

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



EVALUACIÓN DEL ESTADO DE SATURACIÓN DE ARAGONITA EN LAS COSTAS DE BAJA
CALIFORNIA, MÉXICO.

TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL
GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

NORMA LIDIA OLIVA MÉNDEZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. OCTUBRE DE 2012.

Resumen

En la plataforma continental de Baja California se han registrado aguas subsaturadas en aragonita durante época de surgencias. En este trabajo se evaluó el estado de saturación de Aragonita (Ω_A) en la zona intermareal, donde habitan organismos calcificadores. La evaluación se realizó en Arbolitos (Ensenada, Baja California), mediante el estudio del carbono inorgánico disuelto (CID), la temperatura (T) y la alcalinidad total (AT), en un muestreo quincenal desde noviembre de 2009 a 2011. Las mediciones de T y CID de Arbolitos se compararon con la T y el CID (derivado de pCO_2 -AT) de una boya oceanográfica localizada en la Estación Ensenada a tres km de Arbolitos (EE). Esta comparación se hizo con el propósito de detectar cambios en la concentración de CID entre los dos sitios durante eventos de surgencia. Las surgencias costeras fueron la causa principal del aumento en las concentraciones de CID ($2150 \mu\text{mol/kg}$) y de la disminución de valores de temperatura ($T < 15^\circ\text{C}$), pH (7.8) y Ω_A (1.4) del agua tanto en la EE como en Arbolitos. La temperatura explicó la variación del CID en un 90% durante primavera y 60% en el verano, mientras que en invierno no se encontraron aumentos de CID correspondientes con la disminución de temperatura. Por otro lado durante el periodo de estudio, en ninguno de los dos sitios se detectaron valores de Ω_A por debajo del valor de saturación "1". Sin embargo se observaron valores de Ω_A entre 1 y 2 en nueve eventos de surgencia que se identificaron tomando como criterio valores de $pCO_2 > 410 \mu\text{atm}$ y temperaturas $< 15^\circ\text{C}$. Se observó que a mayor duración de estos eventos (17 días), fueron menores los valores de Ω_A y T, y con altos valores de pCO_2 ($863 \mu\text{atm}$). Aún cuando no se observaron diferencias significativas entre las variables en estudio de Arbolitos y EE, es importante resaltar que en los eventos de surgencia se observaron que los valores de Ω_A y pH difirieron en dos decimas y los de temperatura hasta $\sim 2^\circ\text{C}$. Lo anterior se atribuye a procesos como fotosíntesis por mantos de macroalgas localizados en ambos sitios. Además de los procesos antes mencionados, se evaluó también los flujos de CO_2 océano-atmósfera, los cuales también podrían contribuir con las variaciones en las concentraciones de CID entre ambos sitios durante los eventos de surgencia. En ambos sitios se encontraron valores positivos de ΔpCO_2 (máximos de $\Delta pCO_2 = 346 \mu\text{atm}$) cuando ocurren eventos de surgencias, lo que sugiere que el área se comporta como fuente de CO_2 hacia la atmósfera. Del estudio entre estos sitios se observó que el agua que llega desde la estación Ensenada hacia Arbolitos no sufrió cambios significativos. Se observó que en esta región, las variables del sistema del CO_2 están controladas fuertemente por procesos físicos.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

EVALUACIÓN DEL ESTADO DE SATURACIÓN DE ARAGONITA EN LAS COSTAS DE BAJA

CALIFORNIA, MÉXICO.

TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL
GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

NORMA LIDIA OLIVA MENDEZ

Aprobada por:

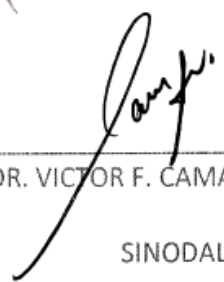


Dr. JOSE MARTIN HERNÁNDEZ AYÓN
Director de tesis



DR. FRANCISCO DELGADILLO HINOJOSA

SINODAL



DR. VICTOR F. CAMACHO IBAR

SINODAL

AGRADECIMIENTOS

El ingresar a una maestría fue más que un proyecto de estudios, pues al finalizarlo se ha convertido en el comienzo de un plan de vida. Este documento es el reflejo de un camino que recién comienza y en el que se me ha dado la oportunidad de conocer a grandes personas en lo espiritual y en lo profesional. Por ello he de agradecerles a quienes lo hicieron posible...

A mi director Dr. Martín Hernández por su infinita paciencia y dedicación en la realización de este trabajo, por ser un ejemplo y compartirme no sólo de sus conocimientos pero también de su amistad.

A mis sinodales al Dr. Victor Camacho por sus consejos y observaciones y al Dr. Francisco Delgadillo por compartirme de su proyecto y mostrarme que siempre hay algo que aprender y mejorar...gracias por la ayuda en la escritura de esta tesis.

Al Dr. Rubén Lara por el apoyo con la boya y el proyecto FLUCAR, así como a Carmen Bazán por el procesamiento de datos.

Al apoyo del programa IMECOCAL, gracias al Dr. Timothy R. Baumgartner.

A quienes hicieron posible los muestreos en brocolitos, Vanesa, Arturo, Armando, Edna, Angel, Arturo, Valdimir.

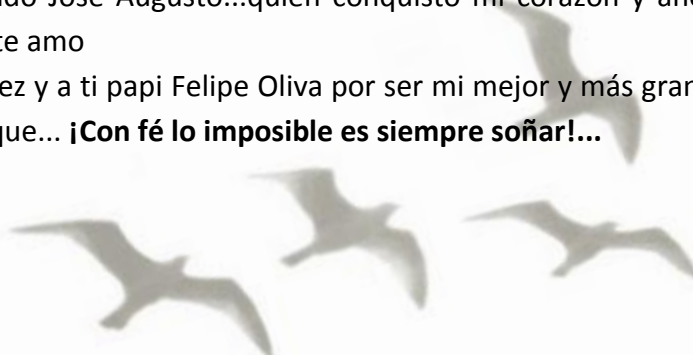
A mis compañeras, amigas y hermanas de estudio y viaje Ana y Gaby. Mil gracias por su apoyo en todo momento, por su paciencia, ánimo y fortaleza.

A la familia que escogí y de los que día a día aprendo, **mis amigüis** Rosarua, Shally, Altheia, Marce, Chava, Javier, Piña, Gaby, Ana, Coria, Daniela, Armando, Janet, Reginaldo, Lorena, Andrea, Orion, Julie, Erica, Carlitos, Andrés, Charlie, Pablo, Paula, Sofía, Laura, Ezequiel, Melchor, Laura, Emma, Miguel Angel, Alma, Eugenio, Luvia, Tatiana, Jushiro, Griselda, Carlos, Alan, Inés... Y lo que saben están en mi corazón.

A mis abuelos Nicolás y Estela por ser el pilar de una gran familia que me impulsa día a día. A mis tíos y primos por preocuparse y estar al tanto de mis andanzas. A mi hermanita Paloma y mi sobrino Max quienes siempre tienen una sonrisa de aliento para mí...

A mi hermoso y amado José Augusto...quien conquistó mi corazón y ahora vamos juntos en este viaje...te amo

A ti mami Lucy Méndez y a ti papi Felipe Oliva por ser mi mejor y más grande inspiración, por enseñarme que... **¡Con fé lo imposible es siempre soñar!...**



INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
1.2 Antecedentes	6 -
2. HIPÓTESIS	- 12 -
2.1 Objetivo general	- 13 -
2.2 Objetivos específicos	- 13 -
3. METODOLOGIA.....	- 14 -
3.1 Área de estudio.....	- 14 -
3.2 Muestreo en transecto costa-océano frente a la zona del intermareal.-	16 -
3.3 Datos generados en la estación de monitoreo Ensenada	- 17 -
3.4 Colecta de muestras en zona del intermareal “Arbolitos”.....	- 17 -
3.5 Análisis de Carbono Inorgánico Disuelto (CID).	- 17 -
3.6 Análisis de alcalinidad total (AT).....	- 20 -
3.7 Procesamiento de datos.....	- 21 -
3.8 Análisis de la hidrografía durante temporada de surgencias	- 21 -
3.9 Variación temporal del CID.....	- 22 -
3.10 Variación estacional	- 22 -
3.11 Presencia y duración del agua subsaturada en Arbolitos	- 22 -
3.12 Cálculos de flujos de CO ₂	- 23 -
4. RESULTADOS	- 24 -
4.1 Hidrografía del Transecto Frente a las Costas de Ensenada	- 24 -
4.2 Análisis del muestreo 2007	- 29 -
4.3 Variación temporal de pCO ₂ y CID en la Estación Ensenada y Arbolitos.....	- 38 -
4.4 Variación estacional y relación de CID vs T	- 48 -
4.5 Variación temporal de ΩA en Arbolitos	- 51 -
4.6 Evaluación de variables químicas durante eventos de surgencias entre la Boya y Arbolitos.....	- 57 -
4.7 Flujo de CO ₂ entre el océano y la atmósfera	- 61 -
5. DISCUSION.....	- 65 -
6. CONCLUSIONES.....	- 90 -
7. REFERENCIAS	- 92 -

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.-** Esquema que ilustra la absorción de CO_2 atmosférico y el decremento de la calcificación en los corales debido al proceso de acidificación del océano. El CO_2 absorbido por el océano, reacciona con agua de mar y se convierte en ácido carbónico, dejando un protón libre que se combina con el ión carbonato (CO_3^{2-}). Esta disminución de CO_3^{2-} , no permite calcificar a organismos como los corales. Ya que $a > [\text{CO}_2]_{\text{atm}} < [\text{CO}_3^{2-}]$ (Tomado de Hoegh-Guldberg, *et al.* 2007)..... - 3 -
- Figura 2.-** Localización del área de estudio. a) Región IMECOCAL, b) Circulo amarillo con una cruz representa la zona del intermareal de Arbolitos y Circulo en verde representa la Estación Ensenada donde se localiza la boya. - 15 -
- Figura 3.-** Diagramas de temperatura vs salinidad de la línea 100 para las temporadas de surgencias; (a) 2007, (b) 2010 y (c) 2011. Los círculos corresponden al perfil climatológico para la estación 100.30, propuesto por Durazo *et al.* (2010). ASA = Agua del Subártico, AESs Agua Ecuatorial Subsuperficial. - 26 -
- Figura 4.-** Secciones verticales de la anomalía de densidad (kg/m^3) frente a las costas de Baja California, correspondientes a las temporadas de surgencias de los años (a) 2007, (b) 2010, (c) 2011. - 28 -
- Figura 5.-** Análisis por estaciones del diagrama T-S para la temporada 2007 - 30 -
- Figura 6.-** Transecto de salinidad de la línea 100, temporada de surgencias 2007 (a); Corte del transecto de salinidad de los primeros 60km de la costa y desde la superficie a 150m de profundidad (b). - 32 -
- Figura 7.-** Estimación de capa de mezcla a) Corte en el transecto de la anomalía de densidad de la línea 100-2007 para los primeros 60km y en los primeros 150 m de profundidad y b) Δ Densidad = valor de densidad en cada profundidad menos al valor de la superficie..... - 34 -
- Figura 8.-** Concentración de CID en la capa de mezcla en el transecto costa-océano de la línea 100 del 2007 - 34 -
- Figura 9.-** Diagrama TS de la estación Ensenada correspondientes: a) Mes de abril para las temporadas de surgencias; 2007 (Línea azul), 2010 (línea rosa) y 2011 (línea roja). La línea discontinua negra, corresponde a la climatología realizada por Durazo *et al.* (2010), para la estación 100.30 de Imecocal; b) Se añadieron los valores de temperatura y salinidad del sitio intermareal Arbolitos de las primaveras-veranos de 2010 y 2011. - 37 -
- Figura 10.-** Series de tiempo de a) Temperatura y de b) pCO_2 registradas en la boya instalada en la estación Ensenada, durante el período de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011. - 39 -
- Figura 11.-** Serie de tiempo de a) Temperatura, b) CID y c) Salinidad, registradas en la estación Arbolitos durante el periodo de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011..... - 41 -
- Figura 12.-** Comparación de las series de tiempo de temperatura de Arbolitos (negro) y la boya (gris), de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011.; a) Serie de

tiempo continúa de la boya y mediciones discretas de Arbolitos; b) Series de tiempo quincenales de temperatura de la boya y de arbolitos.....	- 43 -
Figura 13.- Comparación de las series de tiempo de CID de Arbolitos (negro) y la boya (gris), de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011	- 45 -
Figura 14.- Temperatura vs CID de Arbolitos para el período de Noviembre 8 de 2009 a Julio 20 de 2010.....	- 45 -
Figura 15.- Serie de tiempo en Arbolitos de Temperatura (Círculos) y CID (Triángulos) durante noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011. Estrellas rojas, corresponden a los cinco valores de CID que se calcularon a partir de la regresión de temperatura y CID.....	- 46 -
Figura 16.- Serie de tiempo quincenal de CID en Arbolitos (Triángulos y en morado) y en la boya (Círculos y en gris), durante noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011.....	- 47 -
Figura 17.- Relación de temperatura vs CID en Arbolitos correspondiente a cada una de las estaciones del año, durante el periodo de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011.	- 49 -
Figura 18.- Relación de temperatura vs CID correspondiente a las primaveras de 2010 y 2011, durante el muestreo llevado a cabo en Arbolitos de Noviembre 8 de 2009 a Noviembre 19 de 2011.....	- 50 -
Figura 19.- Serie de tiempo en Arbolitos: a) CID (círculos morados) y temperatura (estrellas grises), b) pH (círculos grises) y Aragonita (cruces negras) de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011. Las líneas representan: primavera (verde), verano (rojo), otoño (negro) e invierno (azul).	- 53 -
Figura 20.- Ubicación y número de los eventos de surgencia (en morado), que se detectaron en las series de tiempo de pCO ₂ y temperatura, en Arbolitos y en la boya.....	- 56 -
Figura 21.- Eventos de surgencias entre 2010 y 2011 con sus características físico-químicas de a) ΩA, b) Temperatura, c) CID y d) pH en Arbolitos y la Boya. Líneas en morado representan; a) ΩA=1, b) Mínimo de temperatura (10.7°C), c) Concentración máxima de CID (2170 μmol/kg), d) pH de subsaturación 7.7 de acuerdo a Feely <i>et al.</i> (2008).....	- 60 -
Figura 22.- Delta pCO ₂ de cada uno de los eventos que se registraron en Arbolitos (Barras en blanco) y en la boya (Barras en negro).....	- 62 -
Figura 23.- Relación entre la duración de los eventos de surgencia y a) ΩA b) temperatura y c) ΔpCO ₂ . Los números que acompañan a cada símbolo, identifican al número de evento de surgencia.	- 64 -
Figura 24.- Climatología para la zona norte de la región IMECOCAL, a) Anomalías de temperatura y b) Anomalías de salinidad. Gráfico tomado de Durazo <i>et al.</i> (En preparación).	- 67 -
Figura 25.- Velocidades geostroficas de la temporada de surgencia 2007. (Tomado del Atlas Imecocal, reporte IM0707).....	- 69 -
Figura 26.- a) Climatología de clorofila para Arbolitos Tomado de Delgadillo (En preparación); b) Serie de tiempo de noviembre de 2009 a noviembre de 2011 de CID e Índice de surgencia (b).....	- 77 -
Figura 27.- a) Producción de larvas vs ΩA y b) Días que le toma a una larva de ostión, llegar de una talla de 120 a 150 μ vs ΩA. Se observa una mayor producción	

larval cuando los valores de saturación son más altos y cuando las larvas están expuestas mayor tiempo. Tomado del estudio de Barton *et al.* (2012). - 79 -

Figura 28.- Del estudio de Bakun (1990), estrés del viento durante 1960 a 1980 en las costas de: a) California, b) Península ibérica, c) Marruecos, d y e) Perú. - 81 -

Figura 29.- Nivel del mar (cm), durante el 4to evento de surgencia. Círculo morado representa el área cercana al área de estudio. Las flechas indican la dirección de las corrientes. - 83 -

Figura 30.- Velocidades de viento con las cuales se identificó un evento de surgencia con duración de 14 días en Bodega Bay, Ca. Línea amarilla corresponde al viento sin filtrar y la línea azul al viento filtrado. Las líneas aqua indican las velocidades del viento de 0 y 5 (m/s). El corchete naranja abarca los 14 días de duración del evento de surgencia. Tomada del estudio de Wilkerson *et al* (2006) - 83 -

Figura 31.- Efecto de la presencia de mantos de macroalgas del estudio llevado a cabo por Frieder *et al.* (2012); a) Densidad y b) pH de los sensores ubicados a 17m (morado) y a 7 m (gris) desde la costa. - 86 -

Figura 32.- Climatología: para Arbolitos; a) CID y c) Temperatura: para la boya b) CID y d) Temperatura. - 89 -

LISTA DE TABLAS

Tabla I.- Coeficiente de correlación (r), de la asociación de temperatura con la concentración de CID, para las diferentes estaciones del año muestreadas de 2010 y de 2011 - 49 -

Tabla II.- Características de los nueve eventos de surgencia; en Arbolitos fecha de muestreo y pCO₂; para la boya inicio y término de cada evento de surgencia de acuerdo al incremento de la pCO₂ y disminución de la Temperatura; valores de Ω y pH tanto para Arbolitos como para la boya. - 55 -

Tabla III.- Promedio y desviación estándar de las temperatura, CID, Aragonita y pH de la Boya y Arbolitos. - 57 -

1. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los gases más importantes en la atmósfera, tiene influencia en el balance de calor de la tierra así como en el equilibrio del carbonato de calcio en los océanos (CaCO_3) (Petit *et al.* 1999). Sin embargo, la quema intensiva de combustibles fósiles y la deforestación ha incrementado el CO_2 atmosférico ~40% por encima de los valores preindustriales, dando como resultado un desbalance de CO_2 entre la atmósfera y el océano (Doney and Schimel 2007). Actualmente la concentración de CO_2 en la atmósfera ($[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$), es de ~396 ppm (<http://co2now.org/>). Dicho valor es el mayor registro en los últimos 650 mil años y se espera que continúe en aumento, y dé lugar a cambios significativos en el clima al final de este siglo (Feely *et al.* 2008). Durante el siglo 20, el aumento en la concentración de CO_2 atmosférico ha causado que ocurra un incremento de la temperatura y del nivel promedio del mar (0.74°C y 17cm, respectivamente), así como la disminución en la concentración del ion carbonato en el agua de mar y de pH ($\sim 30\mu\text{mol kg}^{-1}$ y 0.1 unidades, respectivamente) (Doney *et al.* 2007).

Por su parte los océanos han absorbido ~30% de las emisiones de CO_2 antropogénico, lo cual ha disminuido considerablemente su efecto en la atmósfera como gas de efecto invernadero, amortiguando el impacto del calentamiento global (Feely *et al.* 2008). La absorción de CO_2 en el océano ocurre a través de una serie de reacciones químicas. Estas reacciones comienzan cuando el CO_2 reacciona con el agua de mar y se convierte en ácido carbónico (H_2CO_3), el cuál rápidamente se disocia en un ión hidrógeno (H^+) y bicarbonato (HCO_3^-) (Fig. 1). El ión hidrógeno

puede reaccionar con el carbonato (CO_3^{2-}) y formar bicarbonato. Por ende, cuando se añade más CO_2 al océano, aumentan las concentraciones de H_2CO_3 , HCO_3^- y H^+ y por lo tanto disminuye el pH y la disponibilidad de iones carbonato (Feely *et al.* 2008; Caldeira and Wickett 2003). En el proceso denominado como acidificación del océano, la disminución en la concentración de iones carbonato reduce la tasa de calcificación e inhibe la formación de aragonita en organismos (Raven *et al.* 2005; Kleypas *et al.* 1999). Y por tanto altera la formación de esqueletos y estructuras calcáreas en organismos marinos como corales y bivalvos (Fabry *et al.* 2008; Doney *et al.* 2009).

La mayoría de los estudios indican que cuando hay subsaturación de carbonato, la calcificación disminuye afectando a la formación de conchas y esqueletos en organismos marinos. Por ejemplo, algunos experimentos han mostrado como al aumentar la $[\text{CO}_2]_{\text{atm}}$ a un nivel de 560ppm, disminuye la tasa de calcificación en corales hasta en un 40% (Kleypas *et al.* 2006). Además, para algunos organismos marinos sus primeras etapas de vida son especialmente sensibles a la acidificación. Tal es el caso de los equinodermos *Hemicentrotus pulcherrimus* y *Echinometra matheri*, cuyos desarrollos embrionarios se estudiaron hasta la formación de la larva *pluteus*, en tratamientos con diferentes concentraciones de CO_2 . Se encontró que las larvas no sólo eran morfológicamente anormales conforme aumentaba la concentración de CO_2 , sino que también hubo un efecto en el tamaño, tanto de las larvas como la de sus brazos (Kurihara & Shirayama 2004 a, b). Otro ejemplo es el de las larvas del ostión *Crassostrea gigas*, las cuales fueron sometidas a pCO_2 de 1000 μatm (pH 7.8), y presentaron malformaciones en su desarrollo. Estas

malformaciones se consideran dentro de los criterios típicos para identificar desarrollo anormal de la larva veliger (His *et al.* 1997). De hecho, cuando las larvas se sometieron a 2000 μatm de pCO_2 (pH 7.4), más del 70% de los organismos, mostraron que sus valvas estaban parcial o completamente abiertas (Kurihara *et al.*, 2007). Por lo tanto, el efecto de la acidificación no sólo varía en las diferentes etapas de vida de los organismos calcificadores, sino que también varía de especie en especie. Cabe señalar que aunque las larvas de erizos y bivalvos parecen ser las más vulnerables a altas concentraciones de pCO_2 , para el caso de los corales la etapa de asentamiento es la más sensible, lo cual se debe a que los equinodermos y moluscos comienzan a formar su esqueleto y valvas durante su etapa larval, mientras que los corales comienzan en su etapa de asentamiento (Kurihara 2008).

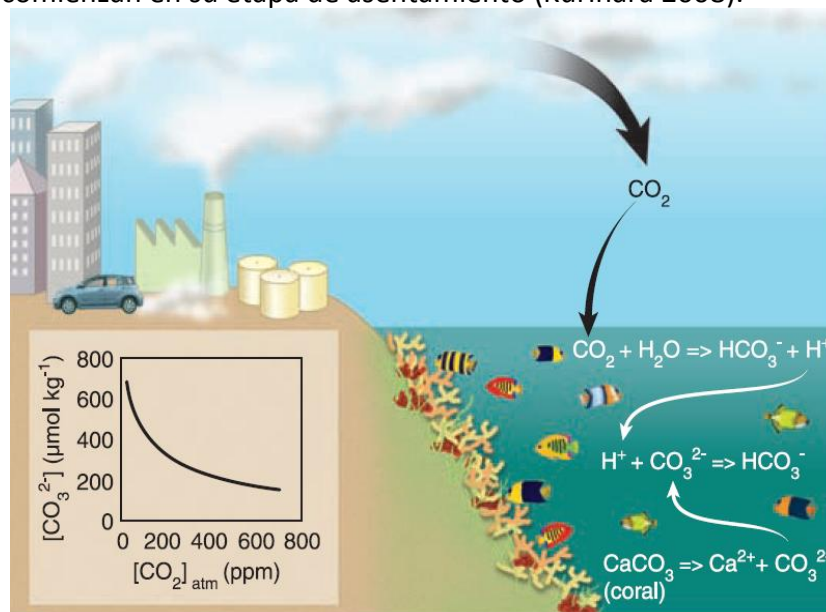


Figura 1.- Esquema que ilustra la absorción de CO_2 atmosférico y el decremento de la calcificación en los corales debido al proceso de acidificación del océano. El CO_2 absorbido por el océano, reacciona con agua de mar y se convierte en ácido carbónico, dejando un protón libre que se combina con el ión carbonato (CO_3^{2-}). Esta disminución de CO_3^{2-} , no permite calcificar a organismos como los corales. Ya que $a > [\text{CO}_2]_{\text{atm}} < [\text{CO}_3^{2-}]$ (Tomado de Hoegh-Guldberg, *et al.* 2007).

En el medio marino, la medida por la cual los organismos calcificadores se ven afectados dependerá del estado de saturación del carbonato (Ω_{CaCO_3}). Este es el producto de las concentraciones de los iones Ca^{+2} y CO_3^{-2} , dividido entre el producto de solubilidad (Kps), ya sea para aragonita o calcita.

$$(\Omega A) = [Ca^{2+}][CO_3^{-2}] / Kps_{aragonita}$$

$$\Omega_{Calcita} (\Omega Ca) = [Ca^{2+}][CO_3^{-2}] / Kps_{calcita}$$

Donde ΩA es el estado de saturación de aragonita y ΩCa es el estado de saturación de Calcita. Las concentraciones de calcio se estimaban a partir de la salinidad, y la del ión carbonato mediante mediciones de Carbono Inorgánico Disuelto (CID) y Alcalinidad total (TA) (Feely *et al.* 2008).

Las variaciones de ΩA y ΩCa son moduladas por el pH. Por ejemplo en regiones donde ΩA o ΩCa son >1 , se favorece la formación de estructuras carbonatadas (conchas y exoesqueletos), pero si son <1 puede ocurrir disolución (Feely 1988). Una proyección al 2060 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), mostró que de incrementarse la $[CO_2]_{atm}$ de 450 a 650ppm, el pH de la superficie del mar puede disminuir entre 0.2 y 0.3 unidades, y reducir así el estado de saturación de calcita y aragonita hasta en un 25% (IPCC 2001).

Algunos estudios han mostrado la presencia de aguas subsaturadas con respecto a ΩA sobre la plataforma continental de norte América. En el caso de las costas oeste de E.U.A y Baja California, México, estas aguas se presentan durante eventos de surgencia cuando los vientos soplan del noroeste durante primavera-verano, y ocasionan que el agua superficial se desplace fuera de la costa y se reemplace por agua subsuperficial más fría, rica en CID y nutrientes, con bajos

valores pH y ΩA . (Feely *et al.* 2008). Un dato particular es que el horizonte de saturación de aragonita es más somero (50-100m) que el de calcita (~500m) (Feely *et al.* 2004), pues la aragonita es 50% más soluble que la calcita (Doney *et al.* 2009). En el trabajo de Feely *et al.* (2008) se encontró que los eventos transportan agua subsaturada con respecto a ΩA hacia menores profundidades (<100m). Cabe señalar que esto no se esperaba que ocurriera en el presente, y que esto era una proyección que se esperaba se presentara en cinco décadas más (Feely *et al.* 2008). Los horizontes de saturación de Aragonita y de Calcita se están haciendo más someros (1-2m año⁻¹), debido a la captación de CO₂ antropogénico por el océano y por cambios decadales y regionales de la circulación (Feely *et al.* 2008, 2012).

Además, la presencia de aguas subsaturadas con respecto a ΩA durante eventos de surgencia, afecta a organismos de importancia comercial, como ostiones y abulones. Organismos cuya concha está constituida por Aragonita e incluso presentan manifestaciones negativas en su metabolismo, reproducción, desarrollo e inmunidad (Fabry *et al.* 2008; Holman *et al.* 2004; Burgents *et al.* 2005). Por lo tanto, el impacto de la presencia y duración de agua subsaturada con respecto a ΩA durante un evento de surgencia, repercute no sólo en el ambiente sino también tiene repercusiones económicas. En el presente estudio, se tiene la finalidad de evaluar el estado de saturación de Aragonita (ΩA) en la zona intermareal del sitio conocido como Arbolitos, en donde habitan organismos que calcifican y es posible detectar la influencia de eventos de surgencia a pesar de ser somero y de estar en la zona del intermareal (Panzeca *et al.* 2009).

1.2 Antecedentes

El límite sureño del Sistema de la Corriente de California (SCC) se encuentra en la región oceánica frente a la costa occidental de la Península de Baja California (BC) (Durazo y Baumgartner, 2002). Esta región sureña del SCC se considera como una zona de transición (Roden 1971), ya que cerca de la superficie confluyen la masa de Agua Subártica (ASA) transportada hacia el sur por el flujo de la Corriente de California (CC), así como el Agua Tropical Superficial (ATS) y el Agua Subtropical Superficial (AStS) que provienen del sur y suroeste de la península (Hickey, 1998; Lynn y Simpson, 1987).

En las aguas superficiales de las costas de Baja California se ha observado una variación estacional relacionada con el descenso en las temperaturas (<15°C), durante Enero (Invierno), mucho menores hacia el mes de Abril (~12°C-primavera) y mayores hacia Julio (~19°C- verano). Con períodos de estratificación de la columna de agua hacia el verano-otoño (julio-octubre), debido al calentamiento de la columna de agua por incidencia solar y el debilitamiento de los vientos del noroeste (Linacre *et al.* 2010).

Lo que se conoce acerca del SCC en la costa oeste de Baja California se ha obtenido a partir de análisis de datos hidrográficos obtenidos entre 1950 y 1978 por el programa “California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations” (CalCOFI, por sus siglas en inglés), y a partir de 1997 por el programa “Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California” (IMECOCAL) (Durazo *et al.* 2010; Pérez-Brunius *et al.* 2007).

De acuerdo a Durazo *et al.* (2010) en el límite sureño del Sistema de la Corriente de California se presentan muchas de las características que identifican a un sistema de circulación de frontera oriental, tales como:

- a) Surgencia costera en respuesta a vientos paralelos a lo largo de la costa.
- b) Flujo predominante hacia el ecuador en la superficie como respuesta al mecanismo forzante.
- c) Una contracorriente subsuperficial dirigida hacia el polo, que fluye entre 200 y 400 m de profundidad, a lo largo del quiebre de la plataforma continental.

Adicionalmente, las masas de agua que confluyen en los primeros 400m en las aguas costeras de Baja California, están determinadas por diferencias en las propiedades fisicoquímicas de la columna de agua:

- a) El ASA por ejemplo, se caracteriza por su mínimo en salinidad, su alto contenido de oxígeno disuelto y por presentar una variación temporal dominando en primavera verano (Linacre *et al.*, 2010).
- b) El Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE) se caracteriza por su alta salinidad, alta concentración de nitratos, y por su bajo contenido de oxígeno disuelto (Reid *et al.* 1958). Al igual que la anterior, esta masa de agua presenta una variación temporal y suele presentarse en el norte de BC en otoño-invierno (Linacre *et al.*, 2010)

En la región que cubre el programa IMECOCAL, se ha reportado la existencia de dos regiones, no solo con diferencias en la oceanografía (con claras diferencias en la presencia de masas de agua), sino también con diferencias en la diversidad de

especies de zooplancton. Estas regiones se ubican una al norte de Punta Eugenia (PE) y otra hacia el sur. Se ha reportado que la diferencia oceanográfica que separa dichas regiones, se debe a la frontera física formada por la morfología de Punta Eugenia (Durazo, 2009). Por otro lado, estudios relacionados con el sistema del CO₂ corroboran dicha variación espacial y temporal asociada a los cambios de circulación por las masas de agua. El trabajo de Juárez-Colunga et al. (2010) llevado a cabo del 2006 al 2008 en las costas de Baja California, mostró que las regiones oceanográficas descritas por Durazo *et al.* (2009), también se distinguen por su comportamiento en relación al pH. La autora reportó que por debajo de 50m, el pH hacia el sur de PE era menor en aprox. 0.25 unidades, en comparación con la región norte. Juárez-Colunga et al. (2010) explicó que estacionalmente se pueden observar diversas condiciones en las que el agua puede presentar valores de pH que se pueden relacionar a la presencia o ausencia de agua subsaturada. La variación espacial del pH que la autora observó por debajo de los 50 m en las Costas de Baja California, determinó que en gran medida está regulada por la variación temporal de las proporciones de ASA y ASsE.

En el océano, el pH ha mostrado cambios no sólo en tiempo y espacio debido a procesos de advección, sino también como resultado del incremento en la absorción de CO₂ de origen antropogénico (Sabine et al., 2004). Este incremento de CO₂ en el océano, provoca cambios en los horizontes de saturación de aragonita (Feely *et al.* 2002, 2012). Los autores señalan que el horizonte de saturación de aragonita para el océano Pacífico Norte, es más somero cada vez debido a la absorción de CO₂ de origen antropogénico. Se estima que la velocidad de migración

del horizonte de ΩA , fluctúa entre 1 y 2 m/año, y que por ejemplo en el caso de las costas del Pacífico Norte, dicho horizonte de saturación ha migrado a una profundidad tal que actualmente las surgencias pueden transportar agua subsaturada a la plataforma continental. Esto fue reportado para las costas del Pacífico Norte observándose aguas subsaturadas en la plataforma continental desde las costas de Canadá hasta Baja California, México (Feely *et al.* 2002, 2008, 2012).

Planteamiento del problema

Las características de los eventos de surgencias se ha vuelto un tópico de interés dado que transportan aguas de diferentes profundidades y por ende con diferentes concentraciones de CO_2 dependiendo de la intensidad de los vientos. En este aspecto, se ha reportado que hay evidencias que señalan incrementos en la intensidad de surgencia debido al calentamiento global (Bakun, 1990). Esto sugiere que aguas más profundas y más ricas en CO_2 potencialmente serían transportadas a la plataforma. En particular, en las costas de Baja California en época de surgencia se encontró que la profundidad de subsaturación de aragonita oscilaba entre 50-70m con un pH de ~ 7.7 (Feely *et al.* 2008). Sin embargo, las condiciones del muestreo de Feely *et al.* (2008) representa un verano de un año particular (2007) y con mediciones realizadas tanto en la región oceánica como sobre la plataforma continental. En el caso de las costas de Ensenada, la colecta más costera se realizó en la estación 100.30 del programa IMECOCAL donde la profundidad es de ~ 300 m y a ocho kilómetros de la costa. Se desconoce lo que ocurre en la zona del intermareal y en otras épocas del año, en las cuales pueden presentarse condiciones diferentes. Es

decir, las diferencias se pueden dar producto de anomalías en la intensidad de las surgencias o acoplada a efectos debidos a variaciones interanuales.

En este último aspecto, Cervantes (2010) estudió la variación estacional del Ω_A en columna de agua de la Estación Ensenada y además mostró el efecto que provocan eventos interanuales en la profundidad del horizonte de saturación de Ω_A . Su muestreo se realizó en la estación de monitoreo conocida como “Estación Ensenada”, está ubicada a 3 km de la costa y a 8 km de la primera estación de la línea 100 del programa IMECOCAL. La autora encontró que durante 2006 se presentaron una serie de anomalías de salinidad asociadas a la entrada de un mayor volumen del ASA cerca de la región. Este hecho indica que en ese periodo dominó la presencia de aguas superficiales de mayor pH (~ 7.9), pero también con bajas concentraciones de CID, y por tanto con aguas sobresaturadas de aragonita. Un hecho relevante en el 2007-2008 fue la transición ocurrida hacia la condición “La Niña”, la cual se desarrolló en los meses posteriores. Lo anterior trajo como consecuencia el ascenso de agua subsaturada en relación a Ω_A ($\Omega < 1$) en época de surgencia, por lo que la combinación “La Niña” con eventos de surgencia durante primavera-verano, provocó la presencia de aguas más densas y subsaturadas de origen más profundo (Desde ~ 150 m hacia ~ 30 m de profundidad) con aguas más frías ($< 15^\circ\text{C}$), mas salinas (> 33.8), con bajas concentraciones de oxígeno (< 120 μM), bajo pH (7.7), altas concentraciones de CID (~ 2150 $\mu\text{mol/kg}$) y bajos valores de Ω_A (~ 1.5). Adicionalmente Cervantes (2010) estudió la variación de la presión parcial del CO_2 ($p\text{CO}_2$) en las aguas superficiales, utilizando una boya oceanográfica que se encuentra en las coordenadas de la Estación Ensenada. Los valores de $\Delta p\text{CO}_2$

positivos en la estación Ensenada durante el evento de LN 2008, lo que sugiere que la zona durante este periodo se comportó como una fuente de CO₂ a la atmósfera. Ante este tipo de hechos, continúa la incertidumbre en relación a lo que esté ocurriendo en la zona del intermareal y su posible efecto en los organismos calcificadores. Sin embargo, habrá que considerar que en las regiones cerca y en el intermareal, existe la presencia de áreas de mantos de *Macrocystis pyrifera*, los cuales podrían funcionar como captadores de CID e incrementar el pH y por consiguiente aumentar el Ω A.

Resulta entonces relevante conocer los cambios biogeoquímicos que pudieran ocurrir en el agua proveniente de surgencias durante su incursión hacia la costa. En un estudio realizado en las costas de Oregón por ejemplo, se identificaron y cuantificaron los cambios en la concentración de CID de una parcela de agua durante su incursión hacia la costa durante eventos de surgencia. En dicho estudio, se evaluó si los cambios de CID eran debidos a procesos de respiración, degasificación o fotosíntesis. Y se encontró que para esa zona durante Mayo de 2007 tras ocurrir un bloom fitoplanctónico, los cambio de CID se debieron a procesos de respiración de la materia orgánica en la columna de agua (Fassbender *et al.* 2012).

Se ha mencionado el efecto que puede llegar a tener las aguas subsaturadas con respecto a Ω A sobre los organismos, un ejemplo de esto es lo reportado en experimentos con *Cassostrea gigas*, donde los autores encontraron poco o nulo desarrollo (47%), en larvas de ostión de entre 120 a 150 μ durante eventos de surgencia cuando el Ω A =1 (Barton *et al.* 2012). Esto sugiere que el efecto de agua subsaturada con respecto a Ω A en algunas etapas larvales, no necesariamente tiene

que estar por debajo o igual al valor de saturación para ser considerada como adversa para organismos marinos que calcifican.

2. HIPÓTESIS

En las costas de Ensenada Baja California, se ha detectado la presencia de agua subsaturada con respecto a ΩA en profundidades menores a 60 m durante eventos de surgencia. Por lo cual se plantea que durante eventos surgencias el agua subsaturada con respecto a ΩA es transportada hasta la zona del intermareal de Arbolitos y se espera que ocurra lo siguiente:

- a) Durante primavera-verano, cuando ocurren eventos de surgencia se espera que ΩA sea menor, debido a la presencia de aguas ricas en CO_2 , mientras que en otoño-invierno se espera que los valores de ΩA aumenten, debido a la nula influencia de aguas de surgencias. Por tanto se espera detectar la variación temporal de las variables del sistema del CO_2 (CID, pH, pCO_2 y ΩA).
- b) Se esperan cambios en el grado de saturación de aragonita del agua recién surgida durante su transporte horizontal hacia la zona del intermareal, debido a procesos de degasificación, respiración o fotosíntesis. Durante primavera-verano, se espera una alternancia con altos y bajos valores de ΩA en dirección hacia la costa, como resultado del efecto de las surgencias, fotosíntesis y degasificación de CO_2 . Durante otoño-invierno se espera disminución de ΩA , por efecto de respiración o degradación de la materia orgánica.
- c) Arbolitos al ser considerado como un sitio donde es posible detectar la señal de las surgencias, se comportará como fuente neta de carbono desde el océano hacia la atmósfera.

2.1 Objetivo general

Estudiar la variación temporal de los parámetros del sistema de CO₂ en la zona del intermareal en Arbolitos durante dos años.

2.2 Objetivos específicos

- ❖ Analizar la hidrografía, de transectos de la línea 100 realizados durante las temporadas de surgencias 2007, 2010 y 2011.
- ❖ Analizar los cambios de la concentración de CID en el agua de mar, que se estima experimenta durante su incursión hacia la costa durante una temporada de surgencias.
- ❖ Estudiar las variaciones temporales de los parámetros del sistema del CO₂ (CID, pCO₂), temperatura y salinidad, mediante muestreos quincenales en la zona intermareal de Arbolitos de Noviembre de 2009 a Noviembre de 2011.
- ❖ De las series de tiempo de la boya oceanográfica de la Estación Ensenada y Arbolitos, comparar y evaluar los cambios temporales de las concentraciones de CID, pH, Temperatura y ΩA .
- ❖ Identificar los eventos de surgencia que se presentaron en la Estación Ensenada durante el período de estudio y en los muestreos quincenales de Arbolitos. La finalidad es estudiar y comparar la variación en las concentraciones de CID, pCO₂ y ΩA , así como estimar la duración de cada evento de surgencia en base a mediciones de la boya.
- ❖ Estimar los flujos de CO₂ en las muestras de agua superficial de Arbolitos usando la información de los muestreos quincenales. Y determinar si la zona de Arbolitos se comporta como fuente o sumidero de CO₂.

3. METODOLOGIA

3.1 Área de estudio

El presente estudio se efectuó en las costas de Ensenada Baja California considerando tres zonas de muestreo (Fig. 2): La primer zona comprende la línea 100 y es la primera línea costa-océano de la red de muestreo del programa IMECOCAL, localizada frente a Ensenada BC, la cual comprende ~220 km y siete estaciones espaciadas cada 37km. La línea 100 se caracteriza por presentar estacionalmente la influencia de la Corriente de California en las estaciones más oceánicas (Estaciones 100.45-100.60) y su interacción con la contracorriente en las estaciones más costeras (Estaciones 100.30-100.40) (Linacre *et al.* 2010). La segunda zona de muestreo es la estación de monitoreo “Estación Ensenada” (31°40.105′N - 116°41.596′W), la cual se ubica a 8km de la estación más costera (100.30) de la línea 100. En dicha estación, se han llevado a cabo bimensualmente mediciones de las concentraciones de Carbono Inorgánico Disuelto (CID). Se han encontrado variaciones en la distribución vertical en la columna de agua, con altas concentraciones durante eventos de surgencia en primavera-verano y con bajas concentraciones en el resto del año (Cervantes, 2010).

Finalmente, a tres km de la estación Ensenada se encuentra la región del intermareal que será descrita en este trabajo como “Arbolitos” (31.70°N - 116.68° W). Dicha zona se caracteriza por estar dentro del intermareal, y en una línea de costa formada de cantiles con altura de hasta 7 m, con clima semiárido y aportes de agua dulce restringidos a la época de lluvias (invierno) (Durazo, 2009; Castro-Martínez 2010; Aguilar-Rosas *et al.* 2001). En la zona aledaña e intermareal de

Arbolitos, se encuentran mantos de macroalgas como *Macrocystis pyrifera*, cuyo desarrollo comienza durante primavera, y continúa hacia verano, alcanza su máximo crecimiento en otoño y durante el invierno su crecimiento disminuye debido al incremento del oleaje (Aguilar-Rosas *et. al.* 2001).

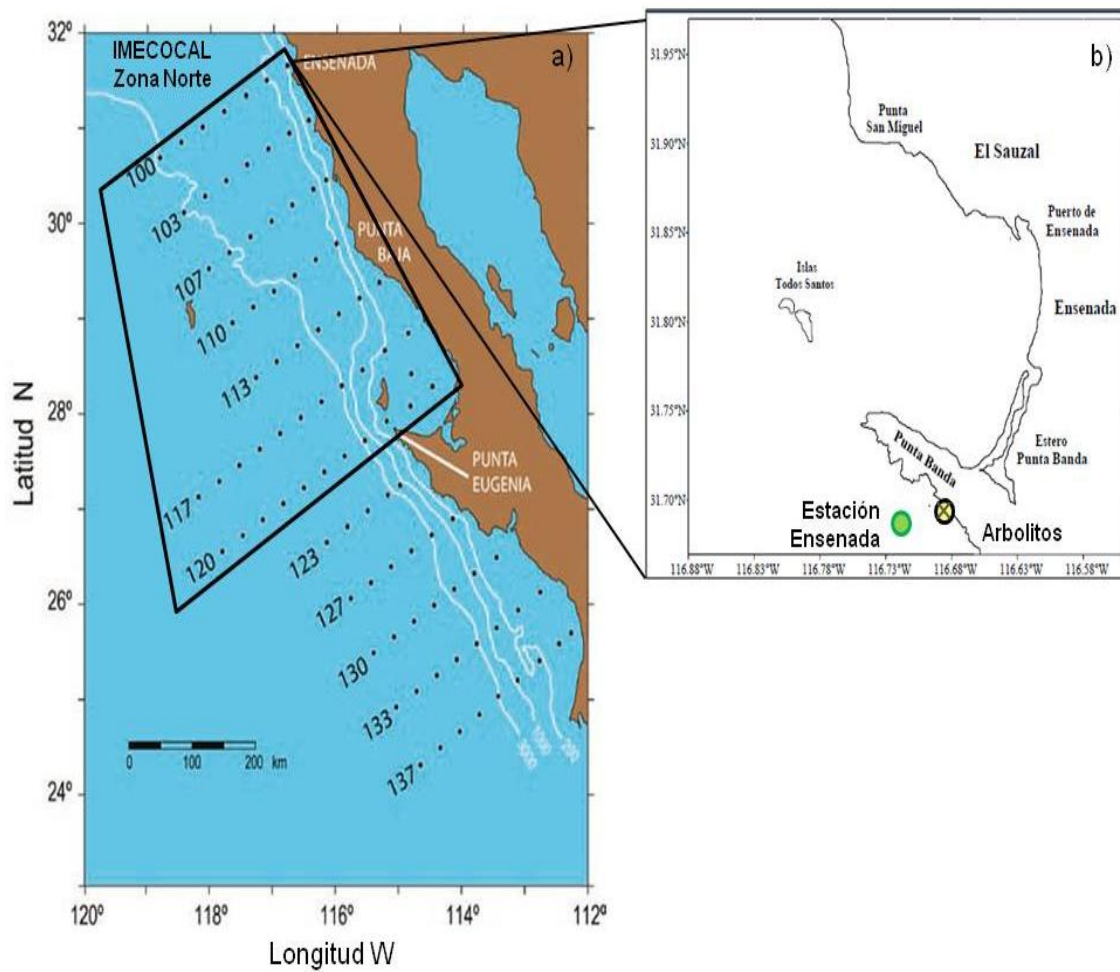


Figura 2.- Localización del área de estudio. a) Región IMECCAL, b) Circulo amarillo con una cruz representa la zona del intermareal de Arbolitos y Circulo en verde representa la Estación Ensenada donde se localiza la boya.

3.2 Muestreo en transecto costa-océano frente a la zona del intermareal.

Se realizó un análisis hidrográfico en tres transectos realizados en primavera-verano (durante la época de eventos de surgencia), correspondientes a la línea 100 del programa Imecocal localizada frente a Ensenada (Fig. 2). Los transectos constan de siete estaciones, con una distancia de separación de ~37 km entre ellas e inician en la estación 30 (ubicada a 11 km de la costa), y terminan en la estación 60, aproximadamente a 220 km mar adentro. En la línea 100 se han llevado muestreos cuatrimestrales desde 1998 a la fecha, registrando temperatura y salinidad por medio de lances de CTD (SBE 9/11) y realizados hasta 500 m de profundidad ó hasta donde el fondo lo permite. Los detalles de los muestreos, procedimientos y análisis de los datos pueden ser consultados en <http://imecocal.cicese.mx>. Para fines de este estudio, sólo se tomaron las variables de temperatura, salinidad y densidad (σ_t), correspondientes a las primaveras de 2007, 2010 y 2011. El muestreo del 2007 fue el único que se realizó como parte del programa internacional North American Carbon Program (NACP) en las mismas estaciones del programa Imecocal. Los detalles, procedimientos, y análisis, se pueden consultar en la siguiente dirección electrónica Http://cdiac.ornl.gov/oceans/Coastal/NACP_West.html. Para este estudio en particular, se tomaron las variables; temperatura, salinidad, densidad (σ_t) y CID (Carbono Inorgánico Disuelto).

3.3 Datos generados en la estación de monitoreo Ensenada

La Estación Ensenada se ubica a 3 km de la costa y cuenta con una boya oceanográfica equipada con sensores para medir cada tres horas la presión parcial del CO₂ (pCO₂) en el agua y en el aire, así como la temperatura del agua de mar y la salinidad. Los datos registrados por la boya son enviados vía satelital al CICESE-IIO y se obtienen a través del enlace <http://www.mbari.org/bog/drifterdata/> en la sección **MBARI-23 (CICESE - Damaged/Previous Ensenada)**.

3.4 Colecta de muestras en zona del intermareal "Arbolitos".

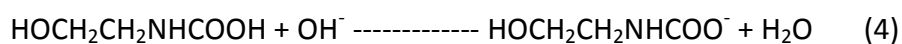
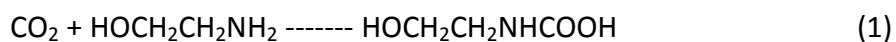
En esta zona del intermareal se llegó por vía terrestre y se realizaron muestreos quincenales por dos años iniciando en noviembre de 2009 a noviembre de 2011. Se recolectaron muestras superficiales discretas para realizar mediciones de temperatura, salinidad, AT (Alcalinidad Total) y CID. Las muestras se tomaron en dirección contraria a las olas y durante la transición de marea baja a alta. Las muestras de agua fueron colectadas en botellas de borosilicato de 500 mL, fijadas con 100 µL de cloruro de mercurio y selladas con grasa Apiezon, para evitar la evaporación y el contacto con la atmósfera, durante su almacenamiento, hasta su análisis en el laboratorio. La salinidad se midió por medio de un salinómetro Guildline AutoSal 8400B previamente calibrado con agua de mar estándar de la IAPSO (International Association for the Physical Sciences of the Oceans).

3.5 Análisis de Carbono Inorgánico Disuelto (CID).

Para la medición del CID se utilizó el método coulométrico descrito por Johnson et al. (1987). Se usó material de referencia certificado para calibrar el instrumento y como control de calidad. Previo al análisis de muestras, las soluciones

catódica (Monoetanolamina) y anódica (Sulfóxido de dimetilo) utilizadas en el análisis, fueron acondicionadas inyectando aproximadamente 10 adiciones de muestras de agua de mar filtrada. Posteriormente, se midió la exactitud y estabilidad utilizando el material certificado con valor de CID conocido, proporcionado por el Dr. Andrew Dickson de Scripps Institution of Oceanography. Si el valor obtenido del estándar se encontró dentro del rango de $\pm 3 \mu\text{mol}$ del valor certificado de CID, se procedió a medir las muestras. Para cada análisis se tomaron alícuotas de peso conocido determinado en una balanza analítica marca Mettler toledo. Posterior a cada inyección, la muestra se hizo reaccionar con H_3PO_4 al 8% en una celda cerrada para convertir todo el carbono inorgánico a CO_2 gas. La celda cerrada donde se realiza la acidificación está conectada a un flujo constante de gas nitrógeno, el cual transporta el CO_2 liberado hacia la celda donde se encuentra la solución catódica (monoetanolamina). Una vez que el gas CO_2 reacciona con la solución catódica forma un complejo en una celda de cristal en el coulómetro, la cual se localiza entre una fuente de luz y un fotodetector para registrar los cambios en transmitancia conforme se lleva a cabo la titulación. En la celda se encuentra una membrana porosa, que separa un electrodo de platino (cátodo) inmerso en solución de monoetanolamina con un indicador colorimétrico de pH de un lado y, del otro lado de la membrana se encuentra un electrodo de plata (ánodo) inmerso en solución anódica. Cuando el CO_2 (g) llega a la celda, reacciona con la monoetanolamina formando un ácido carbámico que hace que el color indicador de esta solución se desvanezca (1). Conforme el % de transmitancia (%T) se incrementa, automáticamente se activa una corriente que es registrada por el coulómetro en

forma de conteos/min, cuando esto ocurre el electrodo de platino, en conjunto con el electrodo de plata comienza a liberar bases OH⁻ (2) y (3), neutralizando la solución y volviendo al %T original (4). Cuando esto sucede, la corriente se detiene y se registra en forma de conteos/min la corriente que fue necesaria para neutralizar la solución.



Para conocer la concentración de CO₂ de la muestra se utilizan los conteos/min obtenidos de la titulación coulométrica en la siguiente ecuación:

$$\text{CID} = (\text{conteos} - \text{Bco} * \text{t}) / (\text{FC} * \text{M})$$

Donde:

CID = Carbono Inorgánico Disuelto de la muestra

Conteos = Número de conteos dados por el coulómetro

Bco = Blanco, número de conteos/min que marca el coulómetro con ácido y gas nitrógeno en la celda, sin muestra.

t = Tiempo de medición de la titulación coulométrica

FC = Factor para calcular concentración, para convertir el contador de corriente en concentración, obtenido a partir de la medición de dos estándares diferentes.

M=Masa de la muestra añadida

3.6 Análisis de alcalinidad total (AT)

Una vez medidas las muestras para CID, se siguió con en el análisis de AT mediante el procedimiento potenciométrico utilizando la metodología descrita por Dickson *et al.* (2003). Previo a la medición de las muestras, se preparó el equipo realizando las mediciones de agua de mar necesarias para que el electrodo se encontrara en las condiciones de acondicionamiento antes de comenzar con los análisis. Un criterio utilizado fue iniciar con análisis de muestras después de que el valor medido del material de referencia se encontraba en el intervalo de $\pm 5 \mu\text{mol}$ del valor de referencia. La titulación se llevó a cabo con un equipo controlado por computadora utilizando un programa en Labview para el control de los instrumentos. Para llevar a cabo el análisis, se tomó una alícuota de la muestra de peso conocido, y se llevó a 20°C en una celda abierta conectada a un termocirculador de agua con temperatura controlada. La titulación se realizó con una pipeta automática marca Radiometer, la cual añadía suficiente HCl $\sim 0.1\text{N}$ con fuerza iónica $0.7 \text{ moles kg}^{-1}$, hasta un pH aproximadamente de 3.5. A partir de esta etapa, la muestra se agitó y se burbujeó intensamente con aire libre de CO_2 para ayudar a liberar el CO_2 producido por la acidificación. Posteriormente, para disminuir el pH hasta 3.0, se realizó un total de 20 adiciones de 0.025 ml de HCl, registrando los cambios de mV de manera simultánea en cada adición. Con estos datos, el programa llevó a cabo una linealización entre el pH, la masa de la muestra y el volumen del HCl que se necesita para neutralizar las bases contenidas en ella, entre un pH de 3.5 a 3.0. Con esta información el programa calculó la AT de la muestra (detalles, ver Dickson *et al.* 2003).

3.7 Procesamiento de datos

Se utilizó el programa CO2Sys.xls (Lewis y Wallace, 1998) para calcular las variables $p\text{CO}_2$, pH in situ y ΩA . Para el análisis y visualización de los datos se utilizaron los programas Ocean Data View (ODV) y Sigma Plot Ver.10. Para corroborar la exactitud de las mediciones, se utilizó material de referencia proporcionado por los laboratorios de SCRIPT. La exactitud para CID fue de $3 \mu\text{molkg}^{-1}$ y para AT de $\sim 5 \mu\text{molkg}^{-1}$, por tanto los errores asociados al método para el cálculo de ΩA , $p\text{CO}_2$ y pH, se estima fueron de ± 0.02 unidades, $\pm 3 \mu\text{atm}$ y ± 0.01 unidades, respectivamente.

3.8 Análisis de la hidrografía durante temporada de surgencias

Mediante el uso de diagramas TS, se detectaron las masas de agua presentes en los tres transectos de la línea IMECOCAL. Se analizaron los transectos de la anomalía de densidad ($\sigma\text{-t}$), para corroborar la persistencia del levantamiento de las isopícnas durante época de surgencias. También se determinó la profundidad de la capa de mezcla, para conocer los cambios en la concentración de CID en una parcela de agua, durante su incursión hacia la costa en eventos de surgencia. Dicha profundidad se determinó a partir de la diferencia entre el valor de densidad en cada profundidad con respecto al valor de la superficie ($\Delta\text{Densidad}$). Por lo que valores de $\Delta\text{Densidad} \leq 1$ indicaron la profundidad de la capa de mezcla, observado en el ascenso de las isolíneas.

3.9 Variación temporal del CID

Se realizó una comparación de la variación temporal entre el CID medido en la boya y el medido quincenalmente en Arbolitos, para lo cual se sobrepusieron valores medidos de forma discreta en Arbolitos, sobre la serie medida en la boya. Y se obtuvieron series de tiempo quincenales, que se compararon estadísticamente.

3.10 Variación estacional

Con la finalidad de evaluar si estacionalmente es posible detectar los cambios de CID en relación a los de temperatura, los datos se agruparon en función de las estaciones de año. Es decir todos los datos de las primaveras, veranos, otoños e inviernos que se registraron durante el período de estudio.

3.11 Presencia y duración del agua subsaturada en Arbolitos

Para detectar la presencia del agua subsaturada con respecto a Ω_A , se identificaron los valores más bajos de Ω_A en Arbolitos y en la Boya. La duración de la presencia de agua subsaturada se determinó, identificando cada uno de los eventos de surgencia. Los cuales frente a las costas de Baja California (Durazo *et al.* 2010; Castro-Martínez 2010) se caracterizan por temperaturas de $\leq 14^\circ\text{C}$ y por presentar valores de $p\text{CO}_2$ mayores al atmosférico ($387 \mu\text{atm}$, <http://co2now.org/>). Para evitar estar en el límite de ambos parámetros, se identificaron al ubicar en la serie de tiempo de la boya los muestreos de Arbolitos que correspondieron con temperaturas $< 15^\circ\text{C}$ junto con valores de $p\text{CO}_2 > 410 \mu\text{atm}$. Esto corresponde a 1°C más que lo propuesto por Durazo *et al.* (2010) y a una desviación estándar de la

climatología para el Mauna Loa de 1958 a 2011, que equivale a 23 μatm por arriba del valor atmosférico (<http://co2now.org/Current-CO2/CO2-Now/>).

3.12 Cálculos de flujos de CO₂

Para estimar los flujos de CO₂ se calculó el $\Delta p\text{CO}_2$ que es la diferencia de la presión parcial de CO₂ entre el agua y la atmósfera ($\Delta p\text{CO}_2 = p\text{CO}_2_{\text{agua}} - p\text{CO}_2_{\text{atm}}$). En el caso de la atmósfera se consideró una $p\text{CO}_2$ de 387 μatm (NOAA Earth System Research Laboratory, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>). En este cálculo, los valores positivos indican que el CO₂ va del océano a la atmósfera, mientras que valores negativos indican que el flujo de CO₂ ocurre de la atmósfera hacia el océano.

4. RESULTADOS

4.1 Hidrografía del Transecto Frente a las Costas de Ensenada

Análisis de Masas de Agua Mediante Diagramas T-S

En la parte norte de las costas de Baja California, el Agua del Sub Ártico (ASA) se encuentra en los primeros 100 metros. Por lo tanto, en las aguas superficiales a lo largo de la línea 100 de Imecocal y en la zona de rompiente, se esperaba encontrar valores característicos del ASA. Por lo anterior, en este trabajo se tuvo un especial interés en dicha masa de agua.

En los diagramas T-S que se realizaron en las temporadas de surgencias del 2007, 2010 y 2011 de la línea 100, se identificó el ASA en los primeros 100m y por debajo de esta el AESs (Fig. 3). Sin embargo, se observaron variaciones en los volúmenes de ASA y de AESs en las temporadas de este estudio. Lo anterior se pudo observar al analizar el diagrama T-S y también, el análisis de comparativo que resultó al sobreponer el T-S climatológico de la estación 100.30 desarrollado por Durazo *et al.* (2010) en las mediciones de este trabajo. De dicho análisis se observó lo siguiente:

1.-Durante el 2007 en los primeros 180 m se observó el ASA y la advección con el AESs. En las aguas superficiales hasta 50 m, se observaron valores de temperatura y salinidad por arriba del perfil climatológico, con valores de temperatura entre 12 y 15°C y una salinidad de ~33.7. Hasta los 200 m se observó que los valores de temperatura y salinidad coincidieron con el perfil climatológico. Y debajo de 200m se observaron valores debajo del perfil climatológico. Sin embargo en base a la salinidad se infiere que en el 2007 se presentó el AESs, la cual se reflejó en la composición de las aguas superficiales (Fig.3a).

2.-En el 2010, se observó mayor presencia del ASA en las aguas superficiales que el observado en el 2007. En los primeros 200 m se observaron valores de salinidad que fluctuaron en el intervalo de ~33.2 hasta 33.5 y temperaturas de 10 a 16°C. Estos valores se ubicaron ligeramente por debajo del perfil climatológico. Además también se detectó la presencia de agua más salina ~200 m con valores característicos del AESs (34) y que se ubicaron cercanos y sobre al T-S climatológico, (Fig. 3b).

3.-En el 2011, el escenario fue diferente a los dos años anteriores. En este año, el ASA presentó anomalías positivas y se observó la presencia de agua menos salina y con valores que estuvieron por debajo del valor climatológico. Los valores de temperatura y salinidad en los primeros 200m, fluctuaron entre ~9 y 17°C y entre ~32.75 y 34 respectivamente (Fig. 3c). Adicionalmente se detectó agua más salina (34) a ~ 200m de profundidad, característicos del AESs.

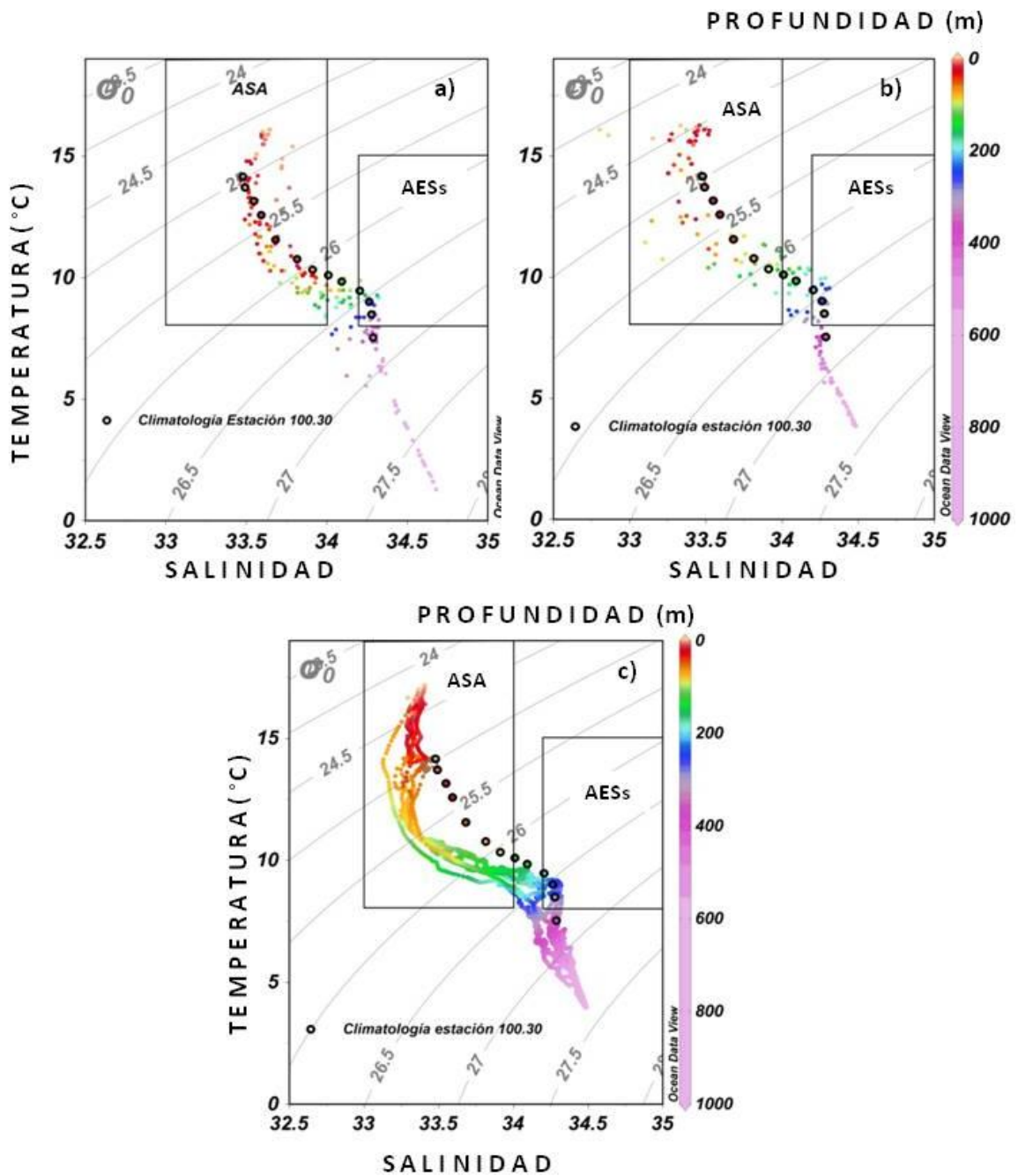


Figura 3.- Diagramas de temperatura vs salinidad de la línea 100 para las temporadas de surgencias; (a) 2007, (b) 2010 y (C) 2011. Los círculos corresponden al perfil climatológico para la estación 100.30, propuesto por Durazo *et al.* (2010). ASA = Agua del Subártico, AESs Agua Ecuatorial Subsuperficial.

Análisis de Isolíneas de la Anomalía de Densidad

Las secciones verticales de la anomalía de densidad ($\sigma-t$) de los tres diferentes años, se presentan en la Fig. 4. Tomando como referencia las isopicnas 25 y 25.5, durante la temporada de surgencia 2007. Las isopicna de 25.5 presentó un claro ascenso desde profundidades de ~ 100 m hasta 50 m en dirección hacia la costa, mientras que la isopicna de 25 ascendió de océano a costa desde 50m hasta la superficie.

En la temporada 2010, las isopicnas mostraron un ligero levantamiento acia la costa. La isopicna de 25.5 ascendió de 80 m en el océano hasta 50 m en la costa, mientras que la isopicna de 25 ascendió de 60 m hasta ~ 20 m (Fig. 4b). También se pudo observar la presencia de agua menos densa en la superficie ~ 24.5 (dicha agua no se observó en el 2007). Esto refleja lo observado en el diagrama T-S, en cual se encontró menor salinidad en aguas superficiales (anomalía negativa de salinidad), producto de una mayor presencia de agua ASA (Fig.4b).

A diferencia de las temporadas 2007 y 2010, la temporada 2011 se caracterizó por presentar la isopicna de 24.5 más profunda en dirección océano–costa (producto de la presencia de un mayor volumen de agua menos salina), desde la superficie hasta 50 m. Esto se detectó en los diagramas T-S ya que se caracterizó por presentar los valores más bajos de salinidad. En este año en particular, las isopicnas de 25 y 25.5 no presentaron levantamiento alguno aún cuando el muestreo corresponde a una temporada de surgencia. Cabe señalar que ambas isopicnas se mantuvieron a 80m y 100m respectivamente (Fig. 4c).

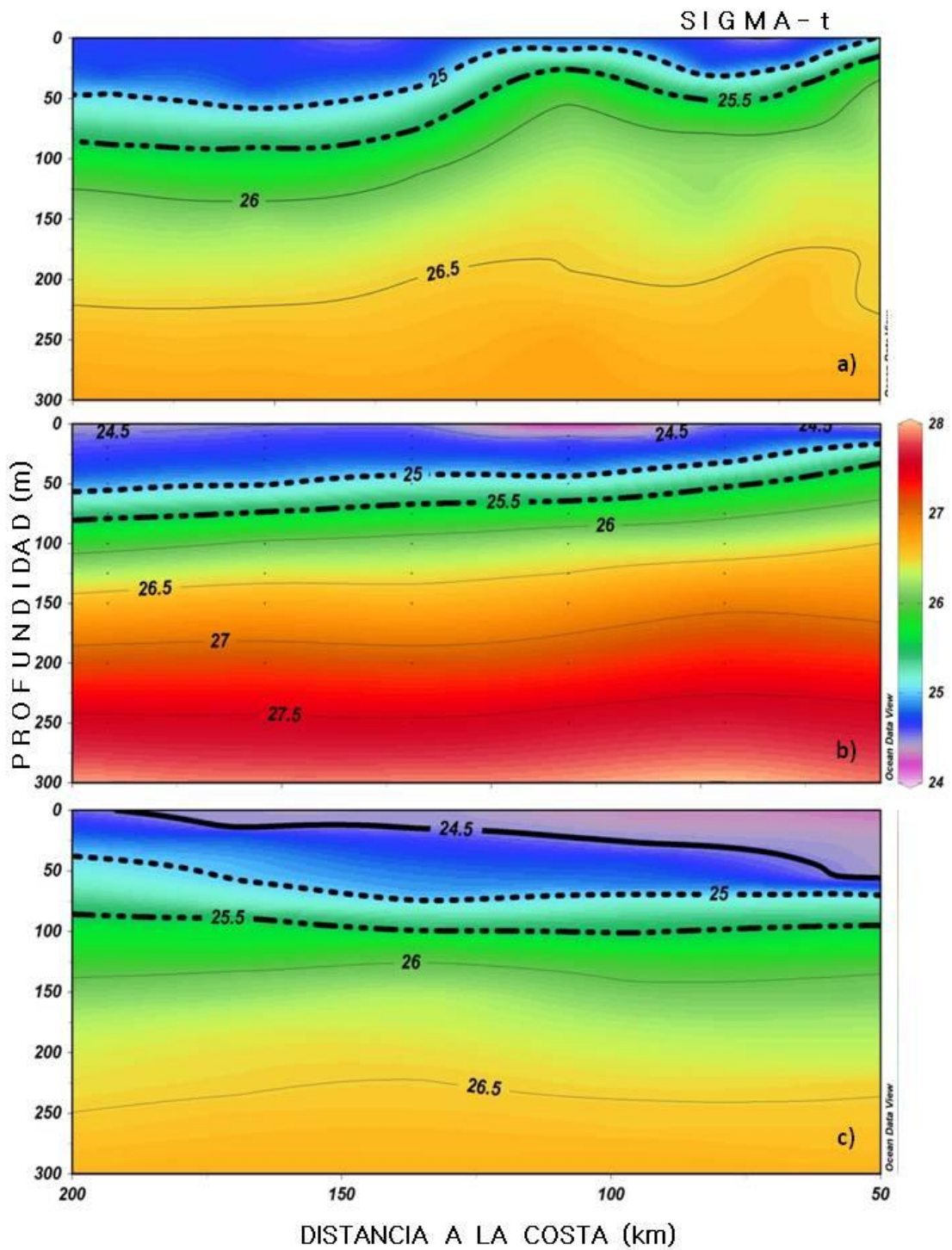


Figura 4.- Secciones verticales de la anomalía de densidad (kg/m^3) frente a las costas de Baja California, correspondientes a las temporadas de surgencias de los años (a) 2007, (b) 2010, (c) 2011.

4.2 Análisis del muestreo 2007

Cambios de CID en las isopícnas de 25.5 y 25 de océano a costa

En el estudio de la temporada primavera-verano, como se explicó anteriormente, se observó que la temporada 2007 presentó un ascenso de las isopícnas en dirección océano–costa atribuido a eventos de surgencia. Los eventos de surgencias son típicos en este tipo de regiones, sin embargo, en este trabajo en particular, la pregunta que se generó fue ¿ocurren cambios en la concentración de CID del agua de una misma densidad cuando esta llega a la costa? A los datos hidrográficos generados en esta temporada, se les aplicó la misma metodología propuesta por Fassbender *et al.* (2011) la cual consiste primeramente en el análisis hidrográfico de una parcela de agua de una misma densidad transportada a la costa por surgencias. En el análisis se encontró lo siguiente:

- La estructura de las isopícnas de 25 y 25.5 señaló transporte de agua desde profundidades de ~100 m en dirección océano–costa. Sin embargo, se detectaron efectos de advección entre las masas de agua ASA y AESs que justo se mezclaron cerca de la costa (Fig. 4a). La presencia de la mezcla de las dos masas de agua limitó el uso de la metodología de Fassbender *et al.* (2011), quienes en las recomendaciones de la técnica indican que esto sería una restricción.
- La mezcla del ASA y AESs se detectó a lo largo del transecto en diferentes regiones. El análisis del diagrama T-S mostró que el correspondiente a la estación más oceánica (estación perfil 86, Fig.5), presentó características similares a los perfiles cercanos a la costa (87, 88, 89, 90); mientras que el perfil de la estación más costera (94)

presentó características muy similares a la estación 91 (ubicada entre las regiones costera y oceánica). Lo anterior sugiere que las estaciones más oceánicas (86-90), se caracterizaron por la influencia del ASA, mientras que las estaciones más costeras (91-94) presentaron influencia del ASA y AESs (Fig. 5). Por lo tanto, el agua que llega a la costa o zona de rompiente no tiene un solo origen.

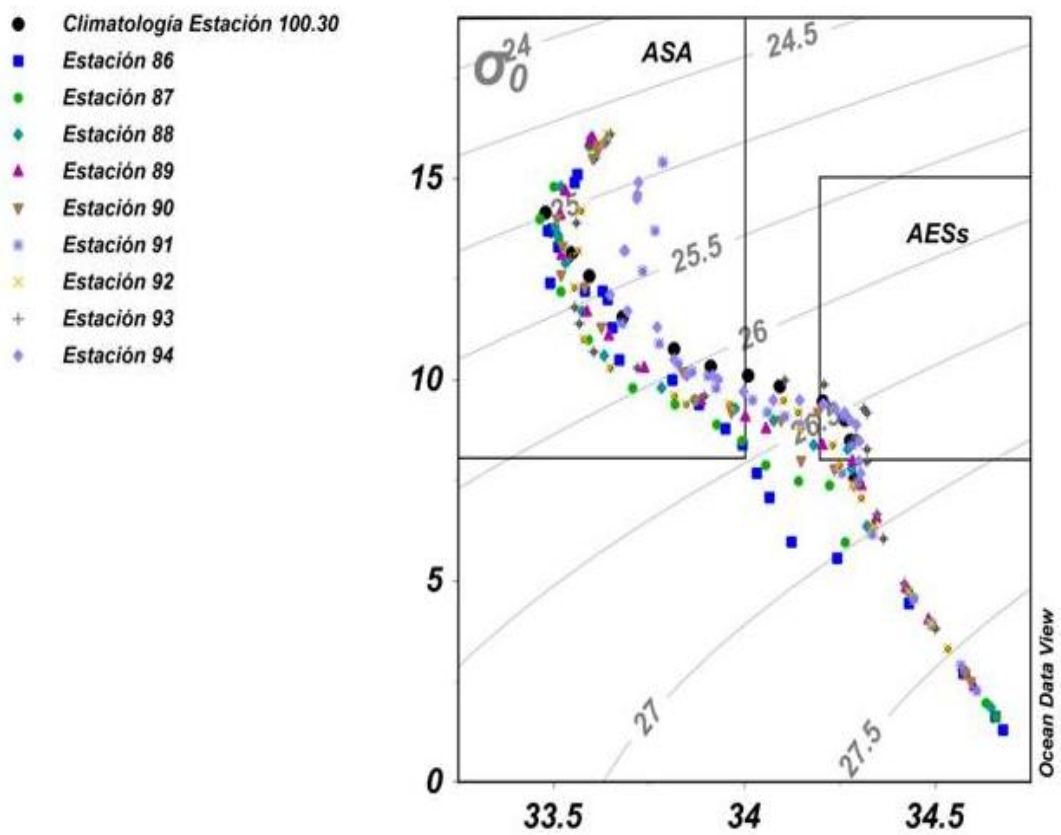


Figura 5.-Análisis por estaciones del diagrama T-S para la temporada 2007

En el transecto de salinidad de la figura 6, en el cual adicionalmente se identificaron dos levantamientos perpendiculares a la costa, uno debido a eventos de surgencias y otro debido a la presencia de un giro ciclónico: el primero relacionado a eventos de surgencia, en cual se observa el transporte de agua desde 150 m a 50 m de profundidad en dirección océano a costa con una salinidad de ~ 33.8 . El segundo entre 60 y 100 km de la costa, en el cual se observa un ascenso desde profundidades de ~ 70 m (Fig. 6a). Este levantamiento pudiera deberse a la presencia de un giro ciclónico (Fig. 6a). Adicionalmente, en el transecto se seleccionaron los primeros 60 km del transecto de salinidad de 0 a 150 m, con la finalidad de estudiar con más detalle los primeros 150 m durante el evento de surgencia (Fig.6b). En esta sección se observó lo siguiente:

- Levantamientos hacia la costa de las isohalinas de 33.7 y 33.9, desde profundidades de ~ 100 m hacia 20 y ~ 50 m respectivamente.
- La intrusión de agua más salina (~ 34) en los primeros 30 km por debajo de los 100 metros. Cabe señalar que valores mayores a 34 son indicativos de la presencia de la masa de agua AESs (Fig. 6 b).

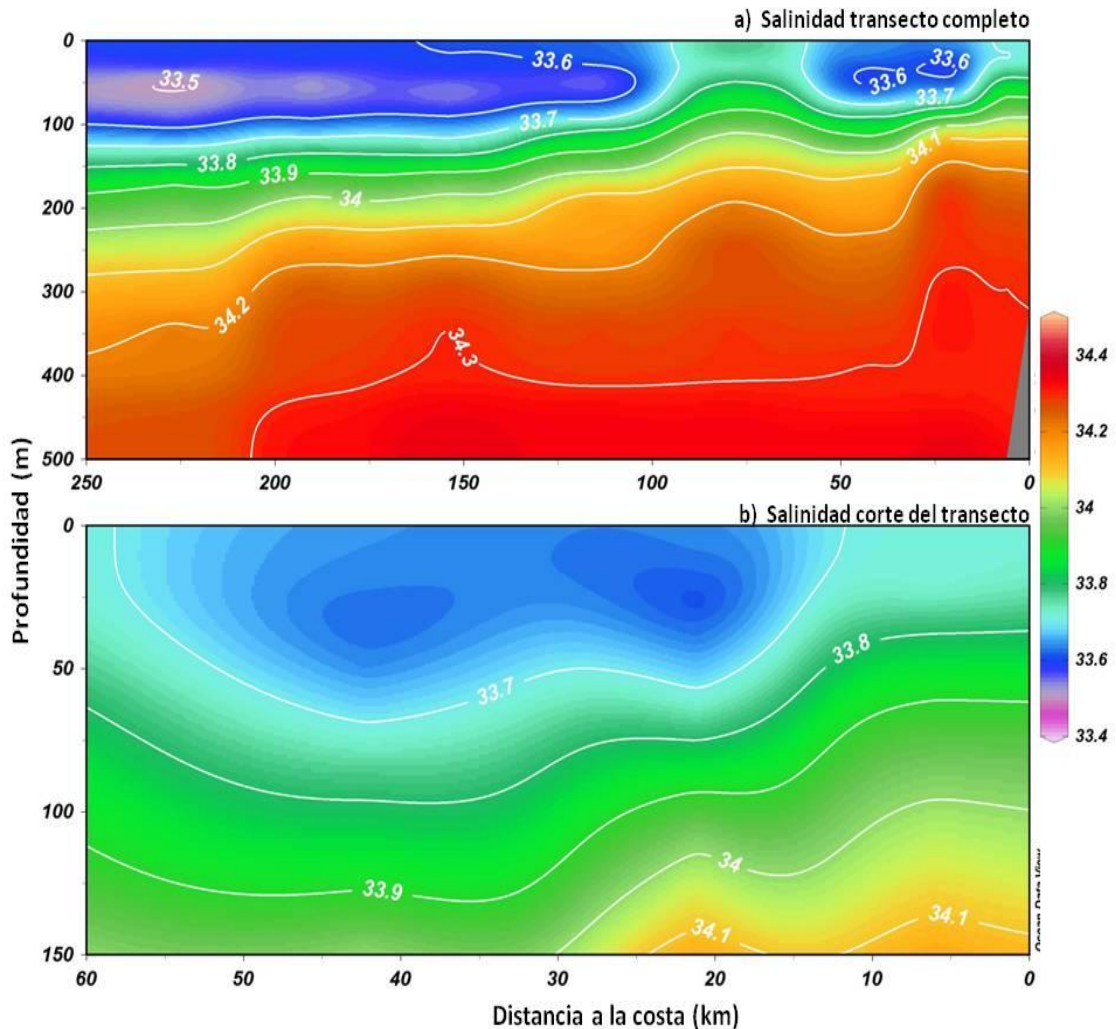


Figura 6.-Transecto de salinidad de la línea 100, temporada de surgencias 2007 (a); Corte del transecto de salinidad de los primeros 60km de la costa y desde la superficie a 150m de profundidad (b).

Capa de mezcla para la temporada de surgencia 2007

La capa de mezcla se ubicó en los primeros metros de profundidad del océano, donde como es de esperarse la densidad y la temperatura no tienen cambios (Fig. 7a). Sin embargo, estas propiedades cambian abruptamente con la profundidad hasta donde la influencia del viento y el calor absorbido por el océano son mínimos. La profundidad de la capa de mezcla se definió hasta donde los valores de Δ Densidad fueron >1 , pues las isolíneas presentaron hundimiento y por lo tanto la influencia del evento de surgencia fue nula en esa porción de la columna de agua. Se observó que

el ancho de la capa de mezcla fue en aumento de costa (50m) hacia el océano (60m) respectivamente (Fig. 7b).

En la capa de mezcla se ubicaron los valores medidos de CID (Fig.8). En este transecto se observaron mayores concentraciones de CID en los primeros 10 km por debajo de los 40m de profundidad; estos máximos coinciden con la intrusión de agua más salina descrita anteriormente (Fig. 6b). Cabe señalar, que en los primeros 60 km que se estudiaron, el transporte de agua en dirección océano – costa sugirió provenir del mismo campo de densidad. Sin embargo en su trayectoria hacia la costa se observó la intrusión de agua de un diferente campo de densidad, lo que podría adjudicarse al AESs. El incremento de la concentración de CID cercano a la costa podría deberse a la intrusión del AESs.

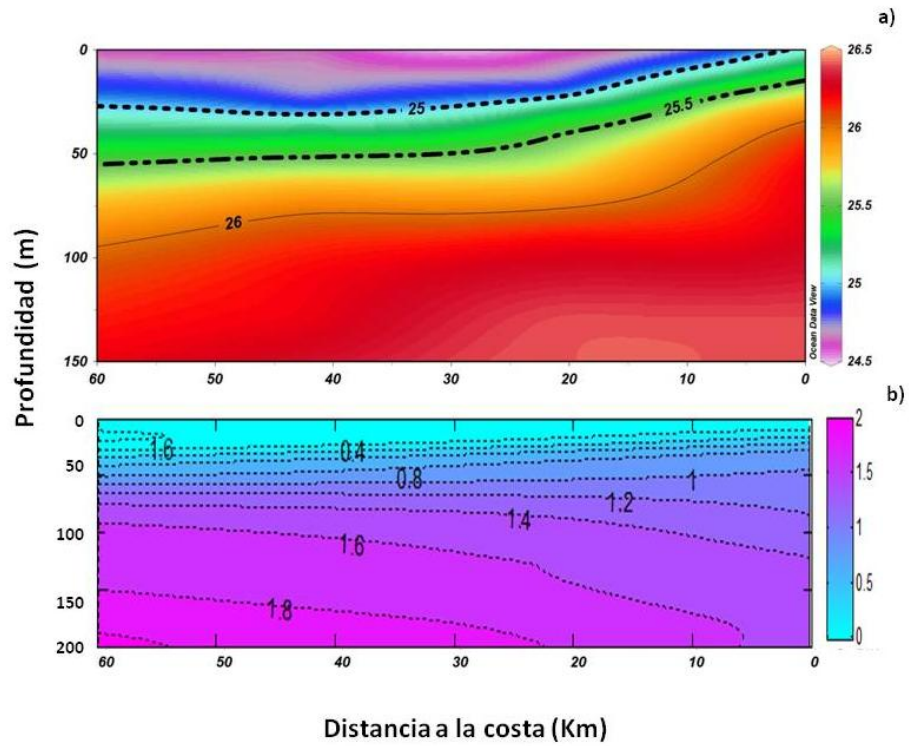


Figura 7.-- Estimación de capa de mezcla a) Corte en el transecto de la anomalía de densidad de la línea 100-2007 para los primeros 60km y en los primeros 150 m de profundidad y b) Δ Densidad = valor de densidad en cada profundidad menos al valor de la superficie.

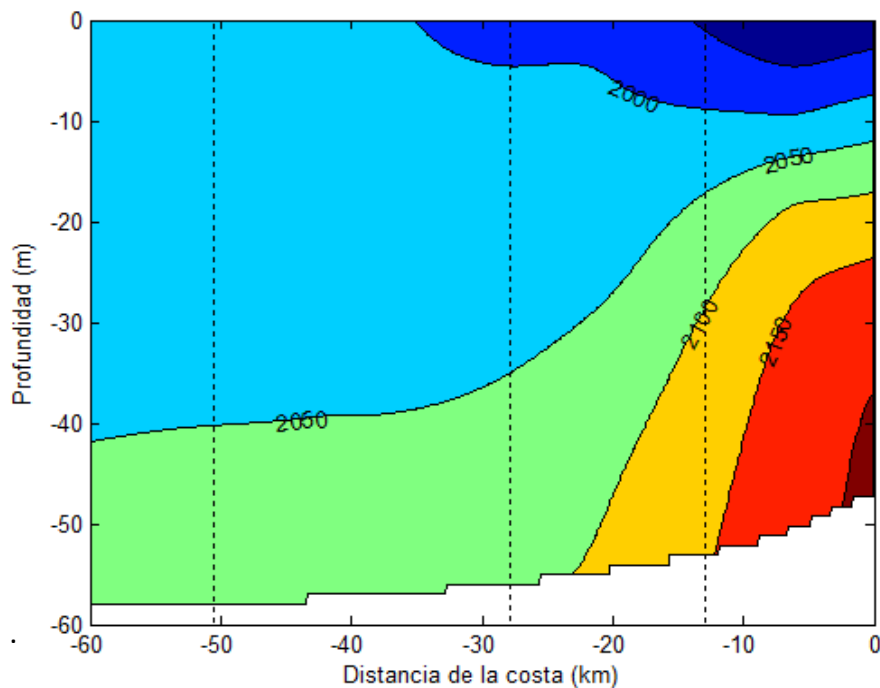


Figura 8.-- Concentración de CID en la capa de mezcla en el transecto costa-océano de la línea 100 del 2007.

La Boya de la Estación Ensenada como sensor de la región oceánica

La advección del ASA y AESs que se observó en la parte costera en el 2007, limitó estimar los cambios de la concentración de CID en una parcela de agua durante su incursión hacia la costa en temporada de surgencias, como lo describe Fassbender *et al.* (2011). Se planteó entonces, utilizar la información de la estación Ensenada como referencia de la señal más oceánica y compararla con las mediciones realizadas en la zona de rompiente de Arbolitos

Se ha reportado que la estación Ensenada es un buen sensor de los cambios oceanográficos que ocurren en la región norte de las costas de BC (Linacre et al., 2010; Durazo et al., 2010). Además, Linacre et al. (2010) generaron una climatología de la estación 100.30 la cual fue utilizada en este trabajo. Se realizó el análisis de los diagramas T-S, comparando los lances de CTD realizados en las temporadas de surgencia 2007, 2010 y 2011 con el lance climatológico (Fig. 9a). A partir de dicho análisis se encontró lo siguiente:

* Durante 2007, los valores de temperatura y salinidad estuvieron por arriba del valor climatológico generado en la estación 100.30 (Fig.9a). Lo anterior sugirió la presencia de agua más salina de lo normal (34.2) como se observó en el análisis del transecto de la línea 100.

* En el 2010 los valores de temperatura y salinidad se observaron ligeramente por debajo de a la climatología de la estación 100.30 con valores de salinidad entre 33.2 y 33.7 (Fig. 9a).

* En el 2011 se encontraron valores de temperatura y salinidad por debajo de la climatología tal y como se observó en el anterior análisis de transectos. Los valores de salinidad mínimos se observaron muy cerca de 33.2 (Fig. 9 a).

Adicionalmente al diagrama TS comparativo entre la Estación Ensenada y la climatología de la estación 100.30, se añadieron los valores de temperatura y salinidad que se obtuvieron en Arbolitos durante las primaveras y veranos del 2010 y 2011 (Fig. 9b). Se observó que las características del agua de la estación Ensenada y de Arbolitos, tiene un mismo origen, puesto que no se observaron diferencias significativas entre estos sitios. La climatología fue un buen punto de referencia para conocer el origen y características del agua en Arbolitos, además es posible detectar valores extremos como el que se observó en 2011 en Arbolitos cuyos valores fueron más salinos y cálidos con respecto a la climatología y que podría atribuirse un evento de surgencia. En este estudio es posible evaluar los cambios de la química del carbono entre la estación Ensenada y el sitio intermareal de Arbolitos.

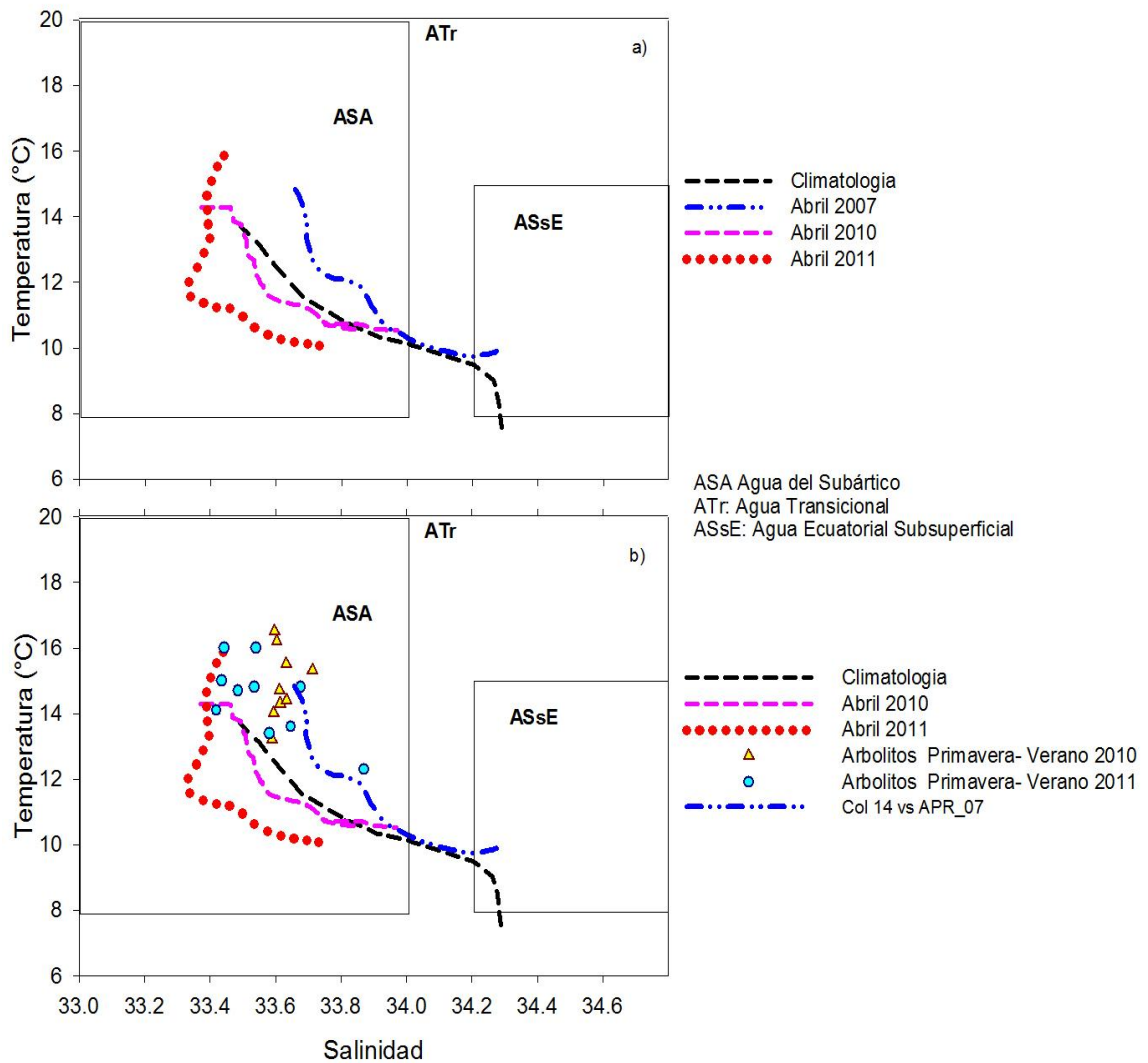


Figura 9.- Diagrama TS de la estación Ensenada correspondientes: a) Mes de abril para las temporadas de surgencias; 2007 (Línea azul), 2010 (línea rosa) y 2011 (línea roja). La línea discontinua negra, corresponde a la climatología realizada por Durazo *et al*, (2010), para la estación 100.30 de Imecocal; b) Se añadieron los valores de temperatura y salinidad del sitio intermareal Arbolitos de las primaveras-veranos de 2010 y 2011.

4.3 Variación temporal de pCO₂ y CID en la Estación Ensenada y Arbolitos

Tanto en la estación Ensenada como en Arbolitos, se observaron disminuciones de temperatura que correspondieron con un aumento de pCO₂ (boya) y de CID en Arbolitos (Fig. 10 y 11). El sensor de salinidad de la boya presentó fallas, por lo que no fue posible analizar dicha variable. En el 2011 se observaron las mínimas temperaturas y máximos valores de pCO₂. En general la máxima variabilidad de T y pCO₂ ocurrió entre los meses de marzo a octubre y la mínima en otoño e invierno. Las características particulares de las variaciones en ambos sitios se describen a continuación:

Estación Ensenada

En la boya se detectaron temperaturas mínimas de 10.6°C y máximas de pCO₂ de 863 µatm durante la temporada de surgencias del 2011. En la temporada del 2010, las mínimas temperaturas y máximos valores de pCO₂ fueron de 11.4°C y 793 µatm respectivamente. Particularmente en el 2009 el periodo de muestreo fue corto y no se detectaron variaciones notorias en los valores de temperatura y pCO₂, pues los intervalos fueron 15 a 18.5°C y 380 a 410 µatm respectivamente. Por otro lado en el 2010, las mayores variaciones se observaron entre mayo y octubre, pues se detectaron disminuciones notorias de temperatura hasta de 11.4°C durante Julio y septiembre. Dichas disminuciones coincidieron con máximos de pCO₂ de 640 y 800 µatm. Para el caso de los meses de noviembre a diciembre, se detectaron fluctuaciones de temperatura entre 12.3 a 19.4°C y pCO₂ 340 a 570 µatm. Cabe destacar que de febrero a mayo de 2010 la boya no estuvo en funcionamiento (Fig. 10b). Por otro lado, en el 2011 se detectaron claras variaciones de temperatura y

pCO₂ durante los meses de enero a julio (10.6 - 18 °C, 228 - 863 μatm). Se encontraron valores mínimos en marzo (10.6°C) y abril (11°C), correspondientes al aumento de pCO₂ (770 y 860 μatm). De agosto a noviembre se encontraron variaciones de temperatura de 12.4 a 19.7°C y de pCO₂ de 281 a 529 μatm.

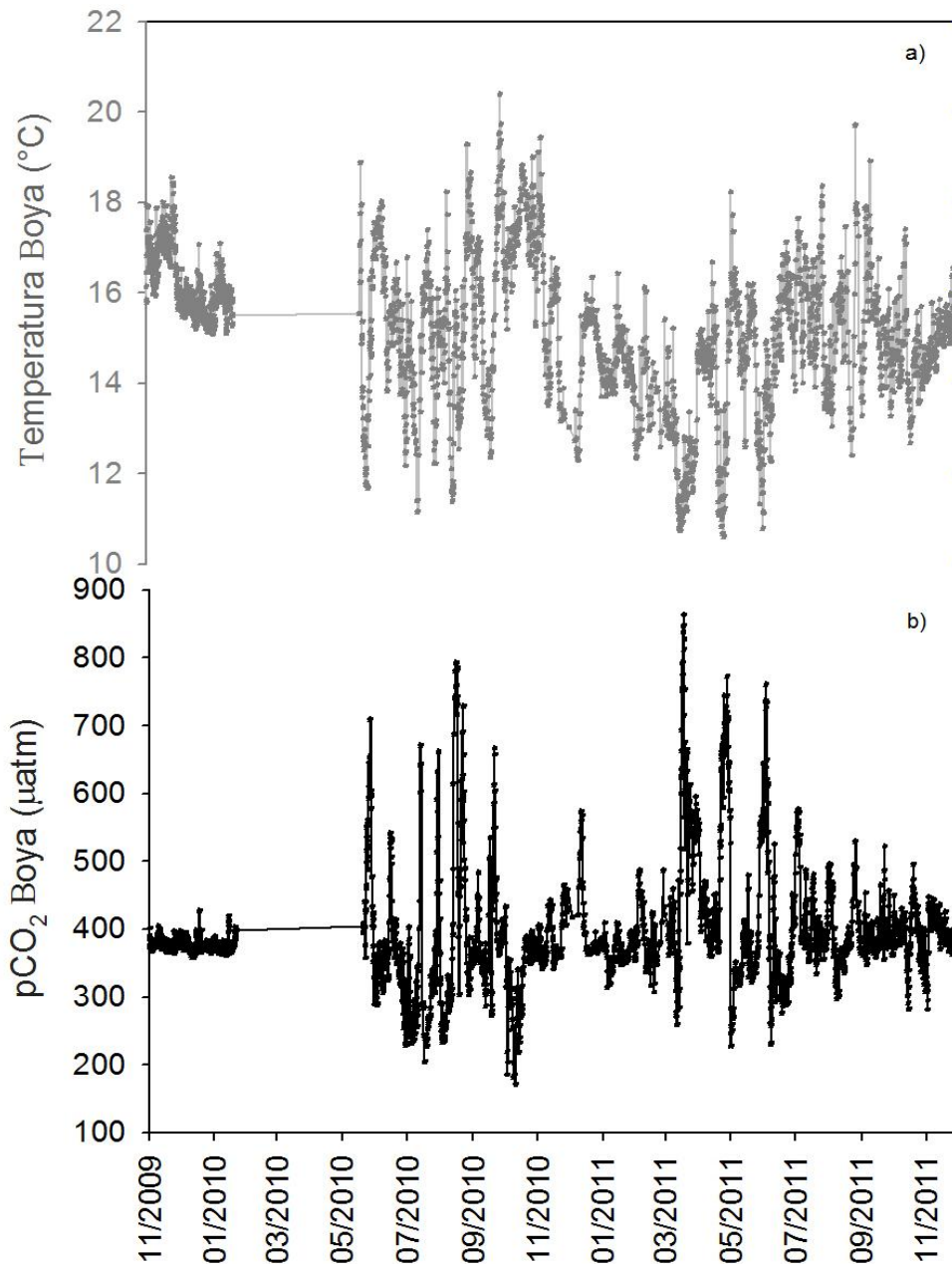


Figura 10.- Series de tiempo de a) Temperatura y de b) pCO₂ registradas en la boya instalada en la estación Ensenada, durante el período de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011.

Arbolitos

En Arbolitos al igual que en la boya, se detectaron las menores temperaturas y mayores concentraciones de CID durante la temporada de surgencias en el 2011 (11.2°C, 2134 µmol/kg), mientras que en la temporada del 2010 se registraron valores mínimos de temperatura (12.7°C) y con menor concentración (2087 µmol/kg) en comparación que el 2011. Particularmente durante el 2009, no se observaron cambios de las variables en estudio como las que se detectaron durante el 2010 y 2011 debido a que se contó solo con datos de la parte final del año. Sin embargo, en este periodo se observaron variaciones de T entre 15 - 16.5°C, de CID entre 1990 - 2015 µmol/kg y de salinidad entre 33.3 - 33.7 (Fig. 11 a, b y c).

Por otro lado, las bajas temperaturas de agosto a octubre (tal y como se registró en la boya) sugirieron un retraso de los eventos de surgencia en el 2010. Pues de enero a julio del 2010 no se detectaron variaciones notorias en los intervalos de temperatura (13.2 a 16.5 °C), CID (2070 a 1940 µmol/kg) y salinidad (33.5 a 33.7), en comparación con las variaciones de agosto a octubre (intervalos de temperatura de 12.7 a 18.3 °C, de CID de 1936 a 2087 µmol/kg y salinidad de 33.2 a 33.6). El resto del año tal y como ocurrió con estos meses en 2009, se encontraron mínimas variaciones de temperatura (13.1 a 15.7°C), CID (1970 a 2031 µmol/kg) y salinidad (33.3 a 33.4) (Fig. 11 a, b y c). En lo que respecta al 2011, como se esperaba, se detectaron las mayores variaciones en los meses de febrero a julio, con intervalos de temperatura de 11.2 a 16 °C, CID de 2134 a 2013 µmol/kg y de salinidad de 33.2 a 33.5. En los meses de agosto a noviembre, se detectaron mínimas variaciones de

temperatura (12 a 13.5 °C), CID (2064 a 2013 $\mu\text{mol}/\text{kg}$) y salinidad (33.5 a 33.4) (Fig. 11 a, b y c).

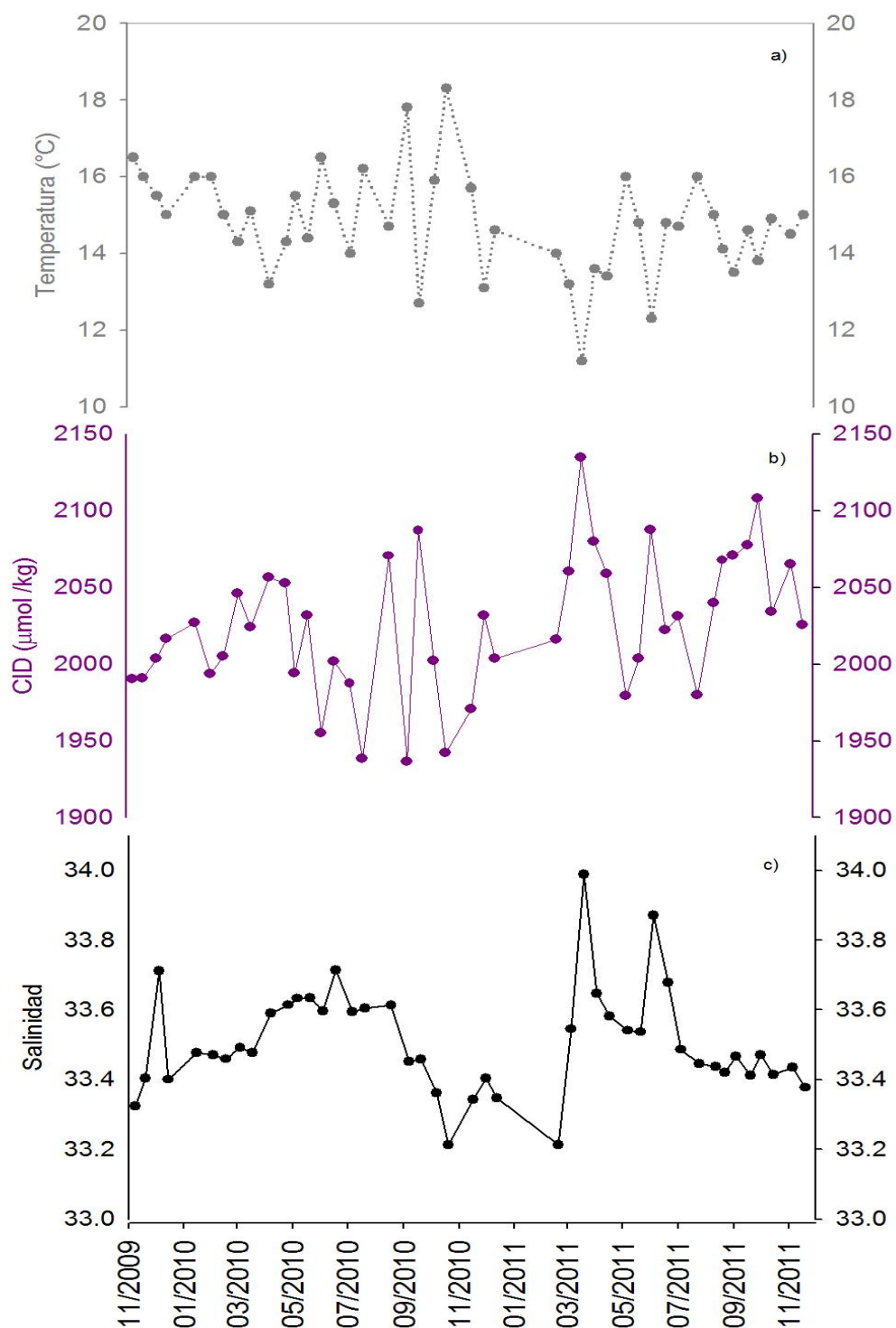


Figura 11.- Serie de tiempo de a) Temperatura, b) CID y c) Salinidad, registradas en la estación Arbolitos durante el periodo de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011

Comparación de las series de tiempo de T y CID entre Arbolitos y la boya

Temperatura

Los valores de temperatura en Arbolitos siguieron la misma tendencia que los valores que se registraron en la serie de tiempo de la boya (Fig.12 a). Se contrastaron las series de tiempo de temperatura de la boya y Arbolitos, con la finalidad de detectar si los valores que se registraron en ambos sitios coincidieron en magnitud y tiempo. En dicha comparación, se observó que la temperatura en Arbolitos (Min.de 11.2 y Max. de 18.3°C) estuvo dentro del intervalo de temperatura que se registró en la boya (Min.de 10.6 y Max. de 20.4°C). Sin embargo, aunque ambas series de tiempo coincidieron en la misma tendencia, se detectaron mayores fluctuaciones de temperatura en la Boya ($\pm 2^\circ\text{C}$) (Fig. 12 a).

Las mediciones quincenales de temperatura de la boya y de Arbolitos, no mostraron diferencias estadísticamente significativas ($t_{\text{calculada}} -0.32 < t_{\text{critica}} 0.73$). En el análisis se incluyeron los pares de datos quincenales que se obtuvieron de la serie de tiempo, tanto de la boya como de los muestreos discretos de temperatura obtenidos de Arbolitos (Fig. 12 b).

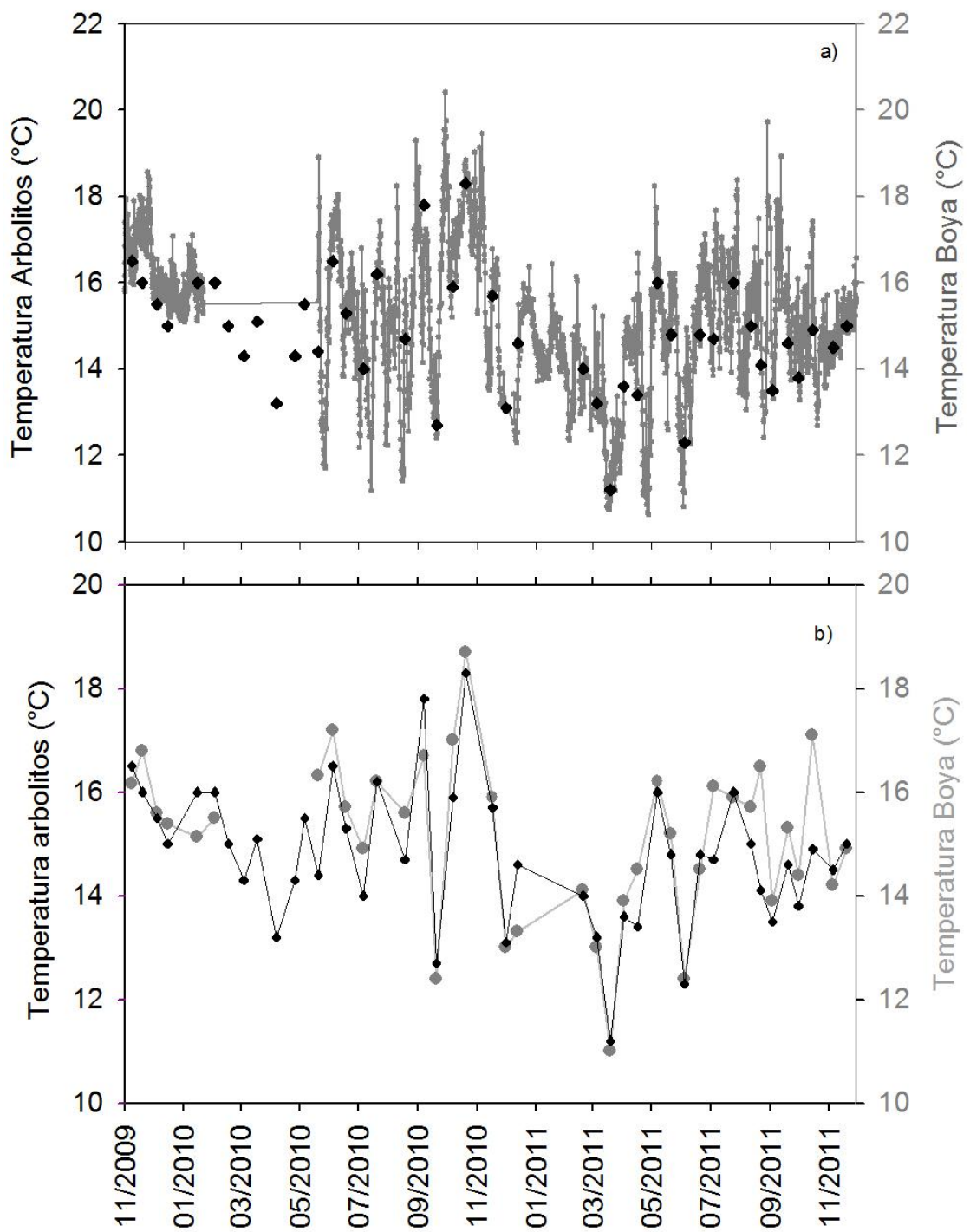


Figura 12.- Comparación de las series de tiempo de temperatura de Arbolitos (negro) y la boya (gris), de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011.; a) Serie de tiempo continúa de la boya y mediciones discretas de Arbolitos; b) Series de tiempo quincenales de temperatura de la boya y de arbolitos.

Carbono Inorgánico Disuelto

Los valores de CID calculados para la boya durante el periodo de noviembre de 2009 a noviembre de 2011, se encontraron dentro del intervalo que se observó con respecto a las mediciones directas en Arbolitos (Fig. 13). Los valores máximos y mínimos de Arbolitos fueron de 2134 y 2036 $\mu\text{mol/kg}$ respectivamente, mientras que en la boya fueron de 2169 y 1856 $\mu\text{mol/kg}$. Sin embargo, aún cuando en promedio las mediciones de CID en Arbolitos fueron de 35 $\mu\text{mol/kg}$ más altas que las de la boya, cinco valores de CID de Arbolitos no concordaron con la serie de tiempo que registró la boya durante Agosto a Septiembre de 2011. Una posible causa que explique esta diferencia puede deberse a errores analíticos o a la presencia de una marea roja (Peña Com. personal) (Fig. 13, 5 puntos en rojo). Por ello estos cinco datos se estimaron a partir de la relación que se encontró en este trabajo entre temperatura y CID. Pues se encontró que para el periodo comprendido de noviembre de 2009 a julio de 2010, el 78% de la variabilidad del CID fue explicado por la temperatura (Fig.14). La serie con los datos completos incluyendo los datos calculados se muestra en la figura 15.

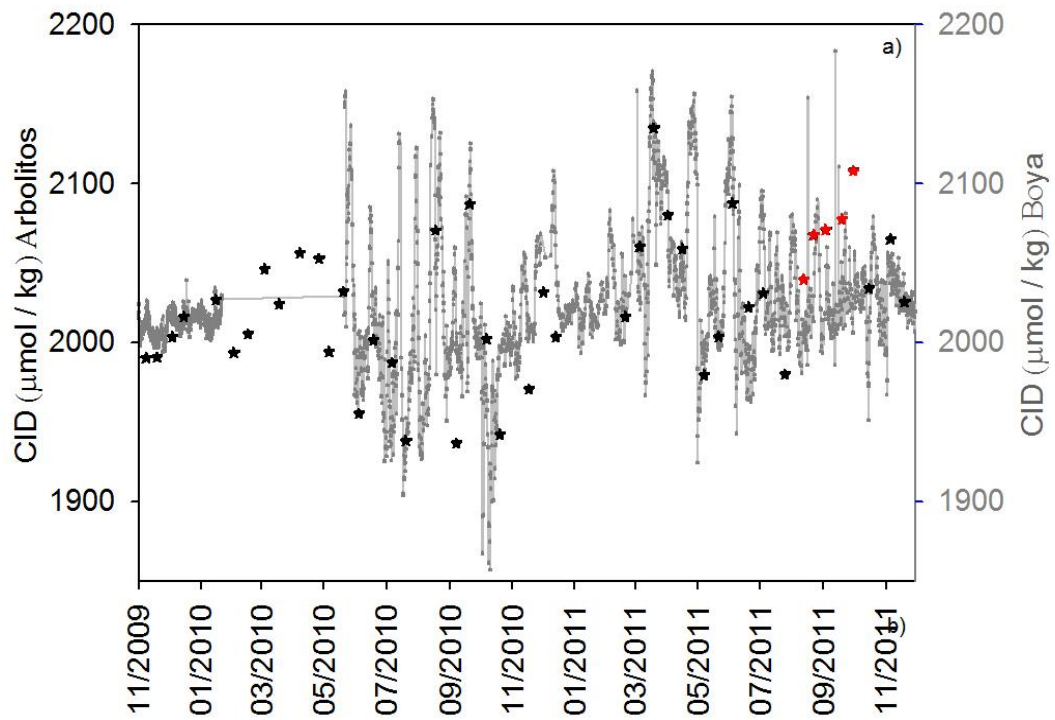


Figura 13.- Comparación de las series de tiempo de CID de Arbolitos (negro) y la boya (gris), de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011

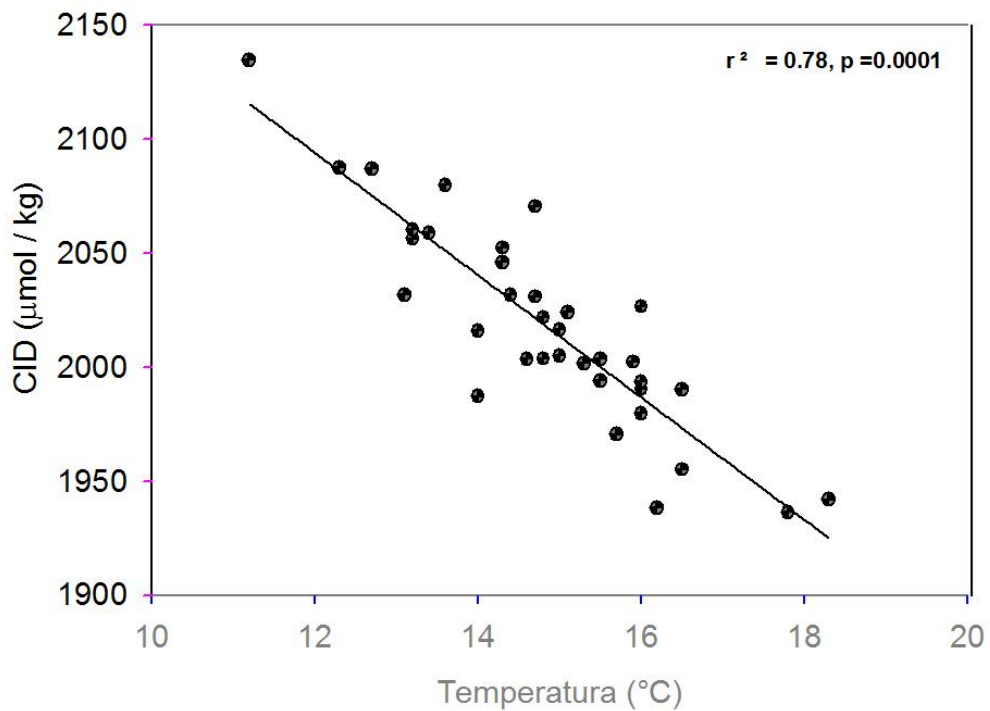


Figura 14.- Temperatura vs CID de Arbolitos para el período de Noviembre 8 de 2009 a Julio 20 de 2010.

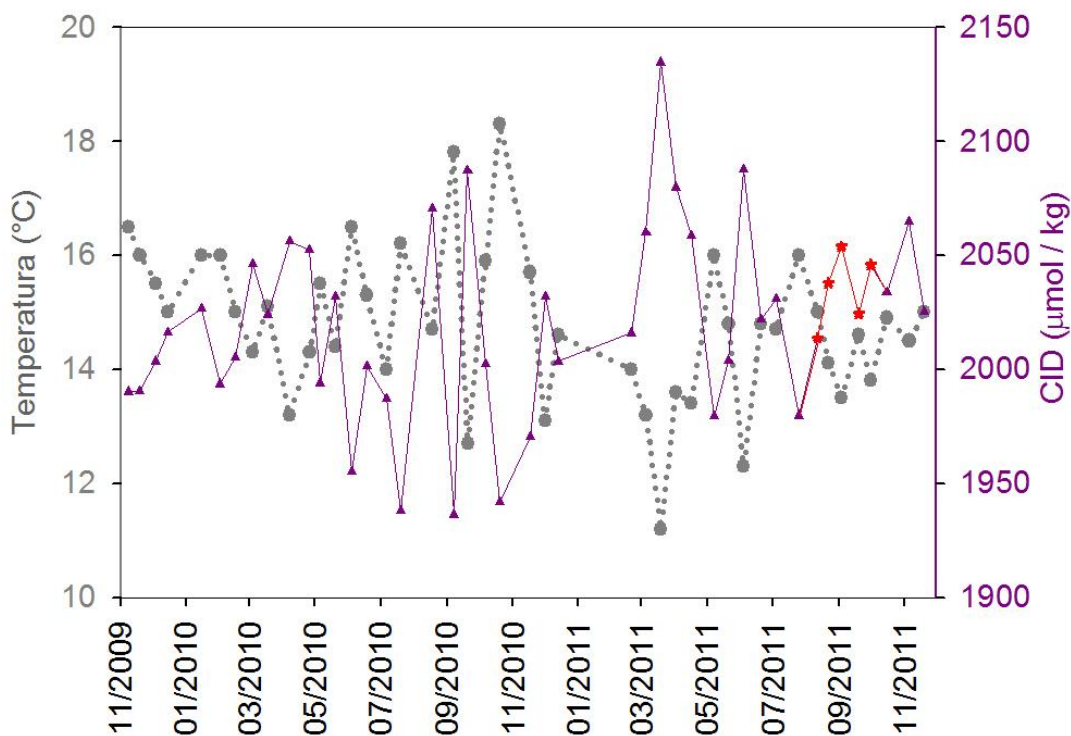


Figura 15.- Serie de tiempo en Arbolitos de Temperatura (Círculos) y CID (Triángulos) durante noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011. Estrellas rojas, corresponden a los cinco valores de CID que se calcularon a partir de la regresión de temperatura y CID.

Al igual que en las mediciones quincenales de temperatura de ambos sitios, el promedio de CID de la boya y de Arbolitos tampoco mostró diferencias estadísticamente significativas ($t_{calculada} 0.41 < t_{critica} 1.9$: Fig. 16). Se encontró para ambos sitios la misma tendencia de aumento y disminución de CID, y el intervalo fue de 1940 a 2140 $\mu\text{mol/kg}$. Sólo en algunos casos como en noviembre de 2010, visualmente las diferencias fueron de $\sim 50 \mu\text{mol/kg}$, y en agosto de 2010 y junio de 2011 las diferencias fueron de $\sim 10 \mu\text{mol/kg}$. En otros casos como abril y agosto de 2011 visualmente no se encontraron diferencias.

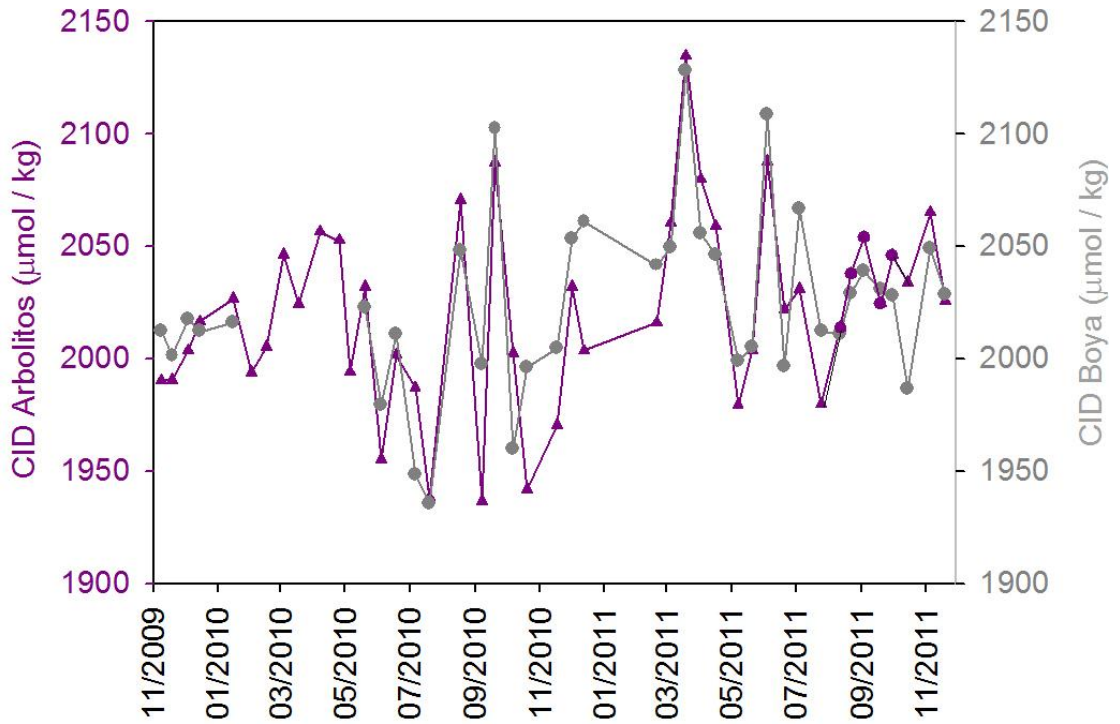


Figura 16.- Serie de tiempo quincenal de CID en Arbolitos (Triángulos y en morado) y en la boya (Círculos y en gris), durante noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011.

4.4 Variación estacional y relación de CID vs T

En Arbolitos los incrementos de CID se correlacionaron significativamente con la disminución de la temperatura durante las primaveras, otoños y veranos y no así para los inviernos (Tabla I, Fig. 17). Se observaron variaciones de CID en el área de estudio que se relacionaron de forma inversa con la disminución de la temperatura ($r=0.88$). Para detectar las variaciones estacionales de dicha relación, los datos de CID y temperatura se agruparon en función de las estaciones del año; encontrando que la temperatura explicó la variabilidad del CID hasta en un 90% en las primaveras y otoños, con mínimos de temperatura de 11.2 y 12.7°C y máximos de CID de 2140 y 2090 $\mu\text{mol/kg}$ respectivamente. Y en verano la temperatura explicó la variabilidad de CID en un 60%, con máximos de hasta 2087 $\mu\text{mol/kg}$ y mínimos de temperatura de 12.3°C. Mientras que en invierno la variabilidad de CID no fue explicada por la temperatura. En esta época el mínimo de temperatura fue de 13 °C y el máximo CID de 2031 $\mu\text{mol/kg}$ (Fig. 17). Cabe señalar que las bajas temperaturas obedecen a la influencia de la temperatura de la temporada de invierno.

Los datos de temperatura y CID de la primavera de 2010 se compararon con los datos de temperatura y CID de la primavera de 2011. No se encontraron diferencias estadísticas entre las primaveras en estudio ($t_{\text{calculada}} 1.04 < t_{\text{crítica}} 2.22$) aún cuando en el 2011 se observaron 2°C menos y 80 $\mu\text{mol/kg}$ más que en 2010 (Fig. 18).

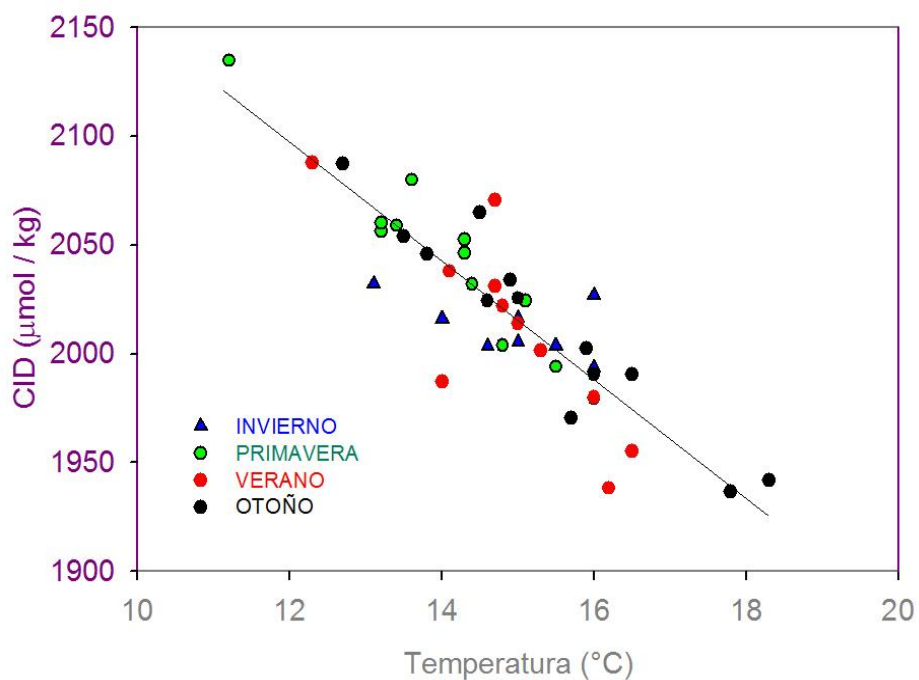


Figura 17.- Relación de temperatura vs CID en Arbolitos correspondiente a cada una de las estaciones del año, durante el periodo de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011.

Tabla I.- Coeficiente de correlación (r), de la asociación de temperatura con la concentración de CID, para las diferentes estaciones del año muestreadas de 2010 y de 2011

Estación	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Meses	Mar-Abr-May	Jun-Jul-Ags	Sept-Oct-Nov	Dic-Ene-Feb
r	0.95	0.81	0.94	0.50
p	0.0001	0.002	0.0001	0.196

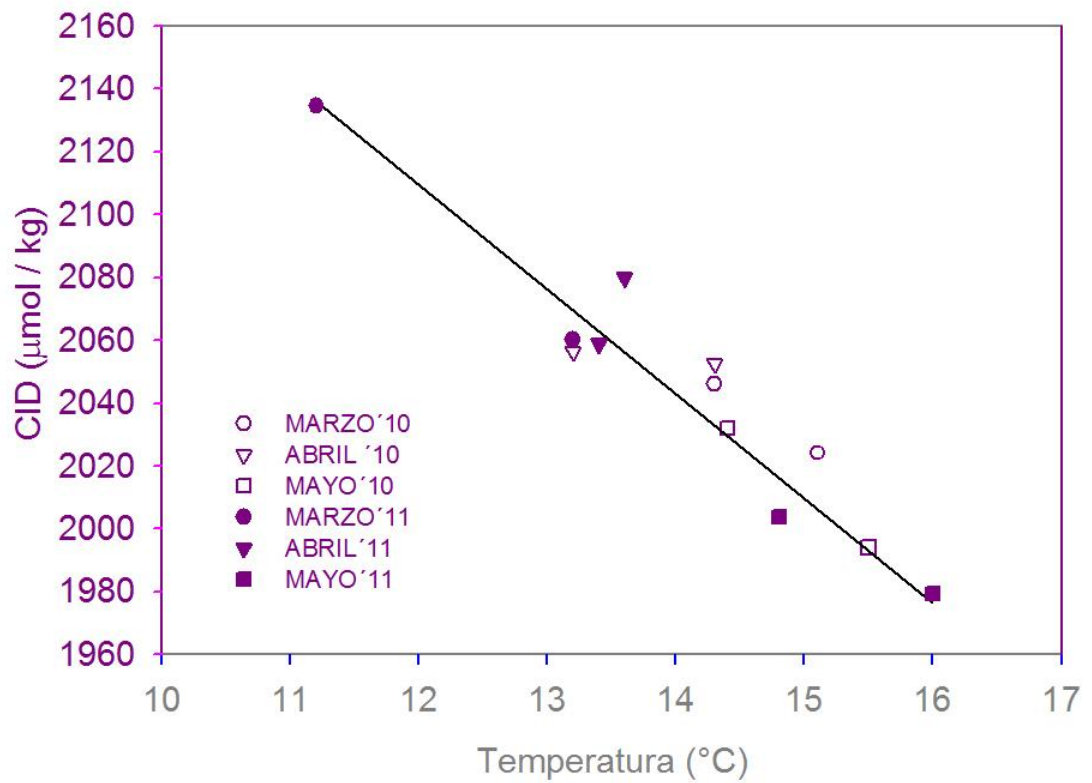


Figura 18.- Relación de temperatura vs CID correspondiente a las primaveras de 2010 y 2011, durante el muestreo llevado a cabo en Arbolitos de Noviembre 8 de 2009 a Noviembre 19 de 2011.

4.5 Variación temporal de ΩA en Arbolitos

Durante los dos años de muestreo, no se detectó la presencia de agua subsaturada con respecto a ΩA en la zona de estudio. Los valores de ΩA se encontraron por encima del valor de saturación variando en un intervalo de ~ 1.4 a 3.0 , y los de pH entre ~ 7.85 y 8.1 (Fig. 19 b). Sin embargo, se observaron los valores mínimos tanto de ΩA de 1.4 como de pH de 7.85 durante septiembre de 2010 y marzo de 2011. Cabe señalar, que en el mismo periodo se detectaron las mayores concentraciones de CID de todo el periodo de estudio (~ 2090 y $2140 \mu\text{mol/kg}$). Durante el periodo de estudio se observó una variabilidad temporal que se describe a continuación:

*Durante Noviembre y diciembre del 2009, las variaciones de CID fueron mínimas (2000 a $2016 \mu\text{mol/kg}$), por lo que los valores de ΩA y pH presentaron poca fluctuación (2.1 a 2.5 , 8.01 a 8.07 respectivamente), al igual que la temperatura (15 a 16°C). Lo anterior podría deberse a la nula presencia de eventos de surgencias (Fig. 19 a y b).

*En el 2010 los valores mínimos de Ω (1.4) se detectaron en otoño, cuando hubo máximos de CID y mínimos de pH (1940 a $2090 \mu\text{mol/kg}$; 8.17 a 7.85 respectivamente). Mientras que durante invierno (enero y febrero), se observaron concentraciones de CID 1923 a $2026 \mu\text{mol/kg}$, valores de pH entre 8.03 y 8.08 y ΩA de 2.3 a 2.5 , así como temperaturas que fluctuaron entre 15 y 16°C . En primavera (marzo, abril y mayo), se observó claramente el aumento en las concentraciones de CID, así como la disminución de los valores de temperatura, ΩA y pH. Las temperaturas fluctuaron entre 13.2 y

15.5°C, el CID de 1994 a 2056 $\mu\text{mol/kg}$, valores de pH entre 7.92 y 8.06 y de ΩA de 1.7 a 2.4. Durante el verano (junio, julio y agosto), se observaron mayores variaciones que en primavera, con valores de temperaturas entre 14 y 16.5°C, concentraciones de CID de 1938 a 2070 $\mu\text{mol/kg}$, valores de pH entre 7.91 y 8.16 y valores de ΩA entre 1.8 y 3. Por su parte, durante el otoño (septiembre, octubre y noviembre), se observaron variaciones de temperaturas entre 12.7 y 18.3°C, concentraciones de CID de 1940 a 20907 $\mu\text{mol/kg}$, valores de pH entre 7.86 y 8.11 y ΩA de 1.46 a 2.8. Mientras que en los meses de diciembre de 2010 a febrero de 2011 se observaron fluctuaciones mínimas, con temperaturas fluctuando entre 13 y 14°C, concentraciones de CID 2003 a 2031 $\mu\text{mol/kg}$, valores de pH entre 7.9 y 8.0 y ΩA de 1.9 a 2.3 (Fig. 19 a y b).

*En general durante el 2011 se observó menor variabilidad que en 2010. Sin embargo, durante marzo se detectó la menor temperatura de todo el periodo de estudio (11.2 °C), con la máxima concentración de CID 2135 $\mu\text{mol/kg}$ y los valores de pH más bajos (7.8) y ΩA (1.46). Durante la primavera del 2011 se considera que las surgencias fueron más intensa que en el 2010, ya que se observaron temperaturas fluctuando entre 11.2 y 16°C, concentraciones de CID 2133 a 1979 $\mu\text{mol/kg}$, valores de pH entre 7.87 y 8.07 y ΩA de 1.46 a 2.5. Mientras que en verano, en comparación con el 2010 se observaron valores de temperatura, CID, pH y ΩA ligeramente más bajos (12.3 a 16°C, 1979 a 2087 $\mu\text{mol/kg}$, 7.93 a 8.04, 1.73 a 2.38 respectivamente). Por otro lado, para el otoño de 2011 las variaciones fueron menos intensas

que en otoño de 2010, pues se observaron intervalos con temperaturas entre 13.5 y 14.9°C, concentraciones de CID 2024 a 2064 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, valores de pH entre 7.89 a 7.99 y ΩA de 1.61 a 2.1 (Fig. 19 a y b).

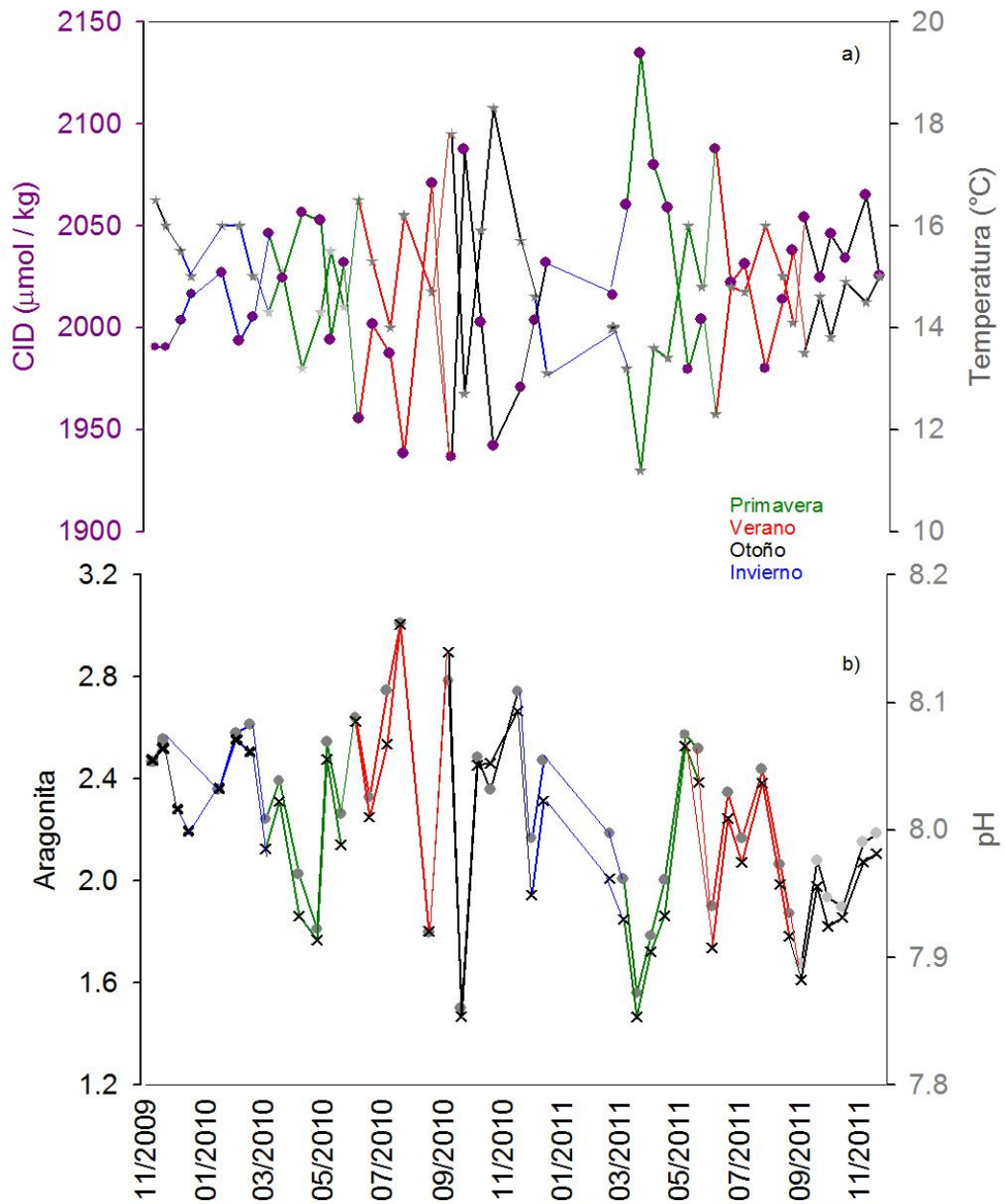


Figura 19.- Serie de tiempo en Arbolitos: a) CID (círculos morados) y temperatura (estrellas grises), b) pH (círculos grises) y Aragonita (cruces negras) de noviembre 8 de 2009 a noviembre 19 de 2011. Las líneas representan: primavera (verde), verano (rojo), otoño (negro) e invierno (azul).

Para detectar la duración de las aguas con valores bajos de Ω_A , se ubicaron y analizaron los eventos de surgencia que se presentaron a lo largo del periodo de estudio. Además, al no encontrar diferencias estadísticamente significativas entre Arbolitos y la Boya, se ubicaron los eventos de surgencia de Arbolitos en base a los valores de pCO_2 y temperatura de las mediciones de cada tres horas de la boya. Con la acción anterior, se detectó el inicio y término de cada uno de los eventos de surgencia utilizando las siguientes características: El agua debía tener valores de $pCO_2 > 410 \mu atm$, temperaturas $< 15 \text{ }^\circ C$.

En el periodo de muestreo se detectaron nueve eventos de surgencia: tres eventos durante el 2010 y seis eventos en el 2011 (Tabla II). Los valores más bajos de Ω_A , pH y temperatura (1.1, 7.7, $10.7^\circ C$ respectivamente) se detectaron durante el evento cuatro correspondiente al mes de marzo de 2011. Dicho evento presentó la mayor duración (17 días) y más alta pCO_2 en la Boya ($863 \mu atm$); mientras que el evento de menor pCO_2 en la Boya fue el evento 8 ($454 \mu atm$), con duración de 1 día. En la figura 20 se indican los mismos eventos de surgencia que se identificaron en este trabajo de forma grafica. Cabe destacar que los valores máximos de Ω_A que se detectaron durante un evento de surgencia, fueron de 2 durante los eventos ocho y nueve, cuyas duraciones fueron de 2 y 3 días respectivamente.

Tabla II.- Características de los nueve eventos de surgencia; en Arbolitos fecha de muestreo y pCO₂; para la boya inicio y término de cada evento de surgencia de acuerdo al incremento de la pCO₂ y disminución de la Temperatura; valores de ΩA y pH tanto para Arbolitos como para la boya.

# Evento	Arbolitos		Boya			ΩA		pH	
	Fecha de muestreo	pCO ₂ (μatm)	Temperatura Mínima (°C)	pCO ₂ Máxima (μatm)	Duración (días)	Boya	Arbolitos	Boya	Arbolitos
1	18-Aug-10	526.44	11.40	793.4	9	1.2	1.8	7.8	7.9
2	20-Sep-10	613.27	12.37	667.1	3	1.4	1.4	7.8	7.9
3	5-Mar-11	475.73	12.59	486.7	9	1.8	1.8	8.0	8.0
4	19-Mar-11	603.24	10.74	863.9	17	1.1	1.4	7.7	7.9
4b	2-Apr-11	535.69			17		1.7		7.9
5	16-Apr-11	476.65	13.52	452.5	3	2.0	1.8	8.0	8.0
6	4-Jun-11	504.52	10.80	761.5	9	1.2	1.7	7.8	7.9
7	22-Aug-11	504.75	12.41	529.4	5	1.7	1.7	7.9	7.9
8	3-Sep-11	557.23	13.30	454.2	1	2.0	1.6	8.0	7.9
9	30-Sep-11	490.49	13.28	449	1	2.0	1.8	8.0	8.0

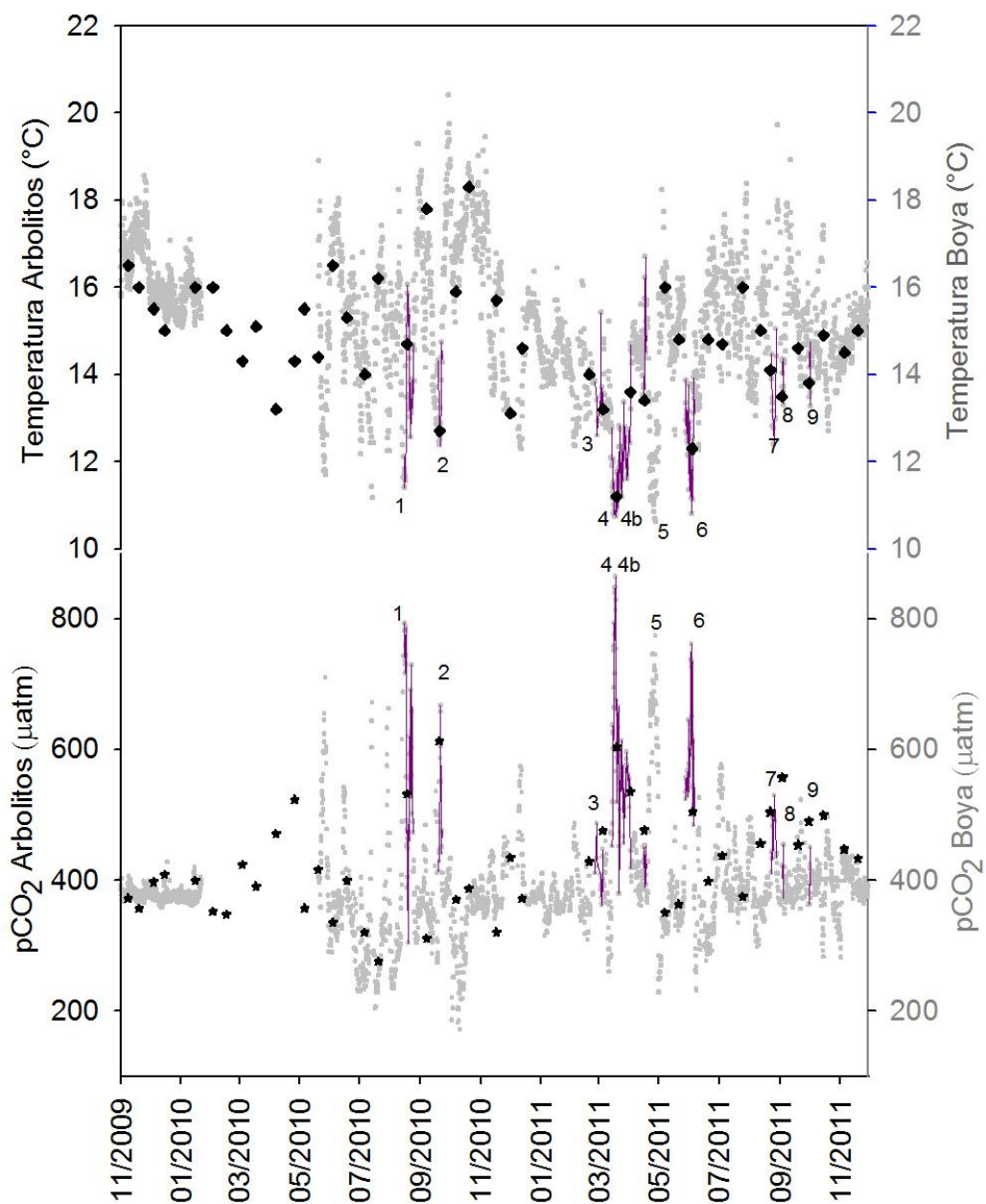


Figura 20.- Ubicación y número de los eventos de surgencia (en morado), que se detectaron en las series de tiempo de pCO₂ y temperatura, en Arbolitos y en la boya.

4.6 Evaluación de variables químicas durante eventos de surgencias entre la Boya y Arbolitos

Comparación entre sitios

No se encontró diferencia en los eventos de surgencia entre Arbolitos y la boya ($t_{calculada} < t_{crítica}$). Además se compararon las variables de un sitio con respecto al otro (CID, temperatura y ΩA) sin encontrar diferencias significativas entre estas (Tabla III). Lo anterior se realizó con la finalidad de estudiar los posibles cambios químicos y/o biológicos del agua proveniente de surgencia que pudieran haber ocurrido durante su incursión hacia la zona del intermareal.

Tabla III.- Promedio y desviación estándar de las temperatura, CID, Aragonita y pH de la Boya y Arbolitos

	Promedio		Desviación estándar	
	Boya	Arbolitos	Boya	Arbolitos
Temperatura	12.3	13.3	1.1	1.0
CID	2102.8	2071.6	44.8	27.8
Aragonita	1.6	1.7	0.4	0.1
pH	7.9	7.9	0.1	0.0

Como se describió anteriormente, no se encontraron diferencias significativas entre los promedios de las variables medidas entre ambos sitios, sin embargo se observaron fluctuaciones entre algunas variables de cada evento. De manera general, se observó que los valores de las variables ΩA , pH y T aumentaron desde la boya hacia Arbolitos, mientras que el CID disminuyó.

Las características de cada uno de los eventos de surgencia se presentan en la figura 21 y tabla II con las siguientes observaciones:

*El evento uno tuvo una duración de 9 días y se observó en agosto de 2010. Este evento presentó valores de ΩA , pH y T más bajos en la boya (1.2, 7.8 y 11.4°C)

que en Arbolitos (1.8, 7.9 y 14.7°C). Por su parte los valores de CID fueron más altos en la boya que en Arbolitos (2152 – 2070 $\mu\text{mol/kg}$ respectivamente).

*Evento dos con duración de 7 días, se observó en septiembre de 2010. Este evento al igual que el evento uno, presentó valores de ΩA , pH y T más bajos en la boya (1.4, 7.8, 12.3 °C) que en Arbolitos (1.8, 7.9, 12.7 °C). Solamente las concentraciones de CID fueron más altas en la boya (2124 $\mu\text{mol/kg}$) que en Arbolitos (2087 $\mu\text{mol/kg}$).

*Evento tres se observó en marzo de 2011 y tuvo una duración de 11 días. Este evento presentó valores de ΩA similares en ambos sitios y valores de pH y T más bajos en la boya (1.8, 8, 12.3) que en Arbolitos (1.9, 8, 13.2). Nuevamente se detectaron concentraciones de CID más altos en la boya (2072 $\mu\text{mol/kg}$) que en Arbolitos (2060 $\mu\text{mol/kg}$).

*El evento cuatro tuvo una duración de 17 días, en los cuales se realizaron dos muestreos. La primera vez que se muestreó fue a mediados de marzo de 2011, se definió como evento 4 y se caracterizó por valores en el límite de ΩA (1.1) en la boya y un aumento hacia Arbolitos (1.5). Este aumento en los valores desde la boya hacia Arbolitos también se observó en el pH y en la temperatura (7.7 - 7.9; 10.7 - 11.2°C respectivamente). En el caso del CID los valores fueron más altos en la boya (2163 $\mu\text{mol/kg}$) que en Arbolitos (2134 $\mu\text{mol/kg}$). La segunda vez que se muestreó fue a principios de abril, casi al final del evento de surgencia. Este muestreo presentó valores más bajos en la boya y en el límite de saturación (1) en comparación con Arbolitos (1.4). De igual forma se observaron valores más bajos de pH y temperatura en la boya (7.7, 10.7), que en Arbolitos (7.9, 13.6). Por el otro lado el CID mostró

concentraciones más altas en la boya (2167 $\mu\text{mol/kg}$) que en Arbolitos (2079 $\mu\text{mol/kg}$).

*El evento cinco tuvo una duración de 15 días y se observó en abril de 2011. Este evento presentó valores de Ω_A , pH y T más bajos en la boya (1.1, 7.77, 10.6) que en Arbolitos (1.9, 7.96, 13.4°C). Así como concentraciones de CID más altas en la boya (2056 $\mu\text{mol/kg}$) que en Arbolitos (2058 $\mu\text{mol/kg}$).

*El evento seis tuvo una duración de 9 días y se observó en junio de 2011. Presentó valores más bajos de Ω_A , pH y T en la boya (1.2, 7.8, 10.8°C) en comparación con Arbolitos (1.7, 7.9, 12.3°C). Las concentraciones de CID fueron mayores en la boya (2150 $\mu\text{mol/kg}$) y disminuyeron en Arbolitos (2087 $\mu\text{mol/kg}$).

*El evento siete tuvo una duración de 5 días y se presentó en agosto de 2011. Este evento se caracterizó por presentar valores de Ω_A , pH y T más bajos en la boya (1.7, 7.9, 12.4 °C) que en Arbolitos (1.8, 7.9, 14.1 °C). Por su parte las concentraciones de CID fueron más altas en la boya (2086 $\mu\text{mol/kg}$) que en Arbolitos (2037 $\mu\text{mol/kg}$).

*Los eventos ocho y nueve fueron los de menor duración (1 día), y se presentaron a principios y finales de septiembre respectivamente. A diferencia de los eventos antes descritos, estos eventos presentaron valores de Ω_A , pH y T ligeramente mayores en la boya (Ω_A 2, pH 7.9, T 13.3) que en Arbolitos (Ω_A 1.6, pH 7.9, T 13.6 °C).

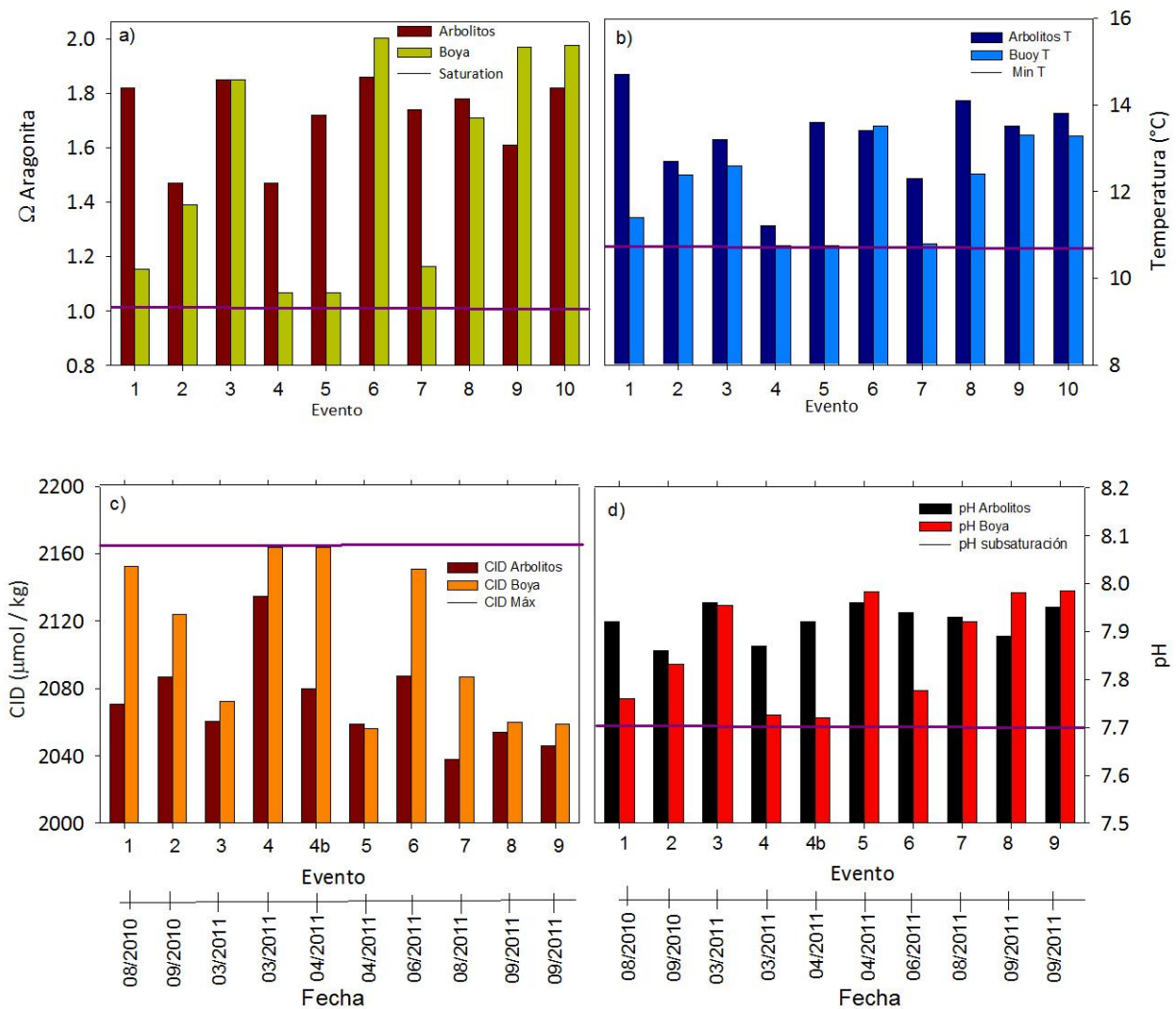


Figura 21.- Eventos de surgencias entre 2010 y 2011 con sus características físico-químicas de a) Ω , b) Temperatura, c) CID y d) pH en Arbolitos y la Boya. Líneas en morado representan; a) $\Omega=1$, b) Mínimo de temperatura (10.7°C), c) Concentración máxima de CID (2170 $\mu\text{mol}/\text{kg}$), d) pH de subsaturación 7.7 de acuerdo a Feely *et al.* (2008).

4.7 Flujo de CO₂ entre el océano y la atmósfera

Durante los nueve eventos de surgencia que se estudiaron tanto en Arbolitos como en la boya, la diferencia de la pCO₂ entre el océano y la atmósfera fue positiva en todos los casos ($\Delta p\text{CO}_2$; Fig. 22). De todos los eventos, se observó que el evento 4-4b que ocurrió en marzo-abril de 2011, fue el que presentó mayor $\Delta p\text{CO}_2$ tanto en la boya (476 μatm) como en Arbolitos (216 μatm) (Fig. 22). El $\Delta p\text{CO}_2$ que se calculó para cada uno de los nueve eventos de surgencia, permitió detectar lo siguiente:

*En el área comprendida entre Arbolitos y la boya se observaron valores de $\Delta p\text{CO}_2$ positivos durante eventos de surgencia. Esto sugiere que el área entre ambos sitios se comporta como fuente de CO₂ hacia la atmósfera cuando ocurren eventos de surgencia (Fig. 22).

*No se encontraron diferencias estadísticas entre el $\Delta p\text{CO}_2$ que se calculó para Arbolitos y para la boya. Sin embargo, tal y como se observó con el CID, se encontraron valores más altos de $\Delta p\text{CO}_2$ en la boya (476 μatm) que en Arbolitos (226 μatm). De estas variaciones entre la boya y Arbolitos destacan los siguientes eventos:

-El evento tres, presentó valores de $\Delta p\text{CO}_2$ muy similares entre la boya (99 μatm) y Arbolitos (87 μatm). Dado que el error en las mediciones de pCO₂ es de $\pm 5\mu\text{atm}$ debido a errores de alcalinidad y CID, se sugiere que los valores de este evento son coherentes.

-En el evento 4 y 4b se observó la mayor diferencia entre las mediciones tanto de CID como de pCO₂. En la figura 22, se puede observar que en dichos eventos el $\Delta p\text{CO}_2$ en la boya fue de 476 μatm en las dos ocasiones en que se

realizaron los muestreos, mientras que en Arbolitos se calcularon valores de 226 μatm y 148 μatm respectivamente.

- En los eventos ocho y nueve a diferencia de todos los eventos, presentaron mayor ΔpCO_2 en Arbolitos (evento 8 - 170 μatm y evento 9 - 103 μatm) que en la boya (evento 8 - 67 μatm y evento 9 - 62 μatm).

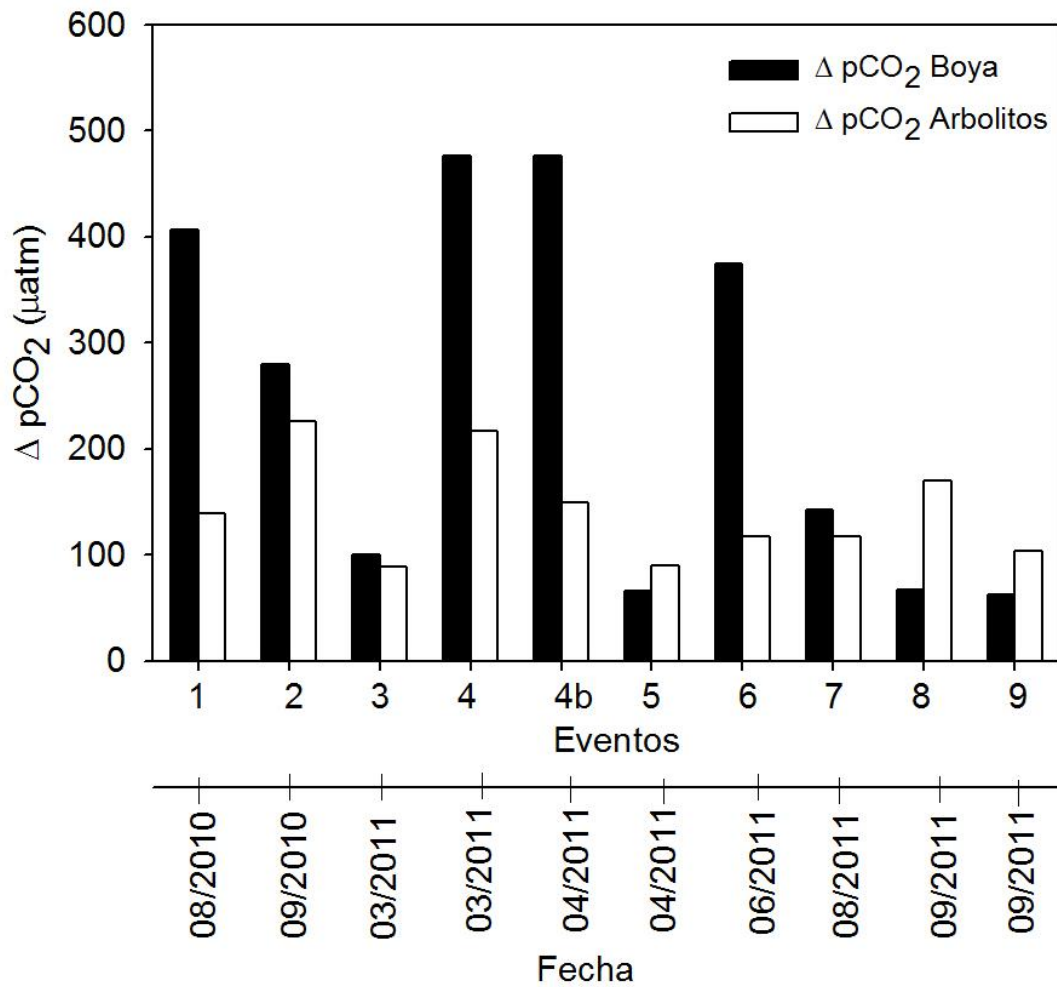


Figura 22.- Delta pCO_2 de cada uno de los eventos que se registraron en Arbolitos (Barras en blanco) y en la boya (Barras en negro)

Implicaciones de la duración de los eventos surgencia

En este trabajo, se observó que a mayor duración de los eventos de surgencia se asociaron menores valores de Ω_A (1.5) y temperatura (11°C) así como el mayor valor de ΔpCO_2 (~346 μatm) (Figs. 23 a, b y c). Se realizó un análisis de la duración de cada evento con respecto al Ω_A , T y ΔpCO_2 promedio entre Arbolitos y la Boya. Lo anterior tuvo la finalidad de evaluar el tiempo en que agua con condiciones cercanas al valor de saturación con respecto a Ω_A (1) así como condiciones con $pCO_{2mar} > 410 \mu atm$ se encuentra en la zona entre Arbolitos y la boya. Con base en lo anterior el cuarto evento de surgencia que ocurrió en marzo-abril de 2011, fue el que presentó condiciones más cercanas al valor límite de saturación de Ω_A (1). Su duración fue de 17 días y presentó valores de Ω_A de 1.3, temperatura de 11°C y ΔpCO_2 346 μatm . Así mismo los eventos con características más alejadas al valor de saturación de Ω_A (1) fueron el 8 y el 9. Estos ocurrieron en septiembre de 2011, y presentaron duración de 1 día y se observaron promedios de: Ω_A 1.8, temperatura 13.5°C y ΔpCO_2 de 124 μatm (Figs. 23 a, b y c).

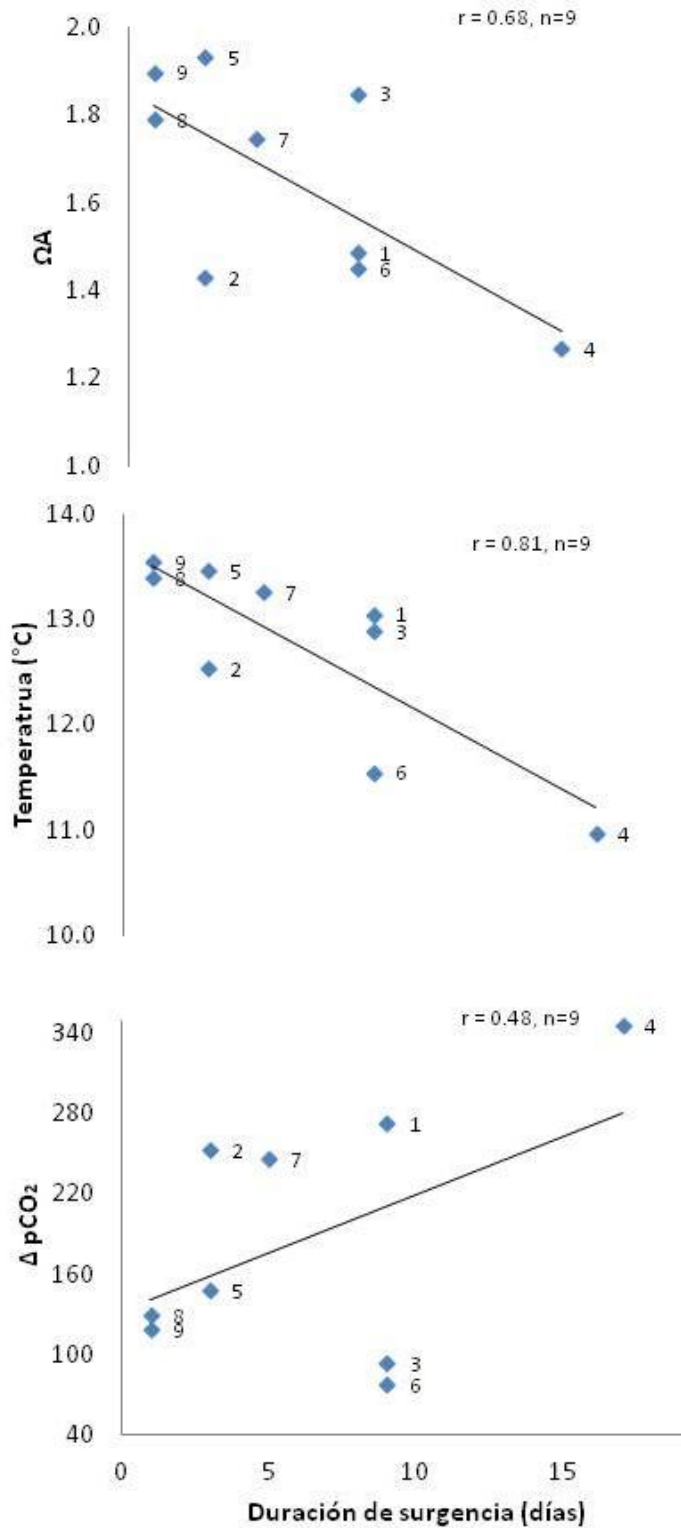


Figura 23.- Relación entre la duración de los eventos de surgencia y a) ΩA b) temperatura y c) ΔpCO_2 . Los números que acompañan a cada símbolo, identifican al número de evento de surgencia.

5. DISCUSION

Masas de agua presentes Frente a las Costas de Ensenada (Línea 100 de Imecocal)

En este trabajo mediante diagramas T-S se identificó la presencia del ASA en los primeros 100 m y por debajo la masa de agua AESs. Además, en los transectos de sigma-t de la línea 100, se observó la advección de dichas masas de agua cerca de la costa. Esto ha sido descrito por otros autores para la región, pues cerca de la superficie el Agua del sub Ártico (ASA), es transportada hacia el sur por el flujo de la Corriente de California (CC). Mientras que entre ~100 y 400m, el flujo es hacia el polo mediante la Contracorriente de California (CCC), la cual acarrea Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESs) (Durazo - Baumgartner 2002). Además se ha reportado que volumen del ASA es máximo durante primavera; esto ocurre cuando los vientos del noroeste son más intensos en la región (Pérez-Brunius *et al.* 2007; Castro y Martínez *et al.* 2010). Por otro lado las variaciones de escala interanual como lo son El Niño y La Niña, suelen modular el volumen del ASA principalmente en la zona norte de la región IMECOCAL, así como la profundidad de la termoclina (Durazo y Baumgartner 2002; Durazo *et al.* 2005 y 2009). En el presente trabajo se detectó en el 2007 la presencia de AESs reflejada en la mayor salinidad (~33.7) de las aguas por arriba del perfil climatológico (Fig. 3a). Esto fue descrito por Durazo *et al.* (2010) como un evento de transición de condiciones El Niño 2007 a condiciones La Niña. Dichas condiciones se muestran en los valores positivos del grafico de anomalías de salinidad de 30m, observado en la región norte de Punta Eugenia (Fig. 24). Adicionalmente, se observó un ascenso moderado de las isopicnas de 25 de ~100 m a 50 m y 25.5 de 50m a superficie (Fig. 4 a y b). Puede ser que las condiciones

finales de El Niño, ocasionaran el ingreso de agua más cálida y salada a la región sur de la CC. Esto puede explicarse por la intensificación de la Corriente Costera Mexicana que ocurre cerca de la costa y con dirección hacia el polo durante condiciones de El Niño (Godínez *et al.* 2010). Por su parte en la temporada de surgencia del 2010, el volumen de ASA en las aguas superficiales fue mayor que el observado en el 2007 (Fig. 3b). Sin embargo se observaron anomalías positivas de temperatura y negativas de salinidad; estas condiciones correspondieron con la presencia de agua menos densa en la superficie (~24.5). En el 2010 se reportaron condiciones de El Niño débil el cual terminó en Junio de 2010 (NOAA, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). Sin embargo, aún bajo estas condiciones se observaron levantamientos de las isopícnas de 25 (80m a 50m) y 25.5 (60m a ~20m) (Fig. 4b). Esto puede explicarse por el ingreso de un mayor volumen de ASA en la región (Fig. 24). En el 2011, el escenario fue diferente a los dos años anteriores, pues se observó la presencia de agua menos salina (32.7) en comparación con el 2010 (33.2) y con valores que estuvieron por debajo del valor climatológico (33.5). Lo anterior se observó a manera de intrusión de agua menos densa en los primeros 50 m (24.5: Figs. 3 y 4c). Además, no se observó el ascenso de las isopícnas de 25 y 25.5 como en los años anteriores, ya que agua superficial menos salina y por tanto menos densa (24.5), se reportó para toda la parte al norte Punta Eugenia (Durazo *et al.* En preparación; Fig.24).

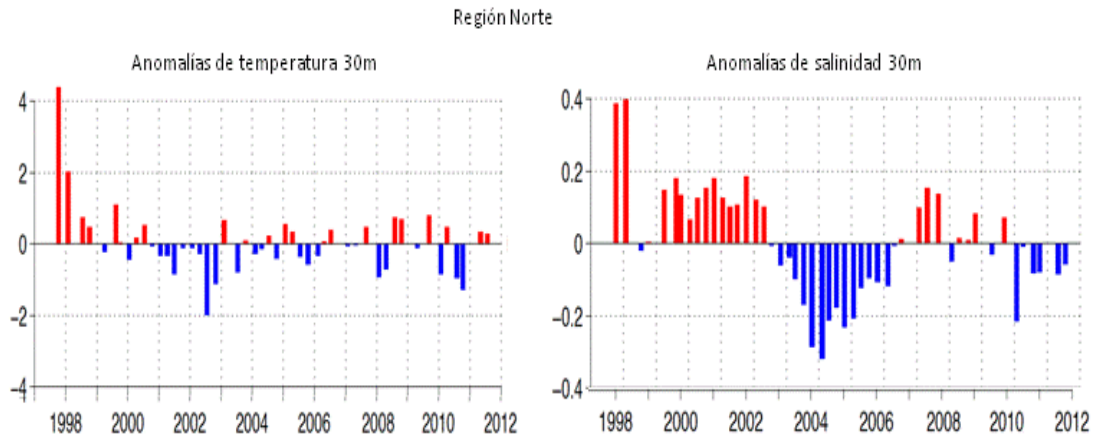


Figura 24.- Climatología para la zona norte de la región IMECOCAL, a) Anomalías de temperatura y b) Anomalías de salinidad. Gráfico tomado de Durazo *et al.* (En preparación).

En este trabajo se reconoce la importancia de conocer que masas de agua se presentan en las aguas superficiales, ya que estas determinaran las características de la química del agua del área de nuestro interés. De acuerdo a Juárez-Colunga *et al.* (2010), se esperan valores de pH entre ~ 7.7 y 7.9 cuando hay dominio del ASA, mientras que bajo la influencia del AESs se esperan valores de pH con valores menores ~ 7.7 . En un punto más cercano a la costa, se encuentra el observatorio de monitoreo costero Estación Ensenada, donde los reportes no sólo coinciden con lo descrito por Juárez-Colunga *et al.* (2010), sino que también se han observado variaciones estacionales y la influencia de eventos interanuales, sobre las características físicas y químicas en los primeros 90 m de la columna de agua. Durante primavera cuando ocurren surgencias, se han observado pulsos de agua más fría (11°C) y salina (33.8) que incursionan hacia la superficie. Esta agua presenta bajos valores de ΩA (1.25), pH (7.8) y altas concentraciones de CID ($2150\ \mu\text{mol/kg}$). Sin embargo la profundidad a la que incursionan estos pulsos de agua no es la misma, observando variaciones por influencia de eventos interanuales. Por ejemplo en el

2008 cuando se presentaron condiciones de La Niña y durante la etapa de eventos de surgencia se observó a solo 20 m la presencia de aguas más salina (34.1) de origen profundo (~150m) AESs. Mientras que en 2009 durante condiciones de El Niño, a 20m se observó agua con temperaturas cálidas (16°C), de baja salinidad (33.3) y pobre en DIC (2000 $\mu\text{mol/kg}$) característico del ASA. Así cuando el AESs presenta mayor presencia en nuestras costas, los valores de Ω_A son menores, hay mayor concentración de CID y mayor pCO_2 ; mientras que lo contrario ocurre durante una mayor presencia del ASA (Cervantes 2010).

Análisis del muestreo 2007

En este trabajo se encontró que los cambios del contenido de CID de una parcela de agua de una misma densidad del transecto 100, se debieron a la mezcla de ASA y AESs. La mezcla de estas masas de agua se detectó en los diagramas TS de la figura 3 y en los transectos de la línea 100, ya que se observó la intrusión del AESs y limitó el uso en este trabajo de la metodología de Fassbender *et al.* (2011). Es requisito de la metodología de Fassbender *et al.* (2011) descartar los posibles cambios del contenido de CID debidos a procesos de advección, por lo que no fue posible evaluar los cambios en la concentración de CID en el agua de una misma densidad cuando esta llega a la costa.

El agua que llega a la costa o zona de rompiente no tiene un solo origen. El análisis mostró que las estaciones más oceánicas (86-90), se caracterizaron por presentar mayor influencia del ASA, mientras que las estaciones más costeras (91-94) presentaron influencia del ASA y AESs (Fig. 5). En el caso del presente estudio se detectó la advección de dos masas de agua a partir de la geostrofia de los primeros

200m de la línea 100 de Imecocal (Fig. 25). En dicha figura se observa el flujo del ASA en dirección hacia el ecuador (valores -) y el AESs hacia el polo (valores +). Lo que conlleva a que el origen de las aguas presentes a lo largo de la línea 100 no tenga un sólo origen. Esto sustenta el hecho de que en este trabajo se detectó la intrusión de agua más salina (~34) en los primeros 30 km desde la costa y por debajo de los 100 metros indicativos de la presencia de la masa de agua AESs.

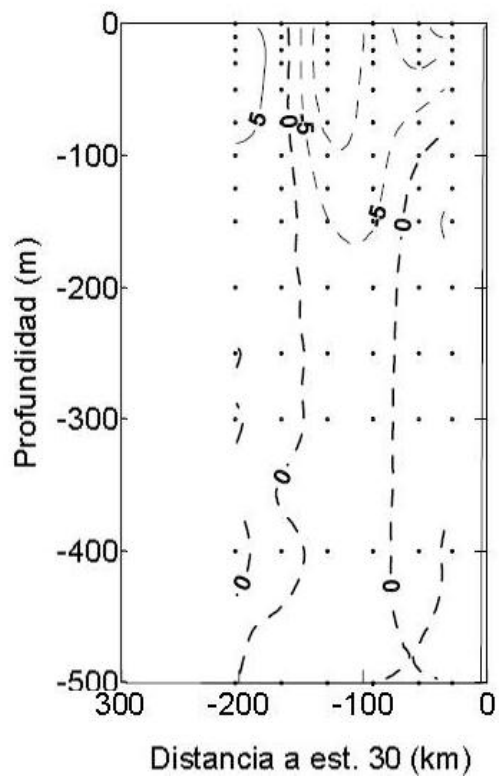


Figura 25.- Velocidades geostroficadas de la temporada de surgencia 2007. (Tomado del Atlas Imecocal, reporte IM0707)

En la capa de mezcla se observó la advección del ASA y AESs. Dado que en la geostrofia de la línea 100, se observaron valores negativos en los primeros ~100m de profundidad y cercano a la costa. Se esperaba que dentro de la capa de mezcla las características fueran de una misma masa de agua (ASA). Sin embargo se detectó un gradiente con mayores concentraciones de CID cerca de la costa (2150 $\mu\text{mol/kg}$) y menores concentraciones hacia el océano (2050 $\mu\text{mol/kg}$). Mostrando también la advección entre el ASA y el AESs (Fig. 8) pues las mayores concentraciones de CID coincidieron con la presencia de agua más salina (~34). Con lo cual queda aún más claro que en el transecto frente a las costas de Ensenada, no es posible aplicar la metodología de Fassbender *et al.* (2011). Pues la advección no permite evaluar cambios en las propiedades químicas del agua de una misma densidad cuando esta llega a la costa.

La Boya de la Estación Ensenada como sensor del agua oceánica

Estudios previos han reportado que en la estación Ensenada es posible detectar la variabilidad estacional e interanual de las propiedades físico-químicas de la columna de agua (Linacre *et al.* 2010; Cervantes 2010). La comparación de los diagramas T-S para las temporadas de surgencia 2007, 2010 y 2011 y al ser comparados o con el T-S climatológico de la estación 100.30 (Fig. 9a). Indicó que las características hidrográficas registradas en la Estación Ensenada de las temporadas de surgencia 2007, 2010 y 2011 (Fig. 9a), son similares a los de la línea 100. Estos resultados son consistentes con el reporte de Linacre *et al.* (2010), quienes mostraron que la Estación Ensenada es representativa de las condiciones

hidrográficas presentes frente a las costas de Ensenada, específicamente en un área alrededor de ~50km.

Origen del agua entre Arbolitos y la Estación Ensenada

En este trabajo se observó que el agua que llega desde la Boya hacia Arbolitos no sufre cambios notorios y por tanto, dada la cercanía tienen el mismo origen (ASA y AESs). Al añadir los valores de temperatura y salinidad de Arbolitos, al diagrama T-S de los lances de CTD de las temporadas de surgencia 2007, 2010, 2011 y el climatológico de la estación 100.30 (Fig. 9a), se observó que las características del intermareal (Arbolitos) son un reflejo de las condiciones oceánicas (Estación Ensenada). Es decir ambos sitios presentan agua de un mismo origen, sin embargo los valores de Arbolitos fueron ligeramente más cálidos y salinos que los de la boya. Lo anterior se puede deber posiblemente a que la estación Ensenada es más profunda (100m), mientras que Arbolitos es un sitio somero de aproximadamente 2m que favorece que el agua pueda calentarse y evaporarse.

Variación temporal en la Estación Ensenada y Arbolitos

La variabilidad de la $p\text{CO}_2$ en la Estación Ensenada y de CID en Arbolitos, correspondió con fluctuaciones de temperatura. De acuerdo a Durazo *et al.* (2010); Pérez- Brunius *et al.* (2007) y Castro-Martínez (2010), la región norte de la zona IMECOCAL se caracteriza por presentar fluctuaciones de temperatura en respuesta a las surgencias costeras que se intensifican particularmente durante abril (primavera) y septiembre (otoño). Estas fluctuaciones se observaron tanto en la boya como en Arbolitos entre los meses de marzo a septiembre (Fig. 10a y 11a) y fueron coincidentes con la presencia de agua con alta $p\text{CO}_2$ (hasta 863 μatm) en la boya y

de CID ($\sim 2140 \mu\text{mol/kg}$) en Arbolitos. Esta agua sugiere tener características del agua sub-superficial transportada por surgencias desde ~ 80 m, la cual presenta valores de S 33.8, T de 14°C y CID de $2165 \mu\text{mol/kg}$ (Linacre *et al.* 2010); y valores de pCO_2 característicos para la zona durante eventos de surgencia ($>700 \mu\text{atm}$: De la Cruz *et al.* 2007). Adicionalmente se observó la influencia de condiciones interanuales sobre los eventos de surgencia, tal y como describe Cervantes (2010). Dicha autora reportó que durante eventos de surgencia y en combinación con eventos como La Niña, se observó la presencia de aguas de mayor profundidad ricas en CID ($2150 \mu\text{mol/kg}$). Esto se reflejó también en las mediciones en la boya en 2011, en las que se observaron temperaturas menores (10.6°C) a otros años durante eventos de surgencia y mayor pCO_2 ($863 \mu\text{atm}$) en comparación con el 2010 (11.4°C y $793 \mu\text{atm}$ respectivamente); por su parte en Arbolitos se observaron menores temperaturas ($\sim 11^\circ\text{C}$) y mayores concentraciones de CID ($2140 \mu\text{mol/kg}$) durante 2011, en comparación con el 2010 ($\sim 12^\circ\text{C}$, y $2100 \mu\text{mol/kg}$ respectivamente). De acuerdo a Durazo *et al.* (en preparación), la zona norte de la región Imecocal presentó a partir de Junio de 2010 anomalías negativas de salinidad y temperatura características de condiciones La Niña, y que esta condición se intensificó hacia el 2011. Se tendría por lo tanto una combinación de eventos de surgencia más pronunciados en 2011 que en 2010 debido a la presencia de condiciones La Niña.

De la variabilidad que se observó tanto en Arbolitos como en la boya, sobresale que la tendencia de incremento y disminución de las variables en estudio se detectó en ambos sitios. Lo que sugiere que el agua entre la boya y Arbolitos tiene un tiempo de residencia del orden de días a horas y por lo tanto las características

entre estos sean similares. Esto se pudo corroborar al no encontrar diferencias estadísticas entre las series de tiempo quincenales de temperatura y CID de la boya (Fig. 12 b) y Arbolitos (Fig. 15).

Variación estacional en Arbolitos

Es de esperarse que en respuesta de ciclo calentamiento-enfriamiento, la temperatura superficial sea mínima en invierno, aumente en primavera, sea máxima en verano, disminuya en otoño para volver a ser mínima en invierno. No obstante, las surgencias costeras son el causante principal de las bajas temperaturas del agua frente a las costas de Baja California (Gómez-Valdez *et al.* 1982, Durazo y Baumgarthner 2002, Durazo *et al.* 2010). Estas surgencias costeras son generadas en respuesta a vientos del noroeste, los cuales son más intensos en primavera que en otoño (Pérez-Brunius *et al.* 2007). Durante los eventos de surgencia ocurre un transporte de agua de mayores profundidades rica en nutrientes, con baja temperatura (14°C) y bajos valores de ΩA (1.25), pH (7.8) y altas concentraciones de CID (2150 $\mu\text{mol/kg}$) a la superficie (Durazo *et al.* 2010; Feely *et al.* 2008; Linacre *et al.* 2011; Cervantes *et al.* 2010). En el presente trabajo, durante primavera y otoño se observaron bajas temperaturas en las aguas de la zona de rompiente y que correspondieron con altas concentraciones de CID. Al analizar la relación entre estas variables se encontró que la temperatura explicó el $\sim 90\%$ de las variaciones del CID en las primaveras y otoños y se correlacionaron en un 95% (Fig. 17: Tabla I). Durante las primaveras en Arbolitos se encontraron valores de mínimos de ΩA (1.5), pH (7.8) y máximos de CID (2137 $\mu\text{mol/kg}$) por arriba de valores de sub-saturación (1, 7.7, 2200 $\mu\text{mol/kg}$). Se observó además que entre las primaveras de 2010 y 2011, no

ocurrieron diferencias significativas. Sin embargo en 2011 se observaron valores de temperatura y CID más extremos (11.2 °C, 2135 $\mu\text{mol/kg}$) que en la primavera de 2010 (13.2°C, 2056 $\mu\text{mol/kg}$). Aunque es temprano para hablar de efectos por la variabilidad interanual, como se explicó anteriormente lo cierto es que en la primavera de 2010 en la zona de estudio había condiciones de El Niño, mientras que en 2011 había condiciones de La Niña. En esta última condición se favorece el transporte de aguas de mayor profundidad ricas en CID (Cervantes 2010). Por lo que se sugiere seguir con la serie de tiempo de Arbolitos, para contar con un mayor número de años de muestreo y poder detectar la influencia de los eventos interanuales en una zona somera como Arbolitos de manera más robusta y con una climatología.

Para identificar la señal de surgencia, se detectaron disminuciones de temperatura correspondientes con aumento en las concentraciones de CID. Esta señal disminuyó conforme se acercó el verano y en su transición hacia el otoño – invierno. Esto puede deberse a que los vientos del noroeste se van debilitando y se incrementa la ganancia de calor por el océano favoreciendo a la estratificación vertical (Durazo et al. 2010). En los veranos en estudio, se observó que la temperatura explicó hasta el 60% de la variabilidad del CID y se relacionaron inversamente en un 95%. Si bien la temperatura aumentó hasta 2°C y los valores de CID fueron más bajos que en la primavera, lo cierto es que se detectaron algunos muestreos que pudieron corresponder a eventos de surgencia, aunque con menor intensidad que los que ocurren en primavera u otoño. En invierno no se observaron eventos de surgencia.

La variabilidad estacional del sistema del CO₂ en Arbolitos, no fue consistente con la variabilidad de otros parámetros. Por ejemplo en la climatología de clorofila de la Fig. 26, se observó un incremento de la biomasa fitoplanctónica durante la primavera (marzo-mayo) de ~3.7 µg/l (Delgadillo en preparación). Hacia el verano (agosto) se observó un segundo incremento de *Chl a* (2 µg/l), que bien puede ser referido al consumo de carbono inorgánico acumulado hacia el final de la época de surgencias (Juárez-Colunga *et al.* 2010). Para otoño - invierno no detectó una señal considerable en las variaciones de *Chl a*. Si bien estos incrementos de *Chl a* no fueron consistentes con los incrementos de las concentraciones de CID que se reportaron en el presente trabajo (abril y septiembre). Se ha observado que a los eventos de surgencia le siguen aumentos en la productividad sobre todo en primavera-verano como explicaron Juárez-Colunga *et al.* (2010). Es decir habría un desfase entre la señal por surgencia de CID y el aumento en la *Chl a*.

Un segundo estudio que involucra la señal de las surgencias, se realizó en Arbolitos durante marzo de 2004 a abril de 2005 (Panzeca *et al.* 2011). Se observaron incrementos de las concentraciones de *Chl a* y fosfato (7µg/L, 1.4 µM, PO₄³⁻), correspondientes con aumento en señal de surgencia (Panzeca *et al.* 2011). A diferencia del presente trabajo en el que encontraron mayores concentraciones de CID durante abril - septiembre, en el estudio de Panzeca *et al.* (2011), el aumento de las concentraciones de PO₄³⁻ y *Chl a* así como el aumento del índice de surgencia se detectó durante el mes de mayo.

En el presente trabajo la disminución de temperatura y el aumento de las concentraciones de CID, no correspondieron con el aumento en el índice de Bakun

(http://las.pfeg.noaa.gov/las6_5/servlets/dataset?catitem=1636) (Fig. 26 b). Lo que se observó es que el índice de las surgencias para la zona (31.6N 116.8W; ángulo 155°) está desfasado a los incrementos de CID. Por ejemplo en 2010 el índice muestra un aumento en mayo-junio y las concentraciones de CID hasta septiembre (Fig. 26 b). En este trabajo se intentó acoplar un desfase de un promedio móvil con un respecto al índice de bakun de 15 días, sin embargo no funcionó. Aunque poco se ha explicado al respecto, recientemente se ha comenzado con monitoreos continuos de pH y temperatura, desde Oregón hasta California, USA. Estos muestreos se realizan en el presente en puntos alejados (hasta 5km) de la costa y en el intermareal y en ellos tampoco se encontró asociación entre variables como pH e índice de surgencia (Washburn comunicación personal, <http://omegas.science.oregonstate.edu/>). Lo cierto es que dicho índice proporciona información de las surgencias a partir de vientos regionales y por lo tanto más alejados de la costa; y por tanto se presenta el desfase (Pérez-Brunius *et al* 2007). Por lo cual se requiere mejorar los modelos con base a mediciones de viento de estaciones meteorológicas cercanas como el caso de Arbolitos, a fin de relacionarlos con cambios de la química del carbono en zonas costeras.

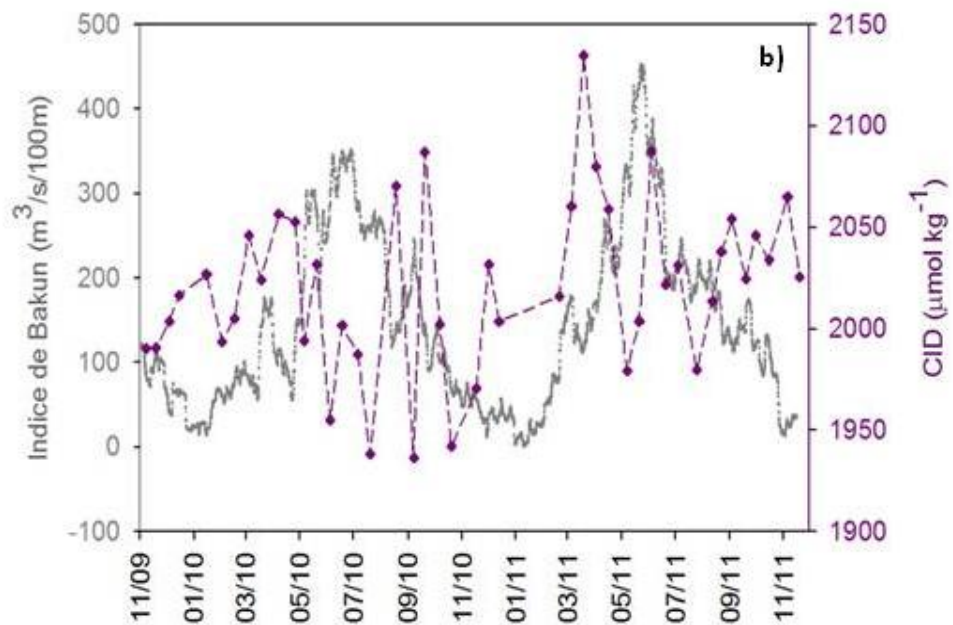
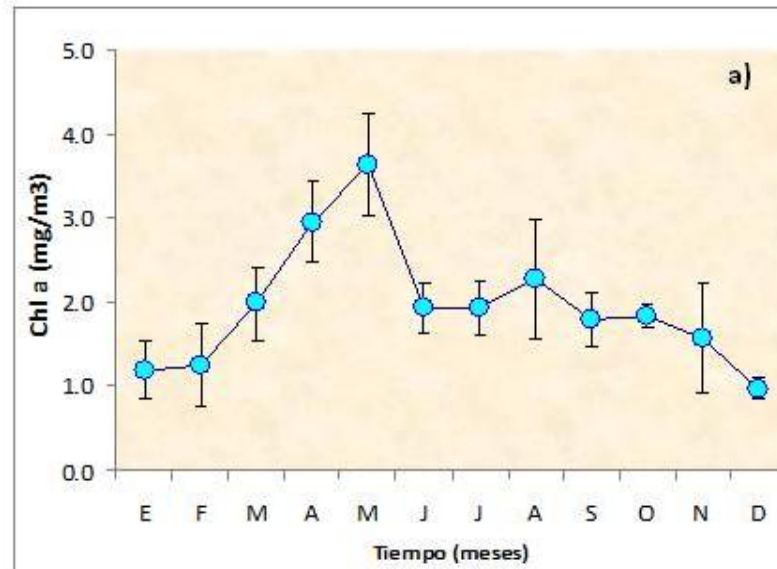


Figura 26.- a) Climatología de clorofila para Arbolitos Tomado de Delgadillo (En preparación); b) Serie de tiempo de noviembre de 2009 a noviembre de 2011 de CID e Índice de surgencia (b).

Evaluación de la presencia y duración de agua subsaturada en la zona del intermareal

Durante los dos años de muestreo en Arbolitos, los valores de ΩA se mantuvieron por arriba del límite de saturación (>1) y por lo tanto no se detectaron aguas subsaturadas con respecto a ΩA . Sin embargo el valor más bajo de ΩA fue de 1.5 y se registró durante septiembre de 2010 y marzo de 2011, este valor correspondió con valores de pH ~ 7.85 y CID de ≥ 2100 $\mu\text{mol/kg}$. Si bien estos valores no llegan a los propuestos por Feely *et al.* (2008), para aguas sub-saturadas con respecto a ΩA en las costas de Baja California (pH 7.7 y CID 2200 $\mu\text{mol/kg}$), este hecho representa la pauta para observar el intervalo de variación al que están sometidos los organismos calcificadores que habitan en el intermareal Arbolitos. Dicho intervalo de ΩA en la zona de estudio fue de 1.4 a 3, por lo tanto los organismos están expuestos a variaciones de ~ 1.6 unidades de ΩA en la escala de días a semanas. Por lo cual es necesario llevar a cabo estudios con organismos que calcifican y habitan en la zona para evaluar posibles impactos. En este aspecto otros estudios han reportado que variaciones de 0.2 de ΩA pueden repercutir en la sobrevivencia de organismos como *Mercenaria mercenaria*, un mejillón cuyo desarrollo larval se vió afectado por variaciones en ΩA . De acuerdo a Green *et al.* (2009), en larvas con tallas de 0.2 a 0.6mm, se observó una mortalidad de hasta 75% cuando el valor de ΩA se encontraba entre 0.4 a 0.6. Otro ejemplo es el estudio del desarrollo larval del ostión *Crassostrea gigas*, en el que se detectó que a menor valor de ΩA , mayor era el tiempo necesario para que las larvas pasaran de un estadio larval a otro (Fig. 27 b, Barton *et al.* 2012). En el gráfico se puede observar que se detectó una menor producción de larvas de ostión a menor ΩA , esto representó

hasta el 50% de la mortalidad de las larvas cuando estuvieron sometidas a valores de ΩA de 1.4. En este sentido no sólo se estudió el valor de ΩA , sino también el efecto que tiene la cantidad de tiempo que estos valores sobre el desarrollo del organismo. Es importante entonces conocer el tiempo de duración en que los valores cercanos al límite de ΩA están presentes en la región de Arbolitos. Por ello en este trabajo se decidió estimar el tiempo que dichos valores están en la región.

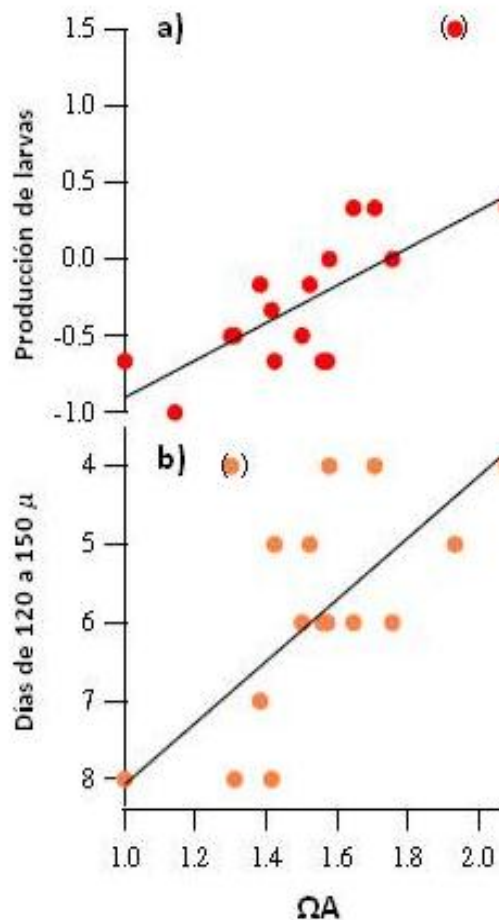


Figura 27.- a) Producción de larvas vs ΩA y b) Días que le toma a una larva de ostión, llegar de una talla de 120 a 150 μ vs ΩA . Se observa una mayor producción larval cuando los valores de saturación son más altos y cuando las larvas están expuestas mayor tiempo. Tomado del estudio de Barton *et al.* (2012).

Entre noviembre de 2009 a noviembre de 2011 se detectaron nueve eventos de surgencia, en la Estación Ensenada y Arbolitos los cuales correspondieron con valores cercanos al límite de ΩA (1.9 - 1). Dichos eventos de surgencia entre la boya y Arbolitos fluctuaron entre 1 y 17 días en la boya y Arbolitos (Tabla II, Figs. 20 y 21). De acuerdo con Barton *et al.* (2012) el someter a las larvas por 4 días a valores ΩA bajos (1 a 2), repercutía directamente en su sobrevivencia. Por lo que surge la inquietud de conocer que es lo que sucede con los organismos al estar expuestos por 17 días a valores por debajo de un ΩA de 1.2.

Hay que considerar que los eventos de surgencia ocurren de forma natural, sin embargo de acuerdo a Bakun (1990), de 1950 a 1990 se han presentado con mayor intensidad. En su estudio llevado a cabo en las costas de California, Península ibérica, Marruecos y Perú se observó el aumento en la intensidad de los eventos de surgencia con base en el aumento en el estrés del viento a lo largo de 40 años de datos (Figura 28). Se esperaría por tanto que conforme se hagan más intensos y frecuentes los eventos de surgencia, se presentarán aguas con valores de ΩA más bajos en la plataforma. Particularmente sobre el intermareal, área donde habitan organismos que calcifican. Se sugiere entonces continuar con el monitoreo tanto en Arbolitos como en la Estación Ensenada con la finalidad de estar pendientes de posibles cambios y que esta información pudiera ser de utilidad al sector pesquero de organismos calcificadores.

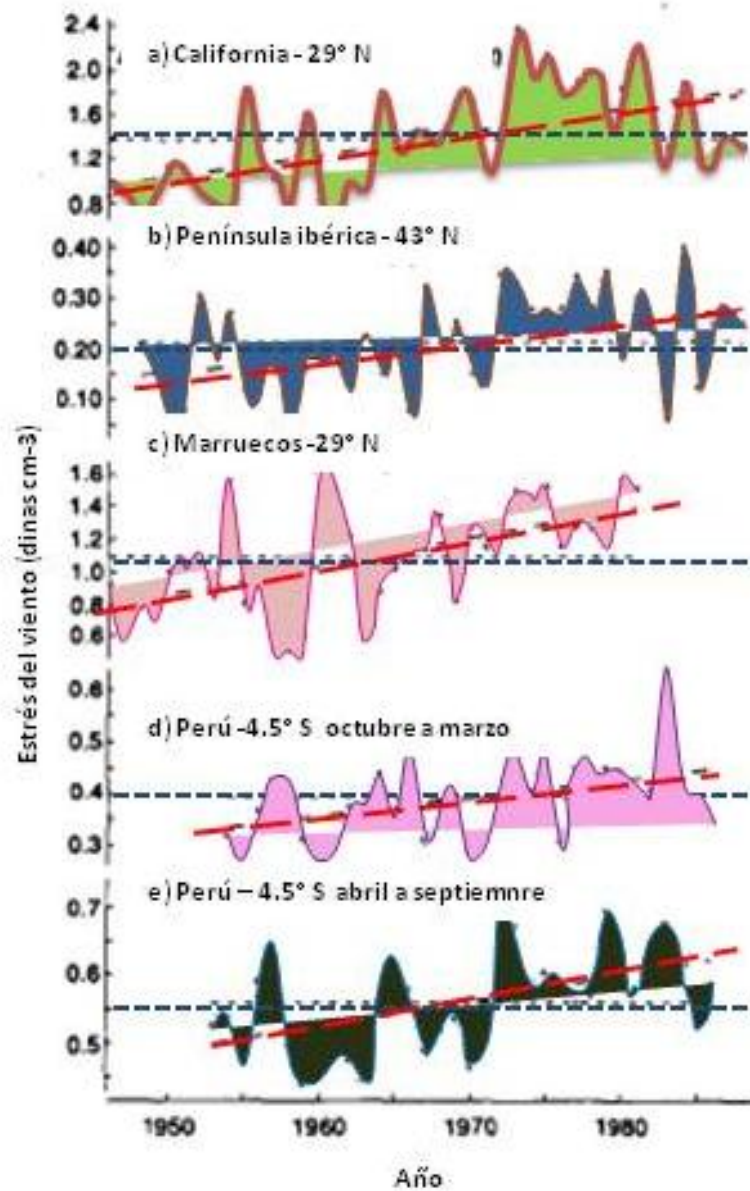


Figura 28.- Del estudio de Bakun (1990), estrés del viento durante 1960 a 1980 en las costas de: a) California, b) Península ibérica, c) Marruecos, d y e) Perú.

Análisis del 4to evento de surgencia

En la zona costera, las surgencias pueden tener una duración de días a semanas (Dorman - Winant, 1995). Como ya se describió, el evento 4-4b tuvo una duración de 17 días y este ocurrió del 14 de marzo al 2 de abril de 2011l. Para corroborar dicha observación se obtuvo una imagen de satélite del nivel del mar generada durante la duración del evento (Fig. 29). Para la interpretación de dicha imagen, habrá que tener en cuenta que las surgencias se caracterizan no sólo por el ascenso de aguas frías, sino también por el descenso del nivel del mar junto a la costa, ya que estos cambios suceden en respuesta al transporte superficial originado por el viento (Enfield y Allen, 1980). En el estudio llevado a cabo por Espinoza-Carreón *et al.* (2004) en Baja California, se observó el descenso del nivel del mar asociado a surgencias; de tal forma que al analizar la imagen del nivel del mar (área dentro del ovalo morado), se observó una disminución permanente del nivel del mar con valores aprox. -12 cm. Estos valores negativos indican desplazamiento de agua hacia fuera de la costa en respuesta al estrés del viento paralelo a la costa y sobre la superficie del mar, característicos de un evento de surgencia (Fig. 29, círculo morado). Si bien se trata de un evento de larga duración, lo cierto es que se han observado eventos de surgencia con duración > 2 semanas. Tal es el caso de Bodega Bay Ca., donde se observó un evento de surgencia con duración aprox. de 14 días. Pues durante dos periodos de 7 días se observó como los vientos del noroeste mantuvieron una velocidad de - 5 a -10 m/s. Lo cual refleja continuidad en el evento de surgencia, pues si bien un día los vientos bajan su velocidad a casi 0 m/s, al día siguiente nuevamente aumentan hasta 15m/s. (Wilkerson *et al.*, 2006; Fig. 30).

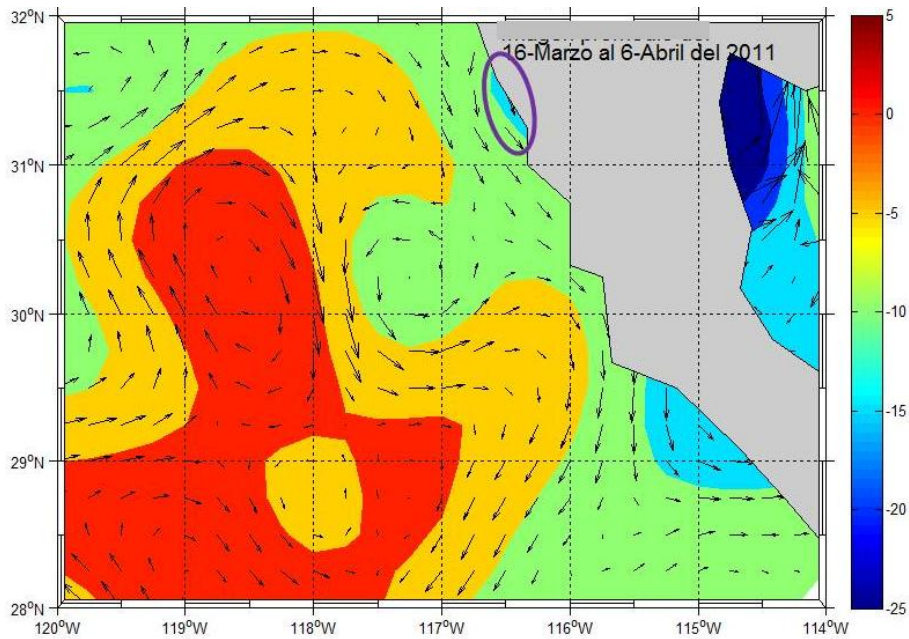


Figura 29.-- Nivel del mar (cm), durante el 4to evento de surgencia. Círculo morado representa el área cercana al área de estudio. Las flechas indican la dirección de las corrientes.

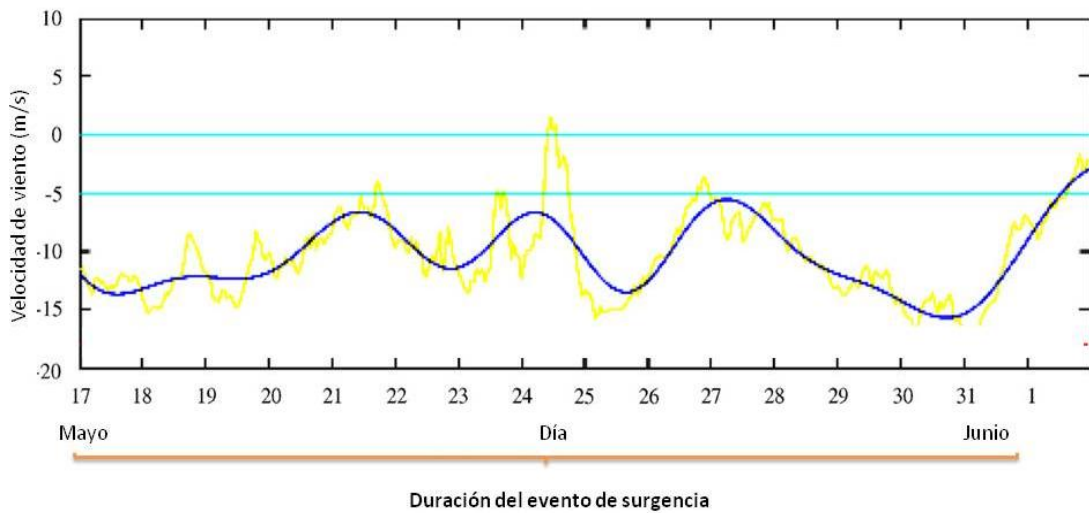


Figura 30.- Velocidades de viento con las cuales se identificó un evento de surgencia con duración de 14 días en Bodega Bay, Ca. Línea amarilla corresponde al viento sin filtrar y la línea azul al viento filtrado. Las líneas aqua indican las velocidades del viento de 0 y 5 (m/s). El corchete naranja abarca los 14 días de duración del evento de surgencia. Tomada del estudio de Wilkerson *et al* (2006)

Se observó que a mayor duración de los eventos de surgencia (17 días), fueron menores los valores de ΩA (1.3) y temperatura (11°C) con valores de pCO_2 que corresponden a $>700 \mu atm$ (Fig. 23 a, b). Las implicaciones que tienen los valores de ΩA en Arbolitos, ya se han explicado anteriormente con el estudio sobre el ostión *Crassostrea gigas* de Barton *et al.* (2012). Cabe destacar que si bien los efectos no se detectan en el primer estadio larval, si se detectan en los siguientes estadios, dado que los organismos no pueden formar sus estructuras de carbonato de calcio las cuales son necesarias para su posterior asentamiento y desarrollo. Al respecto se ha reportado que valores de $pCO_2 >700 \mu atm$ significan, el 10% de disminución en la tasa de calcificación del ostión *Crassostrea gigas* (Gazeu *et al.* 2007). Por lo que si en el presente estudio se observaron valores de $pCO_2 >700 \mu atm$ queda la incógnita de saber que sucede con los organismos de la zona. Por lo anterior el presente trabajo sugiere la necesidad de continuar con los monitoreos en la boya de la Estación Ensenada y Arbolitos.

Características de las variables químicas durante los eventos de surgencia

De los eventos de surgencia entre la boya y Arbolitos no se encontraron diferencias significativas entre las variables químicas en estudio (Fig. 21). Lo cierto es que en los primeros siete eventos de surgencia entre la boya y Arbolitos se observó un incremento de decimas de ΩA y pH y $\sim 2^\circ C$ de temperatura. Esto deja la duda del posible efecto/beneficio en organismos calcificadores en el desarrollo de los organismos que habitan en la zona. En este sentido, se sugiere no solo continuar con el monitoreo en ambos sitios, sino que además de colocar sensores de alta frecuencia en Arbolitos que permitan evaluar a mayor detalle las variaciones de las

características de la química del agua entre la boya y Arbolitos; también realizar estudios con organismos. Y es que la presencia de mantos de macro algas (*Macrocystis pyrifera*, *Sargassum*) entre estas zonas puede ser la razón por la cual se presenten los incrementos antes mencionados; ya que un reciente estudio llevado a cabo en la Jolla, San Diego Ca, se compararon dos series de tiempo de pH, provenientes de sensores ubicados a 17 y a 7m desde la costa (Frieder *et al.* 2012). En el estudio se detectó que cuando el agua que incursionaba hacia la costa durante eventos de surgencia, había un aumento en el pH hasta por ~ 0.3 decimas de pH registrado del primer sensor (17m de la costa) al segundo sensor a ~ 7 m cerca de la costa (Fig.31). Este aumento de pH se atribuyó a la fotosíntesis que ocurrió en los mantos de macroalgas, por lo que procesos como este podrían explicar las fluctuaciones de las variables en estudio desde la boya hasta Arbolitos.

Por otro lado, en los últimos dos eventos se observó lo contrario, es decir valores altos en la boya y menores en Arbolitos. Sin embargo, estos resultados se observaron cuando se presentó un evento de mares rojas en la región (Peña comunicación personal). Por tanto, las diferencias observadas se atribuyen a que se presentaron dos procesos funcionando en sentidos opuestos: 1) fotosíntesis (caso de la boya) que generó aguas con pH más alto y 2) un dominio del proceso de respiración (caso de Arbolitos), en el cual la oxidación de la materia orgánica se oxidó generando valores más bajos de pH en Arbolitos, incluso en este último se podría sugerir que agua con valores de pH más bajo llegó hacia Arbolitos. Pero esto sólo puede ser corroborado con un estudio en el que se integre la comparación de dos sensores que de forma simultánea se midan parámetros como oxígeno, pH y

pCO₂ midiendo antes y después de los mantos de macroalgas tal y como lo hicieron en su estudio Frieder *et al.* (2012).

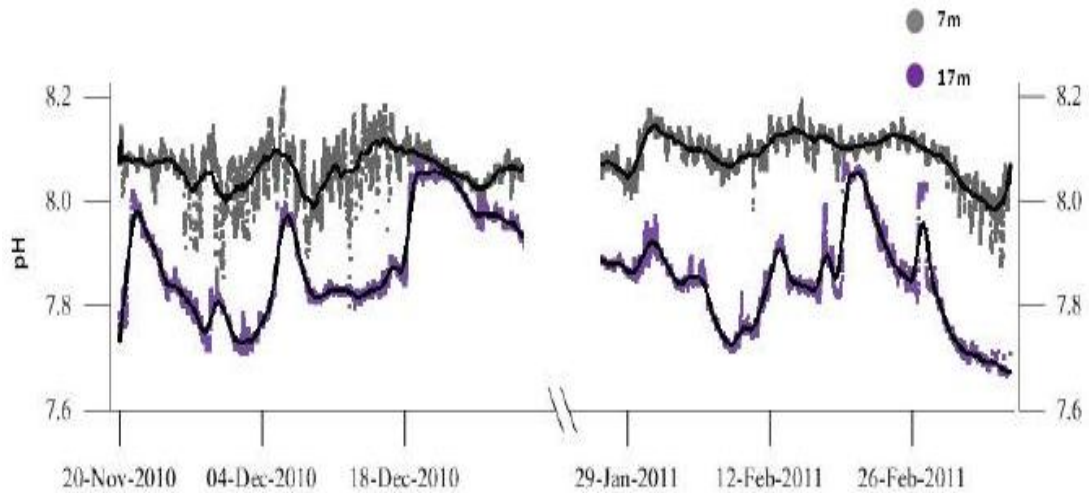


Figura 31.- Efecto de la presencia de mantos de macroalgas del estudio llevado a cabo por Frieder *et al.* (2012); a) Densidad y b) pH de los sensores ubicados a 17m (morado) y a 7 m (gris) desde la costa.

Flujo de CO₂ entre el océano y la atmósfera durante eventos de surgencia

Si bien entre la Estación Ensenada y Arbolitos ocurren procesos de fotosíntesis y respiración, también ocurre la desgasificación, la cual favorece la pérdida de CO₂ y una disminución de CID. En este caso no se calcularon los flujos, por tanto la interpretación se basa solo en el análisis de las diferencias de pCO₂ entre el océano y la atmósfera “ ΔpCO_2 ” (Fig. 22). En este análisis se observaron valores positivos en el área entre ambos sitios (boya y Arbolitos), esto sugiere que el área se comporta como fuente de CO₂ hacia la atmósfera durante los eventos de surgencia en estudio. Cabe recordar que los vientos más intensos se presentan principalmente durante los meses de primavera y verano; por lo que bajo estas condiciones, la dirección e intensidad del viento generan afloramientos costeros de agua

subsuperficial con mayor contenido de CO_2 ($p\text{CO}_2 > 700 \mu\text{atm}$) (De la Cruz *et al.* 2007). En los eventos de surgencia que se estudiaron en este trabajo, se observaron valores de $p\text{CO}_2 \geq 410 \mu\text{atm}$; particularmente en este trabajo, en los eventos 1, 4, 5 y 6 se observaron valores de $p\text{CO}_2 \geq 600 \mu\text{atm}$, por tanto se presentaron los mayores valores de $\Delta p\text{CO}_2$. Por el contrario en el evento tres, fue el que presentó menor flujo de CO_2 hacia la atmósfera con valores de $\sim \Delta p\text{CO}_2 \sim 76 \mu\text{atm}$. Aunque no se encontraron diferencias significativas del $\Delta p\text{CO}_2$ entre Arbolitos y la boya, en los eventos de surgencia que se analizaron, se detectó que los eventos del 1 al 7 la $\Delta p\text{CO}_2$ disminuyó desde la boya hacia Arbolitos. Tal y como ocurrió con el CID, anteriormente se hizo referencia a los procesos de fotosíntesis que pueden presentarse entre la boya y Arbolitos. Pero también cabe la posibilidad de considerar los procesos de degasificación que ocurren entre esos sitios, y que pueden contribuir con la disminución de CO_2 del medio y liberándolo hacia la atmósfera y generando diferencias entre los sitios.

Por tanto, sobresale que los registros de la boya sugieren tener mayor influencia de agua recién transportada por surgencia en comparación con Arbolitos (se observan cambios en una corta distancia). Sin embargo al no encontrar diferencias estadísticas entre estos sitios, se sugiere que el tiempo de residencia del agua entre estos sitios es de \sim horas a pocos días en el cual las pequeñas diferencias entre ambos sitios se deben a que el agua superficial pierde CO_2 vía degasificación o por fotosíntesis. En el trabajo realizado en Oregon por Fassbender *et al.* (2011), observaron cambios de CID en una área donde el tiempo de residencia calculado fue de aproximadamente 4 días; por lo que al no encontrar cambios en nuestro sitio de

estudio entre la boya y Arbolitos, podríamos especular que el tiempo de residencia de Arbolitos debería ser menor, ya que por un lado hay poca distancia entre los sitios (3km) y por otro debido a la advección de masas de agua.

Climatología de CID y T en Arbolitos y la Estación Ensenada

Como contribución final del presente trabajo, se desarrolló el inicio de una climatología con los datos de los dos años de muestreo, tanto para Arbolitos como para la boya y que esperamos seguir manteniendo para que se haga más robusta. En la primera parte del año, tanto en Arbolitos como en la boya se observó un incremento de CID (2080 $\mu\text{mol/kg}$) y disminución de temperatura (12-13°C) hacia el mes de marzo más marcada que en la segunda parte del año. En esta última se observó un incremento de CID (2040 $\mu\text{mol/kg}$) y disminución de temperatura (14-15°C), en Arbolitos durante agosto y en la boya en septiembre (Fig. 32). Lo que se espera es que con la continuidad de este tipo de mediciones, este material sirva no sólo para detectar la presencia de agua con bajos valores de ΩA ; si no que también para sirva de herramienta para implementar acciones de prevención y acciones ante la posible presencia de aguas no óptimas para calcifica y quizás contribuir a ayudar al sector acuícola. Sin embargo no hay duda que es necesario llevar a cabo más estudios para evaluar efecto de la acidificación en organismos marinos.

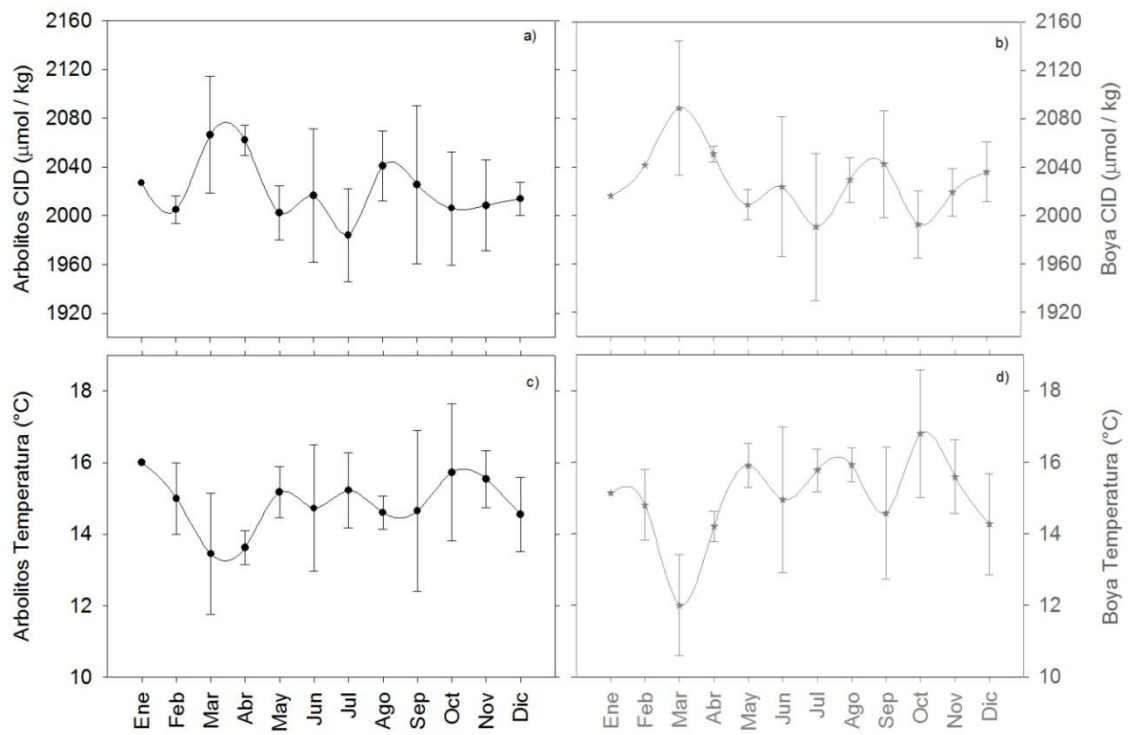


Figura 32.-- Climatología: para Arbolitos; a) CID y c) Temperatura: para la boya b) CID y d) Temperatura.

6. CONCLUSIONES

1.- A lo largo del transecto correspondiente a la línea 100 de Imecocal, se observó que ocurre la advección del ASA y AESs en las costas de Ensenada. Esto sugiere que las variables del sistema del CO₂, están controladas fuertemente por procesos físicos.

2.- Se observó que el agua que llega de la estación Ensenada hacia Arbolitos no sufre cambios significativos y por tanto no se encontraron diferencias en las variables del sistema del CO₂ entre ambos sitios. Sin embargo se desconoce el posible efecto de los mantos de macro algas entre estos sitios.

3.- Se detectó que las surgencias costeras son el causante principal de las bajas temperaturas del agua en Arbolitos y en la Estación Ensenada y de la presencia de aguas ricas en CID. En Arbolitos, durante primavera y otoño se observaron bajas temperaturas que correspondieron con aumento en las concentraciones de CID debido a las surgencias. La temperatura explicó el 90% de la variabilidad del CID durante las primaveras y otoños, mientras que en el verano la temperatura explicó hasta el 66% de la variabilidad del CID. En invierno no se encontró señal alguna de surgencia.

4.- Tanto en la Estación Ensenada como en Arbolitos se observaron características que sugieren que estos sitios están bajo la influencia de condiciones interanuales. Ya que en ambas estaciones durante el 2011 se observaron las temperaturas más bajas y con los máximos valores de pCO₂ en comparación con el 2010. Sin embargo al ser sólo un estudio de dos años, se sugiere continuar con los monitoreos en ambos sitios a fin de poder contar con una base que permita generar conclusiones más robustas.

5.- Durante los dos años de muestreo en Arbolitos, los valores de Ω_A se mantuvieron arriba del límite de saturación (>1), por lo tanto no se observaron aguas subsaturadas con respecto a CaCO₃. Sin embargo, dado que el intervalo de Ω_A fue de 1.4 a 3, se propone que es necesario llevar a cabo estudios con organismos que calcifican y habitan en la zona para evaluar posibles impactos de esta variabilidad en los niveles de saturación de Ω_A .

6.- Entre noviembre de 2009 y noviembre de 2011 se detectaron nueve eventos de surgencia en Arbolitos y en la Estación Ensenada, los cuales correspondieron con valores cercanos al límite de Ω_A (1), con temperaturas <15°C y pCO₂ >410 μ atm. Se encontró que el cuarto evento de surgencia fue el de mayor

duración (17 días) y que fue el que correspondió con los menores valores de Ω (1.1), pH (7.7), de temperatura (10.6°C) y máximo de $p\text{CO}_2$ (863 μatm).

7.-Entre Arbolitos y la boya, además de procesos de fotosíntesis/respiración también ocurre degasificación, misma que fue evaluada en base a $\Delta p\text{CO}_2$. En este análisis se observaron valores positivos en el área entre ambos sitios, esto sugiere que el área se comporta como fuente de CO_2 hacia la atmósfera durante los eventos de surgencia en estudio. Se observó también que a mayor duración de los eventos de surgencia, menores fueron los valores de Ω y temperatura y mayor fue el $\Delta p\text{CO}_2$.

7. REFERENCIAS

- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G., Magaña, V.O. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69:101– 142.
- Aguilar-Rosas, R., Aguilar-Rosas, L. E., Mendoza-González, C., Mateo-Cid, L. E., F. Núñez-Cebrero. (2001). Macroalgas marinas de la costa noroccidental de Baja California, México. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. S039. México, D.F.
- Bakun, A. (1990). Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247: 198-201.
- Barton, A., Hales, B., Waldbusser, G. G., Langdon, C., Feely, R. A. (2012). The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: implications for near-term ocean acidification effects. *Limnology and Oceanography*, 57(3): 698-710.
- Bray, N. A., Keyes, A., Morawitz, W. M. L. (1999): The California Current system in the Southern California Bight and the Santa Barbara Channel, *J. Geophysical Research*, 104: 7695–7714,
- Burgents, J. E., Burnett, K. G., Burnett, L E. (2005). Effects of hypoxia and hypercapnic hypoxia on the localization and the elimination of *Vibrio campbelli* in *Litopenaeus vannamei*, the Pacific white shrimp *Biology Bulletin*, 208: 159–68
- Caldeira, K., Wickett, M. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH *Nature*, 425: 365- 365.
- Castro, R. Martínez, J.A. (2010). Variabilidad espacial y temporal del campo de viento. Dinámica del ecosistemas pelágicos frente a Baja California 1997-2007. Primera edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California. 129:147 pp.
- Cervantes-Díaz, G. Y. (2010). Dinámica de la química del carbono durante eventos Estacionales e interanuales en un observatorio de monitoreo costero en las costas de Baja California. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas.UABC. 66 pp.
- Clark, V., Clarke D., Day-Miller E., Hastie B., Keener-Chavis P., Niebuhr D., Timmons M., Walker S. (2009). Ocean acidification from ecological

impacts to policy opportunities. *Current, the Journal of marine education*, 25 (1): 4-10.

- Dickson, A. G., J. D., Afghan, G. C., Anderson. (2003). Reference materials for oceanic CO₂ analysis: a method for the certification of total alkalinity. *Marine Chemistry*, 80: 185 – 197.
- Doney, S. C. and Schimel, D. S. (2007). Carbon and climate system coupling on time scales from the Precambrian to the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 32: 31–66.
- Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely, and J. Kleypas. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Sciences*, 1:169-192.
- Durazo, R., Baumgartner T. R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 54 :7-31.
- Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Lavaniegos, B., Castro-Valdez, R., Gomez-Valdes, J. Mascarenhas Jr., A.S. (2005). Oceanographic conditions west of Baja California, 2002-2003: A weak El Niño and Subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas*, 31: 537-552.
- Durazo, R. (2009). Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Progress In Oceanography*, 83 (1-4): 361-368
- Durazo, R, Ramirez M. Anax, Miranda Luis E., Soto-Mardones Luis A. (2010). Climatología de variables hidrográficas en la Corriente de California frente a Baja California. Primera edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California. 129:147 pp
- Durazo, R. (2009). Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997-2008. *Progress in Oceanography*, 83: 361-368
- Espinosa-Carreón, TL, Strub PT, Beier E, Ocampo-Torres F, Gaxiola-Castro G. (2004). Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California, *J. Geophysical Research*, 109.
- Fabricius, K E, Langdon C, Uthicke S. (2011). Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Climate Change*, 1 (3):165-69.

- Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65: 414–432.
- Fassbender, A.J., C.L. Sabine, R.A. Feely, C. Langdon, C.W. Mordy. (2011). Inorganic carbon dynamics during northern California coastal upwelling. *Continental Shelf Research*, 31(11): 1180-1192.
- Feely, R.A., Byrne, R.H., Acker, J.G., Betzer, P.R., Chen, C.T.A., et al. (1988). Winter summer variations of calcite and aragonite saturation in the northeast Pacific. *Marine Chemistry*, 25:227–41.
- Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J. (2004). Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 305:362–66
- Feely, R. A., Sabine C. L., Hernández-Ayón, J.M., Lanson, D., Hales, B. (2008). Evidence for Upwelling of Corrosive “Acidified” Water onto the Continental Shelf. *Science*, 320: 1490-1492.
- Feely, R. A., C. L. Sabine, R. H. Byrne, F. J. Millero, A. G. Dickson, R. Wanninkhof, A. Murata, L. A. Miller, and D. Greeley. (2012). Decadal changes in the aragonite and calcite saturation state of the pacific ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 26: 1029-2011.
- Frieder, C. A., Nam, S. H., Martz, T. R., Levin, L. A. (2012): High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest, *Biogeosciences Discuss.*, 9, 4099-4132,
- Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes *ICES Journal of Marine Science*, 65: 414–32
- Gazeau, F., C. Quiblier, J. M. Jansen, J.-P. Gattuso, J. J. Middelburg, and C. H. R. Heip (2007), Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification, *Geophysical Research Letters.*, 34.
- Godínez, V. M., E. Beier, M. F. Lavín, and J. A. Kurczyn. (2010). Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *Journal of Geophysical Research.*, 115.
- Gómez-Valdés J. Vélez-Muñoz H. (1982). Variaciones estacionales de temperatura y salinidad en la region costera de la Corriente de California. *Ciencias Marinas*, 8(2): 167-178.
- Green, M.A., G.G. Waldbusser, S.L. Reilly, K. Emerson, and S.O'Donnell. (2009). Death by dissolution: sediment saturation state as a mortality factor for juvenile bivalves. *Limnology and Oceanography* 54: 1037–1047.

- Hales, B., Moum, J.N., Covert, P., Perlin, A. (2005 a). Irreversible nitrate fluxes due to turbulent mixing in a coastal upwelling system. *Journal of Geophysical Research.*, 110.
- Hales, B., Takahashi, T., Bandstra, L., (2005 b). Atmospheric CO₂ uptake by a coastal upwelling system. *Global Biogeochemical Cycles.*, 19.
- Hickey, B.M. (1998). Coastal oceanography of western North America from the tip of Baja California to Vancouver Island. En: Robinson, A.R., Brink K.H. (Eds.), *Coastal Segment, The Sea, Vol 11.* Wiley, New York, pp. 345-391.
- His, E., Seaman, M.N.L., Beiras, R. (1997). A simplification of the bivalve embryogenesis and larval development bioassay method for water quality assessment. *Water Research*, 31: 351–355
- Hoegh-Guldberg O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, D. R. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi, M. E. Hatzilios. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science* 318 (5857): 1737-1742.
- Holman J D, Burnett K G and Burnett L E. (2004). Effects of hypercapnic hypoxia on the clearance of *Vibrio parahaemolyticus* in the Atlantic blue crab, *Callinectes sapidus*. *Biology Bulletin*, 206: 188–96
- IPCC, Climate Change (2001). The Scientific Basis. The Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J. T. Houghton et al., Eds. Cambridge Univ. Press, New York.
- IPCC, Climate Change. (2007). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon et al., Eds. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, New York.
- Johnson, K. M., J. M. Sieburth, P. J. L. Williams, and L. Brandstrom. (1987). Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: automation and calibration. *Marine Chemistry*, 21:117 – 133.
- Juarez-Colunga, M.C. (2010). Variación espacial y temporal del pH en las costas de Baja California. Tesis para obtener el grado de maestría en Ciencias en Oceanografía Costera. Facultad de Ciencias Marinas Ciencias/Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). 68pp.

- Kleypas, J. A., McManus, J. W., Meñez, L. A. B. (1999). Using environmental data to define reef habitat: Where do we draw the line?. *American Zoologist*, 39: 146-159.
- Kurihara, H., Shirayama, Y. (2004a). Effects of increased atmospheric CO₂ on sea urchin early development. *Marine Ecology Progress Series*. 274:161–169
- Kurihara, H., Shirayama, Y. (2004b). Effects of increased atmospheric CO₂ and decreased pH on sea urchin embryos and gametes. In: Heinzeller T, Nebelsick JH (eds) *Echinoderms: München*. Taylor & Francis group, London, 31–36.
- Kurihara H, Kato S, Ishimatsu A. (2007). Effects of increased seawater pCO₂ on early development of the oyster *Crassostrea gigas*. *Aquatic Biology* 1:91–98.
- Kurihara H. (2008). Effects of CO₂ driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. *Marine Ecology Progress Series*, 373:275-284.
- Linacre, L., Durazo, R., Hernández-Ayón J.M., Delgadillo-Hinojosa, F., Cervantes-Díaz, G., Lara-Lara, J.M., Camacho-Ibar, V., Siqueiros-Valencia, A., Bazán-Guzmán, C. (2010). Temporal variability of the physical and chemical water characteristics at a coastal monitoring observatory: Station ENSENADA. *Continental Shelf Research*, 30:1730-1742.
- Lynn, R., Simpson, J.J. (1987). The California Current system: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*. 92: 12947-12966.
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R.M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G.K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L., Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Totterdell, I.J., Weirig, M.F., Yamanaka, Y. and Yool, A. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, (7059): 681-686.
- Panzeca, C., Beck, A. J., Tovar-Sanchez, A., Segovia-Zavala, J., Gordon, T. Christopher, T., Gobler, J., Sañudo, A., Wilhelmy, J. (2009). Distributions of dissolved vitamin B12 and Co in coastal and open-ocean environments. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 85:223–230.
- Parnell, P. E., Miller, E. F., Lennert-Cody, C. E., Dayton, P. K., Carter, M. L., and Stebbins, T. D. (2010). The response of giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) in southern California to low-frequency climate forcing, *Limnology and Oceanography*, 55, 2686–2702.

- Pérez-Brunius, P., López, M., Parés-Sierra, A., Pineda, J. (2007). Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigation Report*, 48: 204–214.
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E., Stievenard, M. Petit, J.R. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429–436.
- Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O., Liss, P., Riebesell, U., Shepherd, J., Turley, C., Watson, A. (2005) Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy document 12/05. The Royal Society, London.
- Reid, J.L. Jr., Roden, G.I., Wyllie, J.G. (1958). Studies of the California Current system. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations*, 1:27- 56.
- Roden, G.I. (1971). Aspects of the transition zone in the Northeastern Pacific. *J. Geophysical Research*, 76: 3462–3475.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., Raga, B. (2007). Midsummer Gap Winds and Low Level Circulation over the Eastern Tropical Pacific. *Journal of Climate*, 20:3768-3784
- Strub, P.T., James, C. (2002). Altimeter-derived surface circulation in the large- scale NE Pacific gyres: Part 1. Seasonal variability. *Progress in Oceanography*, 53, 163–183.
- Van Geen, A., Takesue, R. K., Goddard, J., Takahashi, T., Barth, J.A., Smith, R.L. (2000). Carbon and nutrient dynamics during coastal upwelling off Cape Blanco, Oregon. *Deep Sea Research. Part II Topic Studies Oceanography*. 47, 975-1002.
- Wilkerson, F.P., Lassiter, A.M., Dugdale, R.C., Marchi, A., Hogue, V.E. (2006). The phytoplankton bloom response to wind events and upwelled nutrients during the CoOP WEST study. *Deep Sea Research* 53: 3023.
- Weiss, R.F. (1974), Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 2: 203-215.
- Zaytsev, O., Cervantes-Duarte, R., Montante, O., Gallegos-Garcia, A. (2003). Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Península. *Journal of Oceanography*, 59: 489–502