson, 1951). La boca tiene un poco más de un kilómetro de ancho (Fig. 1). La profundidad media en la boca de San Quintín, en el canal principal donde se efectuó el muestreo, es de 9 m; y en el Estero de Punta Banda 7 m.

MATERIALES Y METODOS.

Del 1 al 7 de febrero y del 20 de junio al 7 de julio, se realizaron muestreos cuasicontinuos en las bocas del Estero de Punta Banda y de Bahía San Quintín, respectivamente. Cada hora, día y noche, se tomaron muestras de agua superfi-

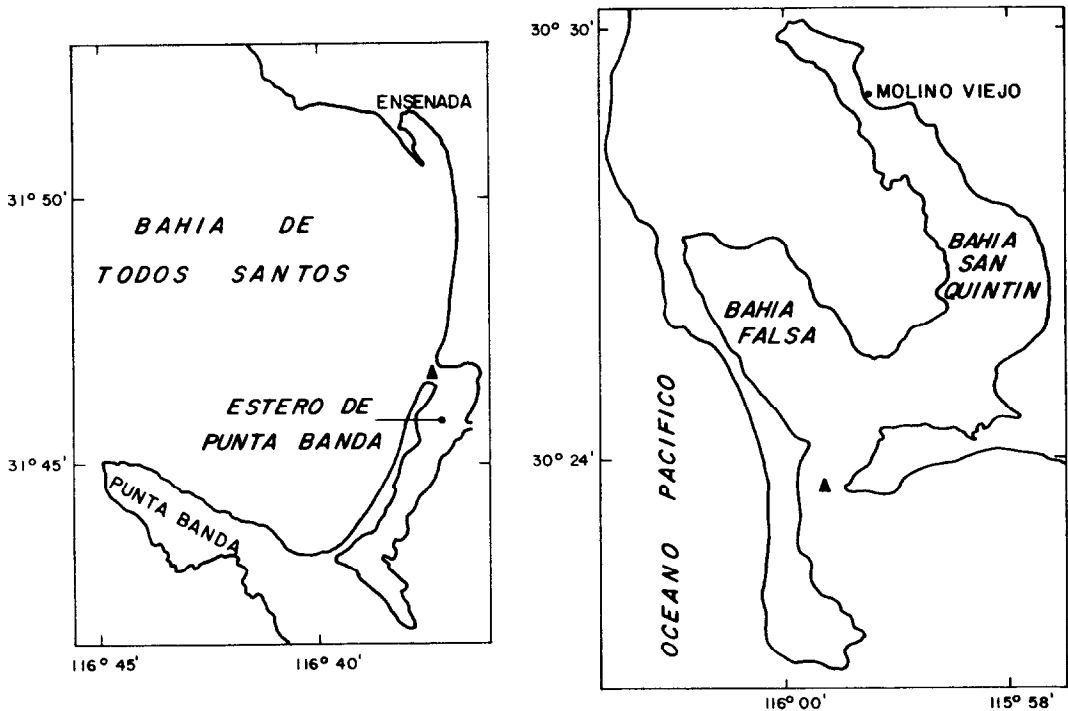


Fig. 1 Localización de los puntos de muestreo.

SERIES DE TIEMPO EN DOS ANTIESTUARIOS

cial para determinación de salinidad, oxígeno disuelto, fosfato inorgánico, pigmentos fotosintéticos y biomasa de fitoplancton. Además, se determinó la temperatura del agua, marea y variables meteorológicas tales como temperatura del aire, irradiación solar (intensidad de luz), velocidad del viento, nubosidad y porcentaje de humedad. En este trabajo sólo se reportan resultados de mareas, salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y fosfato. En cada muestreo se anclaba la embarcación "SIRIUS I" de 35 pies de eslora, propiedad del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, B.C., a manera de plataforma fija. La salinidad se determinó mediante un salinómetro Beckman, modelo 118WA 200; la temperatura mediante termómetros reversibles y termómetros de cubeta, paralelamente; el oxígeno se determinó mediante el método macro-Winkler en el Estero de Punta Banda y el micro-Winkler en Bahía San Quintín. Las mareas para el Estero se obtuvieron del calendario de mareas de la Secretaría de Marina. Para San Quintín se utilizaron dos mareógrafos, uno en la boca, instalado por el grupo de Dinámica de Lagunas Costeras, y otro en Molino Viejo, del grupo de Mareografía, ambos del CICESE (Fig. 1). El mareógrafo de la boca únicamente funcionó durante dos días. Los resultados obtenidos durante ese tiempo permitieron calcular el retraso de la marea de la boca a Molino Viejo y así, en base al mareograma de Molino Viejo, calcular las mareas para la boca. Para la toma de muestras de salinidad, oxígeno y fosfato, se utilizó una botella Nansen recubierta de teflón. A la muestra de fosfato inorgánico se le agregaban tres gotas de solución saturada de cloruro de mercurio y se congelaban en hielo seco, para su posterior análisis en el laboratorio de Ensenada. Para el análisis se utilizó el método descrito por Strickland y Parsons (1967), mediante un espectrofotómetro Spectronic UV-210 digital de Shimadzu y Bausch & Lomb. Además, se calculó el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto:

$$\% \text{ Sat} = (O_2/O_2^i) \cdot 100$$

donde O_2 es el oxígeno disuelto y O_2^i es la solubilidad de oxígeno calculada en función de la temperatura y salinidad (Gilbert, Pawley y Park, 1968).

Los datos fueron procesados en una computadora PRIME-400 del Centro de Cálculo del CICESE.

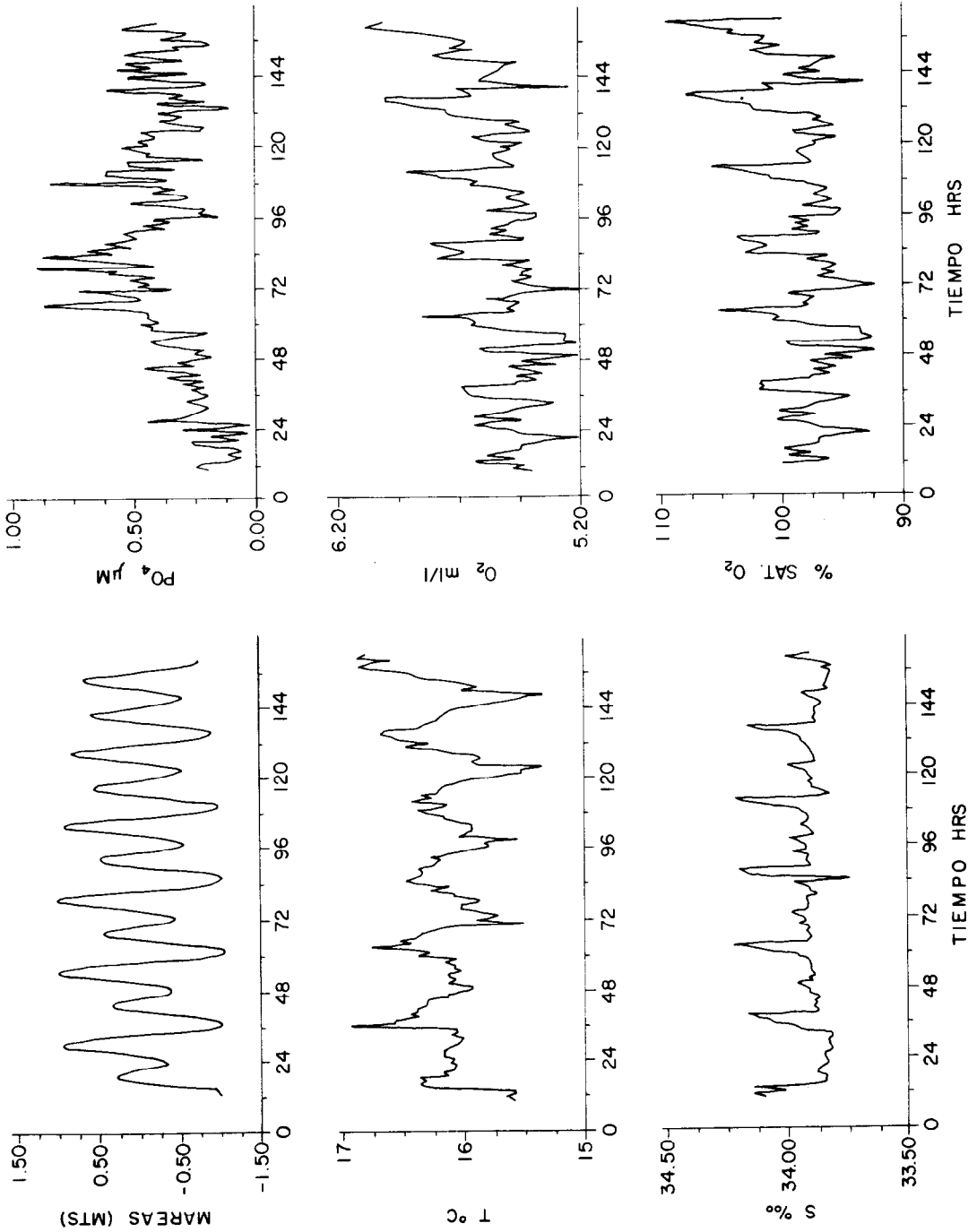


Fig. 2 Series de tiempo del Estero de Punta Banda. En la abscisa los números marcan las medias noches.

SERIES DE TIEMPO EN DOS ANTIESTUARIOS

RESULTADOS.

En el Estero de Punta Banda, la salinidad presentó un comportamiento semidiurno, de acuerdo con la marea (Fig. 2). Los máximos de salinidad correspondieron a las mareas bajas, pero hubo una diferencia notable entre los máximos de salinidad correspondientes a las mareas bajas máximas, y los correspondientes a las mareas bajas mínimas. Los primeros fueron muy marcados. El rango de salinidad fue 0.48 ‰. En general se observó que al bajar la marea la salinidad se incrementaba, mientras que al subir la marea se mantenía bastante constante. La temperatura se comportó con variación diurna, con los máximos correspondiendo a las mareas bajas máximas. Estas ocurrieron al mediodía al inicio del muestreo (Fig. 2). Los mínimos de temperatura ocurrieron a medianoche, correspondiendo a las mareas bajas mínimas. Durante las mareas altas se registraron temperaturas intermedias. El rango de temperatura fue 1.6°C. El oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y fosfato presentaron un comportamiento más irregular que la temperatura y salinidad (Fig. 2). El oxígeno se comportó básicamente con variación diurna, con los máximos entre mediodía y las cuatro de la tarde aproximadamente. Estos máximos correspondieron a las mareas bajas máximas. Las mareas bajas mínimas correspondieron a mínimos de oxígeno, a medianoche. Durante mareas altas, el oxígeno presentó valores mínimos e intermedios. El rango de oxígeno fue 0.9 ml/l. El porcentaje de saturación de oxígeno mostró el mismo comportamiento que el oxígeno mismo, con un mínimo de 92% y un máximo de 109%. La variación de fosfato fue la más irregular de todas con máximos y mínimos tanto en mareas altas como bajas (Fig. 2). El máximo de fosfato fue 0.9 μM y el mínimo 0.02 μM .

En Bahía San Quintín la temperatura y la salinidad se comportaron con variación semidiurna, con valores altos correspondiendo en general con mareas bajas y viceversa (Fig. 3). La serie de temperatura describió una onda larga con período del orden de dos semanas, con valores mayores hacia el séptimo día de muestreo. La salinidad, oxígeno, porcentaje de saturación de oxígeno y fosfato presentaron este tipo de onda larga, pero de una forma menos regular. Con relación a la onda larga, a temperaturas bajas en general correspondieron salinidades y fosfatos altos, y oxígeno bajo; pero con una mayor correlación entre la temperatura y el oxígeno, que entre la temperatura y salinidad o fosfato. La marea también presentó una tendencia, con mareas muertas los primeros cinco o seis días de muestreo, mareas vivas los siguientes nueve días y luego mareas muertas de nuevo al

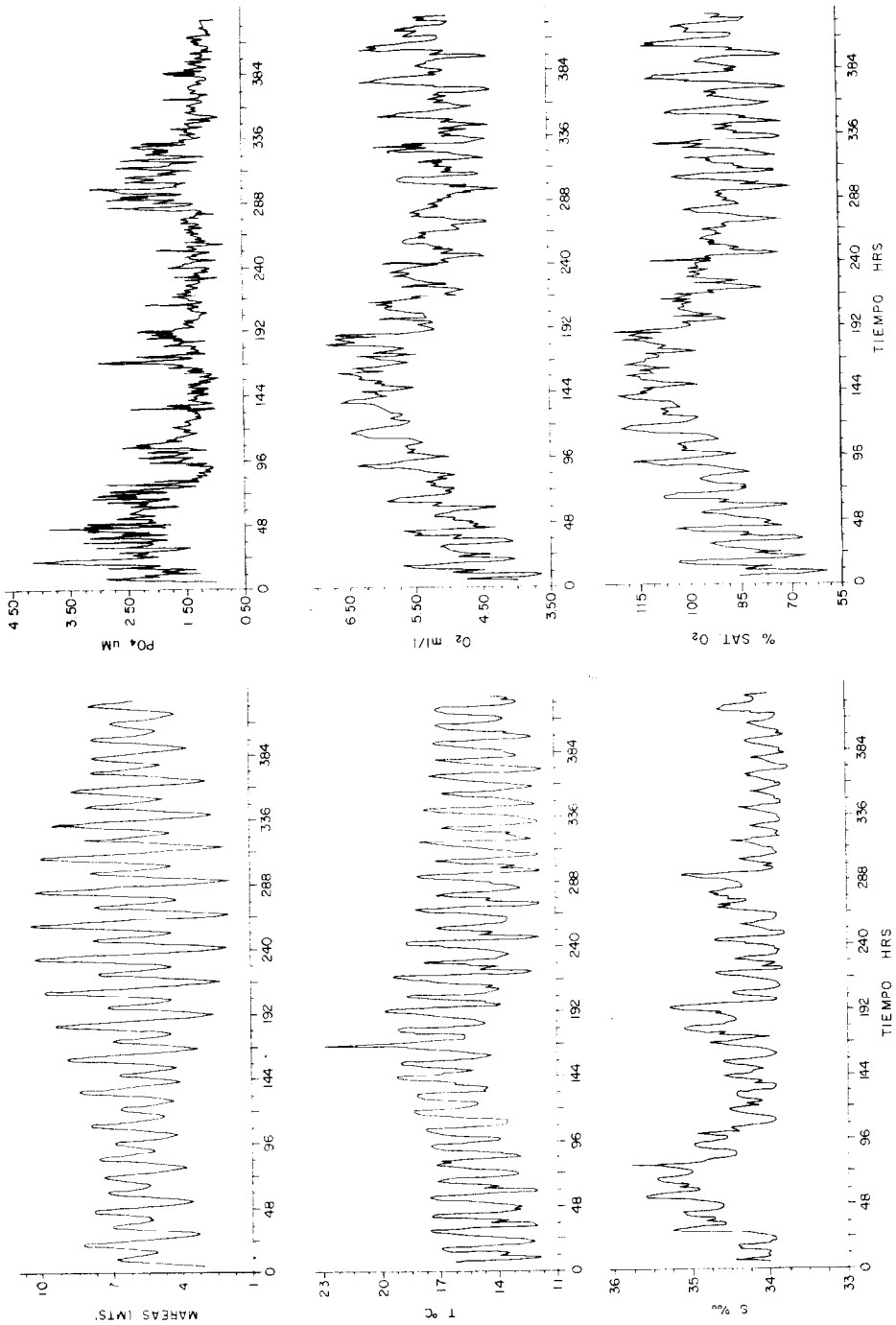


Fig. 3 Series de tiempo de Bahía San Quintín. En la abscisa los números marcan las medias noches.

SERIES DE TIEMPO EN DOS ANTIESTUARIOS

final del muestreo. El rango de salinidad fue 2.05 ‰ y el de temperatura fue 11.28 °C. De nuevo el fosfato presentó la variación más irregular, sin embargo su tendencia mostró correlación con la de salinidad, con valores altos de fosfato correspondiendo en general a valores altos de salinidad. El rango de fosfato fue 3.7 μM , con un máximo de 4.4 μM . La variación de oxígeno no mostró una correlación constante con la marea. Al principio y al final de la serie el comportamiento del oxígeno fue inverso a la marea, es decir a marea alta correspondieron valores bajos de oxígeno y viceversa (Fig. 3). Mientras que a la mitad de la serie el comportamiento de oxígeno se invirtió, con valores máximos en mareas altas. El rango de oxígeno fue 3.2 ml/l, con un máximo de 6.8 ml/l. La serie de porcentaje de saturación de oxígeno se comportó de una manera similar a la de oxígeno. Presentó un máximo de 122 % y un mínimo de 60 %.

Los coeficientes de correlación lineal se presentan en la tabla I, separadamente para el Estero de Punta Banda y San Quintín. El coeficiente de correlación más alto se presentó para temperatura versus marea en las series de Bahía San Quintín (-0.74). Los demás coeficientes son muy bajos. Se calcularon los espectros de frecuencia para cada serie, por el método directo o de transformada rápida (Cooley y Tukey, 1965). Sin embargo, los espectros no proporcionaron mayor información que la que se obtiene a simple vista. Sólo las frecuencias correspondientes a las mareas aparecen con claridad.

Se aplicó análisis de regresión lineal múltiple a los datos para expresar fosfato en función de las demás variables, separadamente a los del Estero y de San Quintín. Esto se hizo para explorar la posibilidad de obtener una ecuación empírica. Pero los coeficientes de correlación obtenidos son muy bajos, y el análisis de residuos no indicó que la regresión se podría mejorar con términos no lineales.

DISCUSIONES.

Lagunas costeras como el Estero de Punta Banda y Bahía San Quintín son verdaderas cuencas de evaporación, donde en la mayor parte del año la temperatura y la salinidad aumentan en general de la boca hacia el interior (Acosta Ruíz y Alvarez Borrego, 1974; Chávez de Nishikawa y Alvarez Borrego, 1974). Esto debería implicar una correlación estrecha entre la marea y la temperatura y la salinidad en series de tiempo obtenidas en las bocas. Sin embargo, existen diversos factores

que pueden causar variaciones irregulares de estas propiedades v. g.: calentamiento y evaporación no uniforme en el interior de las lagunas debido a una batimetría irregular, con canales y bajos; la presencia de corrientes a lo largo de la playa en el exterior de las bocas; las condiciones cambiantes en la zona oceánica adyacente a las bocas como los cambios producidos por una surgencia; el oleaje variable; la mayor turbulencia y por lo tanto mayor homogeneidad de la columna de agua en reflujo (Alvarez Borrego, Acosta Ruíz y Lara Lara, 1977). Además, la marea es semidiurna y la irradiación solar es diurna, lo que causa una asimetría entre los máximos de temperatura que corresponden a las mareas bajas y viceversa, en lagunas costeras relativamente grandes como Bahía San Quintín (Fig. 3). O bien, causa el tener un solo máximo de temperatura al día, en lagunas costeras pequeñas como el Estero de Punta Banda (Fig. 2). Esta asimetría también es clara para la salinidad y se acentúa en lagunas pequeñas. La salinidad presenta dos máximos cada 24 horas, aún en el Estero de Punta Banda, con el de la noche muy atenuado, porque la evaporación se efectúa aún con temperaturas relativamente bajas (Fig. 2). El ciclo de irradiación solar tiene un efecto marcado también en el oxígeno disuelto. Los máximos de oxígeno en el Estero de Punta Banda al mediodía o más tarde, se deben a la mayor fotosíntesis a estas horas (Fig. 2). Mientras que los mínimos se deben a la respiración.

Existen dos diferencias notorias entre las series del Estero de Punta Banda y las de Bahía San Quintín (Fig. 2 y 3). Los rangos de variación en San Quintín son claramente mayores; y las series en San Quintín presentan una tendencia, a manera de onda larga con período del orden de dos semanas, mientras que en el Estero de Punta Banda no se distinguen períodos mayores que el diurno. Esta última diferencia se debe a la presencia de surgencias intensas en la zona oceánica adyacente a la boca de Bahía San Quintín. Los mayores rangos de variación en San Quintín se debieron parcialmente a las surgencias y parcialmente a que el muestreo en San Quintín fue en verano mientras que en el Estero fue en invierno. Alvarez Borrego, Ballesteros Grijalva y Chee Barragán (1975) reportaron para la boca de San Quintín temperaturas menores en verano que en invierno, por el efecto de las surgencias. Esto causa el que haya gradientes horizontales intensos de temperatura de la boca de Bahía San Quintín hacia los interiores en verano, ya que en los interiores hay un fuerte calentamiento por irradiación solar. La temperatura mínima registrada en este trabajo fue 11.65°C y la máxima 22.93°C para San Quintín, mientras que la mínima para el Estero fue 15.32°C.

SERIES DE TIEMPO EN DOS ANTIESTUARIOS

El agua que aflora en la surgencia frente a San Quintín tiene menor temperatura, menor oxígeno, mayor salinidad y mayor fosfato, que la que se encuentra comúnmente presente en esa zona cuando no hay surgencia. Esto se nota claramente en las series generadas para la boca de la Bahía (Fig. 3). Esto tiene un impacto particular en la fertilidad de Bahía San Quintín con relación a la del Estero de Punta Banda. Las concentraciones de fosfato registradas en Bahía San Quintín son mucho mayor que las registradas en el Estero (Figs. 2 y 3), lo cual indica una mayor concentración de nutrientes en general en San Quintín. Esto causa una biomasa de fitoplancton hasta diez veces mayor en San Quintín (Millán Nuñez y Alvarez Borrego, en preparación). Estrictamente, las series del Estero y de San Quintín aquí presentadas (Figs. 2 y 3) no son directamente comparables porque fueron generadas en diferentes estaciones del año, pero los valores de concentración de nutrientes se mantienen relativamente bajos en el Estero durante el año; la concentración de fosfato cambia solamente de cerca de $0.4 \mu\text{M}$ a cerca de $0.8 \mu\text{M}$ (Sánchez Hernández, en preparación). Alvarez Borrego; Lara Lara y Acosta Ruíz (1977) reportaron valores de fosfato de 0.5 a $1.3 \mu\text{M}$ para una variación diurna en agosto de 1975, en el Estero.

En los interiores de estas lagunas costeras se presenta una fuerte remineralización de nutrientes por la actividad bacteriana en la materia orgánica que se atrapa en los pastos (Alvarez Borrego y Chee Barragán, 1976). Sin embargo, en las series aquí presentadas no se observa un aporte claro de nutrientes inorgánicos de las lagunas hacia el océano. Hay muy baja correlación entre fosfato y mareas (tabla I). En Bahía San Quintín esto es más acentuado debido a que existen valores altos de fosfato con temperaturas altas y mareas bajas por la remineralización en el interior, y existen valores altos de fosfato con temperaturas bajas y mareas altas por el aporte de las surgencias. En base a los datos presentados en este trabajo y los de Alvarez Borrego y Chee Barragán (1976) se puede concluir que en Bahía San Quintín el fosfato no es limitante para el crecimiento del fitoplancton. En cambio en el Estero de Punta Banda, cuya boca no se encuentra cercana a una zona de surgencia, el fosfato puede ser limitante. Habría que determinar otros nutrientes cuyos niveles podrían ser más limitantes para hacer una mejor comparación entre los dos cuerpos de agua, v. g.: metales traza, vitaminas, etc. Alvarez Borrego, Lara Lara y Acosta Ruíz (1977) reportaron valores de nitratos mayores en San Quintín que en el Estero, en verano. Los nitratos se presentaron algunas veces bajo el nivel de detectabilidad en el Estero.

	MAREA	T °C	S ‰	O ₂
PO ₄	-0.01 , 0.06	-0.01, -0.16	0.13 , 0.28	0.15 , -0.33
MAREA		-0.19, -0.74	-0.59, -0.44	-0.45, -0.05
T °C			0.10 , 0.47	0.48 , 0.54
S ‰				0.37 , 0.09

Tabla I. Coeficientes de correlación lineal simple. En cada caso los números de la izquierda son los coeficientes para el Estero de Punta Banda y los de la derecha para Bahía San Quintín.

Las inversiones de la correlación entre el oxígeno disuelto y la marea en Bahía San Quintín (Fig. 3), con una correlación inversa al inicio y al final del muestreo, y una correlación directa a la mitad del muestreo, se debió a la alternancia de eventos de surgencia. En los primeros y últimos días del muestreo, con una surgencia intensa, entraba a la Bahía, con las corrientes de marea, agua con bajos valores de oxígeno. En el interior de la Bahía el oxígeno aumentaba por fotosíntesis y aereación, y al bajar la marea salía agua con mayor concentración de oxígeno. En los días intermedios del muestreo, con surgencia atenuada, el agua de la zona oceánica adyacente a la boca tenía mayor residencia en la superficie y ya había sido altamente oxigenada por fotosíntesis y aereación antes de entrar a la Bahía con la marea.

RECONOCIMIENTOS.

Agradecemos a los compañeros oceanólogos Manuel de Jesús Acosta Ruíz, Gilberto Gaxiola Castro, José Rubén Lara Lara, Roberto Millán Núñez, Vidal Huitrón Barajas y Juan Manuel Rodríguez Osuna; y a los estudiantes de la Escuela Superior de Ciencias Marinas Eduardo Millán Núñez, Josué Alvarez Borrego y Esthela Elsie Millán de Alvarez; su colaboración en los muestreos. A las compañeras Sila Nájera de Muñoz, oceanólogos Elsa Gil de Gaxiola y Carolina Morales Zuñiga su colaboración en el análisis de muestras de salinidad y oxígeno. Agradecemos además la colaboración de todo el personal del CICESE que apoyó la realización del trabajo, elementos de los grupos de Mareografía, Dinámica de Lagunas Costeras, Electrónica, Telecomunicaciones, Cruceros Oceanográficos y Centro de Cómputo. Nuestro especial

SERIES DE TIEMPO EN DOS ANTIESTUARIOS

reconocimiento al espíritu de colaboración del Sr. Alfonso Vela y del Sr. Antonio Novelo por permitirnos utilizar sus moteles en San Quintín y el Estero de Punta Banda, respectivamente, a manera de laboratorio y dormitorios.

BIBLIOGRAFIA.

- Acosta Ruíz, M. J. y S. Alvarez Borrego. 1974. Distribución superficial de algunos parámetros hidrológicos físicos y químicos, en el Estero de Punta Banda, B.C., en otoño e invierno. *Ciencias Marinas (Mex)*, Vol. 1 No. 1: 16-45.
- Alvarez Borrego, S., G. Ballesteros Grijalva y A. Chee Barragán. 1975. Estudio de algunas variables fisico-químicas superficiales en Bahía San Quintín, en verano, otoño e invierno. *Ciencias Marinas (Mex)* Vol. 2, No. 2: 1-9.
- Alvarez Borrego, S. y A. Chee Barragán. 1976. Distribución superficial de fosfatos y silicatos en Bahía San Quintín, B.C. *Ciencias Marinas (Mex)*, Vol. 3 No. 1: 51-61.
- Alvarez Borrego, S., M. J. Acosta Ruíz y J. R. Lara Lara. 1977. Hidrología comparativa de las bocas de dos antiestuarios de Baja California. *Ciencias Marinas (Mex)*, Vol. 4, No. 1: 1-11.
- Alvarez Borrego, S., J. R. Lara Lara y M. J. Acosta Ruíz. 1977. Parámetros relacionados con la productividad orgánica primaria en dos antiestuarios de Baja California. *Ciencias Marinas (Mex)*. Vol. 4 No. 1: 12-22.
- Chávez de Nishikawa, A. G. y S. Alvarez Borrego. 1974. Hidrología de la Bahía de San Quintín, Baja California en invierno y primavera. *Ciencias Marinas (Mex)*, Vol. 1, No. 2 : 31-62.
- Cooley, J. W. y J. W. Tukey. 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. of Comput.* 19: 297-301.
- Dawson, E. Y. 1951. A further study of upwelling and vegetation along Pacific Baja California, México. *Jour. Mar. Res.* Vol. 10, No. 1: 39-58.

ZERTUCHE GONZALEZ - ALVAREZ BORREGO

- Gilbert, W., W. Pawley y K. P. Park. 1968. Carpenter's oxygen solubility tables and monograph for seawater as a function of temperature and salinity. Corvallis, Oregon State University. Department of Oceanography. Data Rep. No. 29. 139 p.
- Millán Nuñez, R. y S. Alvarez Borrego. 1978. Series de tiempo de pigmentos fotosintéticos en dos lagunas costeras de Baja California. (en preparación).
- Sánchez Hernández, J. L. 1978. Distribución superficial de micronutrientes en el Estero de Punta Banda, Baja California, en un ciclo anual. Tesis profesional. Ensenada, Escuela Superior de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California (en preparación).
- Strickland, H. D. y T. R. Parsons. 1967. A practical handbook of sea water analysis. Fish. Res. Bd. of Canada. Bull. 167. 311 p.

Recibido: Junio 2, 1978.