



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**  
**Instituto de Investigaciones Oceanológicas**



**VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALCALINIDAD TOTAL DURANTE  
EVENTOS DE SURGENCIA DURANTE PRIMAVERA – VERANO DE  
2005 EN BAHIA DE SAN QUINTIN, BAJA CALIFORNIA, MEXICO**



**TESIS**  
que para obtener título de  
**OCEANÓLOGA**  
presenta  
**ALEJANDRA LARA ESPINOSA**

Ensenada, B.C. Noviembre, 2007

# Variabilidad espacial de Alcalinidad Total (At) durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín, Baja California, México

## RESUMEN

En este estudio se midió la variabilidad espacial de la alcalinidad total (At) durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín (BSQ). Además, se identificaron los procesos más importantes que modificaron cambios en su concentración. Se presentan los resultados de mediciones superficiales de At, salinidad y temperatura durante eventos de surgencia ocurridos en junio del 2005. Se realizaron 14 muestreos en 21 localidades distribuidos desde la boca hasta los dos extremos internos de la bahía. Durante este periodo de muestreo, se detectaron eventos de surgencia de manera frecuente mediante mediciones de temperatura utilizando termógrafos y usando el índice de Bakun. Se observó que a partir del octavo día de muestreo (D8) ocurrió la mayor intensidad de surgencias que en combinación con las mareas vivas se detectó su influencia hasta las regiones más internas de ambos brazos en la bahía. Se encontró además, una clara variación de At atribuída tanto a procesos físicos como eventos de surgencia en combinación con el transporte realizado por mareas, así como también a procesos de evaporación que a su vez provocaron incrementos en At. Al mismo tiempo, se midieron claros descensos de At de hasta  $\sim 400 \mu\text{moles kg}^{-1}$  en el Brazo San Quintín (Brazo SQ) como consecuencia de los procesos biológicos atribuidos al consumo del ion  $\text{HCO}_3^-$  por *Zostera marina* durante la fotosíntesis. En la Boca se observó la menor variabilidad en las concentraciones de At como consecuencia de la cercanía y mayor influencia oceánica en comparación con las otras dos regiones. En la Boca el promedio en la concentración de At fue de  $\sim 2276 \mu\text{moles kg}^{-1}$  y la variación no excedió los  $15 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . En Bahía Falsa (BF), sitio de cultivo del ostión, el promedio en los valores de concentración de At fue de  $\sim 2321 \mu\text{moles kg}^{-1}$  con una fluctuación muy similar a la observada en la boca con valores de  $\sim 13 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . El caso contrario fue el observado en el Brazo SQ que se caracteriza por tener las más altas densidades de *Zostera marina*. En dicho lugar se calculó un valor promedio de At de  $2336 \mu\text{moles kg}^{-1}$  con fluctuaciones de hasta  $\sim 27 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . Sin embargo, al normalizar las mediciones de At por salinidad en la Boca y BF permitió estimar el control de la evaporación y advección sobre la variabilidad de At. Los resultados sugieren que en la Boca y BF el 80% de la variabilidad de At estuvo controlada por procesos de evaporación y advección. El 20% restante, se atribuyó al aporte de bases de origen fitoplanctónico que participaron como aceptores de protones durante las determinaciones de alcalinidad total. Cabe señalar que en BF no se detectaron efectos de disolución o precipitación sobre la At aun cuando en dicha zona se localizan los cultivos de ostión.

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALCALINIDAD TOTAL DURANTE  
EVENTOS DE SURGENCIA EN BAHIA DE SAN QUINTIN, BAJA  
CALIFORNIA, MEXICO**

**QUE PRESENTA:  
ALEJANDRA LARA ESPINOSA**

**APROBADA POR:**



---

**Dr. José Martín Hernández Ayón  
Dir. de tesis**



---

**Dr. Víctor F. Camacho Ibar  
Sinodal**



---

**Dr. Héctor Bustos Serrano  
Sinodal**

## DEDICATORIA

A mis abuelos Justino Espinosa y Lauro Lara por el legado que nos han dejado, por el sentido que han impreso en nuestras vidas

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia: a mi ma Aurora, por haber hecho caer este largo sendero dentro de los límites de la verosimilitud, por su amor y apoyo; a mi pa Rodolfo, por darme la gran fortuna de ser mi papá; a Víctor por haber hecho de la sangre que nos hermana un indescriptible placer; a Araceli, por las palabras de aliento; a mi hermanita Alma por haber revolucionado nuestras vidas

A Mathieu: por haber hecho de nuestro encuentro mucho más que un evento fortuito, por su capacidad única de aferrarse a ese único camino visible que terminó por unirnos

A los Séguin: por abrirme las puertas de su corazón sin condición alguna

A la familia que he encontrado a través de los años: a Mauricio, Tihui, Laila, Itzel, Lilian, Jacob y Estrella. Y del DF a mis grandes amigas Andrea, Paulina y Mónica

Muy especialmente: a Ikerne y Abraham por haber sido mis cómplices en esa infinita búsqueda de la felicidad, por hacerse presentes a cada instante, por toda la felicidad que representan en mi vida...por la huella imborrable que han dejado en lo más profundo de mi ser

Al proyecto SEP – CONACyT Num. 40144 por el gran apoyo a este trabajo

A Eduardo Ortíz, Leslie Aveytua, Arturo Siqueiros, Salvador Galindo, Dr. Dickson, personal involucrado en la colecta y análisis de las muestras

Al Dr. Eduardo Santamaría por proveer las imágenes de satélite empleadas en este trabajo

A Martín Hernández Ayón por la motivación tan grande que me dio a cada instante, por su estratosférica paciencia, por ser un perfecto ejemplo de quienes aman y se entregan a lo que hacen y por el placer de haberlo conocido como investigador y como persona

A mi comité de tesis: Víctor Froylan Camacho Ibar, por darme la oportunidad de participar en el proyecto y Héctor Bustos Serrano, a ambos por sus valiosos comentarios y por su disposición para mejorar este trabajo

## ÍNDICE

Resumen .....	II
Aprobación .....	III
Dedicatoria .....	IV
Agradecimientos.....	V
Índice .....	VII
Lista de Tablas.....	IX
Lista de Figuras .....	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Mareas – Surgencias.....	3
1.2 Evaporación.....	4
1.3 Procesos Biológicos.....	5
2 ANTECEDENTES.....	6
3 OBJETIVO.....	9
4 HIPÓTESIS.....	9
5 ÁREA DE ESTUDIO.....	10
6 METODOLOGÍA.....	13
7 RESULTADOS.....	16
7.1 Eventos de Surgencias.....	16
7.2 Pruebas Estadísticas.....	19
7.3 Efecto de Mareas – Surgencias sobre T°C, S y At.....	20
7.4 Evaporación.....	27

8	DISCUSIONES.....	35
8.1	Efecto de las Surgencias y Mareas.....	38
8.2	Efecto por Evaporación.....	45
8.3	Efecto por Procesos Biológicos.....	48
8.4	Efecto por Bases Extras.....	54
9	CONCLUSIONES.....	56
10	REFERENCIAS.....	58

## LISTA DE TABLAS

Tabla I. Promedio de At, Salinidad y Temperatura para las tres regiones comprendidas en la Bahía San Quintín.....	20
---	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bahía San Quintín, Baja California, México.....	12
Figura 2. Localización de los sitios de muestreo en Bahía San Quintín, B. C., México.....	15
Figura 3. (a) Índice de surgencia ( $m^3 s^{-1} (100m)^{-1}$ ) y (b) altura de marea (cm) en la zona costera de Bahía San Quintín. (c) Serie de tiempo de temperatura superficial en la estación 1. Barras oscuras en el eje <i>X</i> indican períodos de muestreo.....	18
Figura 4. (a) Serie de tiempo de temperatura superficial en la Boca, (b) serie de tiempo de salinidad en la Boca y (c) Serie de tiempo de <i>At</i> en la Boca. Barras oscuras en los ejes <i>X</i> de (a), (b) y (c) indican períodos de muestreo.....	22
Figura 5. (a) Serie de tiempo de temperatura superficial en la BF, (b) serie de tiempo de salinidad en la BF y (c) Serie de tiempo de <i>At</i> en la BF. Barras oscuras en los ejes <i>X</i> de (a), (b) y (c) indican períodos de muestreo.....	24
Figura 6. (a) Serie de tiempo de temperatura superficial en el Brazo SQ, (b) serie de tiempo de salinidad en el Brazo SQ y (c) Serie de tiempo de <i>At</i> en el Brazo SQ. Barras oscuras en los ejes <i>X</i> de (a), (b) y (c) indican períodos de muestreo.....	26
Figura 7. (a) Distribución superficial de temperatura en la Boca, (b) Distribución superficial de salinidad en la Boca, (c) Distribución superficial de <i>At</i> en la Boca y (d) Distribución superficial de <i>NAt</i> en la Boca.....	28
Figura 8. (a) Distribución superficial de temperatura en la BF, (b) Distribución superficial de salinidad en la BF, (c) Distribución superficial de <i>At</i> en la BF y (d) Distribución superficial de <i>NAt</i> en la BF.....	30
Figura 9. (a) Distribución superficial de temperatura en el Brazo SQ, (b) Distribución superficial de salinidad en el Brazo SQ, (c) Distribución superficial de <i>At</i> en el Brazo SQ y (d) Distribución superficial de <i>NAt</i> en el Brazo SQ.....	32

Figura 10. (a) Promedio y desviación estándar de la distribución espacial de At en la Boca, (b) promedio y desviación estándar de la distribución espacial de At en la BF y (c) promedio y desviación estándar de la distribución espacial de At en el Brazo SQ.....	33
Figura 11. (a) Promedio y desviación estándar de la distribución espacial de NAt en la Boca, (b) promedio y desviación estándar de la distribución espacial de NAt en la BF y (c) promedio y desviación estándar de la distribución espacial de NAt en el Brazo SQ.....	34
Figura 12. (a) Promedio y desviación estándar de temperatura en las tres cajas (b) promedio y desviación estándar de salinidad en las tres cajas, (c) promedio y desviación estándar de At en las tres cajas y (d) promedio y desviación estándar de NAt en las tres cajas. Números 1, 2 y 3 en eje X, Boca, BF y Brazo SQ respectivamente.....	37
Figura 13. (a) Imagen satelital de temperatura durante surgencia en 2005 y (b) Imagen satelital de clorofila durante surgencia en 2005.....	39
Figura 14. Comparación de dos muestreos realizados en condiciones contrastantes de mareas y surgencias. D1 (Mareas muertas – no surgencias (rojo)) y D9 (Mareas vivas - Surgencias (azul) de temperatura, salinidad, At y NAt en las tres regiones de la BSQ.....	41
Figura 15. Perfil vertical de At con datos del IMECOCAL Abril-2006.....	44
Figura 16. Variación en la concentración de clorofila con respecto a la salinidad en la Boca (rojo), BF (verde) y Brazo SQ (amarillo).....	49
Figura 17. Fotografía que muestra las praderas de pastos marinos en el Brazo SQ.....	50
Figura 18. Variación de NAt con respecto a la concentración de CID en la Boca (rojo), BF (verde) y Brazo SQ (amarillo).....	52
Figura 19. Distribución superficial de pH en el Brazo SQ.....	54

## 1. INTRODUCCIÓN

La alcalinidad total  $At$  es una medida cuantitativa de los iones con carga negativa en una cantidad determinada de agua. En aguas oceánicas son el bicarbonato  $[HCO_3^-]$ , el carbonato  $[CO_3^{2-}]$  y el borato  $[B(OH)_4^-]$  quienes tienen una mayor contribución en esta variable, sin embargo algunos autores como Millero (1992) reconocieron la importancia del resto de los donadores de protones en agua de mar ( $[SiO(OH)_3^-]$  y  $[HPO_4^{2-}]$ ) así como la contribución del  $[HS^-]$  y  $NH_3$  en aguas anóxicas, a su vez Dickson (1992) reconoció la existencia de otras bases adicionales que contribuyen al valor de  $At$  principalmente en zonas costeras, proponiendo la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} At = & [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [B(OH)_4^-] + [OH^-] \\ & + [HPO_4^{2-}] + 2[PO_4^{3-}] + [SiO(OH)_3^-] + [NH_3] \\ & + [HS^-] + [H^+]_F - [HSO_4^-] - [HF] - [H_3PO_4] \\ & + [Bases\ mayores - Bases\ menores] \end{aligned} \quad (1)$$

$At$  es una variable cuyo estudio proporciona información útil en el entendimiento de la modificación de las concentraciones del  $CO_2$  y sobre la dinámica de nutrientes en zonas costeras (Cai *et al.*, 2000).

La producción de carbono orgánico y la respiración pueden ocasionar cambios en el carbono inorgánico disuelto (CID), mientras que los procesos de calcificación y disolución de carbonato en su forma mineral, que dependen de la actividad del  $CO_3^{2-}$ , pueden ocasionar cambios en la  $At$  (Alliance for Coastal Technologies, 2005).

La medición experimental de dos de las cuatro variables pH, alcalinidad, pCO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> total, permite una aproximación al entendimiento del sistema del CO<sub>2</sub> (Brewer y Goldman, 1976).

Los componentes del CO<sub>2</sub> han sido determinados con el fin de proporcionar herramientas útiles en los estudios concernientes al sistema del CO<sub>2</sub>. La sobre o subsaturación de CO<sub>2</sub> acuoso afecta las tasas a las cuales el CO<sub>2</sub> es secuestrado o liberado en aguas naturales (Aliance for Coastal Technologies, 2005). En general se reconoce que el océano es el principal sumidero de los crecientes niveles de dióxido de carbono (Oliveira *et al.*, 2006). Esto explica el gran interés que existe actualmente hacia los estudios que contribuyan al mejor conocimiento del CO<sub>2</sub> en el agua de mar (Hernández-Ayón, 1995). Es por ello que se han llevado a cabo numerosos estudios sobre la modificación de los parámetros que afectan su composición en el agua de mar.

Pese a que las zonas costeras – donde la tierra, océano y atmósfera interactúan – cubren aproximadamente 7% ( $26 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) de la superficie oceánica, son ambientes que juegan un papel considerable en los ciclos biogeoquímicos (Gatusso *et al.*, 1998) dado que están caracterizados por gran variedad de procesos específicos tales como surgencias, frentes mareales, descargas fluviales, intercambio con sedimentos y procesos biológicos intensos (Oliveira *et al.*, 2006). Sin embargo aún se cuenta con pocos estudios que permitan entender el enriquecimiento de nutrientes y CO<sub>2</sub> desde el océano hacia ecosistemas costeros someros, particularmente en zonas donde el mar está influenciado por eventos de surgencias y procesos de mezcla (Hernández-Ayón *et al.*, 2007a).

## 1.1 Surgencias – Mareas

En la superficie oceánica donde la fuerza de los vientos produce una divergencia oceánica, el agua subsuperficial es transportada hacia la superficie. En zonas costeras esta agua adyacente, producto del fenómeno mencionado, es normalmente rica en nutrientes y CO<sub>2</sub> y pobremente oxigenada (Torres *et al.*, 2002). Sin embargo, las surgencias costeras afectan de manera indirecta a cualquier cuerpo de agua adyacente a la costa (Flores-Vidal, 2006) y en gran medida la influencia está controlada por las corrientes de marea, mismas que determinan los intercambios entre las zonas costeras y el mar abierto.

En estudios realizados en Bahía San Quintín (BSQ), por Álvarez y Álvarez (1982) y Álvarez-Borrego *et al.* (1976) se reportó que durante eventos de surgencias intensas aguas con bajas temperaturas se podían propagar hasta los extremos más internos de la bahía. Sin embargo, esto no ocurriría sin la presencia de mareas. Es decir que la propagación hasta los brazos más internos se da cuando se combinan los factores de varios días de “surgencia intensa con mareas vivas” Hernández-Ayón *et al.* (2007a).

BSQ es una laguna costera que se encuentra localizada en la costa del Pacífico de Baja California y recibe la influencia del Sistema de la Corriente de California (SCC) (Hernández-Ayón *et al.*, 2007a). El SCC está constituido por una corriente superficial con dirección al ecuador llamada Corriente de California (CC), por la Subcorriente de California (CU) que tiene un flujo subsuperficial con dirección hacia el polo y por la Contracorriente de California (CCC) que es costera y con una estacionalidad intermitente (Durazo *et al.*, 2005). Estas corrientes

cambian en intensidad a escalas estacionales e interanuales, controlando el funcionamiento, en gran medida, de las surgencias que ocurren en esta zona costera.

En la región cercana a BSQ, los eventos de surgencia son más intensos durante la primavera y el verano como resultado de la dominancia de los vientos del noroeste. Durante el periodo mayo-julio, el índice de surgencia alcanza valores máximos de aproximadamente  $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  por cada 100 m de costa (<http://www.pfeg.noaa.gov>). En esa región costera adedaña a BSQ, las mareas poseen un papel importante en la dinámica e intercambio océano-bahía transportando aguas ricas en nutrientes y carbono inorgánico hacia el interior de la bahía. Es por ello que la presencia de agua de baja temperatura y altas concentraciones de nutrientes observados en el interior de BSQ pueden ser explicadas por las corrientes de marea (Hernández-Ayón et al., 2007a).

Debido a lo poco profundo de BSQ, las mareas son el principal factor de la dinámica de las aguas en el área, siendo su corriente unidireccional en respuesta al flujo de marea (Ocampo-Torres, 1980). Las olas provocadas por la marea se propagan lentamente en las aguas someras de BF más que en Brazo SQ (Jiménez-Hernández, 2005), lo que facilita el acarreo de aguas ricas en nutrientes cerca de la boca de la bahía (Álvarez- Borrego, 2004) y de este modo las corrientes de marea propagan esta agua a través de toda la bahía.

## 1.2 Evaporación

Bahía San Quintín es un sistema hipersalino con salinidades que aumentan desde la Boca hasta los extremos internos, aún durante invierno (la temporada de lluvias), ya que los aportes de agua dulce son relativamente pequeños en comparación con la evaporación (Camacho-Ibar *et al.*, 2003).

La evaporación es uno de los procesos que modifican la alcalinidad total aumentándola. En la bahía, el tiempo de residencia estaría ligado a los días en que el volumen de agua en el interior de BSQ está expuesto a la irradiación solar, lo cual provoca un aumento en la salinidad. En varios trabajos se ha reportado que los gradientes de salinidad pueden variar en las diferentes regiones de la BSQ (Lara-Lara, 1979; Camacho-Ibar *et al.*, 2003), lo que se debe en gran medida a que el tiempo de residencia es menor en la Boca con respecto a ambos brazos y menor en BF con respecto a Brazo SQ.

### 1.3 Procesos Biológicos

El estudio de la biogeoquímica en BSQ ha cobrado gran relevancia debido a que desde la década de 1970, la maricultura es la actividad pesquera más importante en la región desde su introducción como actividad y ha crecido hasta casi establecerse en toda Bahía Falsa. En el Brazo SQ, se han hallado altas densidades del pasto *Zostera marina*, Ward *et al.*, (2004) reportaron que las praderas de *Zostera marina* dominaron >50% tanto la zona intermareal de la bahía como la submareal. Ambos factores juegan un papel de gran importancia en la biogeoquímica de la zona. Hernández-Ayón *et al.* (2007a) concluyeron que sólo en las zonas cercanas a la boca los procesos físicos son dominantes sobre los procesos biológicos.

Bahía San Quintín ha sido considerada, desde el punto de vista productivo, una región muy importante para las actividades de acuicultura. Ambos brazos de la BSQ presentan una gran porción de fondos lodosos con mucha abundancia de especies fanerógamas (pastos marinos) como: *Zostera marina*, *Spartina sp.*, *Salicornia sp.* (Plascencia-Díaz, 1980) y los mantos más densos de *Ulva ssp.* se localizan particularmente en la región de BF y en la Boca (Camacho-Ibar *et al.*, 2003, Camacho-Ibar *et al.*, 2007).

El conocimiento de los factores que afectan la productividad de una laguna costera es de suma importancia para el pleno desarrollo acuicultural de una región determinada, pues de ello depende que se obtenga un máximo rendimiento de las especies que se pretendan cultivar, sin que se sobrepase la capacidad de carga del sistema (Carrillo-Sánchez, 1985). Es por ello que los estudios que analizan la variabilidad de los factores presentes en toda la bahía pueden ser piezas importantes en el entendimiento de los procesos biológicos ocurridos en los distintos escenarios de la BSQ.

## 2. ANTECEDENTES

A lo largo del tiempo se ha recaudado gran cantidad de información y observaciones sobre los procesos físicos en BSQ. A mediados de la década de 1970 las investigaciones al respecto comenzaron a cobrar relevancia debido a la implementación de actividades de maricultura. Mediante numerosos estudios llevados a cabo en esta época se observó una estrecha relación de parámetros físicos como mareas, viento, distribución de variables fisicoquímicas y biológicas.

Entre los estudios relacionados con la hidrodinámica de la laguna costera Bahía de San Quintín sobresalieron los llevados a cabo por Ocampo-Torres (1980), Monreal-Gómez (1980) y Del Valle-Lucero (1979), que constituyeron una gran aportación a las descripciones de la dinámica y circulación de BSQ mediante modelos numéricos. En ellos se reunieron evidencias de disminución en la velocidad de corriente de la boca hacia el interior de la bahía y alta influencia de componentes no astronómicas de la marea y el viento, revelando la importancia de la marea en el intercambio de volumen.

Alvarez-Borrego y Álvarez-Borrego (1982) establecieron la participación de la marea en las variaciones de temperatura hallando una relación entre ambas y el tiempo de residencia. Martori-Oxamendi (1989) llevó a cabo un estudio más profundo en el que confirmó la influencia de la marea en el recambio de agua y la variabilidad de la temperatura, además de identificar la influencia del viento en diferentes escalas.

A partir de esos estudios se ha buscado profundizar en el conocimiento de la circulación residual en BSQ así como en la dinámica de intercambio entre este cuerpo costero y el océano Pacífico. Flores-Vidal (2006) y Angulo-Larios (2006) realizaron estudios que permitieron determinar la importancia del viento en la circulación residual y la importancia de las mareas en las corrientes cercanas al fondo.

En forma paralela, la realización de estudios relacionados con variables fisicoquímicas y biológicas en BSQ también se fue incrementando eg. Lara-Lara (1975) llevó a cabo uno de los primeros estudios sobre parámetros biológicos, con mediciones superficiales de clorofilas y Ballesteros-Grijalva (1975) efectuó mediciones superficiales de algunos parámetros fisicoquímicos, ratificando los estudios realizados por Chávez de Nishikawa y Álvarez-Borrego (1974) sobre el aumento paulatino de la salinidad hacia los extremos internos de la BSQ.

Posteriormente, Plascencia- Díaz (1980) encontró una relación entre la variación de la temperatura y la distribución de la densidad sugiriendo un papel dominante del proceso de calentamiento sobre el de evaporación. De esta manera se dió avance al conocimiento de las relaciones físico-biológicas, un ejemplo de ello fue el estudio de Jiménez Hernández (2006) en el que por primera vez se utilizó un marco de referencia de modelación numérica con el fin de

identificar la contribución de forzamientos hidrodinámicos y dinámica fitoplancton-zooplancton-nutrientes en la variabilidad de la productividad primaria del sistema.

Los estudios mencionados proporcionaron un marco más amplio para el entendimiento y descripción de los ciclos biogeoquímicos. Con base en dichos estudios Hernández-Ayón *et al.* (2007a) llevaron a cabo una descripción de los procesos biológicos que influyeron en cada uno de los escenarios biogeoquímicos existentes en BSQ con el fin de explicar la variabilidad de CO<sub>2</sub> total durante los eventos de surgencia del 2002. Aveytua-Alcázar (2002) y Camalich-Carpizo (2006), identificaron las posibles causas de generación de carbono orgánico disuelto en la región, cuyo proceso es altamente influenciado por pastos marinos.

Diversos estudios en zonas costeras han argumentado la importancia de las relaciones entre procesos biológicos y la distribución de la alcalinidad, lo que resulta sumamente útil en el entendimiento de los flujos de CO<sub>2</sub>. Entre ellos destacan:

Wei-Jun *et al.* (2000) obtuvieron datos de CID, At, pH y de nitrato de muestras colectadas en 1996 en el estuario del Río Santilla, sistema localizado al sureste de EEUU, con el fin de describir los flujos de CID y NO<sub>x</sub>. Los valores altos de At coincidieron con los máximos de CID, lo que sugirió degradación anaeróbica además de una fuente significativa de At y CID. Wei – Jun *et al.* (2002) realizaron estudios de alcalinidad total, que aunados a la medición de otros parámetros facilitaron la caracterización de la geoquímica del CID en una cuenca mareal en Carolina del Sur, con ello utilizaron la At como una de las herramientas para determinar altos flujos de CID en zonas de distintas condiciones biológicas y físicas; Wei-Jun (2003) realizó el primer estudio en el Río Mississippi, en donde midió CID y At y encontró valores de At muy elevados con respecto a otras zonas estuarinas; y, finalmente, Wang y Wei – Jun (2004) midieron

cambios estacionales e interacciones de  $\text{CO}_2$  en el sistema estuarino del Río Duplin, Isla Sapelo, Georgia, auxiliándose de At,  $\text{pCO}_2$  y CID para identificar el comportamiento estacional y sugirieron que el sistema exporta At principalmente en verano y otoño como resultado de respiración anaeróbica.

En BSQ no se ha hecho ningún intento, hasta ahora, por conocer las relaciones entre los procesos biológicos y la distribución de la alcalinidad, por lo que este estudio pretende proporcionar una visión más amplia en el entendimiento de los procesos biogeoquímicos presentes en esta región así como una herramienta más en la explicación en los cambios generados por las actividades humanas.

### **3. OBJETIVO**

El objetivo de este trabajo fue estudiar la variabilidad espacial de la alcalinidad total durante eventos de surgencia, así como evaluar e identificar los procesos principales que controlan la distribución espacial de At en la Bahía San Quintín.

### **4. HIPOTESIS**

Dado que la At superficial es una variable conservativa en el océano, se partió de que su variabilidad espacial se mantiene sin cambios en BSQ aún durante eventos de surgencia.

## 5. ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de San Quintín (BSQ), está situada al Noroeste del Pacífico Mexicano, en la península de Baja California, entre los 30°24' y 30°30' de latitud N y entre los 115°57' y 116°01' de longitud W, 300 km al sur de la frontera con Estados Unidos (figura 1). Se trata de una laguna costera con una bifurcación en uno de sus extremos y se comunica permanentemente al océano en el extremo contrario. Cuenta con un brazo conocido como Bahía Falsa y otro conocido como Brazo San Quintín.

Bahía Falsa tiene 5.6 km de largo, y consiste en una plataforma submarina poco profunda (2m). La otra rama, Brazo San Quintín, de 11.5 km de largo, se caracteriza por un fondo más irregular que el de Bahía Falsa, con un canal de 10 m en su primer tercio (Ocampo-Torres, 1980). En general, en toda la BSQ se presentan corrientes cerca del fondo del orden de  $10 \text{ cm s}^{-1}$ , con dirección preferencial hacia el interior de la bahía y moduladas principalmente por la marea (Flores-Vidal, 2006). Cerca de la superficie, las corrientes tienen magnitud  $\sim 30 \text{ cm s}^{-1}$ , dirección preferencial hacia el sur-este y son influenciadas esencialmente por el viento (Flores-Vidal, 2006).

El clima de la región es semiárido con temperaturas medias anuales del aire y del agua que varían entre los 11° y 22° C, y entre 15° y 22° C respectivamente (Ward *et al.*, 2004). Durante el verano se presentan vientos intensos del NW (Martori-Oxamendi, 1989), causando eventos de surgencia más intensos durante la primavera y el verano. Durante estos meses, el

índice de surgencia alcanza valores máximos de aproximadamente  $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  por cada 100 m de costa (<http://www.pfeg.noaa.gov>).

BSQ se considera una laguna restringida, con una sola conexión permanente con el mar y con mareas que oscilan con las del océano costero pero reduciendo ligeramente su amplitud dentro de la laguna (Angulo-Larios, 2006). Se caracteriza por tener extensas llanuras intermareales, bajos someros submareales y estrechos canales de marea. Las mareas son semidiurnas mixtas y tienen un intervalo máximo de 1.5 m. Su 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 (Flores-Vidal, 2006).

La laguna tiene dos tipos dominantes de macrovegetación 1) La flora marina que consiste en pastos marinos (*Zostera marina*), 2) Flora de marisma constituida por la halófito *Spartina foliosa* (Aveytua-Alcázar, 2002) y 3) Flora de marisma constituida por la macroalga *Ulva ssp* en la Boca y BF (Camacho-Ibar *et al.*, 2007). La vegetación marina dominante en la bahía son las extensas praderas de *Zostera marina* que cubren grandes extensiones de bajos fangosos que quedan al descubierto en baja marea, y una flora de marisma en los márgenes de la bahía sujeta al flujo de mareas (Poumian-Tapia, 1986). Progresivamente, entre la unión entre el canal principal y el Brazo SQ, el canal principal tiene márgenes con *Z. marina* y fondo blando con mayor frecuencia en su margen Este (Huerta-Tamayo, 1985).

San Quintín es un cuerpo de agua altamente productivo, con una productividad fitoplanctónica tres o cuatro veces mayor que la del mar abierto (Jiménez-Hernández, 2005), por lo que las actividades de pesca artesanal y deportiva están estrechamente ligadas a la laguna y a partir de 1976 se inician actividades acuiculturales de Bahía Falsa. Actualmente hay cultivos de

osti3n japon3s (*Crassostrea gigas*), osti3n europeo (*Ostrea edulis*), mejill3n azul (*Mytilus edulis*) y almeja manila (*Chione succinata*). Tambi3n existe extracci3n de alga roja *Geridium cartilagineum* (Jim3nez-Hern3ndez, 2005).

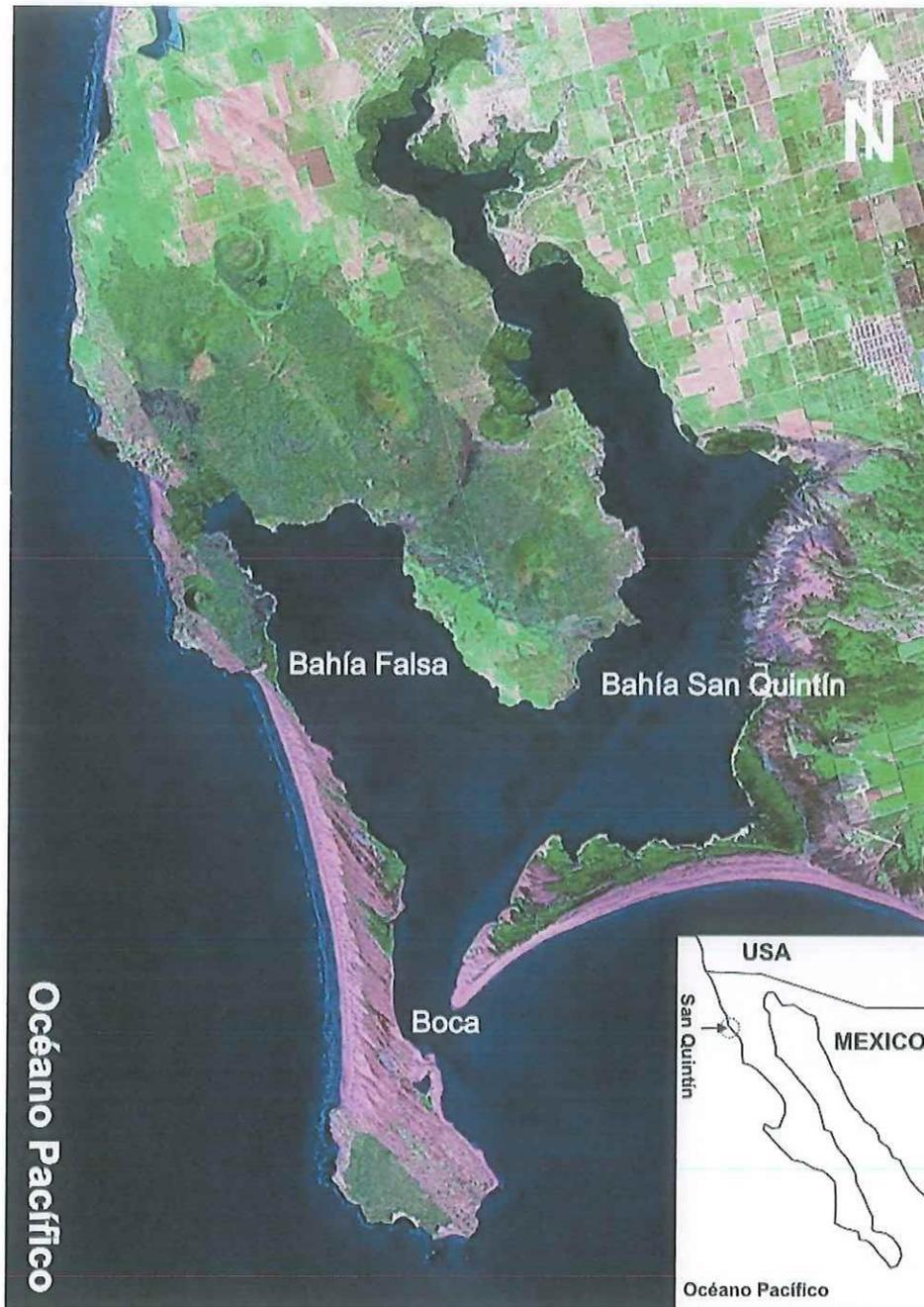


Figura 1. Bahía San Quintín, Baja California, México (proporcionada por Xavier Flores Vidal)

## 6. METODOLOGÍA

Se colectaron muestras discretas superficiales para evaluar salinidad, temperatura, pH y At durante época de surgencia en el periodo de Mayo 27 a Julio 7 de 2005. Los muestreos se realizaron en una red fija de 21 localidades de BSQ (Figura 2). El muestreo comprendió periodos de mareas muertas, parte final de mareas muertas, mareas vivas y parte final de mareas vivas. Con el fin de minimizar la variación en las propiedades del agua debido a los cambios en la altura de marea, las estaciones fueron muestreadas en una embarcación desde el océano hasta la zona interna iniciando en el pico máximo de marea durante el flujo, cada transecto se cubrió en dos días.

Se instaló un termógrafo digital HOBO, Onset Computers, EUA en la estación 1 programado para muestrear cada 15 minutos a lo largo del periodo de estudio. El índice de surgencia se obtuvo de valores promedio por día para una localidad de la zona oceánica adyacente a BSQ (<http://upwell.pfeg.noaa.gov>). La altura de marea se obtuvo utilizando el programa de pronóstico de marea para San Quintín desarrollado por CICESE (MAR. V.6.0).

La salinidad se determinó por conductividad mediante un salinómetro Autosal Guildline. Las mediciones de At fueron analizadas potenciométricamente utilizando ácido preparado en una solución 0.6 M de NaCl con una concentración de 0.100394 mol/kg-sol basado en titulación coulométrica. Se utilizaron electrodos Orión (modelo 8102BN) para analizar las muestras. El sistema de titulación consistió de una celda abierta que se aireó a través de una trampa de ascarita en cada titulación para desgasificar CO<sub>2</sub>. Los datos de la titulación fueron tratados de acuerdo a la técnica descrita por Dickson *et al.* (2003). El control de calidad de los datos se realizó titulando material certificado al principio y al final de un grupo de diez muestras con

estándares producidos por el Dr. Dickson en la Institución Scripps-UCSD, San Diego. Los datos de At en este trabajo se presentaran como Alcalinidad Total que provienen de la titulación, pero además se discutirán los datos de alcalinidad total normalizados (NAt) por salinidad con la finalidad de quitar su efecto. La normalización se llevó a cabo utilizando el promedio de los valores de salinidad, encontrados en este estudio, correspondientes a la Boca (33.8) mediante la siguiente ecuación "NAt = At × 33.8 / salinidad". Esta normalización elimina las posibles variaciones debidas a los cambios por salinidad, por lo que posibles cambios de NAt se pueden atribuir a procesos biológicos y no a cambios en la salinidad (Millero, 1996).

Se aplicaron además, las pruebas estadísticas de Kruskal-Wallis y *a posteriori* de Tuckey, ambas al 95% de confianza utilizando la salinidad con el fin determinar si eran iguales o diferentes estadísticamente las tres regiones que se señalan que existen en la Bahía de San Quintín.



Figura 2. Localización de los sitios de muestreo en Bahía San Quintín, B. C., México

## 7. RESULTADOS

En esta sección de resultados y posteriormente de discusiones se antepondrá una “D” y un número con lo que se indicará simplemente el número de muestreo realizado en la bahía. Cabe recordar que estos irán del D1 al D14 en relación al total de muestreos realizados.

### 7.1 Eventos de Surgencias:

Durante los ~40 días de muestreo se observaron dos periodos de intensificación de surgencia mediante los índices de Bakun y temperaturas (figura 3). El primero ocurrió entre los muestreos D1 – D6 (27 de mayo – 12 de junio de 2005), en el cual se registró una fluctuación entre los  $\sim 50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$  y los  $\sim 220 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$  y el segundo, considerado en este trabajo, como el periodo más intenso ocurrió a partir de D8 al D14 (19 de junio – 7 de julio), con un valor máximo de  $\sim 200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ . A partir del muestreo D10 (24 de junio), el índice de surgencia fue menor a  $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} (100 \text{ m})^{-1}$ . El evento intenso de surgencias ocurrido entre los muestreos D1 y D6 coincidió con la parte final de las mareas vivas, mientras que el ocurrido a partir de D8 a D14 justo ocurrió con mareas vivas. Esta combinación ocurrida durante D9 a D14 marcó diferencias hidrológicas entre un periodo y otro.

Los datos de temperatura de los termógrafos permitieron hacer más robusto el señalamiento anterior sobre la intensidad de los eventos de surgencia. En general se observaron tres descensos de la temperatura a lo largo del período de muestreo uno entre los muestreos D1 – D6 con valores entre  $>12.5$  y  $14^\circ\text{C}$ , otro entre D8 – D11 con mínimos de temperatura menores a  $12^\circ\text{C}$  y, el último a partir de D13 – D14 alcanzando mínimos de  $\sim 12^\circ\text{C}$ . Dichos descensos coincidieron con los valores más altos del índice de surgencia. Los altos índices de surgencia,

aunados al descenso de la temperatura del agua superficial, fueron indicativos de tres eventos de surgencia ocurridos durante el periodo de muestreo.

Los registros de temperatura de los muestreos D1 – D6, D8 – D11 y D13 – D14 los descensos de temperatura ocurrieron en respuesta a un alto transporte de agua de surgencia y al bombeo por mareas vivas ocurridas durante dichos muestreos. Por el contrario, en el muestreo D7 (16 de junio), que coincidió con el fin de la marea muerta, sin embargo, el índice fue muy bajo. Además, se observó que las temperaturas del océano en esas fechas fueron igualmente más cálidas de  $\sim 18^{\circ}\text{C}$ .

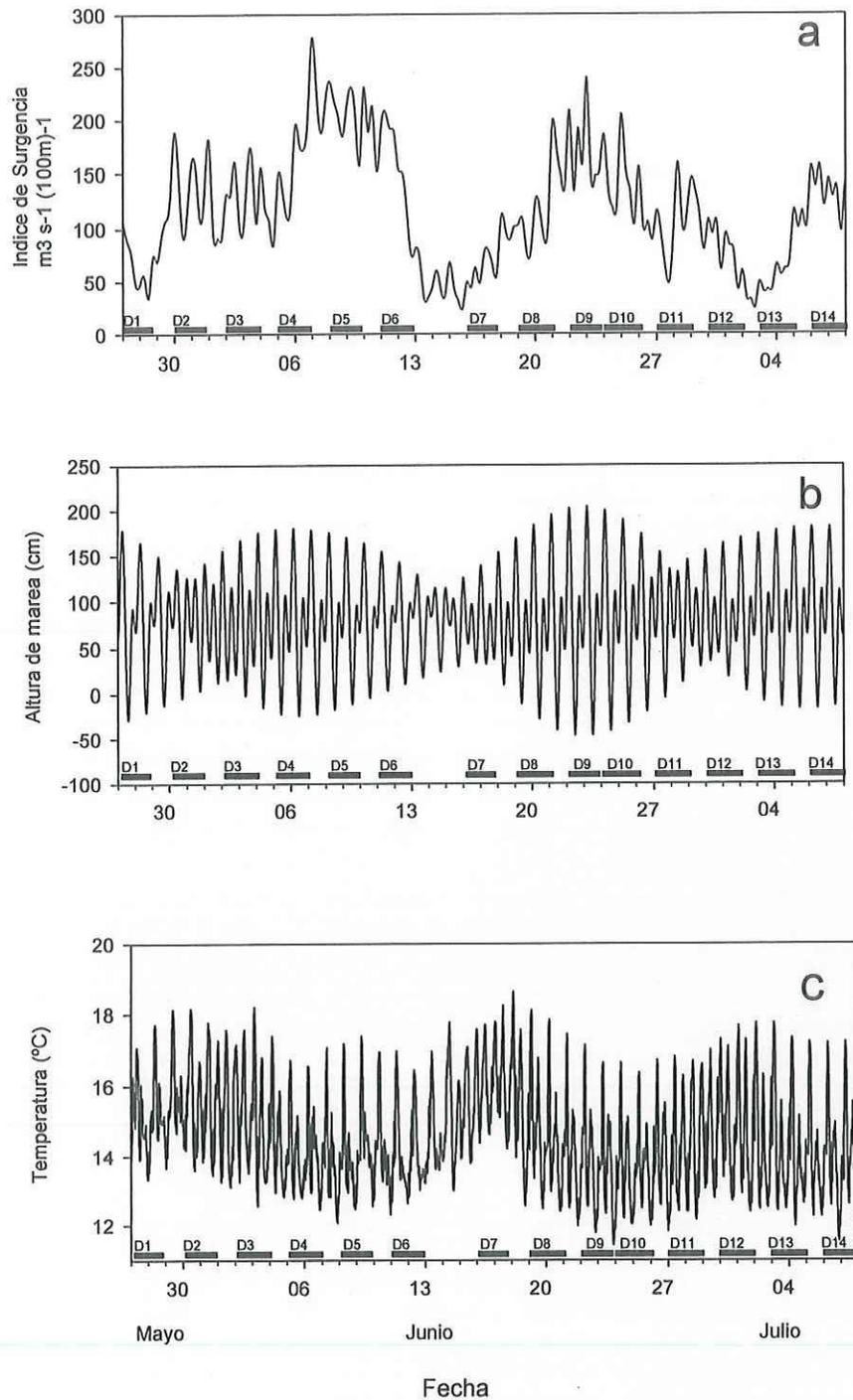


Figura 3. Índice de surgencia ( $m^3 s^{-1} (100m)^{-1}$ ) (a) y altura de marea (cm) en la zona costera de Bahía San Quintín (b). (c) Serie de tiempo de temperatura superficial en la estación 1 realizada mediante un termógrafo sumergible. Barras oscuras en el eje X indican períodos de muestreo.

## 7.2 Prueba estadística de Kruskal – Wallis y *a posteriori* de Tuckey

La prueba estadística de Kruskal – Wallis, llevada a cabo para los datos de salinidad, reveló diferencias significativas entre los valores correspondientes a la Boca, BF y Brazo SQ. Se procedió entonces a la prueba *a posteriori* de Tuckey misma que se mostró diferencia significativa entre Boca – BF, Boca – Brazo SQ y BF – Brazo SQ. Mediante este criterio estadístico y ya señalado por otros autores se realizarán señalamientos y observaciones en referencia a dichas zonas. La prueba estadística de Kruskal – Wallis se aplicó también en datos de At y reveló diferencias significativas entre los valores correspondientes a la Boca, BF y Brazo SQ. Se procedió entonces a utilizar la prueba *a posteriori* de Tuckey con la que se halló diferencia significativa entre Boca – BF y Boca – Brazo SQ, sin embargo no se halló diferencia significativa entre BF – Brazo SQ. La prueba se aplicó también para la temperatura y se encontró diferencia significativa entre Boca – BF, Boca – Brazo SQ y BF – Brazo SQ, sin embargo no se halló diferencia significativa entre BF – Brazo SQ aún cuando gráficamente se observaron variaciones mayores en el Brazo SQ.

### 7.3 Efecto Mareas – Surgencias sobre T°C, S y At

#### *Boca*

Se observaron claras diferencias en las mediciones de temperatura superficial del agua entre la Boca, BF y el Brazo SQ (fig. 4a, 5a y 6a). Adicionalmente, en la Boca la variabilidad temporal fue pequeña con 2°C en los primeros 8 muestreos y menos de una unidad en los últimos 6. BF y Brazo SQ presentaron una variabilidad temporal de ~2°C. Sin embargo en ambas regiones se observaron temperaturas más cálidas de hasta ~3°C y ~4°C respectivamente con respecto a las temperaturas de la Boca. Por lo tanto en la Boca, por su cercanía al océano, se pudo observar que el agua proveniente del exterior de la BSQ tuvo una repercusión más directa y las fluctuaciones de temperatura, mantuvieron valores muy similares a los de los registros del termógrafo oceánico en respuesta a una mayor interacción océano – Boca. Así mismo, los parámetros medidos en esta zona presentaron los valores promedio más bajos de temperatura, salinidad y At en toda la BSQ con ~15°C, ~33.9 y ~2276  $\mu\text{moles kg}^{-1}$  respectivamente (fig. 4 y tabla I). Sin embargo, se observaron claros aumentos de temperatura y salinidad durante mareas muertas, así como claros descensos durante mareas vivas.

Tabla I. Promedio de At, Salinidad y Temperatura para las tres regiones comprendidas en la Bahía San Quintín

	<b>Boca</b>	<b>Brazo SQ</b>	<b>BF</b>
At ( $\mu\text{moles kg}^{-1}$ )	2276.29	2335.67	2321.14
Salinidad	33.97	35.26	34.41
Temperatura (°C)	15.08	19.32	18.38

Fue claro que durante mareas vivas y durante eventos de surgencias, hubo un transporte de aguas de menor temperatura resultando en cambios hacia el interior de ambos brazos de la bahía. Por el contrario, con una excepción en el muestreo D7, el poco transporte que ocurrió en respuesta durante mareas muertas no sólo no acarrió aguas de menor temperatura del exterior de la BSQ, sino que dada la menor interacción con el océano la temperatura se incrementó y por consiguiente los valores de salinidad aumentaron en respuesta a los efectos de la evaporación. Los cambios en la  $A_t$  en respuesta a los factores mencionados anteriormente propiciaron que en la boca la concentración variara  $\sim 2276 \mu\text{moles kg}^{-1}$  durante surgencias hacia valores  $10 \mu\text{moles kg}^{-1}$  más altos durante mareas muertas.

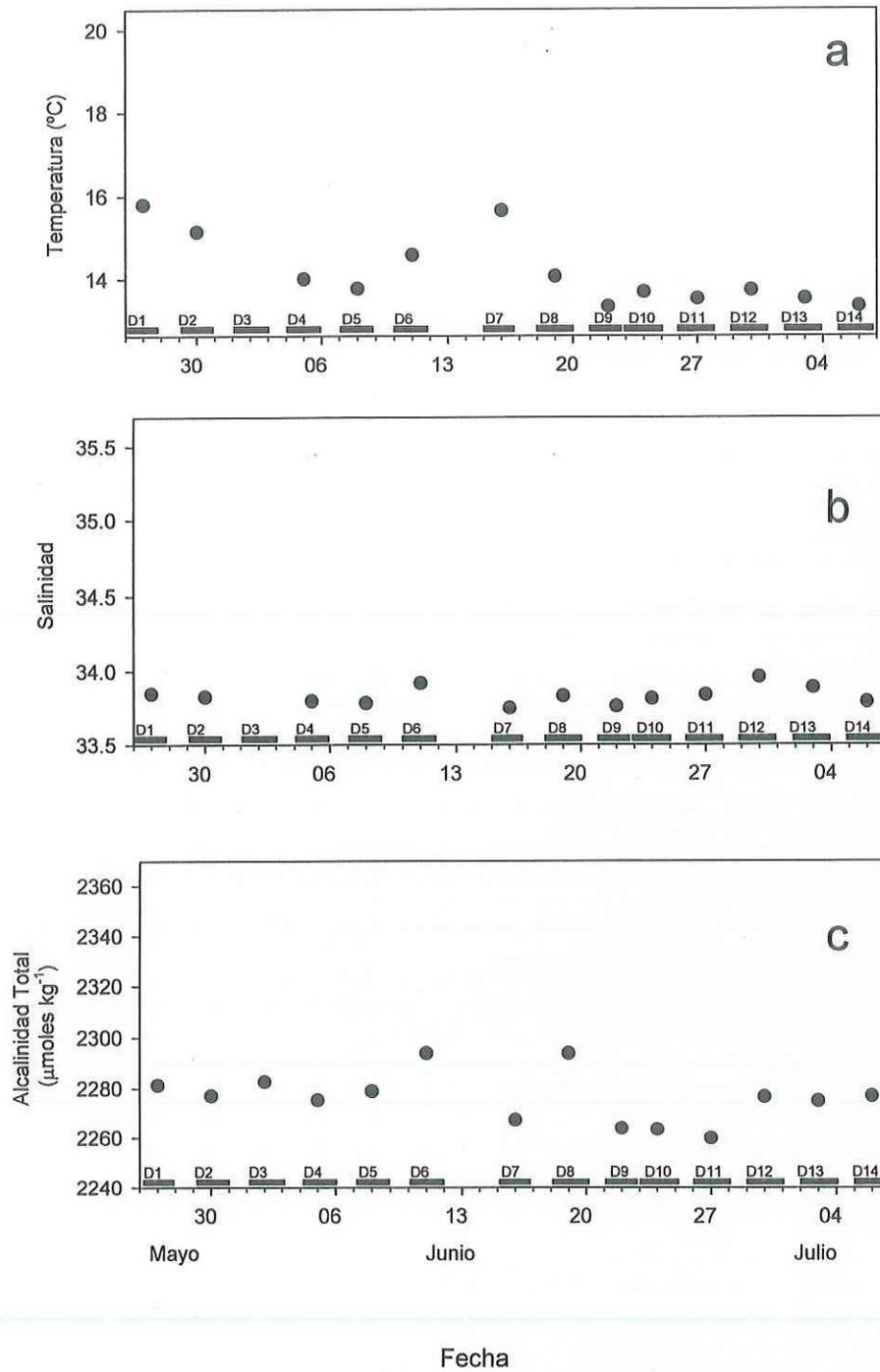


Figura 4. Promedios de datos superficiales realizados en la Boca (a) Serie de tiempo de temperatura superficial, (b) serie de tiempo de salinidad y (c) Serie de tiempo de At. Barras oscuras en los ejes X de (a), (b) y (c) indican períodos de muestreo.

## ***BF***

En BF al igual que en la Boca, se pudo observar el efecto sobre la alcalinidad y las demás variables cuando agua proveniente del exterior de la BSQ incursionó hacia el interior de BF modificando los valores (fig. 5). Sin embargo, esta región mostró tener una relación menos directa con el océano que la observada en la Boca, ya que por ejemplo, las fluctuaciones fueron mayores a los 2°C. Esto se puede observar al analizar los valores promedios en la tabla I en los que la temperatura fue ~18°C y donde la salinidad fue >0.4 unidades respecto a la boca. Cabe señalar que los valores de temperatura mostraron incrementos evidentes durante mareas muertas y decrementos durante mareas vivas. Dichos cambios también se pudieron notar tanto en la salinidad como en la alcalinidad. Finalmente se puede notar como la alcalinidad en esa zona fue mayor en aproximadamente en 40  $\mu\text{moles kg}^{-1}$  en comparación con el promedio medido en la Boca aun cuando existe una clara cercanía. Lo anterior sugiere que existieron otros procesos aparte del transporte de aguas de surgencia que modificaron las concentraciones de At en esa zona.

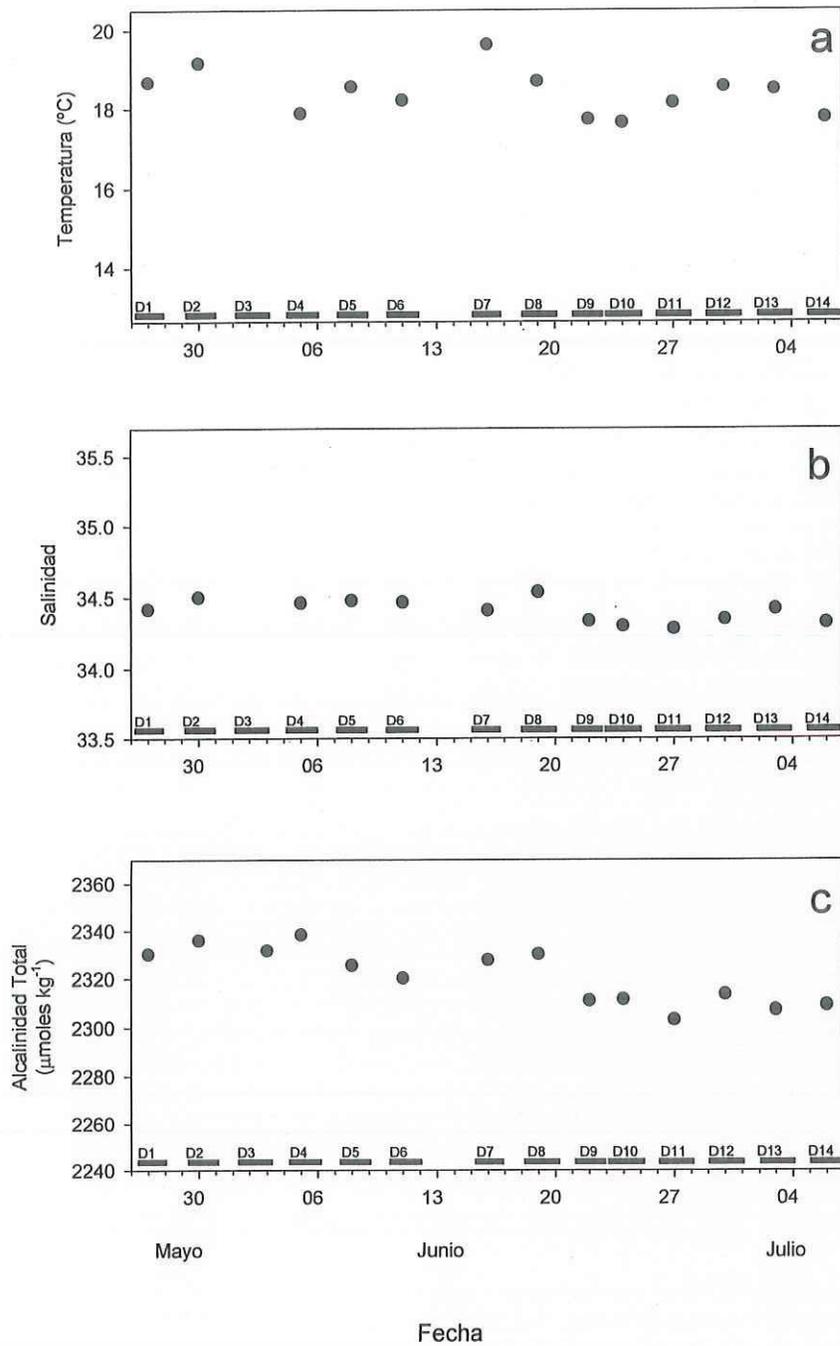


Figura 5. Promedios de datos superficiales realizados en Bahía Falsa (a) Serie de tiempo de temperatura superficial, (b) serie de tiempo de salinidad y (c) Serie de tiempo de At. Barras oscuras en los ejes X de (a), (b) y (c) indican períodos de muestreo.

## *Brazo SQ*

En el Brazo SQ a diferencia de la Boca y BF, se pudo observar una influencia mucho menor del agua proveniente del exterior de la BSQ sobre las variables medidas (Fig.6). Es claro que la ubicación geográfica de esta zona la sitúa lejos de la interacción con el océano (fig. 1). En esa zona las temperaturas fueron hasta  $\sim 4^{\circ}\text{C}$  más altas en comparación que las medidas en la boca. Esta zona se caracterizó por presentar los valores promedios más altos de temperatura, salinidad y At en toda la BSQ. Los valores promedios fueron de  $\sim 19^{\circ}\text{C}$ ,  $\sim 35$  y  $\sim 2336 \mu\text{moles kg}^{-1}$  respectivamente (tabla I) en los que se puede notar claras diferencias en relación a los valores medidos en la boca. Por ejemplo, la salinidad aumentó de manera muy clara con valores mayores en 1.3 unidades, mientras que la At fue mayor a los  $60 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . En esta zona los valores de temperatura no mostraron incrementos evidentes durante mareas muertas ni decrementos durante mareas vivas. La alcalinidad, como se mencionó, fue de  $60 \mu\text{moles kg}^{-1}$  mayor en comparación a los medidos en la boca y fue de  $20 \mu\text{moles kg}^{-1}$  mayor en comparación a BF. Se puede notar que procesos distintos al efecto por mareas-surgencias contribuyeron en los cambios de At en esa zona ante la poca interacción con el océano, sugiriendo también al igual que BF que otros procesos controlan la At en esa región.

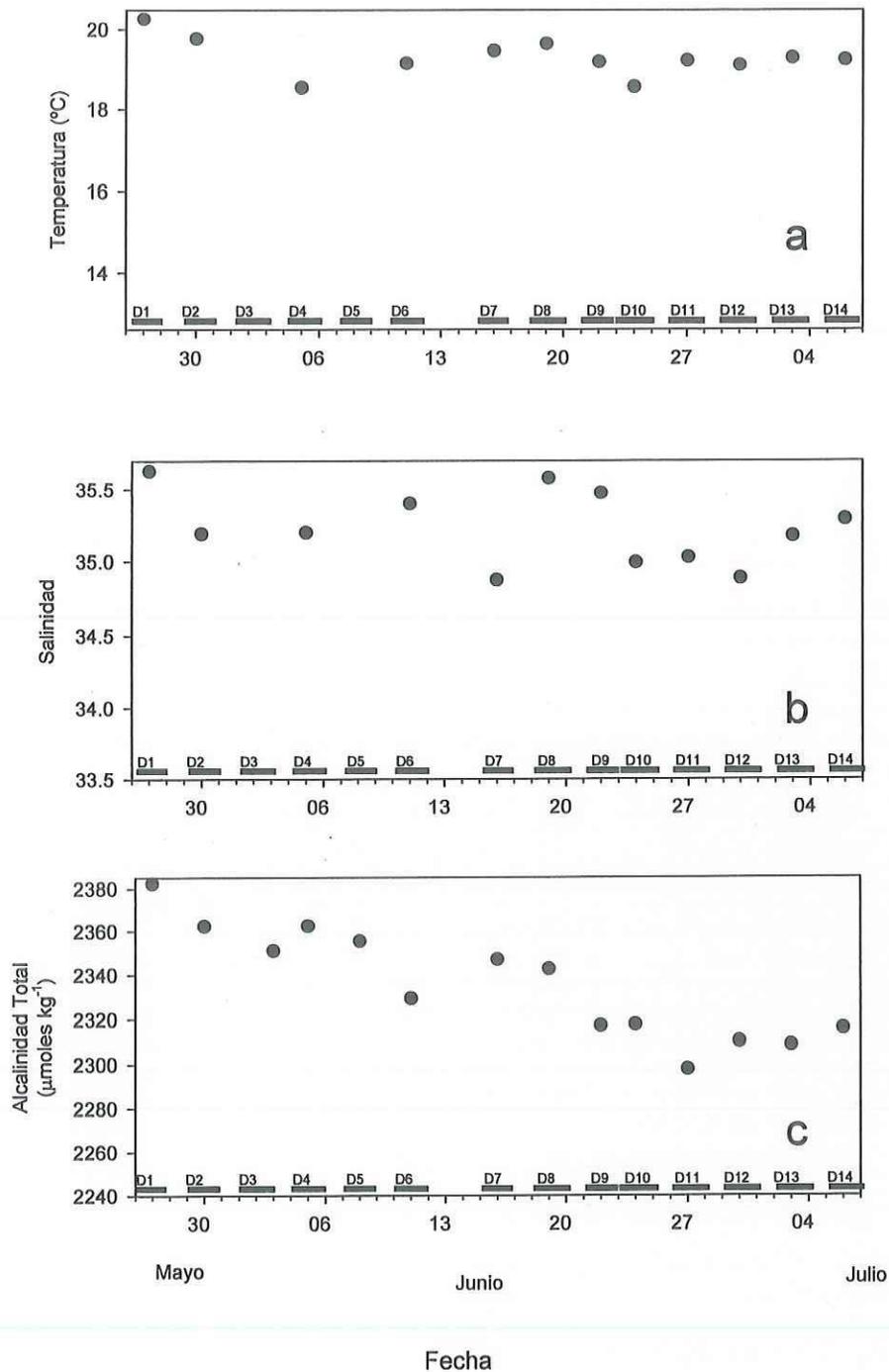


Figura 6. Promedios de datos superficiales realizados en el Brazo San Quintín (a) Serie de tiempo de temperatura superficial, (b) serie de tiempo de salinidad y (c) Serie de tiempo de At. Barras oscuras en los ejes X de (a), (b) y (c) indican períodos de muestreo.

## 7.4 Evaporación

### *Boca*

En la Boca, se observó un aumento ligero de salinidad y temperatura en el agua desde el océano hacia la parte interna del Brazo SQ (fig. 7). Dicha condición ocurrió en todos los muestreos tanto en los valores de temperatura como en los de salinidad. Se ha descrito que este comportamiento ocurre de manera normal en este tipo de cuerpos costeros de tipo mediterráneo donde no existen aportes de agua dulce por ríos. De tal forma que en los brazos más internos se incrementan gradualmente la temperatura y la salinidad por el calentamiento solar en combinación con el tiempo de residencia del agua. Por esta razón el comportamiento en los valores de concentración de  $At$  parecieron responder a los incrementos de salinidad en esta región mostrando la característica monotónica conforme se adentraba a los brazos más internos, por lo que las estaciones más cercanas a la boca no tuvieron este efecto. Al normalizar los datos de  $At$  a una misma salinidad se pudo observar que la variación que originalmente había sido de  $\sim 60 \mu\text{moles kg}^{-1}$  en las estaciones 10 y 12 se redujo a  $\sim 10 \mu\text{moles kg}^{-1}$  en los cálculos de  $NAt$  (figuras 7, 10 y 11). Esto indicó que en dicha zona el proceso físico marea-surgencia y evaporación durante este muestreo fueron factores importantes en promover las variaciones de  $At$  observadas.

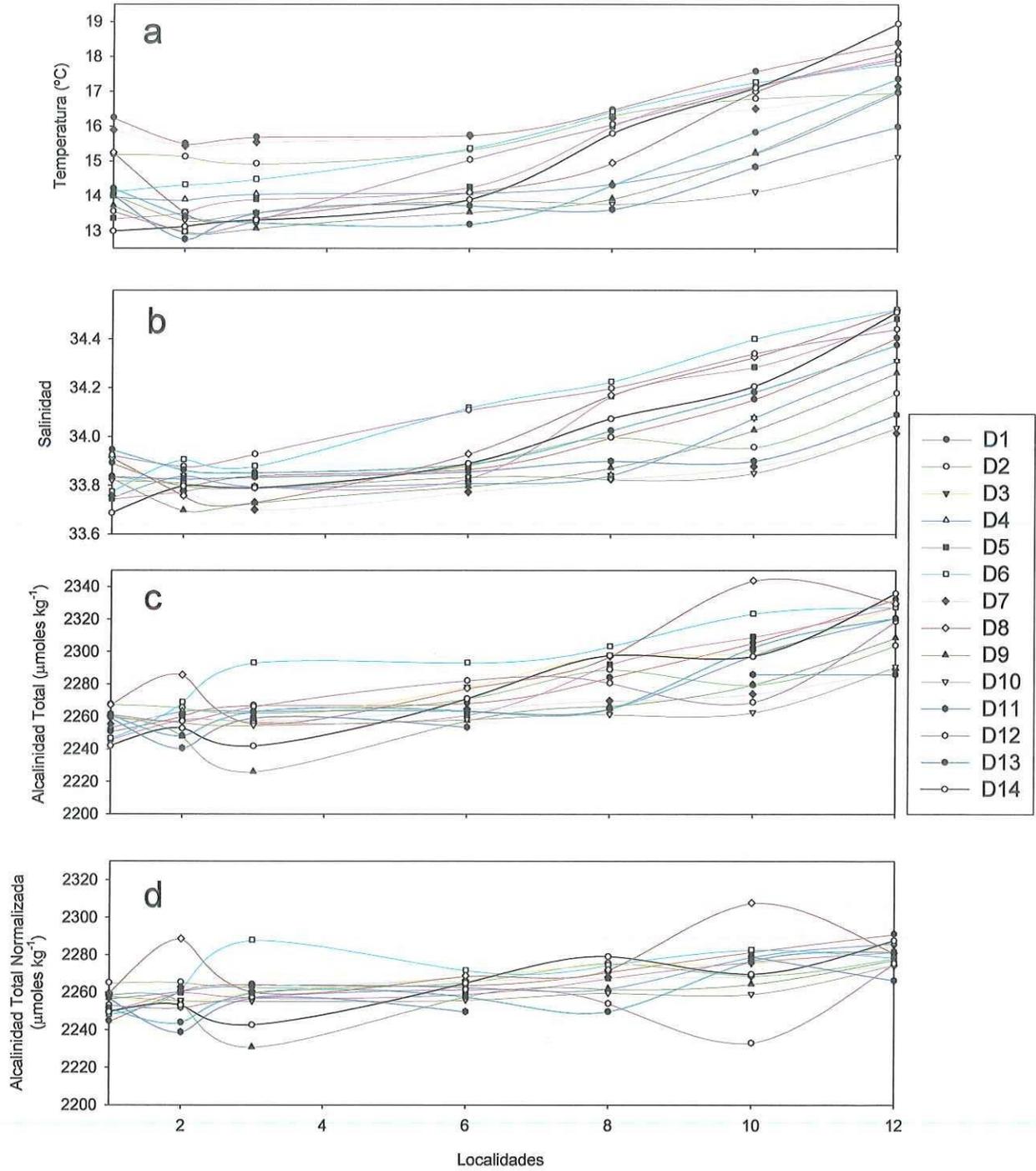


Figura 7. Distribuciones superficiales realizadas en las estaciones incluidas en la región de la Boca. (a) temperatura, (b) Salinidad, (c) At y (d) NAt.

## ***BF***

Al igual que en la Boca, pero en mayor medida en BF se observó un aumento gradual de salinidad y temperatura en el agua desde el océano hacia la parte interna de (fig. 8a y b). Dicha condición ocurrió en todos los muestreos, y tanto en los valores de temperatura como en los de salinidad se observaron incrementos hacia el interior del brazo como consecuencia de un mayor tiempo de residencia del agua y un mayor calentamiento de la misma. Sin embargo, a diferencia de la Boca, esta región se encuentra geográficamente más alejada del océano por lo que los valores promedio de dichas variables fueron más altos (tabla I). La variabilidad temporal observada en los valores de  $A_t$  pareció responder a los incrementos de salinidad en esta región mostrando la característica monotónica de incremento tanto en salinidad como en temperatura y en los valores de  $A_t$  (tabla I). Los datos normalizados de  $A_t$  para esta región fluctuaron entre los  $\sim 16 \mu\text{moles kg}^{-1}$  considerando todas las estaciones de esta región, mientras que los valores sin normalizar fueron de  $\sim 70 \mu\text{moles kg}^{-1}$  (Fig.8, 10 y 11). Lo anterior indica que más del 75% de las variaciones de  $A_t$  en BF se pueden deber a procesos de evaporación y transporte de agua por mareas. Por lo que dicha información sugiere que existe en gran medida una fuerte influencia debida a la física del sistema (Fig.8). Nótese en la figura 8 la variación espacial ocurrida con los valores más altos de  $S$ ,  $T^\circ\text{C}$  y  $A_t$  durante los muestreos D1 a D6, mientras que los valores más bajos se observaron durante los muestreos D8 en adelante. Además se puede observar que aún normalizada la  $A_t$ , se observó un aumento en  $\sim 25 \mu\text{moles kg}^{-1}$  a partir de la estación 22 en comparación a las mediciones de  $A_t$  realizadas en las estaciones cercanas a la boca (fig. 11). Dichos cambios no son relacionados a productos de intercambio por mareas o evaporación.

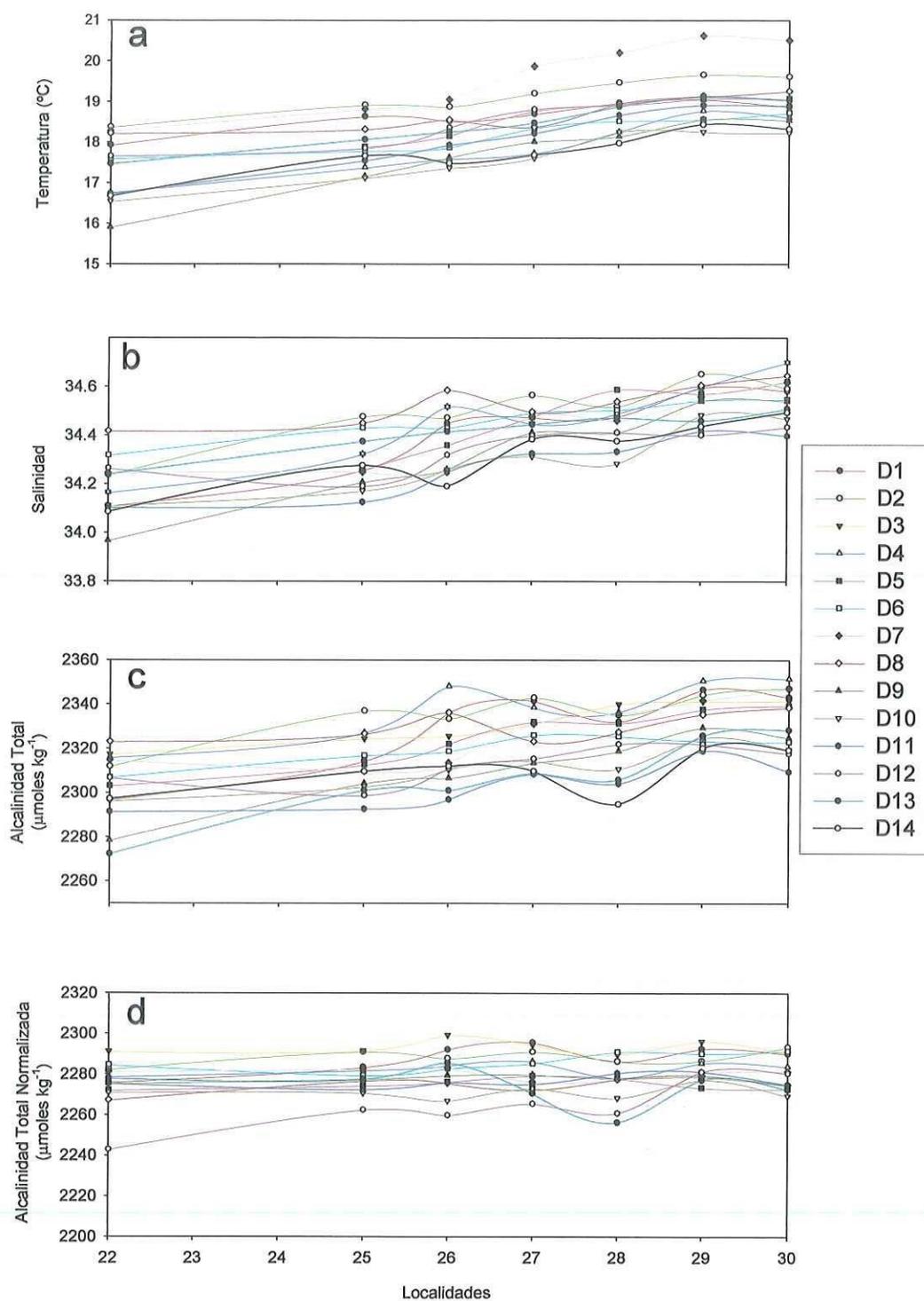


Figura 8. Distribuciones superficiales realizadas en las estaciones incluidas en la región de Bahía Falsa. (a) temperatura, (b) Salinidad, (c) At y (d) NAT.

### *Brazo SQ*

En el brazo SQ se observó un claro incremento de salinidad y temperatura en el agua desde el océano hacia la parte interna durante todos los muestreos (fig. 9a y b). Dicha región se caracteriza por tener normalmente un alto tiempo de residencia del agua mayor a los 20 días. Sin embargo, las concentraciones de At a partir de la localidad 16 se observaron variaciones de 16 a 53  $\mu\text{moles kg}^{-1}$  y con escenarios en los que en algunos muestreos la At se incrementó hacia el interior y en otras en los cuales ocurrió lo contrario (Fig.9c y 10). Pero al normalizar se encontró un escenario con una tendencia muy clara que muestra una disminución de la estación 14 a la 21 en todos los muestreos (figura 9). Además, se observó un incremento gradual de la variabilidad de NAt de estación a estación conforme se realizaron los muestreos hacia el extremo interno, de tal forma que mientras en la estación 14 la desviación estándar fue de 6  $\mu\text{moles kg}^{-1}$ , en la estación 21 fue de  $\sim 54 \mu\text{moles kg}^{-1}$  (figura 11). En esta región, solo en las estaciones 14 y 16 las variaciones de At se atribuyeron al proceso de evaporación. Sin embargo, es importante señalar que, aún normalizada la At, se pudo observar un aumento en  $\sim 25 \mu\text{moles kg}^{-1}$  a partir de la estación 14 en comparación a como entró el agua a la bahía. Lo mismo fue observado en BF e igualmente no se atribuye este incremento por ninguno de los procesos físicos aquí evaluados.

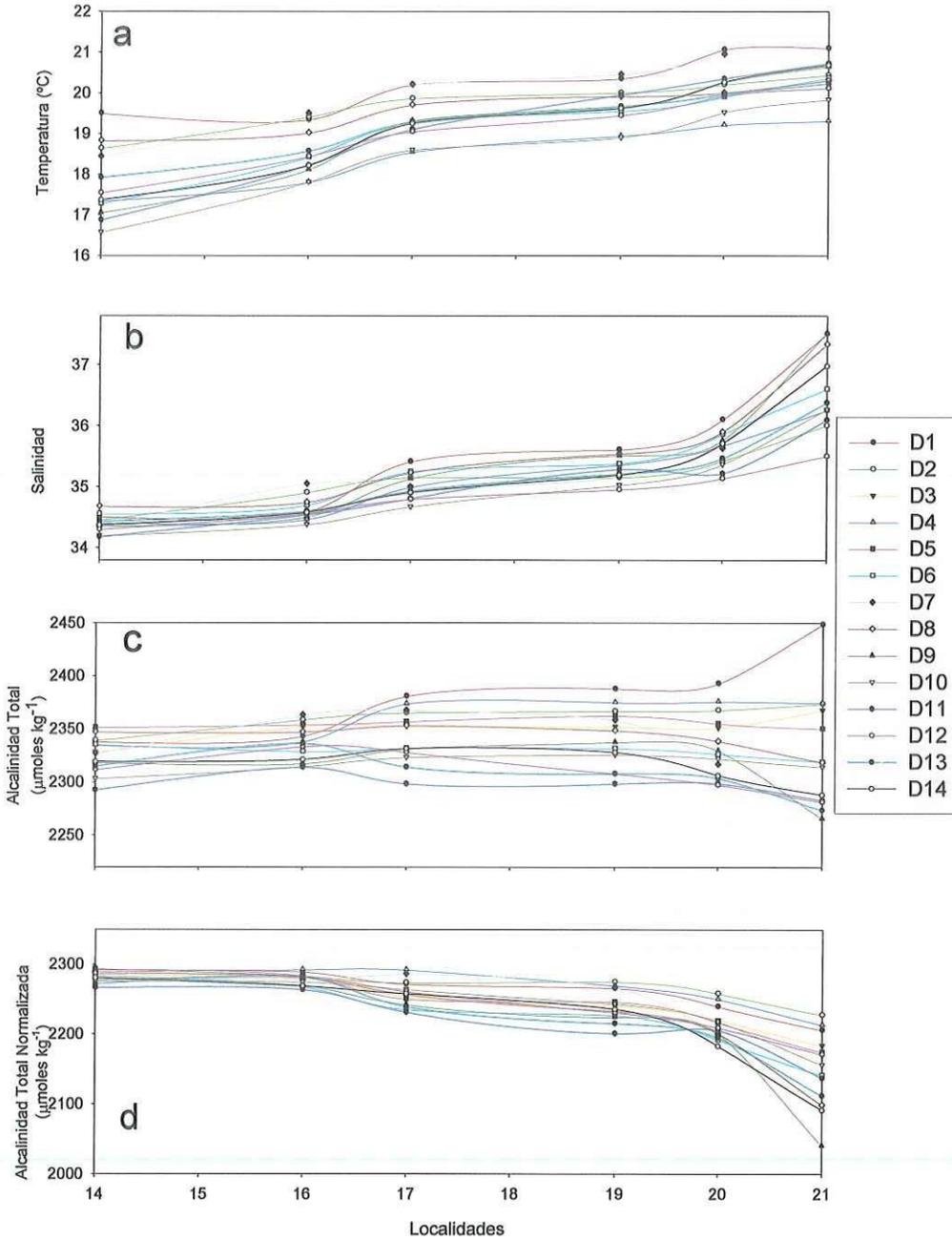


Figura 9. Distribuciones superficiales realizadas en las estaciones incluidas en la región del Brazo San Quintín. (a) temperatura, (b) Salinidad, (c) At y (d) NAt.

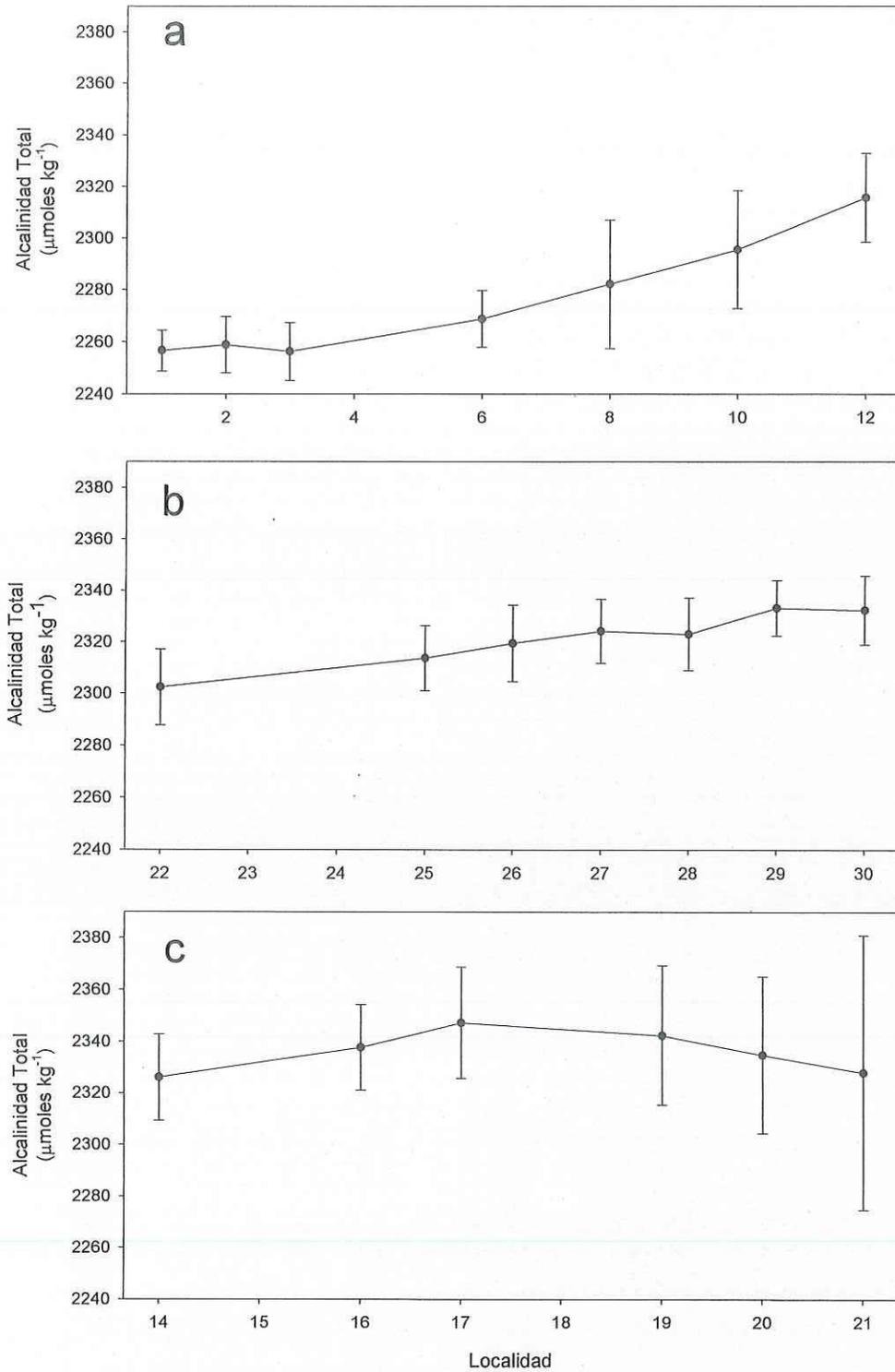


Figura 10. Distribuciones espaciales de la Alcalinidad Total promedio y desviación estándar de las regiones: a) Boca, b) BF y c) Brazo SQ.

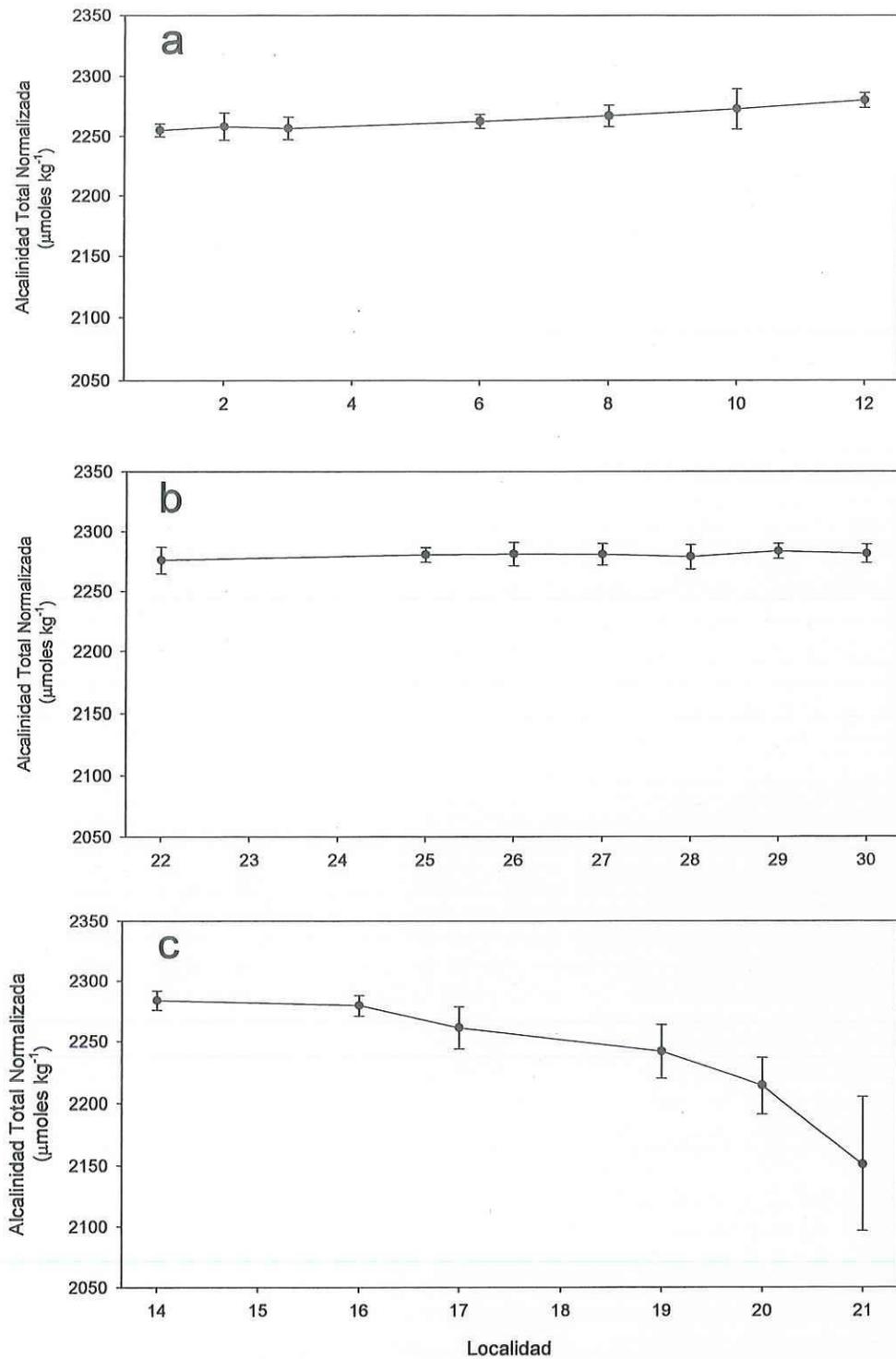


Figura 11. Distribuciones espaciales de la Alcalinidad Normalizada promedio y desviación estándar de las regiones: a) Boca, b) BF y c) Brazo SQ.

## 8. DISCUSIONES

En este trabajo se encontraron claras variaciones de At debidas a procesos físicos como el transporte de aguas de surgencia efectuado por mareas – surgencias, evaporación y biológicos provocados por el pasto *Zostera marina* al consumir  $\text{HCO}_3^-$ , en combinación con el alto tiempo de residencia de algunas regiones más internas de BSQ. En el mar abierto, los valores de At no sufren un cambio significativo bajo procesos de respiración y fotosíntesis (Hernández Ayón *et al.*, 2007a), pero procesos como la precipitación y la disolución de  $\text{CaCO}_3$  alteran las concentraciones significativamente (Smith y Key, 1975). Sin embargo, en zonas costeras existen otros procesos que adicionalmente pueden contribuir a la variación de la alcalinidad. Por ejemplo Wei – Jun *et al.* (1998) mostraron que los materiales húmicos transportados por ríos pueden contribuir significativamente en la alcalinidad de aguas estuarinas, pero este no sería el caso para la BSQ dada la ausencia de ríos. Un caso más, es el reportado recientemente por Hernández-Ayón *et al.* (2007b) y Hernández-Ayón *et. al* (*En proceso*) en los cuales se reportó que en zonas costeras como San Quintín y la bahía de San Diego se midieron incrementos de At debidos a bases orgánicas de origen fitoplanctónico.

En esta investigación se encontró una clara variabilidad en las concentraciones de la alcalinidad atribuida a los factores mencionados anteriormente. El transporte de aguas de surgencia mostró tener una influencia sobre BSQ en función de la ubicación geográfica en que se realizaron las mediciones, lo que permitió observar regiones con una variación espacial similar. Es decir, las estaciones aledañas a la boca mostraron cambios muy similares pero distintos a observaciones realizadas en el brazo San Quintín. Lo anterior fue descrito por Camacho-Ibar *et al.* (1999), quienes auxiliándose de la observación de los gradientes de salinidad propusieron el

modelo de tres cajas geográficas para BSQ. Por lo anterior se aplicaron las pruebas estadísticas no paramétricas de Kruskal-Wallis y *a posteriori* de Tuckey, utilizando la salinidad con la finalidad de definir estadísticamente tres zonas diferentes químicamente. Los resultados estadísticos de salinidad, agruparon tres zonas diferentes significativamente: 1) la Boca, que incluía las estaciones 1 a la 12, 2) Bahía Falsa (BF), las estaciones 22 a la 30, y 3) Brazo San Quintín, que incluyó las estaciones de la 14 a la 21. Nos basaremos entonces en los resultados estadísticos de salinidad para referir las cajas con el fin de describir y discutir el efecto de los diferentes procesos que promovieron cambios sobre la alcalinidad.

Las pruebas se aplicaron adicionalmente usando temperatura y alcalinidad total. Adicionalmente la figura 12 muestra el promedio y la desviación estándar de las tres variables y se pueden observar las diferencias obtenidas para cada zona. Los resultados estadísticos de temperatura marcaron diferencias significativas entre la Boca-BF y entre la Boca-Brazo SQ pero no entre BF-Brazo SQ, lo que se pudo deber a que tanto BF como Brazo SQ son muy someras por lo que la radiación solar puede influir en forma similar en la temperatura de ambas regiones. Los resultados estadísticos de alcalinidad total, al igual que los de temperatura, marcaron diferencias significativas entre la Boca-BF y entre la Boca-Brazo SQ pero no entre BF-Brazo SQ, lo que se pudo deber a que tanto BF como Brazo SQ se encuentran bajo la influencia de procesos no físicos, que se discutirán más adelante.

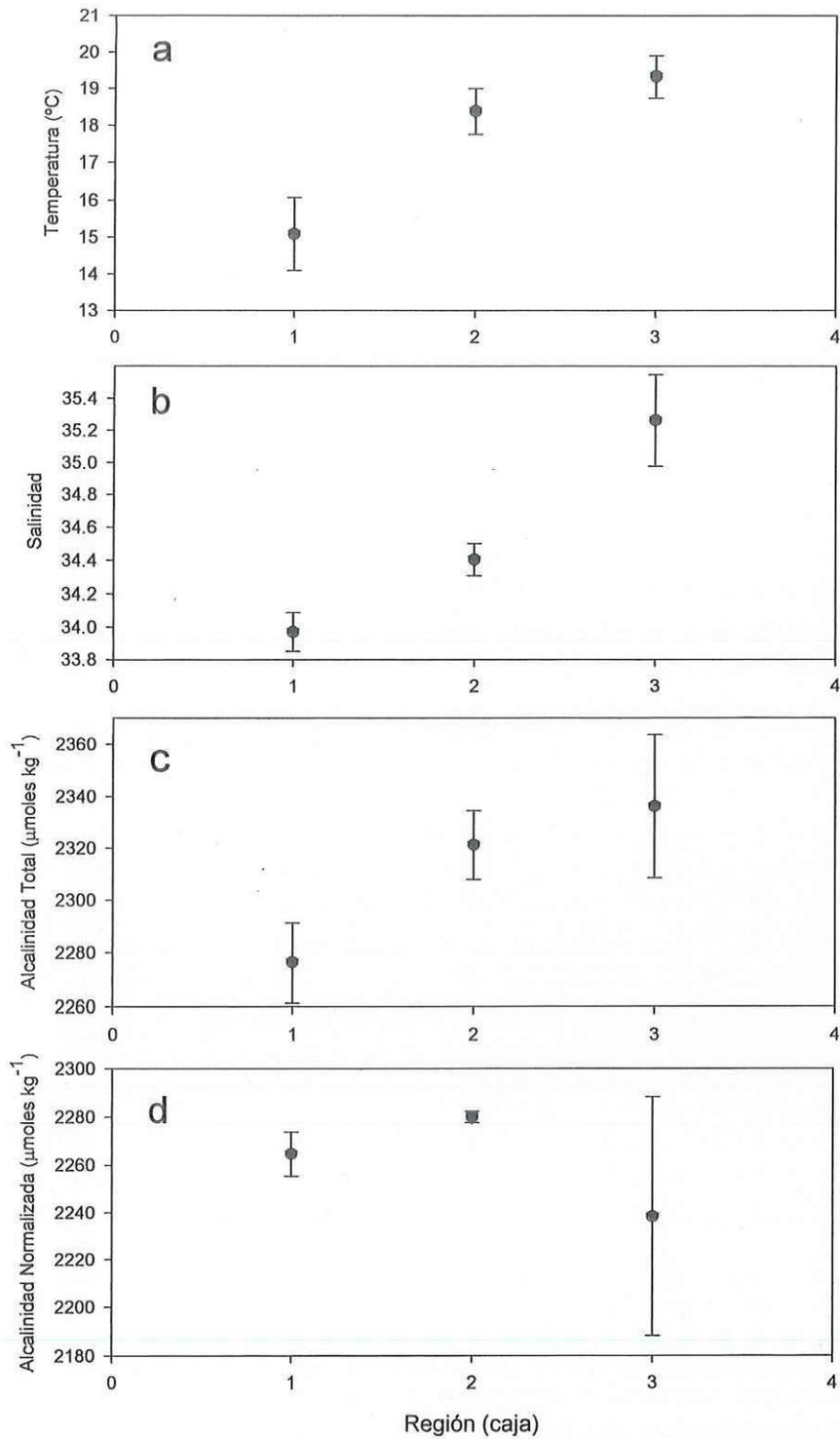


Figura 12. Promedio y desviación estándar en las tres cajas (a) temperatura (b) salinidad, (c) At y (d) NAt . Números 1, 2 y 3 en eje X, Boca, BF y Brazo SQ respectivamente.

### ***8.1 Efecto de las surgencias y Mareas:***

Los eventos de surgencia son intensos durante la primavera y el verano en la región cercana a BSQ como resultado de la dominancia de los vientos del noroeste (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). En esa región costera aledaña a BSQ, las mareas poseen un papel importante en la dinámica e intercambio océano-bahía, transportando aguas ricas en nutrientes y carbono inorgánico hacia el interior de la bahía. Es por ello que la presencia de agua de baja temperatura y altas concentraciones de nutrientes observados en el interior de BSQ pueden ser explicadas por las corrientes de marea (Hernández-Ayón *et al.*, 2007a).

La ocurrencia de eventos de surgencia generada al exterior de la BSQ en 2005 durante las fechas de muestreo, pudo ser observada mediante las imágenes satelitales de temperatura y clorofila proporcionadas por el Dr. E. Santamaría (FCM, UABC), en las cuales se puede observar la presencia de eventos de surgencia con bajas temperaturas localizada en la plataforma a ~ 70m de profundidad (Figura 13). Una vez presente el agua de surgencia en la región aledaña a BSQ, estas aguas subsuperficiales son transportadas hacia el interior de la bahía por las mareas.

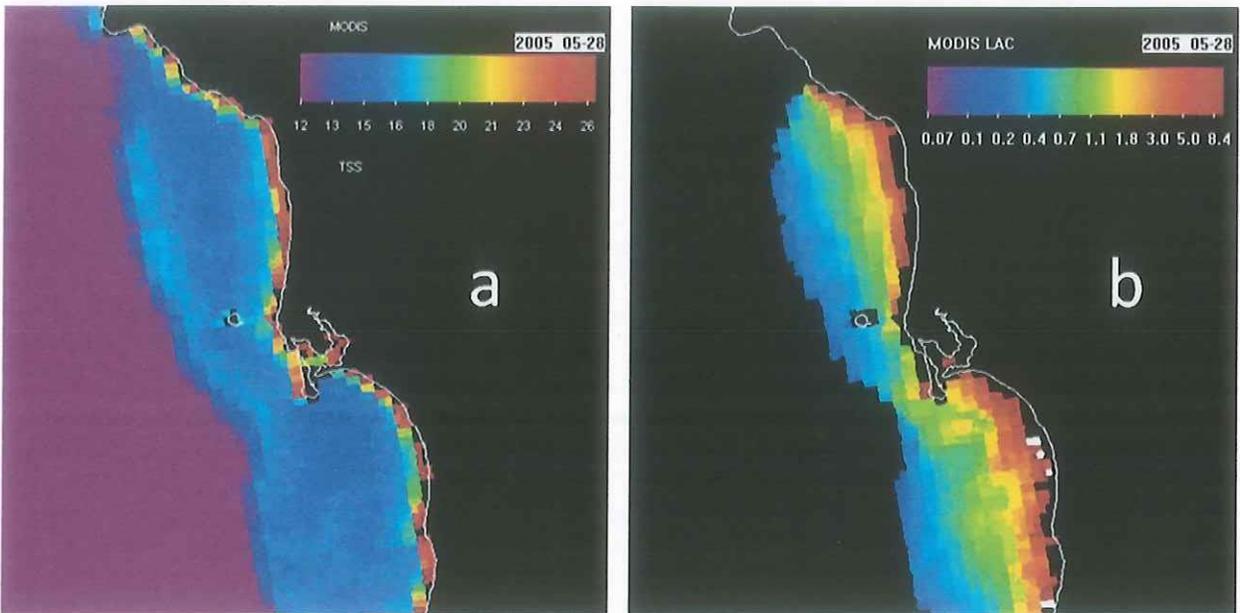


Figura 13. Imágenes satelitales generadas el 28 de mayo del 2005 durante eventos de surgencia correspondiente al D1: (a) temperatura y (b) clorofila.

En estudios realizados en BSQ, por Álvarez y Álvarez (1982) y Álvarez-Borrego *et al.* (1976) se reportó que durante eventos de surgencias intensas aguas con bajas temperaturas se podían propagar hasta los extremos más internos de la bahía. Lo anterior coincide con los resultados observados en este trabajo, en el que tanto los registros continuos de temperatura como las mediciones de At, mostraron la propagación de agua de surgencia. Sin embargo, esto no ocurriría sin la presencia de mareas. Es decir, que la propagación hasta los brazos más internos se dió cuando se combinaron los factores de varios días de “surgencia intensa con mareas vivas”. Esta situación también fue descrita por Hernández-Ayón *et al.* (2007a) quienes evaluaron el efecto de la surgencia y los fenómenos asociados a las mareas sobre la concentración de Ct, pH, temperatura, niveles de nitratos y concentración de clorofila *a* en BSQ en junio del 2002 durante diferentes estados de marea e intensidades de surgencia. Señalaron que

el mayor transporte de Ct con valores de  $\sim 2150 \mu\text{mol kg}^{-1}$  hacia la zona interna de BSQ ocurrió igualmente durante la combinación “surgencias intensas y mareas vivas”.

Con el fin de describir mejor este efecto, se seleccionaron dos escenarios contrastantes en los que se mostraron los datos del día 1 (marea muerta – No-surgencia) y D9 (marea viva – surgencia) (Fig.14).

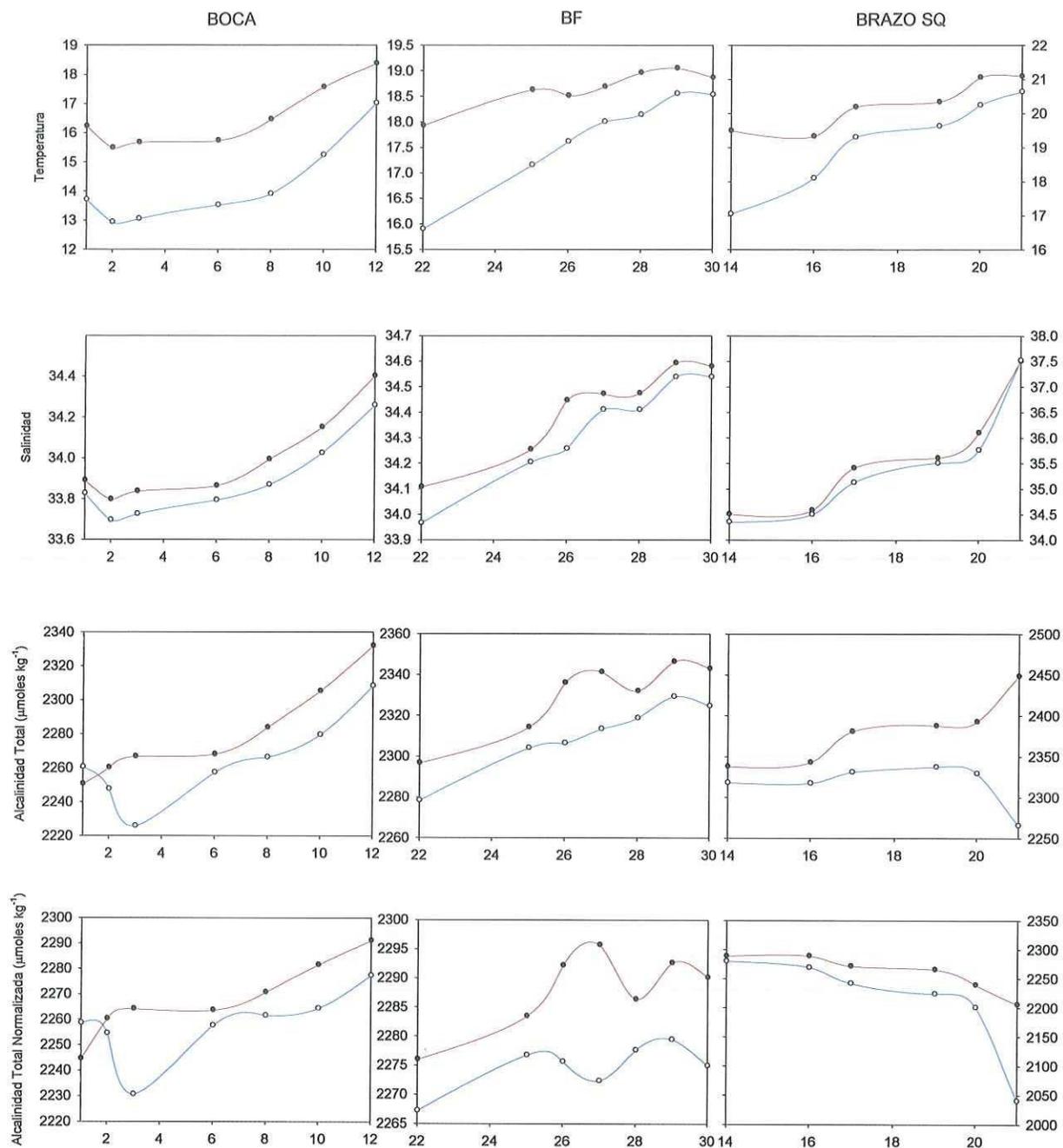


Figura 14. Comparación de dos muestreos realizados en condiciones contrastantes de mareas y surgencias. D1 (Mareas muertas-No surgencia--rojo) y D9 (Mares vivas-Surgencias --azul) de temperatura, salinidad, At y NAt en las tres regiones de la BSQ.

En la figura 14 se pueden observar contrastes entre el D1 y el D9, con concentraciones de At mayores en D1 de hasta  $\sim 80 \mu\text{moles kg}^{-1}$  entre las estaciones del Brazo SQ y de  $50 \mu\text{moles kg}^{-1}$  en BF. A continuación se describen ambos escenarios:

*La condición en D1:*

Porque hubo transporte relativamente pequeño de agua oceánica hacia el interior se realizaron las siguientes observaciones:

- 1) Un incremento de la temperatura de  $\sim 16^\circ\text{C}$  en la boca hasta  $21^\circ\text{C}$  en el brazo SQ.
- 2) Un incremento de salinidad en toda la bahía
- 3) Un incremento de la alcalinidad total en las tres regiones.
- 4) La alcalinidad normalizada muestra que hubo una remoción de la alcalinidad contrario a lo que se observa en la alcalinidad total en el interior del brazo SQ.

Mientras que

*La condición D9:*

- 1) Una disminución muy clara de la temperatura en toda la bahía en comparación con D1 con valores fluctuando de  $\sim 13$  a  $20.5^\circ\text{C}$ .
- 2) Una menor salinidad de  $\sim 0.1$  unidades en toda la bahía con excepción de la estación 21.
- 3) Una menor alcalinidad total fluctuando entre  $10$  y  $30 \mu\text{moles kg}^{-1}$ .
- 4) La alcalinidad normalizada remarca las diferencias por salinidad entre D1 y D9.

En la zona correspondiente a la Boca se detectó agua con características adquiridas en el interior de la BSQ durante el D1 con dos características particulares: la primera es que no hubo evento de surgencias en esos días de muestreo, y segundo, el muestreo se realizó durante mareas muertas (figura 3). Lo que se puede resumir en un nulo transporte de agua del océano hacia el interior de la bahía. Este muestreo se caracterizó por presentar las condiciones de mayor temperatura, salinidad y alcalinidad total en comparación del resto de los muestreos producto la evaporación ocurrida ante el pobre intercambio con el océano adyacente.

El caso fue totalmente contrario durante el muestreo de D9, donde no sólo se realizó el muestreo durante surgencias intensas, sino que cinco días antes ya había iniciado el evento con un índice de Bakun fluctuando entre 100 y 150  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} (100)^{-1}$ . Adicionalmente, el muestreo coincidió con el periodo de mareas vivas. La alcalinidad total medida en este muestreo en la boca fue de  $\sim 2260 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . Dicho valor, si fuera producto de la surgencia, debería encontrarse en aguas profundas y posteriormente emerger a la superficie en respuesta a la surgencia. En la figura 15 se presenta un perfil generado a partir de datos de alcalinidad total del crucero de IMECOCAL de Abril-2006. En dicho perfil se puede observar que la concentración de At de  $\sim 2260 \mu\text{moles kg}^{-1}$  se sitúa alrededor de los 100m de profundidad. Juárez-Colunga (2007) realizó transectos perpendiculares de densidad en frente de BSQ durante abril del 2006 y mostró que agua profunda de  $\sim 150 \text{ m}$  puede ser transportada a la superficie durante eventos de surgencia. El D9 fue entonces la mejor combinación para que se diera el intercambio de propiedades químicas entre la BSQ y el océano adyacente. En este muestreo se combinaron varios días previos de surgencias intensa que coincidieron en conjunto con mareas vivas. El caso

contrario totalmente fue durante D1 en que no había surgencias previas y coincidió con mareas muertas (Fig.3 y 14). BF presentó condiciones muy similares a las descritas en la boca, sólo con moderados incrementos en temperatura, salinidad y At debidos a un mayor tiempo de residencia.

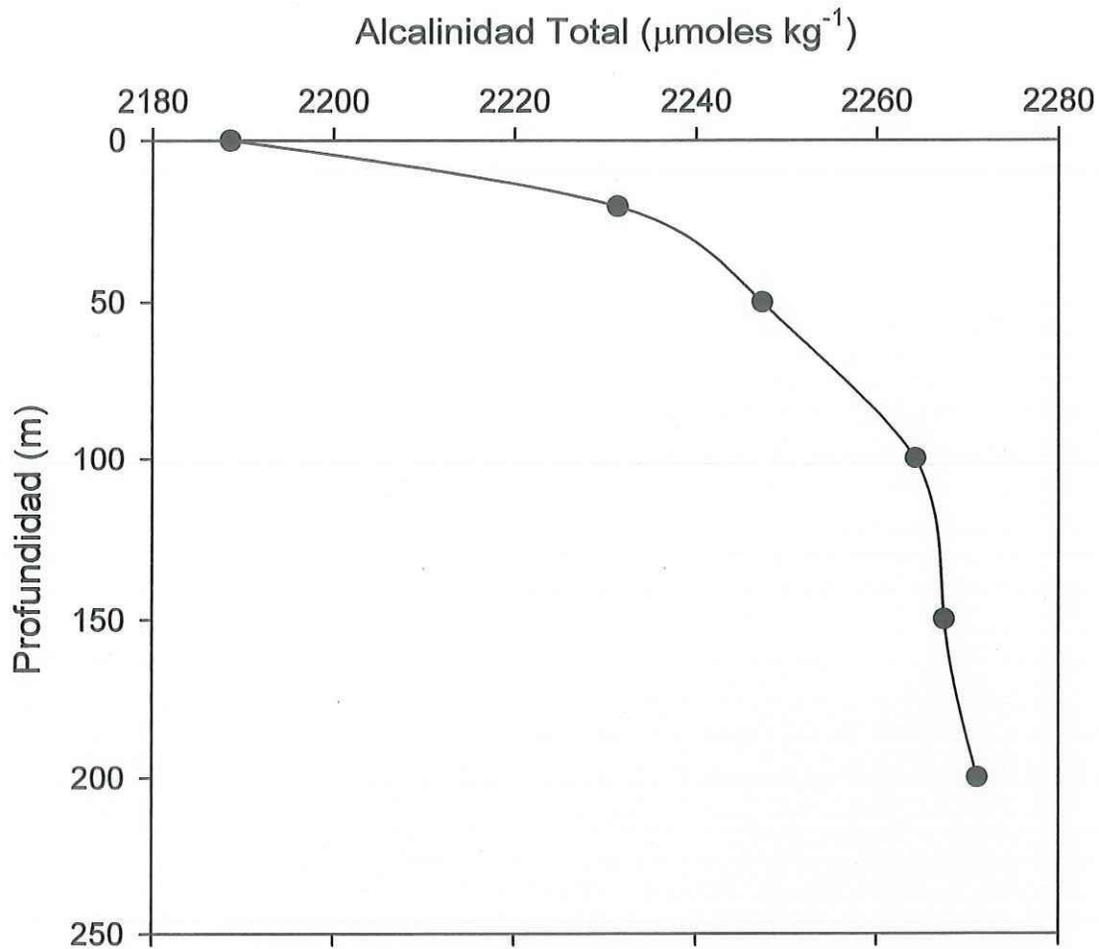


Figura 15. Perfil vertical de At con datos del IMECOCAL Abril-2006.

Finalmente, en las localidades 14 – 21, comprendidas por Brazo SQ, que geográficamente se encuentran más lejanas del océano con respecto a la Boca y BF, el intercambio de agua con el océano es más limitado. Sin embargo, se observó propagación de la surgencia durante D9. No obstante, las concentraciones de At transportadas por la surgencia, no

llegaron a ser las mismas que las medidas en la Boca. Esto sugiere que existen procesos distintos que de alguna forma están modificando la At en esa región de la bahía. Este mismo patrón fue observado en el Brazo SQ durante el periodo de surgencia del 2002 (Hernández-Ayón *et al.*, 2007a).

### ***8.2 Efecto por Evaporación***

La evaporación es uno de los procesos que modifican la alcalinidad total aumentándola. En la bahía, el tiempo de residencia estaría ligado a los días en que el volumen de agua en el interior de BSQ está expuesto a la radiación solar, lo cual provoca un aumento en la salinidad. En este trabajo no se hicieron cálculos de los tiempos de residencia, sin embargo, en varios trabajos se ha reportado que en la Boca, BF y Brazo SQ los tiempos de residencia son aprox. 3, 7 y 20 días respectivamente (Camacho-Ibar *et al.*, 1999; Aveytua-Alcazar, 2002; Camacho-Ibar *et al.*, 2003). Lo anterior se puede entender mejor si se observa la poca variabilidad mostrada en las mediciones de temperatura, salinidad y At en la región de la boca en comparación a lo medido en el Brazo SQ (Figs. 4, 5 y 6). La figura 12 adicionalmente muestra la mínima variación en los datos de la boca representada por los bajos valores de desviación estándar. El contraste, como se mencionó anteriormente, se muestra en los datos medidos en el Brazo SQ en que la variación fue muy clara tanto en temperatura como en salinidad (figuras 7 y 9).

Con los elementos mencionados anteriormente lo que se esperaba encontrar era lo siguiente: 1) Poco efecto de la evaporación sobre la alcalinidad en la región de la boca dado que el tiempo de residencia es bajo; 2) Un mayor efecto de la evaporación sobre la alcalinidad hacia

los extremos internos, tanto en BF como en el brazo SQ, y 3) Debido a que el tiempo de residencia es mucho mayor en el brazo SQ, la tasa de evaporación es mayor y por lo tanto en esa zona se esperaba una mayor modificación de las concentraciones de At como resultado de un mayor incremento de la salinidad.

El efecto de la evaporación sobre At se puede observar en la figura 10, en la cual se nota que mientras en la boca el valor promedio fue  $\sim 2260 \mu\text{M}$  al incursionar hacia el interior de ambos brazos en las estaciones 22 y 14, la At se incrementó en 40 y 70  $\mu\text{moles kg}^{-1}$  respectivamente, lo que se reflejó en el aumento de la salinidad (Fig.4, 5 y 6). El efecto de la evaporación sobre At puede ser eliminado normalizando los datos a una salinidad predeterminada. Por ello se aplicaron cálculos de normalización en las mediciones a una salinidad de 33.84 representativo de la boca y los resultados se muestran en la figura 11.

Lo más sobresaliente en los cálculos de NAT (figura 11) fue la poca variación de NAT observada tanto en la Boca como en BF al quitar el efecto por salinidad en At. Esto indica que el factor evaporación fue muy importante sobre la variación de At en ambas regiones. Por ejemplo, en la boca la variación fue originalmente de  $\sim 60 \mu\text{moles kg}^{-1}$  y se redujo a  $\sim 10 \mu\text{moles kg}^{-1}$ , mientras que en BF At fluctuó  $\sim 70$  y se redujo a  $\sim 16 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . Se puede resumir que, en ambos casos, el 80% de la variabilidad en esas dos regiones fue debida a la evaporación y el porcentaje restante debería explicarse por otros procesos. La poca variabilidad en los valores de At en la boca y BF, es el resultado de un mayor intercambio con el océano (bajos tiempos de residencia) por lo que el evaluar el papel de la evaporación indica que en ambos casos la evaporación influyó de forma importante sobre la variabilidad de At. Sin embargo, al comparar los valores de At en la boca con las concentraciones medidas en BF (Fig. 11), se observó que en

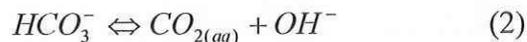
esa región hubo un incremento de  $\sim 25 \mu\text{moles kg}^{-1}$  observado en la est. 22 (Inicio de BF). Dicho incremento se mantuvo con un valor promedio más alto en comparación con la boca con  $\sim 15 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . Dicha diferencia no puede ser explicada como resultado de la evaporación.

En el Brazo SQ se observó un escenario muy distinto a lo observado en las regiones anteriores cuando se comparan At vs NAt. A partir de la localidad 16 las concentraciones con el efecto de salinidad muestran una alta variabilidad producto de la evaporación. Se observaron variaciones de 16 a  $53 \mu\text{moles kg}^{-1}$  y con escenarios en los que, en algunos muestreos, la At se incrementó hacia el interior y otras en los cuales ocurrió lo contrario (Fig.9 y 10). Pero al normalizar se encontró un escenario con una tendencia muy clara que muestra una disminución de la estación 14 a la 21. Además, se observó un incremento gradual de la variabilidad espacial de NAt de estación a estación conforme nos acercábamos al extremo interno, de tal forma que mientras en la estación 14 la desviación estándar fue de  $6 \mu\text{moles kg}^{-1}$ , en la estación 21 fue de  $\sim 54 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . En esta región las variaciones de At por el proceso de evaporación se explicaron solo en las estaciones 14 y 16 sin embargo, al igual que en BF, se observó un incremento de alcalinidad más alto en comparación con la Boca con un valor de  $\sim 25 \mu\text{moles kg}^{-1}$  inicialmente en ambas estaciones. Posterior a estas estaciones se observó el claro descenso en NAt lo que indica que debido a un proceso distinto al de evaporación la alcalinidad fue removida. Como se explicó anteriormente, en esta región el tiempo de residencia fue de  $\sim 21$  días (Camacho-Ibar *et al.*, 1999) y por lo tanto, debido que la renovación de agua es más lenta, se esperaba un mayor efecto de la evaporación sobre la At. Pero los resultados de este trabajo indican el poco control que tuvo la evaporación en esta zona sobre esta variable.

### 8.3 Efecto de Procesos Biológicos

Los valores de  $A_t$  en la superficie del océano no sufren cambios y las concentraciones permanecen constantes durante los procesos de respiración y fotosíntesis (Zirino y Lieberman, 1985), pero procesos como la precipitación y la disolución de  $\text{CaCO}_3$  cambian sus concentraciones significativamente (Smith y Key, 1975).

La reacción 2 representa de manera general como el pH de la superficie del agua de mar puede incrementar sus valores durante el consumo de la especie química  $\text{HCO}_3^-$  por organismos fotosintetizadores sin producir un cambio en la  $A_t$  (Zirino y Lieberman, 1985). La estequiometría de la reacción indica que hay un consumo de un anión pero como producto se producen los mismos moles de aniones, de esta forma se mantiene un balance de cargas y la alcalinidad total no cambia.



En los resultados de este estudio las concentraciones más altas de clorofila se midieron tanto en la boca como en BF. Diversos estudios han señalado que BSQ importa material orgánico desde el océano vía las mareas dado que los florecimientos de fitoplancton ocurren aledaño a la boca de BSQ (Aveytua-Alcázar, 2002; Camacho-Ibar et al., 2003). Durante la incursión de aguas provenientes del exterior de la bahía hacia la Boca como a BF, se midieron variaciones de clorofilas debidas a la influencia del agua rica en nutrientes provenientes de eventos de surgencia con aumentos de hasta  $\sim 10 \text{ mg m}^{-3}$  (figura 16). En la misma figura se observa que, en Brazo SQ,

la clorofila se mantuvo en concentraciones de  $\sim 3 \text{ mg m}^{-3}$  sin los incrementos observados en la Boca y BF, esto se debió a su lento intercambio con el océano, por lo que cambios en At debidos al efecto del fitoplancton serían mucho más bajos que los que pudieran ocurrir en las otras dos regiones. Como se explicó, el efecto del fitoplancton no debería cambiar la At en base a las consideraciones antes mencionadas, sin embargo existe un efecto potencial que podría modificarla en presencia de altas concentraciones de clorofila y esto será explicado en la siguiente sección.

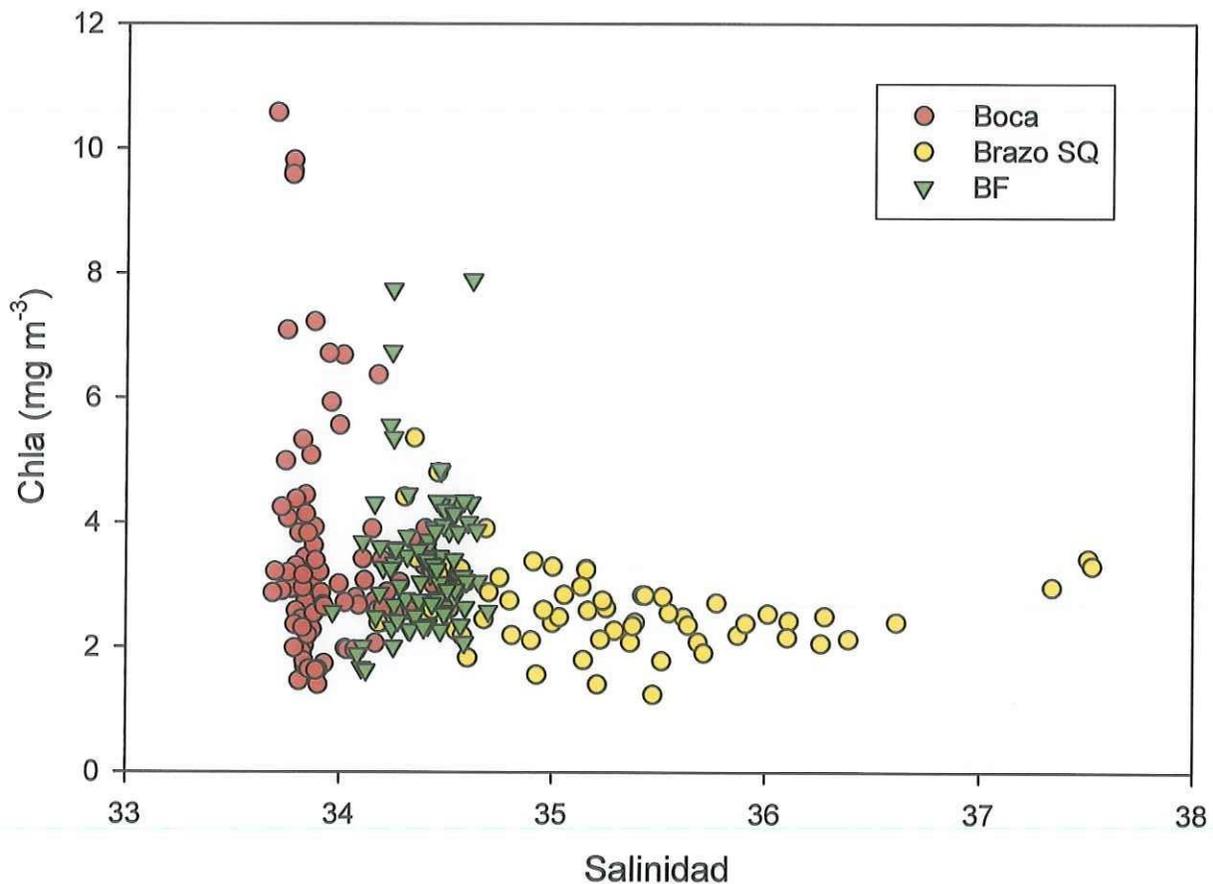


Figura 16. Variación en la concentración de clorofila con respecto a la salinidad en la Boca (rojo), BF (verde) y Brazo SQ (amarillo).

BF se caracteriza por ser un brazo altamente productivo en el que se practica el cultivo de ostión, por lo que los procesos de precipitación de carbonato potencialmente podrían causar cambios en la At, pero adicionalmente en ella se localizan áreas de pastos marinos. Plascencia-Díaz (1980) reportó la presencia de *Zostera marina*, *Spartina sp.* y *Salicornia sp.* en la BF y en el Brazo SQ. Sin embargo, se sabe que es en el Brazo SQ donde se localizan las densidades más altas de *Zostera marina*. Se ha reportado que los mantos de *Z. marina* en el Brazo SQ dominan >50% tanto en la zona intermareal de la bahía como en la submareal (Ward *et al.*, 2004). En la figura 17 se muestra una fotografía aérea en la que se observan las altas densidades de pasto marino en esa zona.



Figura 17. Fotografía que muestra las praderas de pastos marinos en el Brazo SQ.

Con el fin de comprender los procesos que ocurren en la BSQ, se elaboró una figura utilizando los datos calculados de NAt versus los datos normalizados de NCID (figura 18), en ambas variables se trató de quitar el efecto de la salinidad sobre las concentraciones. En los valores de la Boca y BF, se observó un incremento en la At de  $\sim 16 \mu\text{moles kg}^{-1}$  dentro de la bahía hacia BF y después de la estación 14 hacia el interior del Brazo SQ. Se observan cambios de CID de no más de  $\sim 200 \mu\text{moles kg}^{-1}$ . Hasta este punto podemos hacer notar que hubo disminución en algunos valores de CID pero no se observan grandes cambios en la At que sugieran se deban a procesos de disolución o precipitación. Esto se concluye dado que de haber disolución se observarían aumentos tanto de CID como de At. El aumento entonces de solo At de  $\sim 16 \mu\text{moles kg}^{-1}$  sugiere que este cambio se debe a otro proceso. Por lo tanto en BF durante este periodo de muestreo no se observaron efectos de disolución o precipitación ante la presencia de los cultivos de ostión en BF. Lo anterior puede ser producto del poco tiempo de residencia en la bahía.

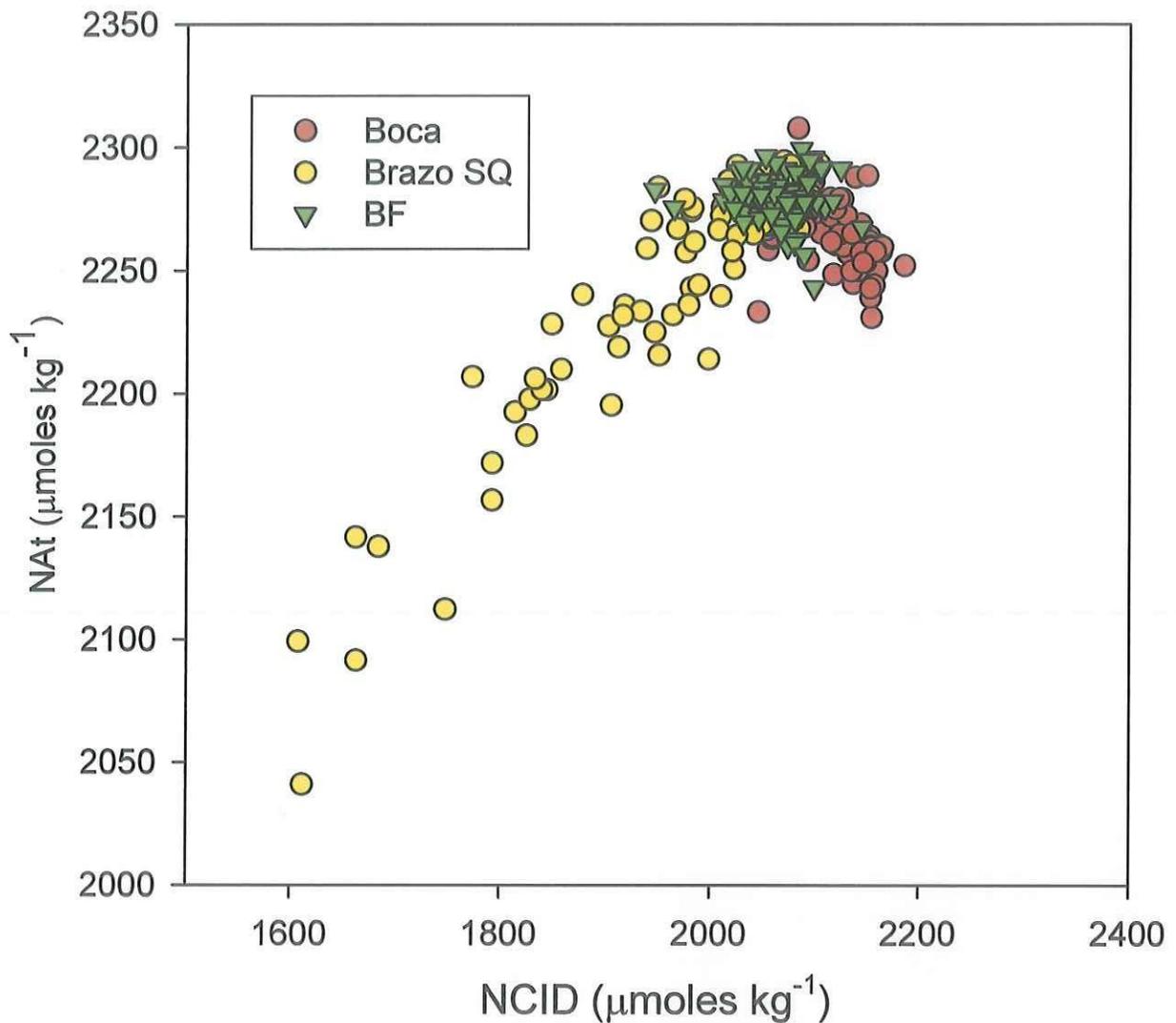


Figura 18. Variación de NAT con respecto a la concentración de CID en la Boca (rojo), BF (verde) y Brazo SQ (amarillo).

Por su parte Brazo SQ mostró un escenario totalmente distinto ya que se midieron cambios de At mayores a  $200 \mu\text{moles kg}^{-1}$  y hasta  $\sim 400 \mu\text{moles kg}^{-1}$  de CID (Fig. 18). Como se mencionó esta zona se caracterizó por las bajas concentraciones de clorofila (fig 16), indicando que el fitoplancton no fue la causa de los decrementos en la CID. Cabe señalar que esta zona se

caracteriza por tener las más bajas concentraciones de nutrientes de toda la bahía (Camacho- Ibar *et al.* (2003).

La pregunta que surge es ¿a qué se debió la disminución de CID y de At? Se mencionó anteriormente la presencia de las más altas densidades de *Zostera marina* en dicho brazo. Se ha argumentado por diversos autores la afinidad de *Z. marina* (Beer y Rehnberg, 1997) y *Ulva sp.* (Dreschler *et al.*, 1993) por la asimilación de  $\text{HCO}_3^-$  del medio marino mediante diversos mecanismos que a continuación se enumeran: 1) deshidratación extracelular de  $\text{HCO}_3^-$  para formar  $\text{CO}_2$  mediante la enzima anhidrasa carbónica (Smith y Bidwell, 1989; Björk *et al.*, 1992, 1993); y 2) consumo directo de  $\text{HCO}_3^-$  (Cook *et al.*, 1986; Dreschler *et al.*, 1993; Beer, 1994), citados por Beer y Rehnberg, (1997). En el primer caso, los valores de At permanecerían constantes al mantenerse el balance de cargas explicado en la ec. 2, mientras que el segundo mecanismo permitiría explicar el porqué la clara disminución en la concentración de At. El segundo mecanismo fue reportado para *Zostera sp.* por Hellblom *et al.* (2001), quienes utilizaron una solución amortiguadora con la que encontraron que el mecanismo de consumo de  $\text{HCO}_3^-$  se realiza mediante un bombeo de protones hacia la pared celular acidificando el  $\text{HCO}_3^-$  llevándolo hasta  $\text{CO}_2$  y así incorporándolo hacia el interior de la célula. Sin embargo en la conclusión de esta investigación se reporta que la incorporación de  $\text{HCO}_3^-$  se podía llevar de forma paralela utilizando tanto mediante la protonación como mediante la enzima anhidrasa carbónica en ambientes naturales donde el pH fuera  $\sim 8.1$ . En este trabajo la figura 19 muestra que el pH el Brazo SQ fluctuó por arriba de este valor y concuerda con las condiciones descritas por Hellblom *et al.* (2001). Por lo tanto los cambios simultáneos observados tanto en CID como en la At en el brazo SQ se atribuyen a dicho proceso.

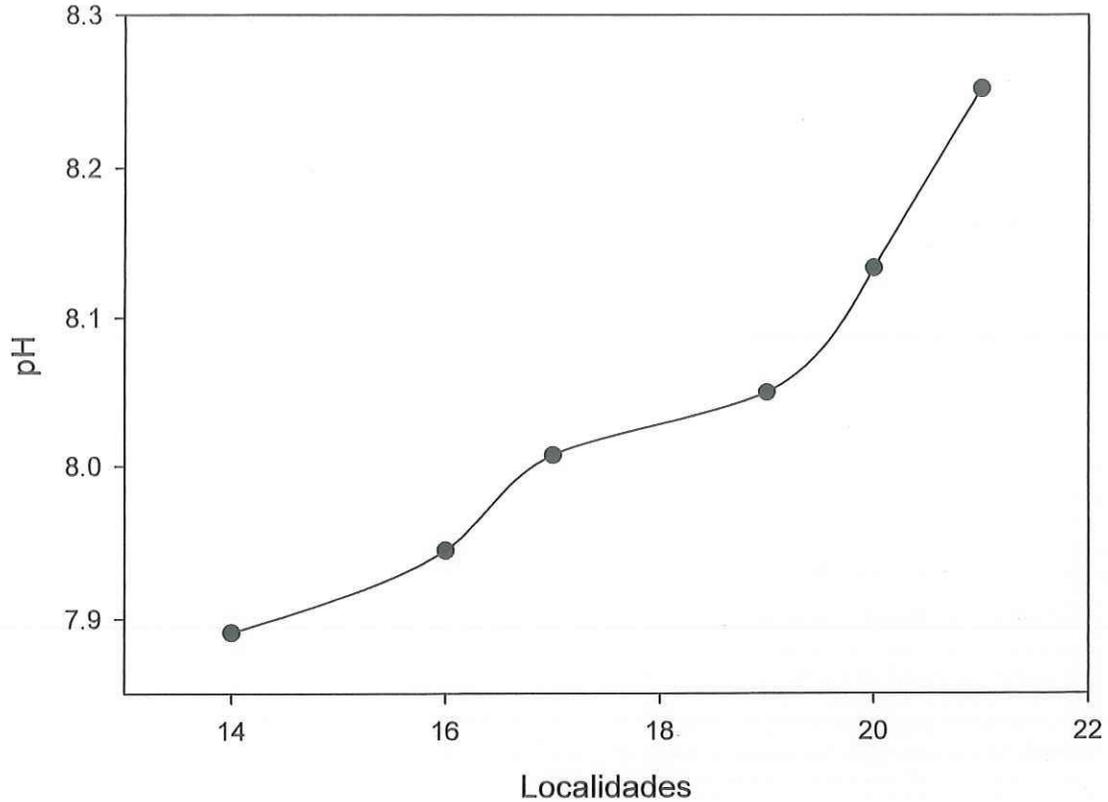


Figura 19. Distribución superficial de pH en el Brazo SQ. Cada punto representa el promedio de los 14 muestreos.

#### ***8.4 Efecto de Bases Extras***

Se explicó anteriormente que en la boca y en BF los cambios en las concentraciones se atribuían a los procesos debidos al intercambio con el océano así como a los procesos de evaporación. Sin embargo se mencionó que un 20% no se explicaba por los factores mencionados. Adicionalmente se señaló que tampoco se atribuían a procesos de disolución-precipitación. Recientemente se reportó la influencia de bases de origen fitoplanctónico que participan en las mediciones de alcalinidad en cuerpos costeros semicerrados (Hernández-Ayón

*et al.*, 2007b). El estudio se realizó en tres regiones costeras entre ellas BSQ encontrando valores de dicha base fluctuando alrededor de 30  $\mu\text{moles kg}^{-1}$  el cual sería similar al 20% que no se encontró explicación por otros procesos. Esto se puede entender mejor si se observa la ecuación que define la At:

$$\text{At} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{B(OH)}_4^-] + [\text{OH}^-] + [\text{HPO}_4^{2-}] + 2[\text{PO}_4^{3-}] + [\text{SiO(OH)}_3^-] + [\text{NH}_3] \\ + [\text{HS}^-] + [\text{H}^+]_{\text{F}} - [\text{HSO}_4^-] - [\text{HF}] - [\text{H}_3\text{PO}_4] + [\text{Bases mayores} - \text{Bases menores}]$$

En esta ecuación se puede observar el último componente de At el cual en zonas oceánicas suele ser muy pequeño al grado que es difícil detectarlo. En este caso el valor, usando las técnicas actuales de medición, puede ser estimado con una exactitud de menos de 2  $\mu\text{moles kg}^{-1}$ .

## 9. CONCLUSIONES

En este trabajo se encontraron claras variaciones de At durante eventos de surgencia debidas a procesos físicos como el transporte de aguas por la combinación mareas – surgencias y la evaporación. Además, se midieron cambios en At como consecuencia de los procesos biológicos efectuados por el pasto *Zostera marina*.

A partir de las imágenes satelitales de temperatura y de las mediciones discretas de salinidad, temperatura y At se observó que a partir del muestreo D8 se observó la mayor influencia de aguas de surgencia hasta los brazos más internos como resultado de intensificación de vientos en combinación con las mareas.

Las pruebas estadísticas en base a la salinidad indicaron la existencia de tres regiones significativamente diferentes en la BSQ: 1) la Boca, que incluye las estaciones con mayor influencia oceánica de la est. 1 a la 12, 2) Bahía Falsa (BF) que incluye las estaciones 22 a la 30, y 3) Brazo San Quintín, que incluye las estaciones de la 14 a la 21 caracterizadas por ser la región con el intercambio más lento con el océano.

Se encontraron efectos sobre la concentración de At en BSQ durante las combinaciones mareas muertas – mareas vivas con la intensidad de las surgencias. Por ejemplo, se observó que durante la combinación mareas muertas con la ausencia de eventos de surgencia, se midieron los valores más altos de temperatura, salinidad y alcalinidad total de todos los muestreos realizados en BSQ. Los incrementos ocurrieron como consecuencia de la evaporación ocurrida ante el pobre intercambio con el océano adyacente. Por otro lado, durante la combinación marea viva –

surgencia se midieron valores de At característicos de aguas de surgencia que se propagaron hacia los extremos internos.

Los resultados de la normalización de At por salinidad en la Boca y BF indicaron que el 80% de la variabilidad de At en esas dos regiones estuvo controlada por procesos de evaporación y advección. En el Brazo SQ sólo las primeras dos localidades (14 y 16) mostraron variaciones de At debidas a la evaporación, sin embargo, las restantes mostraron claros descensos hacia el interior. El 20% restante se atribuye a la influencia de bases de origen fitoplanctónico que participan en las mediciones de alcalinidad.

En BF no se detectaron efectos de disolución o precipitación sobre la At ante la presencia de los cultivos de ostión en esa región.

En el Brazo SQ, se observaron de manera consistente los más claros descensos en la concentración de At de forma gradual hacia su extremo interno. Dichos cambios se atribuyeron al consumo de  $\text{HCO}_3^-$  por *Zostera marina* durante la fotosíntesis.

## 10. REFERENCIAS

- Aliance for Coastal Tecnologies. (2005). In situ measurement of dissolved inorganic carbon speciation in natural waters: pH,  $p\text{CO}_2$ , TA y  $\text{TCO}_2$ . *Workshop proceedings*. Honolulu, Hawaii. 23pp.
- Álvarez-Borrego, S., G. Ballesteros-Grijalva y A. Chee-Barragán. (1976). Estudio de algunas variables fisicoquímicas superficiales en Bahía de San Quintín, en verano, otoño e invierno. *Ciencias Marinas*. 2(2):1-19.
- Álvarez-Borrego, J. y S. Álvarez-Borrego. (1982). Temporal and spatial variability of temperature in two coastal lagoons. *CalCOFI Reports XXIII*: 188-197.
- Álvarez-Borrego S. (2004). Dinámica de nutrientes y fitoplancton en una laguna costera fuertemente afectada por surgencias costeras. *Ciencias Marinas*. 30(1A):1-19.
- Angulo-Larios N. T. (2006). Hidrodinámica de la Bahía de San Quintín, B. C. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas-Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada, B. C., México. 128pp.
- Aveytua-Alcázar, L. (2002). Carbono orgánico disuelto en Bahía San Quintín, Baja California, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas-Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada, B. C., México. 68pp.
- Ballesteros-Grijalva, G. (1975). Estudio de algunos parámetros fisicoquímicos superficiales en Bahía San Quintín en verano, otoño e invierno. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C., México. 45pp.

- Beer, S. y J. Rehnberg (1997). The acquisition of inorganic carbon by the seagrass *Zostera marina*. *Aquatic Botany*. 56: 277 – 283.
- Brewer, P.G. y J. C. Goldman. (1976). Alkalinity changes generate by phytoplankton growth. *Limnology and Oceanography*. 21(1): 108-117
- Brewer, P. G. y Goldman, J. C. (1976). Alkalinity changes generated by phytoplankton growth. *Limnology and Oceanography*. 21(1):108-117pp.
- Camacho-Ibar V. F, Carriquiry J D, Smith S V. (1999). Bahía San Quintín, Baja California: N/P budgets within compartments in a coastal lagoon. En: Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II). LOICZ Reports and Studies No. 13, LOICZ, Texel, The Netherlands, pp 65-78.
- Camacho-Ibar, V. F., J. D., Carriquiry, S. V., Smith. (2003). Non-conservative P and N Fluxes and Net Ecosystem Production in San Quintin Bay, Mexico. *Estuaries*, 2003
- Camacho-Ibar, V. F., J. M. Hernández-Ayón, E. Santamaría-del-Ángel, L.W. Daesslé-Heuser y J. A. Zertuche-González. (2007). Relación de las surgencias con los stocks de carbono en Bahía San Quintín, una laguna costera del NW de México. SEMARNAT-INE-CICESE. 18pp
- Camalich-Carpizo, J. M. (2006). Contribución de los pastos marinos a la concentración de carbono orgánico disuelto en Bahía de San Quintín (Baja California, México): aldosas como biomarcadores. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas-Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada, B. C., México. 87pp.

- Camiro-Vargas, T. K. (2004). El sistema del carbono en la región de las grandes islas en el Golfo de California. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas-Instituto de Investigaciones Oceanológicas. UABC. Ensenada, B. C., México. 91pp.
- Carrillo-Sánchez, C. G. (1985). Variación estacional del contenido de materia orgánica en sedimentos y biodepositación en Bahía San Quintín, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC. Ensenada, B.C., México. 55pp.
- Chávez-de-Nishikawa, A. y S. Alvarez-Borrego. (1974). Hidrología de la Bahía de San Quintín, Baja California, en invierno y primavera. *Ciencias Marinas*, 1(2): 31-62
- Del Valle-Lucero, L. I. (1979). Aplicación de un modelo numérico y análisis de condiciones hidrodinámicas en Bahía San Quintín. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada. Ensenada, B. C. México. 36 pp
- Dickson, A. G. (1992). The development of the alkalinity concept in marine chemistry. *Marine Chemistry* 40, 49-63.
- Dickson, A. G., P. Yetter y G. Anderson., (2003). Accurate determination of the total alkalinity of sea water by acidimetric titration. Can we measure the amount of “unknown protolyte”? *EOS, Transactions of the American Geophysical Union* 72, 262.
- Durazo, R., G. Gaxiola-Castro, B. Lavaniegos, R. Castro-Valdez, J. Gómez-Valdés y A. Da S. Mascarenhas Jr. (2005). Condiciones oceanográficas frente a la costa occidental de Baja California, 2002–2003: Influencia de un El Niño débil y del incremento de agua subártica. *Ciencias Marinas*.31(3): 537–552.

- Drechsler, Z., R. Sharkia, Z. I. Cabantchik y S. Beer. (1993). Bicarbonate uptake in the marine macroalga *Ulva sp.* is inhibited by classical probes of anion exchange by red blood cells. *Planta*. 191: 34 – 40.
- Flores-Vidal, X. (2006). Circulación Residual en Bahía de San Quintín, B. C. México. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B. C. México. 80pp.
- Gattuso, J. P., M. Frankignoulle y R. Wollast. (1998). Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematic*. Vol. 29. 405-434pp.
- Hellblom F., Beer S., M. Björk y L. Axelsson. (2001). A buffer sensitive inorganic carbon utilization system in *Zostera marina*. *Aquatic Botany*. 69 :55–62
- Hernández-Ayon, J. M. (1995). Desarrollo de un sistema automático, sencillo y preciso de medición de CO<sub>2</sub> total, alcalinidad y pH. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California - Instituto de Investigaciones Oceanológicas., Ensenada B. C., México. 74pp
- Hernández-Ayón, J. M., V. Camacho-Ibar, A. Mejía-Trejo, y Alejandro Cabello-Pasini. (2007a). Variabilidad del CO<sub>2</sub> total durante eventos de surgencia en Bahía de San Quintín Baja California, México. Capítulo IV. CO<sub>2</sub> en Aguas Costeras y Lacustres. Ed. INE-CICESE. Carbono En Ecosistemas Acuáticos de México. *En prensa*.
- Hernández-Ayón, J. M, A. Zirino, A. G., Dickson, T. Camiro-Vargas y E. Valenzuela. (2007b). Estimating the contribution of organic bases from microalgae to the titration alkalinity in costal seawaters. *Limnology and Oceanography*. Vol 5. 225-232.

- Huerta-Tamayo, R. (1985). Producción primaria aérea de *Zostera marina* L. en Bahía Falsa, San Quintín, B. C. de junio a diciembre 1982. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C., México. 103pp.
- Jiménez-Hernández, S. B. (2005). Análisis de procesos físico-biológicos acoplados en la Bahía de San Quintín, B. C., México. Tesis de Maestría. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada B. C., México. 95pp.
- Juárez-Colunga, M. C. (2007). Variación espacial y temporal de pH en las costas de Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B.C., México
- Lara-Lara, J. R. (1975). Ciclo anual de clorofilas y producción orgánica primaria en Bahía de San Quintín, B. C. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C., México. 89pp.
- Lara-Lara, J. R. (1979). Variability and tidal exchange of ecological properties in a coastal lagoon. Thesis for the Master of Science. Oregon State University. Oregon, U. S. A. 59pp
- Martori-Oxamendi, J. E.(1989). Variabilidad de la circulación y sus causas en Bahía San Quintín, B. C. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B. C., México. 110pp.
- Millero, F. J., M. L. Sohn. (1992). Chemical Oceanography. CRC Press. Londres. 269-319
- Millero, F. J. (1996). Chemical Oceanography. CRC Press. Londres (ver si no es Boca Raton). 469pp

Monreal-Gómez, M. (1980). Aplicaciones de un modelo de dispersión en Bahía San Quintín, B.C. México. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B. C., México. 84pp.

Ocampo-Torres, F. (1980). Análisis de mareas y predicción de velocidad mediante el modelo unidimensional en Bahía San Quintín, B. C. México. Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C. México. 94pp.

Oliveira A. P, M. Nogueira y G. Cabeçadas. (2006). Variabilidad de CO<sub>2</sub> en aguas costeras superficiales adyacentes al estuario del Tajo (Portugal) CO<sub>2</sub> variability in surface coastal waters adjacent to the Tagus Estuary (Portugal). *Ciencias Marinas*. 32(2B): 401–411.

Plascencia-Díaz, R. M. (1980). Análisis de temperatura, salinidad y determinación de circulación por gradientes de densidad en Bahía San Quintín , B. C. Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C. México. 123pp.

Poumian-Tapia, M. (1986). Biomasa aérea de *Zostera marina* L. y sus epífitas microscópicas en Bahía Falsa, San Quintín, B. C. de junio a diciembre de 1982. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C., México. 87pp.

Smith, S. V. y G. S., Key. (1975). Carbon dioxide and metabolism in marine environments. *Limnology and Oceanography*, 20(3):493-495pp.

Torres, R., D. Turner, J. Rutllantb, M. Sobarzo, T. Antezanad y H. E. González. (2002). CO<sub>2</sub> outgassing off central Chile (31–30°S) and northern Chile (24–23°S) during austral summer 1997: the effect

of wind intensity on the upwelling and ventilation of CO<sub>2</sub>-rich waters. *Deep-Sea Research. I* 49:1413–1429

Wang, Z. A., y W. J.- Cai. (2004). Carbon dioxide degassing and inorganic carbon export from a marsh-dominated estuary (the Duplin River): A marsh CO<sub>2</sub> pump. *Limnol. Oceanogr.*, 49(2):341-354

Ward, D. H. (2000). U. S. Geological Survey, Alaska Science Center.

Ward, D.H., T. L. Tibbitts, A. Morton, E. Carrera-González y R. Kempka. (2001). Uso de videografía multiespectral digital para evaluar la distribución del pasto marino en Bahía San Quintín, Baja California, México. *Ciencias Marinas*. 30(1A):47-60pp

Wei – Jun , C., Y. Wang y R. E. Hodson. (1998). Acid – Base properties of dissolved organic matter in the estuarine waters of Georgia, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 473-483.

Wei – Jun, C., Y. Wang, J. J. Krest, y W. S. Moore. (2002). The geochemistry of dissolved inorganic carbon in a surficial groundwater aquifer in North Inlet, South Carolina, and the carbon fluxes to the coastal ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(4):631-637.

Wei – Jun, C. (2003). Riverine inorganic carbon flux and rate of biological uptake in the Mississippi River plume. *Geophysical Research Letters*, 30(2): 1032pp.

Wei – Jun, C., Z. A. Wang. (2004). Carbon dioxide degassing and inorganic carbon export from a marsh-dominated estuary (the Duplin River): A marsh CO<sub>2</sub> pump. *Limnol. Oceanogr.*, 49(2):341-354

Zirino, A. y S. H. Lieberman. (1985). Mapping Strategies in Chemical Oceanography. Library of Congress Cataloging in Publication Data, U.S.A., 467pp