

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**VARIABILIDAD TEMPORAL DEL CADMIO DISUELTO EN LA ZONA
COSTERA DE LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, ENSENADA BAJA
CALIFORNIA, MÉXICO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

OCEANÓLOGA

PRESENTA:

SANDRA LAURA QUIJANO DEL OLMO

Ensenada, Baja California, México. Junio 2014.

RESUMEN

La Bahía de Todos Santos (BTS), ubicada en la Península de Baja California al noroeste de México, es una bahía dentro del Sistema de la Corriente de California (SCC), el cual es reconocido porque se presenta el fenómeno de surgencia. Con el objetivo de estudiar la variación temporal del cadmio disuelto (Cd) en la BTS durante el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010, se realizaron muestreos para la recolecta de agua de mar en dos estaciones de la zona interna (IIO y La Rada) y uno en la zona externa (Arbolitos). También se obtuvieron datos de temperatura, salinidad, clorofila a (Cl "a") y fosfatos (PO_4^{-3}). El análisis del Cd se realizó bajo condiciones de "ultralimpieza" y se cuantificó por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. Los resultados muestran que la variación estacional de la temperatura superficial de la estación IIO y La Rada, siguieron la variación estacional de la radiación solar, con valores máximos de temperatura durante el verano (21.0 a 22.0°C) y mínimos en invierno (14.5 a 16.7°C). En contraste, en la estación Arbolitos la variación estacional de temperatura siguió la variación estacional de la surgencia costera con valores máximos en otoño (15.7-17.2°C) y mínimos en primavera (12.9-15.0°C). La variación estacional de la salinidad superficial siguió la variación estacional de la surgencia costera tanto en la parte externa (33.33 a 33.92) como interna (33.14 a 33.94) de la BTS, lo que indica que el agua de surgencia de la zona adyacente entra al interior de la bahía. La variación estacional del Cd en la estación Arbolitos, fue similar a la variación estacional de la surgencia costera con valores altos en primavera (0.30-0.49 nM) y bajos en otoño (0.18-0.21 nM). De manera similar, en la zona interna de la BTS, las concentraciones más altas de Cd también se registraron durante primavera-invierno (0.21-0.32 nM) y las menores durante otoño (0.15-0.20 nM), lo cual se relacionó con una intensa actividad biológica (0.27-9.90 mg m^{-3}) estimulada por la advección de las aguas de surgencia de la zona adyacente que quedan retenidas en el interior de la BTS. Además de la variación estacional, las concentraciones de Cd presentaron una variación interanual bien definida. Las aguas superficiales en la BTS y en la zona adyacente presentaron mayores concentraciones de Cd durante la primavera del 2008 (0.49 ± 0.08 nM) en comparación con el 2009 (0.41 ± 0.08 nM) y el 2010 (0.21 ± 0.02 nM) asociado con las características hidrográficas del fenómeno de La Niña, que de acuerdo a la literatura fue la condición que prevaleció durante el 2008 en esta región del Pacífico. En conclusión, el análisis de los resultados de este trabajo indican que los procesos físicos como la surgencia y la advección, así como los procesos biológicos como la fotosíntesis, juegan un papel muy importante en controlar la variabilidad espacial y temporal del Cd en este sistema costero del sur SCC.

Palabras clave: Cd, Bahía Todos Santos, Surgencia.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
LICENCIATURA EN OCEANOLOGÍA

VARIABILIDAD TEMPORAL DEL CADMIO DISUELTO EN LA ZONA
COSTERA DE LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, ENSENADA BAJA
CALIFORNIA, MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

OCEANÓLOGA

PRESENTA:

SANDRA LAURA QUIJANO DEL OLMO

Aprobada por:



M.C. Eunise Vanessa Torres Delgado
Director de tesis



Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa
Sinodal



Dr. Héctor Bustos Serrano
Sinodal

DEDICATORIAS

Un océano maravilloso e inmenso me dio la posibilidad de sumergirme en sus aguas y recorrerlo con las personas más importantes en mi vida. Por tanto dedico mi tesis con mucho amor y cariño:

A *mi Mamá* por ser mi principal motor, que gracias a tu amor infinito, consejos y regaños he logrado hasta lo que ahora soy, por ser parte de cada uno de mis sueños, metas y compartir siempre tu sabiduría.

A *mi Padre* por ser una de las fuerzas que me inspiran a seguir adelante, tu apoyo incondicional, tus consejos y exhortaciones que me han llevado a ser mejor cada día, por ese amor infinito que me demuestras día con día.

A *mis Hermanos Mario y Alex* por ser ese apoyo incondicional, que gracias a sus consejos y amor infinito me motivan día con día a seguir adelante y gracias a su ejemplo he podido superar cada uno de los obstáculos que se presentan en la vida.

“Antes de ser hombres de ciencia, deberíamos ser hombres”

-Albert Einstein-

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y colaboración de grandes personas, que estuvieron firmes en cada momento.

Agradezco a mi directora de tesis a la M.C Eunise Vanessa Torres Delgado, por darme la oportunidad de trabajar en su equipo de trabajo, por cada uno de sus consejos, enseñanzas, críticas y por ese trabajo de equipo que fortalecieron las bases para la finalización de esta tesis.

Quiero agradecer al Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa por su apoyo incondicional durante la realización de este trabajo, por aceptarme a formar parte del equipo de trabajo, por compartir sus experiencias y conocimientos que fueron parte fundamental para la culminación de esta tesis.

Agradezco al Dr. Héctor Bustos Serrano, por formar parte de mi comité de tesis, ya que gracias a sus observaciones, comentarios y consejos fue posible la finalización de esta tesis.

También agradezco al Dr. Víctor Froylan Camacho Ibar y al M.C. Eduardo Ortíz Campos por la colaboración en el análisis de las muestras de nutrientes que favorecieron la realización y culminación de este proyecto de tesis.

Gracias a la UABC y en especial a la FCM y al IIO por abrirme las puertas en este gran proyecto de vida, por el uso de sus instalaciones y que gracias a cada uno de los investigadores y profesores fue posible terminar este gran proyecto.

Al proyecto CONACYT CB-2008-01-098471, “Biogeoquímica de elementos traza en la zona sur de la cuenca del sur de California: una región influenciada por la Corriente de California, surgencias y aportes antropogénicos”, por brindarme un sostén económico (número de becario 17156) para la realización de este trabajo de tesis.

Gracias a mis compañeros de laboratorio y amigos: Carlos Romero, Mauricio Reyes y Jacob Valdivieso, ya que gracias a su experiencia y conocimientos, además de su apoyo incondicional, fueron una gran inspiración para la elaboración de esta tesis.

Agradezco infinitamente el apoyo brindado por mi FAMILIA, por ser ese pilar que me sostenía de pie en momentos difíciles, por su apoyo incondicional y ese gran amor. Doy gracias a Dios por permitir culminar todos mis triunfos a pesar de cada una de las circunstancias y compartir estos momentos con mi familia. Así mismo agradezco a mi MAMI por tu apoyo infinito, tu sabiduría y por cada palabra de aliento que me inspiraba a seguir adelante, gracias mami por ser testigo de cada uno de mi triunfos y ser ese sostén en cada fracaso, que a

pesar de la distancia siempre estuviste en cada momento de mi lucha, gracias infinitas a mi guerrera incansable. Agradezco a mi PAPI por ser incondicional, por ser cómplice de cada uno de mis sueños y metas, por ser ese ejemplo a seguir y por enseñarme a nunca rendirme, gracias por tanto amor. Los amo padres. Gracias a mis HERMANOS, aquellos seres humanos que Dios me envió como mis compañeros y cómplices de vida, por sus porras y palabras de aliento, son lo mejor que pudiera tener en la vida, gracias por todo hermanos.

Agradezco de manera personal a mis abuelos: Raquel, Herminia y Noé, por compartir cada una de sus experiencias que son armas para ser una guerrera incansable como ustedes y gracias por ese amor infinito que solo los abuelos pueden demostrar. A mis tías y tíos, gracias por su apoyo, palabras de aliento, consejos y amor incondicional (Tía Estela, Tía Raquel, Tía Marú, Tía Cande, Tía Naty, Tía, Tío Joel, Tío Roberto, Noé, Oscar y a todos mis tíos que fueron parte importante en esta etapa. Así mismo agradezco a todos mis primos que con ansias, cariño y esmero esperaban mi regreso (Julia, Maru, Areli, Carina, Luis, Laura, Raquel, Sofía, Eric, Luna).

De manera especial quiero agradecer el apoyo de la Tía Sabina, Fam. López Calderón, Fam. López Sánchez, Fam. López Camargo, Fam. Orozco López, Tía Perla y Fam. Ramírez Mortera. Por hacerme participe de su familia y hacer más amena mi estancia, gracias por sus consejos, amor, cariño, ayuda y cada momento que compartieron conmigo. También agradezco a la Familia Lorenzo Palma y Silva Palma, ya que gracias a su buen corazón, humildad y hospitalidad, hicieron mejores mis días. Gracias por su apoyo incondicional.

Agradezco a mis amigos, a cada uno de ellos que me hizo sentir en familia, gracias por su amistad incondicional, apoyo, consejos, enseñanzas, experiencias y hermandad. Agradezco infinitamente a mis amigas del alma: Natalia S, Angélica R y Alejandra R, que son parte fundamental de esta nueva etapa. También agradezco a mis amigas incondicionales: Yuritz P y Nathalí C, a mis Guerreras: Edna S, Jasmín C y Yolohiti S, a mis amigos que inspiraron este sueño: Carlos R, Jacob V y Mauricio R. A mis amigos de toda la vida: Alejandra H, Cristina L, Yolanda L, Giselle S, Brenda M, Vianney G, Liliana M, Daniel, Ignacio y a todos aquellos que formaron parte de este proyecto (Braulio, Carlos, Doreny, Fernanda, Blanca, Lulú).

Finalmente agradezco a todas las personas que hicieron posible este trabajo, investigadores, profesores, técnicos y compañeros.

ÍNDICE




Capítulo	CONTENIDO	Página
1.	Introducción.	1
2.	Objetivo.	4
2.1.	Objetivo General.	4
2.2.	Objetivos específicos.	4
3.	Hipótesis.	5
4.	Área de estudio	6
4.1.	Clima.	7
4.2.	Vientos.	7
4.3.	Circulación.	8
4.3.1.	Circulación superficial adyacente a la BTS.	8
4.3.2.	Circulación superficial de la BTS.	8
4.4.	Hidrología de la BTS.	10
5.	Metodología.	11
5.1.	Limpieza de materiales.	11
5.2.	Diseño experimental y recolecta de muestras.	11
5.3.	Análisis y cuantificación de las variables químicas.	12
5.4.	Procesamiento de Datos.	15
6.	Resultados.	16
6.1.	Variación estacional del índice de surgencia (ISB ₁₅) de la BTS.	16
6.2.	Variación estacional de temperatura y salinidad de las aguas superficiales en la zona costera de la BTS.	18
6.3.	Variación estacional de Cl "a" y PO ₄ ⁻³ superficial en la zona costera de la BTS.	21
6.4.	Variación estacional del Cd superficial de la zona costera de la BTS.	25
6.5.	Variación estacional de la razón Cd/PO ₄ ⁻³ en la zona costera de la BTS	27
7.	Discusión.	30
7.1.	Análisis hidrográfico de las aguas superficiales de la zona costera de la BTS.	30

7.2.	Efecto de los procesos físicos sobre la variación temporal del Cd en aguas superficiales de la zona costera de la BTS.	34
7.3.	Efecto de los procesos biológicos sobre la variación temporal del Cd superficial en la zona costera de la BTS.	36
8.	Conclusiones.	41
9.	Referencias.	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
I	Límite de detección (LD) de las variables hidrográficas, químicas y biológicas.	13
II	Análisis del estándar de referencia para el control de calidad del análisis de Cd. Como material de referencia se utilizó el agua de mar de origen costero CASS-5 (Coastal Atlantic Standard of Seawater). n= número de alícuotas del estándar de referencia, (promedio ± error estándar).	14
III	Promedios de la variación estacional de la hidrografía [T,S], índice de surgencia (ISB ₁₅), Cl "a", PO ₄ ⁻³ y Cd de la zona costera de la BTS, durante un periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. (promedio ± error estándar).	17
IV	Promedios de la variación estacional de la razón Cd/PO ₄ ⁻³ en aguas superficiales (promedio ± error estándar). El promedio de las primaveras, los veranos, etc., se calcularon utilizando todos los datos de la razón Cd/PO ₄ ⁻³ de cada una de las épocas.	29
V	Correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas de los tres sitios costeros de la BTS.	33
VI	Concentraciones de Cd y PO ₄ ⁻³ medidos en el Pacífico.	36
VII	Relación Cd/PO ₄ ⁻³ en diferentes sistemas costeros de los mares del mundo.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Área de estudio y puntos de muestreo en la región de la BTS. La estación IIO () y la estación La Rada () se encuentran en el interior de la bahía, mientras que la estación Arbolitos () se localiza en el exterior.	6
2	Variación estacional del Índice de surgencia (ISB) para una estación localizada a 30°N, 119° W para el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. Los datos se obtuvieron de la base de datos de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration; mLC=metros de línea de costa).	16
3	Variación temporal de la temperatura en la región de la BTS para el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.	19
4	Variación temporal de la salinidad en la región de la BTS durante el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.	20
5	Variación temporal de la biomasa fitoplanctónica (Cl “a”) en la región de la BTS durante el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.	22
6	Serie de tiempo de la concentración de fosfatos (PO_4^{-3}) en la región de la BTS durante el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.	24
7	Serie de tiempo de la concentración de Cd disuelto (Cd) en la región de la BTS durante un periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.	26
8	Relación $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ de la zona costera de la BTS para el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada. La línea punteada corresponde a la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ reportada para aguas del Pacífico Nororiental (0.35 nM/ μM , Bruland, 1980).	28
9	Batimetría y circulación superficial (flechas punteadas) durante primavera-verano en la BTS (tomado de Peña-Manjarrez <i>et al.</i> , 2009).	31

- | | | |
|-----------|---|-----------|
| 10 | Perfiles de Cd y PO_4^{-3} para aguas del Pacífico Nororiental (tomados de Bruland, 1980). | 36 |
| 11 | Relación Cd vs PO_4^{-3} en la zona costera de la BTS comparada con la del Pacífico Nororiental (Bruland, 1980). | 38 |

1. INTRODUCCIÓN.

La biogeoquímica de los metales traza en el ambiente marino ha generado interés en aguas costeras y oceánicas, debido al papel que juegan estos metales en los procesos biológicos (Bruland, 1980; Klinkhammer y Bender, 1980; Kremling, 1985; Saager *et al.*, 1992; Cotté-Krief *et al.*, 2000; Nava-López, 2002; Segovia-Zavala *et al.*, 2003, 2004). Uno de ellos es el cadmio disuelto (Cd), el cual se presenta en la forma de $CdCl^+$ ya que tiene un estado de oxidación de +2 en el agua de mar (Cd (II)) (Morford y Emerson, 1999; Russell y Morford, 2001; Nameroff *et al.*, 2002).

En el océano, el perfil vertical del Cd es de tipo nutriente debido a que en la zona eufótica es removido por la captación del fitoplancton e incorporado a su tejido biológico, posteriormente incrementa su concentración con la profundidad, alcanzando un máximo entre los 1000-1500 m por descomposición y remineralización de las partículas biogénicas en la columna de agua (Boyle *et al.*, 1976; Bruland *et al.*, 1978; Bruland, 1980; Knauer y Martin, 1981). De esta manera, el Cd presenta concentraciones bajas en la superficie y elevadas en aguas profundas (Libes, 1992). Además, la asociación que existe entre las distribuciones de Cd y nutrientes en la columna de agua (Elbaz-Poulichet y Martín, 1987; Abe y Matsunaga, 1988; Bruland *et al.*, 1994; De Baar *et al.*, 1994; Abe, 2001) ha sido de interés para entender los procesos biogeoquímicos que ocurren en el ecosistema marino (Sañudo-Wilhelmy *et al.*, 2002). Las distribuciones verticales del Cd se correlacionan significativamente con las de fosfatos (PO_4^{-3} , Abe y Matsunaga, 1988; Boyle *et al.*, 1985; van Geen *et al.*, 1992; van Geen y Husby, 1996; Takesue y van Geen, 2002) debido a que ambos se remueven en aguas superficiales y se regeneran en aguas profundas (Boyle *et al.*, 1976; Bruland *et al.*, 1978; Bruland, 1980; Saager *et al.*, 1992; Abe, 2001; Chen *et al.*, 2005). Por lo tanto, la relación entre el Cd y el PO_4^{-3} sugiere que la distribución vertical de estos elementos están regulados por procesos biogeoquímicos similares (Bruland, 1980; Chen *et al.*, 2005).

Comúnmente en la literatura se ha reportado que en la zona costera las concentraciones de Cd están fuertemente controladas por procesos de interacción entre el océano y el continente, debido a que los mecanismos de

transporte como la escorrentía de los ríos y las surgencias juegan un papel muy importante en determinar la composición química de las aguas costeras (Cotté-Krief *et al.*, 2000). En la región costera del Pacífico Nororiental por ejemplo, se han reportado concentraciones superficiales de Cd que varían de 0.04 a 1.0 nM mientras que en aguas oceánicas oscilan entre 0.002 y 0.25 nM (Bruland *et al.*, 1978; Bruland, 1980; Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1991, 1996; Takesue *et al.*, 2004; Lares *et al.*, 2008; Lares y Marinone, 2009; Salamanca-Quevedo, 2013). Además, se ha establecido que su variación temporal en esta región está relacionada a) a la intensidad de la surgencia, b) la productividad biológica y c) con eventos de escala interanual como El Niño y La Niña (Bruland, 1980; Boyle *et al.*, 1981; Knauer y Martin, 1981; van Geen *et al.*, 1992; van Geen y Husby, 1996; Takesue *et al.*, 2002, 2004).

En particular, dentro de la región Noroccidental de Baja California se ha observado que los eventos de surgencia costera son la principal característica oceanográfica que influye en la productividad biológica (Millán-Núñez y Rivas-Lozano 1988; Jiménez-Pérez 1989; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010). Estos eventos de surgencia ocurren durante todo el año, aunque son más intensos durante el periodo de primavera-verano (Barton y Argote, 1980; Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982) y se caracteriza por un transporte de agua profunda hacia las aguas superficiales; producido por el transporte de Ekman y la acción de vientos continentales. Aunque este transporte depende esencialmente de la intensidad y dirección del viento a lo largo de la costa, otros factores como la batimetría submarina, la geometría de la costa y la presencia de una termoclina más somera, son importantes en el establecimiento de condiciones favorables para el movimiento vertical de aguas subsuperficiales hacia la superficie oceánica (Strub *et al.*, 1991; Graham, 1993). En esta región los eventos de surgencia son muy frecuentes y aparentemente emergen de 70-100 m de profundidad por lo que la concentración de los diferentes elementos químicos debe ser similar a las de aguas de esta profundidad (Durazo *et al.*, 2010). Por lo tanto, la distribución superficial del Cd en las bahías de la zona costera de Baja California podría ser afectada por la surgencia costera que proporciona un transporte de Cd a las aguas superficiales.

La variación interanual de las concentraciones de Cd es otra característica importante que se debe estudiar en la zona costera de Baja California debido a la ocurrencia de los fenómenos sinópticos como El Niño o La Niña (Chávez *et al.*, 1999; Takesue *et al.*, 2004; Durazo *et al.*, 2005). En esta región, los eventos de El Niño provocan calentamiento en las aguas superficiales, cambios en la salinidad, reducción en los procesos de surgencias costeras y en los aportes de Cd, así como la disminución de la producción primaria por el hundimiento de la nutriclina y la termoclina (Lynn, 1967; Lynn *et al.*, 1998). Por el contrario, durante periodos de La Niña, se presentan temperaturas más frías asociadas a eventos de surgencia intensos, así como concentraciones de Cd altas y un incremento de la producción primaria debido al ascenso de la nutriclina y la termoclina (Hayward *et al.*, 1999).

En este trabajo, las estaciones de muestreo están ubicadas estratégicamente para identificar los procesos que controlan la concentración de Cd superficial en la Bahía de Todos Santos (BTS), un cuerpo costero que se encuentra en la región Noroccidental de Baja California y afectada en su parte externa por eventos de surgencia intensa. La circulación en el exterior de la BTS tiene un efecto importante sobre la circulación en el interior de la bahía (Mateos-Farfán, 2010), y dado que tiene comunicación abierta con el Océano Pacífico, esta condición determina en gran medida las propiedades fisicoquímicas de sus aguas (Mancilla-Peraza y Martínez-García, 1991; Mateos-Farfán, 2010; Peña-Manjarrez *et al.*, 2009). Por tal motivo se seleccionó la estación IIO, ubicada en la zona norte de la BTS, un sitio impactado por las corrientes litorales, actividad biológica y aportes antropogénicos intermitentes, que podrían afectar las concentraciones naturales del Cd. La estación Arbolitos como una localidad representativa de la región oceánica, influenciada por fenómenos estacionales como la surgencia costera y que se caracteriza por el enriquecimiento natural de Cd. Por último, la estación La Rada se ubicó en el interior de la zona portuaria para identificar si existe un enriquecimiento de forma antropogénica, debido a las actividades relacionadas con el tráfico marítimo. Así, este trabajo pretende estudiar la variación temporal del Cd en tres sitios costeros de la BTS, e identificar los procesos principales que controlan la concentración del Cd en la zona costera de la bahía, como son la surgencia, la actividad antropogénica

y la actividad biológica natural que ocurre en las aguas superficiales de este cuerpo de agua de la región sur del Sistema de la Corriente de California (SCC).

2. OBJETIVO.

2.1. Objetivo general.

Estudiar la variabilidad temporal de la concentración del Cd en tres sitios costeros de la Bahía de Todos Santos, durante el periodo de enero del 2008 a diciembre de 2010.

2.2 Objetivos específicos.

I.- Analizar la variabilidad temporal de las variables fisicoquímicas (temperatura y salinidad), biológicas (Cl "a") y químicas (PO_4^{-3} y Cd) en las aguas costeras de la BTS para el periodo de enero del 2008 a diciembre de 2010.

II.- Identificar los eventos de surgencia a través del índice de surgencia de Bakun (ISB) y asociarlo con la variabilidad estacional del Cd para el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010.

III.- Estimar la variación estacional de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ de la zona interna y adyacente de la BTS para el periodo de enero del 2008 a diciembre del 2010.

3. HIPÓTESIS.

Considerando que la variación temporal de la concentración del cadmio disuelto (Cd) en la región de la BTS está influenciado por eventos antropogénicos, surgencia costera y la actividad biológica, se espera encontrar bajas concentraciones en la estación IIO ya que se localiza en la parte abierta de la bahía y relativamente alejada de las principales fuentes naturales y antropogénicas de Cd. En contraste, se espera encontrar altas concentraciones de Cd en la estación Arbolitos, ya que se ubica en un sitio que es una fuente natural de Cd por los eventos de surgencia, y en la estación La Rada debido a que se encuentra influenciada por las actividades marítimo-portuarias.

4. ÁREA DE ESTUDIO.

La Bahía de Todos Santos (BTS) se localiza al noroeste de México y en la costa oeste de Baja California (latitudes 31.70°N a 31.90°N y longitudes 116.80°W a 116.60°W), aproximadamente a 100 km al sur de la frontera de México con Estados Unidos. Los límites de la BTS son: al norte Punta San Miguel (PSM), al sur Punta Banda (PB), al este la ciudad de Ensenada y al oeste dos conexiones con el mar abierto, separadas por las Islas de Todos Santos (ITS). La BTS es una bahía somera entre 10 y 50 m de profundidad, excepto en el cañón submarino localizado entre PB y las ITS al suroeste de la bahía, que alcanza profundidades de 400 m (Argote-Espinoza *et al.*, 1991).

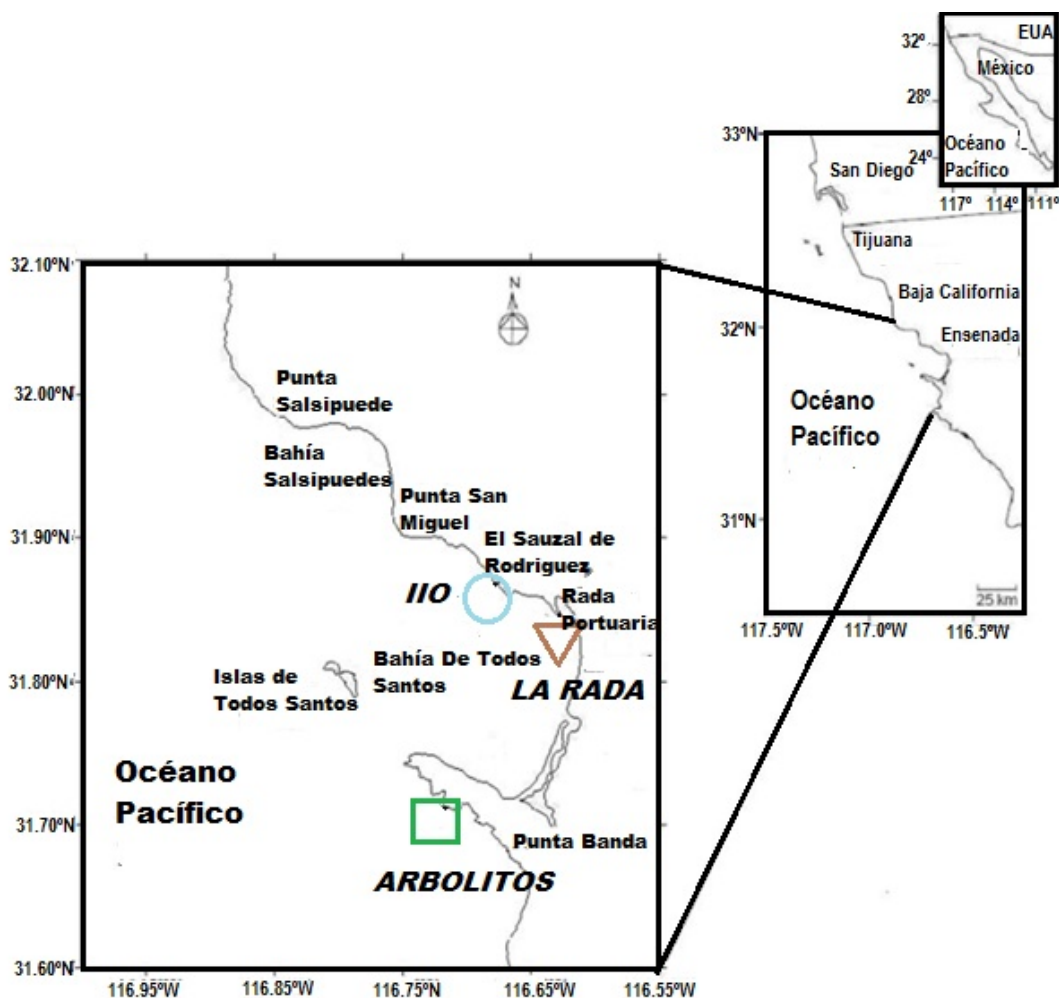


Figura 1.- Área de estudio y puntos de muestreo en la región de la BTS. La estación IIO (○) y la estación La Rada (▽) se encuentran en el interior de la bahía, mientras que la estación Arbolitos (□) se localiza en el exterior.

4.1. Clima.

El clima en el noroeste de Baja California es muy seco, con un intervalo de temperatura promedio anual de 11.5-21.0°C y un régimen de lluvia invernal tipo mediterráneo (Walkowiak y Solana, 1989; Pavia y Graef, 2002). En esta región la lluvia invernal presenta un promedio anual de 260 mm y ocurre durante los meses de Noviembre a Abril (Reyes Coca y Troncoso Gaytán, 2004).

4.2. Vientos.

El sistema de vientos en la BTS se ve afectado por las características fisiográficas de la región. Los mecanismos que los generan en el ámbito local como sinóptico, no son homogéneos en toda la bahía (Mateos-Farfán, 2010). Los vientos en la región de las ITS tienen una componente dominante del noroeste. Durante invierno soplan con la máxima intensidad de 7.5 m s^{-1} proveniente del sureste. Durante primavera y verano los vientos provienen del noroeste, en el inicio de la primavera los vientos se relajan (3.3 m s^{-1}), y durante el verano soplan con una intensidad promedio de 5.4 m s^{-1} (Pavía y Reyes, 1983). Álvarez (1977) encontró que los vientos del noroeste son vientos predominantes en los meses de marzo a agosto, los cuales favorecen las surgencias costeras y forman frentes térmicos costeros, permitiendo el desarrollo de flujos geostróficos costeros hacia el ecuador (Lynn y Simpson, 1987; Strub y James, 2000). En los meses de octubre a diciembre los vientos presentan direcciones fluctuantes entre noreste y sureste, y en ocasiones con intensidades de hasta 18 m s^{-1} , que es la característica principal de la condición de los vientos de Santana (Mateos-Farfán, 2010).

4.3. Circulación.

4.3.1. Circulación superficial adyacente a la BTS.

La principal corriente que se presenta en la zona oceánica adyacente a la BTS es la Corriente de California (CC), que fluye hacia el sureste a lo largo de la costa. Las propiedades del agua del SCC, se atribuye a la presencia de cuatro masas de agua que se definen por su temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes: Agua Subártica (ASA), Agua Subtropical Superficial (AStS), Agua de Transición (Atr) y Agua del Pacífico Ecuatorial (APE) (Durazo y Baumgartner, 2002). El ASA se forma en altas latitudes donde hay exceso de precipitación y pérdida de calor. Esta masa de agua entra al SCC desde los 48° de latitud norte con baja salinidad y temperatura, pero a medida que se acerca a las costas de Baja California ganan calor y se mezclan, presentando temperaturas superficiales menores a 18°C, salinidades menores a 33.8 y alto contenido de oxígeno de ~5.5 mL/L (Kindyushev, 1970). El ASA se localiza en el área de Baja California cerca de la costa, entre la superficie y los 100 m de profundidad. Durante primavera puede extenderse hasta el extremo de la península y durante verano y otoño se aleja de la costa (Hickey, 1979). El AStS definida por Roden (1971), es equivalente al Agua del Pacífico Central Norte descrita por Sverdrup *et al.* (1942), aunque forma parte del SCC no entra al interior de la BTS.

4.3.2. Circulación superficial de la BTS.

La BTS se caracteriza por tener aguas frías, saladas, densas y con bajo contenido de oxígeno (~ 3 mL/L) en épocas de surgencia y con alto contenido de oxígeno (~6mL/L) en el resto del año (Mancilla-Peraza y Martínez-García, 1991). La circulación del agua superficial en la BTS consiste principalmente en la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos que evolucionan en escala de alrededor de 2 días (Mateos-Farfán, 2010). La formación de remolinos ciclónicos y/o anticiclónicos en la BTS se debe a la geometría en forma de "C" invertida de la bahía y al desprendimiento de las corrientes en las salientes de la misma (ej. Punta Morro). La variación de los remolinos en el interior de la bahía está relacionada con la variabilidad de las corrientes en el exterior.

Cuando el transporte por las bocas es débil, el esfuerzo del viento es responsable de la formación e intensificación de la corriente frente a Punta Morro dando origen a un remolino anticiclónico (Mateos-Farfán, 2010). La variabilidad hidrográfica en la BTS parece estar fuertemente influenciada por los cambios estacionales de la CC (Álvarez-Sánchez, 1971), la cual se aproxima a la costa durante abril y mayo, retirándose al final de verano.

Argote-Espinoza *et al.* (1975) también propuso que existen dos patrones de circulación superficial para los 10 y 30 metros de profundidad, respectivamente. Bajo condiciones de viento proveniente del noroeste se observa que el flujo es hacia el interior de la bahía en la parte norte, siguiendo el contorno de la costa; en la parte media de la bahía, se observa que éste gira hacia el oeste (giro anticiclónico), fluyendo hacia el exterior en la zona de las islas. En la parte sur se presenta un giro ciclónico, se puede apreciar que las aguas fluyen hacia el interior de la bahía frente a PB y siguen el contorno de la batimetría del cañón fluyendo hacia el exterior por la zona de las islas. De lo anterior, el autor dedujo que la configuración de la topografía del fondo es determinante en la dirección del flujo, sobre todo para el nivel de los 30 metros, y que el viento influye en el sentido de la corriente en la parte norte de la bahía. Bajo condiciones de viento dominante del sureste el patrón de circulación cambia, presentándose una circulación completamente inversa a la anterior. Aunque, Mateos-Farfán *et al.* (2009) en su estudio de la corriente superficial de la BTS, encontró que la circulación dentro de la bahía se rige por el transporte a través de sus bocas, al aumentar el transporte, se forman dos remolinos que giran encontrándose uno anticiclónico al norte y otro ciclónico al sur de la bahía. Una de las causas más importantes en la circulación o patrones de circulación superficial se debe principalmente por el esfuerzo del viento (Hernández-Walls, 1986), debido a la energía tangencial al mar se producen movimientos horizontales de las aguas.

A partir de las distribuciones horizontales de temperatura y salinidad, también se ha observado que se pueden presentar corrientes paralelas a la costa (Argote-Espinoza *et al.*, 1991). Las velocidades de corrientes generadas por el esfuerzo y dirección del viento que se han reportado van desde 0.1 cm s^{-1} hasta 7.3 cm s^{-1} en el área de las ITS, y de 0.04 cm s^{-1} a 5.7 cm s^{-1} en el área de PB (Argote-Espinoza *et al.*, 1991). La velocidad promedio de las corrientes

paralelas a la costa es de 15 cm s^{-1} para los meses de marzo a agosto y de 5 cm s^{-1} para los meses de septiembre a enero (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988).

4.4. Hidrología de la BTS.

La BTS al encontrarse influenciada por la CC, muestra características fisicoquímicas importantes. La salinidad superficial presenta un máximo de 33.7 en verano y un mínimo de 33.3 en invierno (Mancilla-Peraza y Martínez-García, 1991). Granados-Guzmán *et al.*, (1995) realizaron mediciones de temperatura en la BTS durante mayo de 1992 a marzo de 1993. De acuerdo con sus resultados en el este de las ITS, a los 25 m de profundidad la temperatura mínima registrada en junio fue de 11.1°C y la máxima de 17.4°C en noviembre. La fluctuación de estas variables en diferentes épocas del año indica que la bahía está influenciada por procesos locales y regionales, con lo cual se generan condiciones hidrológicas distintas, con un posible reflejo en los primeros niveles de la trama trófica.

El balance de calor en la BTS, por su ubicación latitudinal presenta una ganancia neta en los meses de verano y una pérdida neta en los meses de invierno (Cruz- Colín, 1997). La columna de agua se encuentra completamente mezclada durante invierno y presenta su estratificación máxima cuando se define perfectamente una termoclina durante los meses de septiembre y octubre (Espinosa-Carreón *et al.*, 2001). La influencia de agua subsuperficial fría, rica en nutrientes y bajo contenido de oxígeno (Zaytzev *et al.*, 2003) dentro de la bahía se origina por el transporte de agua aflorada por los eventos de surgencia fuera de la bahía (Mancilla-Peraza y Martínez-García, 1991), los cuales se intensifican en primavera y verano (Gómez-Valdéz, 1983) provenientes de profundidades de entre 70 a 100m (Durazo *et al.*, 2010). El aporte de las aguas de surgencia produce anomalías en la distribución de las propiedades fisicoquímicas de las aguas superficiales de la BTS (Torres-Moye y Acosta-Ruíz, 1986).

5. METODOLOGÍA.

5.1. Limpieza de materiales.

Las botellas de recolecta y los materiales utilizados durante el procesamiento de las muestras se trataron con las técnicas de "ultralimpieza" (Bruland *et al.*, 1979; Kremling, 1983; Delgadillo-Hinojosa, 2001). La limpieza consistió en un ciclo de lavado con jabón Micro-90 al 3% y enjuague con agua desionizada ($>18\text{M}\Omega\text{-cm}^{-1}$); se continuó con un ciclo de lavado con ácido clorhídrico (HCl) al 10% y enjuague final con agua desionizada. El secado del material se realizó en una campana de flujo laminar clase 100 para generar una atmósfera positiva y un ambiente libre de polvo (Segovia-Zavala *et al.*, 1998). Finalmente el material fue almacenado en cubetas y bolsas de plástico limpias.

Los filtros de policarbonato de $0.40\ \mu\text{m}$ utilizados para separar la fase particulada y disuelta de las muestras de agua de mar, fueron previamente lavados con HCl al 25%, se enjuagaron con agua desionizada y finalmente se secaron en una campana de flujo laminar.

5.2. Diseño experimental y recolecta de muestras

Para caracterizar la variación temporal de Cd en la bahía se propusieron tres estaciones; la primera estación fue ubicada en la parte Norte (Estación IIO), la segunda estación se ubicó en el exterior de la bahía para captar la señal de los eventos de surgencia (Estación Arbolitos), y finalmente se estableció una estación en la parte central de la bahía que es afectada antropogénicamente por las descargas de las actividades portuarias (Estación La Rada Portuaria). Los muestreos hidrográficos y de agua para el análisis de Cd se realizaron semanalmente en la estación IIO, quincenalmente en Arbolitos y mensualmente en La Rada, desde enero de 2008 a diciembre de 2010. En cada muestreo, se midió la temperatura con un termómetro de cubeta ($\pm 0.5^\circ\text{C}$ de precisión) y se tomaron muestras de agua de mar para el análisis de salinidad, fosfatos (PO_4^{-3}), clorofila "a" (Cl "a") y Cd. Las muestras de agua de mar superficial para la salinidad se tomaron en botella de borosilicatos de 300 mL de capacidad. Las muestras para los PO_4^{-3} se tomaron con botellas de polietileno de baja densidad (LDPE) de 1 L de capacidad y para la Cl "a" se utilizaron botellas

oscuras de polietileno (LDPE) de 1 L de capacidad y se le agregaron 5 gotas de carbonato de Magnesio ($MgCO_3$) al 1% para su preservación. Finalmente, la recolecta de muestras de agua de mar para el análisis del Cd se realizó utilizando las técnicas de “ultralimpieza” para evitar la contaminación durante el muestreo. Como herramientas muestreadoras se usó 1) un tubo extensible de 3 m de longitud con recubierta plastificada adaptado con un porta-botellas de plástico, 2) botellas de polietileno (LDPE) de 1L de capacidad y 3) guantes de polietileno. Las muestras recolectadas se guardaron en bolsas de plástico en el interior de una cubeta hasta su análisis en el laboratorio.

5.3. Análisis y cuantificación de las variables químicas.

La salinidad se cuantificó a través de la medición de la conductividad utilizando un salinómetro 3400B marca GuildLine, usando como referencia el estándar de agua de mar de la IAPSO (International Association for the Physical Sciences of the Oceans) con el cual fue calibrado el equipo para mantener el control de calidad en la medición. El límite de detección (LD) se calculó midiendo la conductividad de 10 muestras de agua de mar filtrada y se usó la ecuación $LD = 3\sigma$ (tres veces la desviación estándar de las 10 réplicas del agua de mar analizada).

Las muestras para el análisis de Cl “a” se filtraron a través de un filtro de fibra de vidrio GF/F Whatman de 24 mm de diámetro con un poro nominal de 0.7 μm . Posteriormente, el filtro se colocó en un frasco de vidrio con capacidad de 15 mL, se agregó 10 mL de acetona al 90% y se mantuvo en refrigeración por 24 hrs (Venrick y Hayward, 1984; Hayward y Venrick, 1998). Para la cuantificación de la Cl “a” se utilizó el método espectrofotométrico con un equipo UV-VIS modelo CARY 50 marca Varian y la concentración de Cl “a” ($mg\ m^{-3}$) se estimó utilizando la ecuación de Jeffrey y Humphrey (1975). El LD se calculó utilizando tres veces la desviación estándar de diez réplicas del extracto de la muestra de menor concentración de Cl “a” (Tabla I).

Las muestras para el análisis de PO_4^{-3} se filtraron con jeringas de polietileno de 60 mL de capacidad a través de un filtro de fibra de vidrio GF/F Whatman de 0.7 μm con ayuda de un portafiltros de polietileno de 24mm de diámetro. La

muestra filtrada se almacenó en tubos de 30 mL y se congeló a -20°C hasta su posterior análisis. Para su cuantificación se utilizó el método colorimétrico utilizando un Auto-analizador de Flujo Segmentado modelo Skalar San Plus (Gordon *et al.*, 1993) y finalmente el LD se calculó con la ecuación $\text{LD}=3\sigma$ (tres veces la desviación estándar de diez réplicas de los extractos del blanco, Tabla I).

Tabla I.- Límite de detección (LD) de las variables hidrográficas, químicas y biológicas.

Salinidad	Cl "a" (mg m^{-3})	PO_4^{-3} (μM)
0.01	0.04	0.07

El análisis de Cd en agua de mar requirió condiciones de "ultralimpieza" (Bruland *et al.*, 1979; Kremling, 1983), porque éste análisis es una tarea compleja debido a las bajas concentraciones de los metales en agua de mar. Las muestras de agua de mar se filtraron en el interior de una campana de flujo laminar (clase 100) a través de membranas de policarbonato ($0.40 \mu\text{m}$, 47 mm), con un sistema de filtración que incluyó tubería de teflón y una bomba de vacío. El filtrado de las muestras se realizó con el fin de separar los metales que se encuentran en la fase particulada de los de la fase disuelta (Libes, 1992). Las muestras de la fase disuelta fueron colectadas en botellas de polietileno de 1 L (LDPE) y fueron acidificadas agregando 1 mL de ácido nítrico (HNO_3) Ultrex para alcanzar un $\text{pH} < 2$.

El análisis del Cd en el agua de mar se realizó en un laboratorio "ultralimpio" y en el interior de una campana de flujo laminar con la finalidad de tener una atmósfera limpia siguiendo el procedimiento descrito por Delgadillo-Hinojosa, (2000) y Delgadillo-Hinojosa *et al.* (2001). Para el análisis del Cd en el agua de mar, se pre-concentraron 250 mL de agua de mar con 3 mL de resina Chelex-100 bajo condiciones de atmósfera limpia. Previo a la pre-concentración, el pH de la muestra se ajustó entre 6.0 ± 0.5 con una solución de hidróxido de

amonio (NH_4OH) Ultrex. Al finalizar, la resina se enjuagó con acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COO-NH}_4$) 1M y se eluyó con HNO_3 2M.

La cuantificación de Cd se llevó a cabo utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica con horno de grafito (Varian 880Z) equipado con corrección de fondo Zeeman. Las concentraciones de Cd se obtuvieron usando el método de adición de estándares con el fin de corregir las interferencias debidas a la matriz. La exactitud y precisión del método fue verificado a través de materiales de referencias certificados para agua de mar de origen costero (CASS-5; Tabla II). Además se analizaron blancos de procedimiento (Tabla II) para garantizar que la metodología utilizada fue realizada satisfactoriamente bajo las condiciones de "Ultralimpieza". Para su análisis, fueron procesados 250 mL de agua desionizada ($>18\text{M}\Omega\text{-cm}^{-1}$) y cuantificadas siguiendo el mismo procedimiento para el tratamiento de las muestras de Cd. Para obtener el LD en el método utilizado para el análisis de Cd se midieron diez veces el extracto de cada uno de los extractos del blanco y se calculó con la ecuación: $\text{LD} = 3\sigma$ (tres veces la desviación estándar de las diez lecturas de cada uno de los extractos del blanco)

Tabla II.- Análisis del estándar de referencia para el control de calidad del análisis de Cd. Como material de referencia se utilizó el agua de mar de origen costero CASS-5 (Coastal Atlantic Standard of Seawater). n= número de alícuotas del estándar de referencia, (promedio \pm error estándar).

Valor certificado del Estándar de referencia (CASS-5) (nM)	Valor medido del Estándar de referencia (CASS-5) (nM)	Porcentaje de Recuperación (%R)	Límite de Detección (LD) (nM)	Blanco de procedimiento (nM)	N
0.191 \pm 0.015	0.185 \pm 0.005	96.8 \pm 2.52	0.02	0.006 \pm 0.001	2

5.4. Procesamiento de Datos.

El estudio de la salinidad y la temperatura se realizó a través de gráficos de cada variable contra el tiempo para analizar la variación temporal de cada una de ellas.

Para estudiar la variabilidad estacional del Cd se calcularon los promedios estacionales y se graficó la concentración de Cd contra el tiempo.

El índice de surgencia costera (Bakun, 1973; y Bakun y Nelson, 1977), permitió inferir el caudal de agua de surgencia en la costa a partir del volumen de agua superficial desplazado por el viento. Para la determinación de la variabilidad estacional del ISB se aplicó un filtro de 15 días a los datos obtenidos de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), además se determinó si existe una relación entre las concentraciones del Cd y el fenómeno de surgencia con un análisis de correlación (r de Pearson) entre estos elementos.

Se realizó una comparación estadística de la temperatura, salinidad, Cl "a", PO_4^{-3} y Cd de los tres puntos de muestreo, para determinar si existen diferencias en la variabilidad espacial y temporal de estas variables hidrográficas, biológicas y químicas. Se realizaron pruebas paramétricas y no paramétricas en base a la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilks. Para las distribuciones normales, se realizaron análisis estadísticos paramétricos utilizando la prueba t-student (t_{student}). Finalmente, para las variables con una distribución no normal, se realizó un análisis estadístico no paramétrico utilizando la prueba de Kruskal-Wallis (KW) por rangos. En todos los análisis se consideró un intervalo de confianza del 95%.

También se llevó a cabo una correlación simple de Pearson entre el Cd y el PO_4^{-3} , con el fin de identificar si la variabilidad temporal de estos elementos está asociada a procesos biológicos como la fotosíntesis o procesos físicos como la surgencia costera.

6. RESULTADOS.

6.1. Variación estacional del índice de surgencia (ISB₁₅) de la BTS.

El ISB₁₅ calculado durante el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010 presentó una variación estacional bien definida a lo largo de los tres años de muestreo (Fig. 2). Los valores máximos de ISB₁₅ se registraron durante primavera-verano ($74\text{-}125 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}(100\text{mLC})^{-1})$), mientras que los valores promedio mínimos se registraron durante el otoño-invierno ($40\text{-}70 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}(100\text{mLC})^{-1})$); Fig. 2, Tabla III). En la variación interanual del ISB₁₅, se observó que durante la primavera del 2008 fue mayor la intensidad de la surgencia ($125.64 \pm 3.59 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}(100\text{mLC})^{-1})$) con respecto a la primavera del 2009 ($97.56 \pm 4.28 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}(100\text{mLC})^{-1})$) y 2010 ($79.66 \pm 9.14 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}(100\text{mLC})^{-1})$); Fig. 2, Tabla III).

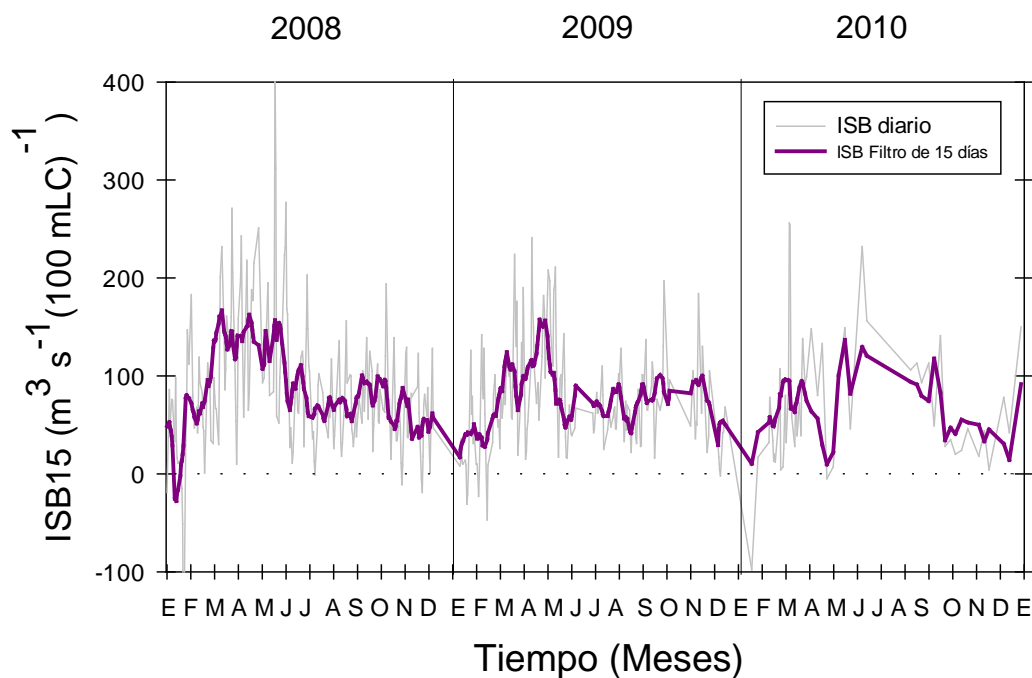


Figura 2.- Variación estacional del Índice de surgencia (ISB) para una estación localizada a 30°N , 119°W para el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. Los datos se obtuvieron de la base de datos de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration; mLC=metros de línea de costa).

Tabla III.- Promedios de la variación estacional de la hidrografía [T,S], índice de surgencia (ISB₁₅), Cl "a", PO₄⁻³ y Cd de la zona costera de la BTS, durante un periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. (promedio ± error estándar).

		Temperatura 2008		Salinidad 2008		ISB ₁₅ 2008		Cl "a" 2008		PO ₄ ⁻³ 2008		Cd 2008	
Sitio	Estación	T (°C)	n	S	n		m ³ s ⁻¹ (mLC) ⁻¹	[(mg m ⁻³)]	n	[(µM)]	n	[(nM)]	n
IIO	Primavera	17.0 ± 0.2	52	33.92 ± 0.04	8			3.34 ± 0.27	37	0.77 ± 0.03	51		0
	Verano	21.9 ± 0.2	52	33.78 ± 0.07	9			1.97 ± 0.12	15	0.70 ± 0.02	53		0
	Otoño	19.3 ± 0.2	47	33.40 ± 0.08	9				0	0.87 ± 0.03	48		0
	Invierno	14.5 ± 0.1	50	33.50 ± 0.05	8			2.33 ± 0.16	29	0.72 ± 0.03	50		0
Arbolitos	Primavera	12.9 ± 0.7	6	33.92 ± 0.03	6	Primavera	125.64 ± 3.59	3.01 ± 0.55	6	1.14 ± 0.19	6	0.49 ± 0.08	6
	Verano	15.5 ± 1.0	6	33.62 ± 0.11	4	Verano	74.15 ± 1.99	1.37 ± 0.13	6	0.91 ± 0.09	6	0.26 ± 0.04	6
	Otoño	17.2 ± 0.5	6	33.50 ± 0.02	3	Otoño	65.42 ± 2.75	1.31 ± 0.18	6	0.82 ± 0.03	6	0.18 ± 0.02	6
	Invierno	12.8 ± 0.4	5	33.63 ± 0.04	5	Invierno	72.50 ± 7.62	2.50 ± 0.28	5	1.00 ± 0.07	5	0.28 ± 0.06	5
Rada	Primavera	19.5 ± 1.0	2	33.94 ± 0.08	2			9.90 ± 0.00	1	0.58 ± 0.24	2		0
	Verano	21.0 ± 0.0	2		0			6.58 ± 0.43	2	0.56 ± 0.21	2		0
	Otoño	17.0 ± 0.0	1		0			3.42 ± 0.00	1	0.93 ± 0.00	1		0
	Invierno	14.7 ± 0.9	3	33.61 ± 0.17	3			3.34 ± 1.46	3	0.90 ± 0.05	3		0
		Temperatura 2009		Salinidad 2009		ISB ₁₅ 2009		Cl "a" 2009		PO ₄ ⁻³ 2009		Cd 2009	
Sitio	Estación	T (°C)	n	S	n		m ³ s ⁻¹ (mLC) ⁻¹	[(mg m ⁻³)]	n	[(µM)]	n	[(nM)]	n
IIO	Primavera	19.7 ± 0.2	55	33.76 ± 0.04	11			1.93 ± 0.28	3	0.91 ± 0.02	55	0.24 ± 0.05	8
	Verano	22.9 ± 0.2	52	33.63 ± 0.04	10			2.22 ± 0.17	33	0.81 ± 0.02	55	0.16 ± 0.02	19
	Otoño	18.0 ± 0.5	25	33.42 ± 0.02	11			1.01 ± 0.21	15	0.80 ± 0.02	37	0.15 ± 0.02	8
	Invierno	16.7 ± 0.1	47	33.44 ± 0.03	9				0	0.93 ± 0.03	47		0
Arbolitos	Primavera	15.0 ± 0.5	6	33.74 ± 0.04	6	Primavera	97.56 ± 4.28	2.52 ± 0.84	5	1.36 ± 0.10	6	0.41 ± 0.08	6
	Verano	14.6 ± 0.0	1	33.55 ± 0.00	1	Verano	70.35 ± 1.81	1.56 ± 0.00	1	1.22 ± 0.00	1	0.24 ± 0.00	1
	Otoño	15.8 ± 0.3	4	33.46 ± 0.09	4	Otoño	77.17 ± 4.04	0.44 ± 0.27	2	0.75 ± 0.05	4	0.21 ± 0.05	4
	Invierno	15.3 ± 0.8	5	33.58 ± 0.04	5	Invierno	59.25 ± 4.56	1.46 ± 0.26	5	1.05 ± 0.13	5	0.46 ± 0.04	5
Rada	Primavera	17.5 ± 0.3	3	33.65 ± 0.02	3				0		0	0.15 ± 0.06	2
	Verano		0		0				0		0		0
	Otoño	16.9 ± 1.3	3	33.43 ± 0.08	2			0.33 ± 0.02	2		0	0.25 ± 0.03	3
	Invierno	15.5 ± 0.5	2	33.34 ± 0.12	2			0.37 ± 0.00	1	1.46 ± 0.00	1	0.32 ± 0.00	1
		Temperatura 2010		Salinidad 2010		ISB ₁₅ 2010		Cl "a" 2010		PO ₄ ⁻³ 2010		Cd 2010	
Sitio	Estación	T (°C)	n	S	n		m ³ s ⁻¹ (mLC) ⁻¹	[(mg m ⁻³)]	n	[(µM)]	n	[(nM)]	n
IIO	Primavera	17.9 ± 0.3	16		0			2.66 ± 1.08	10	0.71 ± 0.03	16	0.22 ± 0.02	11
	Verano	19.1 ± 0.6	6	33.52 ± 0.04	4			2.11 ± 0.10	6	0.70 ± 0.03	2	0.26 ± 0.03	6
	Otoño	17.9 ± 0.6	10	33.37 ± 0.02	10			1.40 ± 0.19	10		0	0.20 ± 0.02	10
	Invierno	16.7 ± 0.1	26	33.14 ± 0.29	2			1.10 ± 0.83	13	0.77 ± 0.02	27	0.18 ± 0.03	3
Arbolitos	Primavera	14.7 ± 0.5	6	33.63 ± 0.02	6	Primavera	79.66 ± 9.14	3.10 ± 0.32	6	0.97 ± 0.06	6	0.21 ± 0.02	6
	Verano	14.9 ± 0.8	6	33.55 ± 0.03	6	Verano	89.81 ± 6.28	2.71 ± 0.35	6	1.15 ± 0.13	6	0.29 ± 0.04	4
	Otoño	15.7 ± 0.7	6	33.34 ± 0.03	6	Otoño	40.24 ± 3.95	2.01 ± 0.43	6		0		0
	Invierno	15.3 ± 0.3	5	33.48 ± 0.01	5	Invierno	69.67 ± 4.20	0.80 ± 0.58	5	0.88 ± 0.09	6	0.23 ± 0.01	5
Rada	Primavera	17.7 ± 0.9	3		0			6.04 ± 2.84	2		0	0.21 ± 0.04	3
	Verano	20.8 ± 0.5	3	33.60 ± 0.10	3			6.57 ± 1.61	3		0	0.29 ± 0.07	3
	Otoño	16.9 ± 1.1	4	33.35 ± 0.02	4			2.58 ± 0.95	4		0		0
	Invierno	16.5 ± 0.5	2		0			0.27 ± 0.14	2		0	0.31 ± 0.01	2

6.2. Variación estacional de temperatura y salinidad de las aguas superficiales en la zona costera de la BTS.

La temperatura superficial presentó un patrón estacional bien definido en los tres sitios de muestreo (Fig. 3). En la estación IIO y la Rada por ejemplo, se presentaron los valores máximos de temperatura durante el verano (19-22°C) y los mínimos en invierno (14-16°C; Fig. 3, Tabla III). En cambio en la estación Arbolitos, la temperatura estuvo asociada a la variación estacional de la surgencia costera con valores máximos de temperatura durante el otoño (16-17°C) y valores mínimos durante la primavera (12-15°C; Fig. 3a, Tabla III).

La temperatura superficial de la zona costera de la BTS registró cambios interanuales. En la estación IIO, los valores máximos del verano fueron 1.0°C menos en 2008 en comparación con el 2009 y 2.8°C más que en 2010. En la estación Arbolitos, los valores mínimos de primavera fueron 2.1°C menos en el 2008 en comparación con el 2009 y 1.8°C menos que en 2010. En la estación La Rada los cambios interanuales no fueron evidentes (Fig. 3b, Tabla III).

La salinidad presentó una variación estacional a lo largo del ciclo anual en toda el área de estudio. La estación IIO y La Rada presentaron valores máximos de salinidad durante la primavera (33.70-33.95) y valores mínimos durante el otoño-invierno (33.10-33.40; Fig. 4, Tabla III). Sin embargo, en la estación Arbolitos se registraron valores máximos de salinidad en primavera (33.63-33.94) y valores mínimos en otoño (33.30-33.50; Fig. 4a, Tabla III). Las bajas salinidades (32.83-33.30) en las tres estaciones de muestreo durante el otoño y el invierno están relacionadas a la época de lluvias.

La variación interanual de la salinidad fue evidente para las tres estaciones de muestreo. Los valores máximos de salinidad de este trabajo se registraron durante la primavera del 2008 (33.92 ± 0.04 ; IIO, 33.92 ± 0.03 ; Arbolitos y 33.94 ± 0.08 ; Rada), mientras que los valores máximos registrados en la primavera del 2009 fueron ligeramente menores (Tabla III).

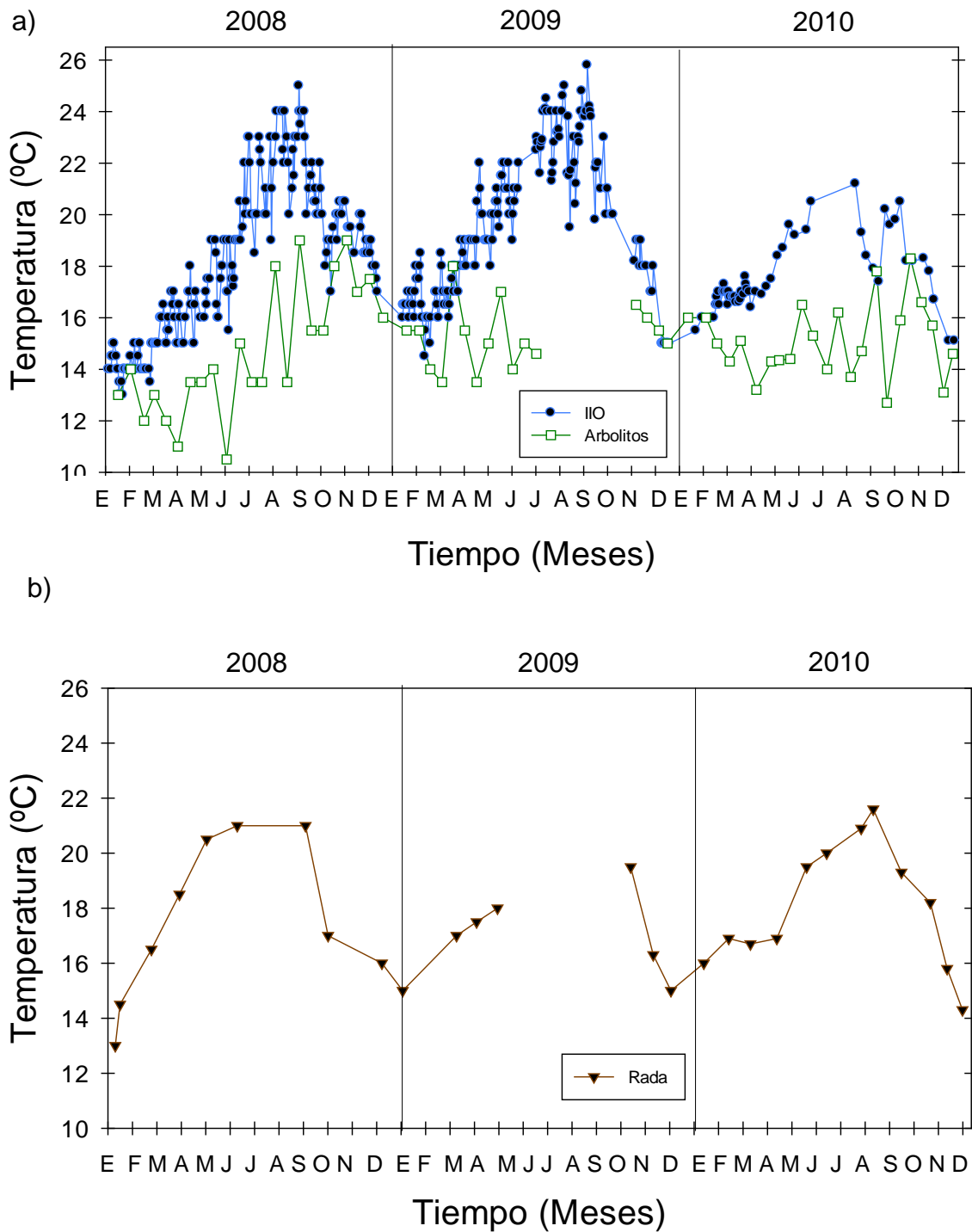


Figura 3.- Variación temporal de la temperatura en la región de la BTS para el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.

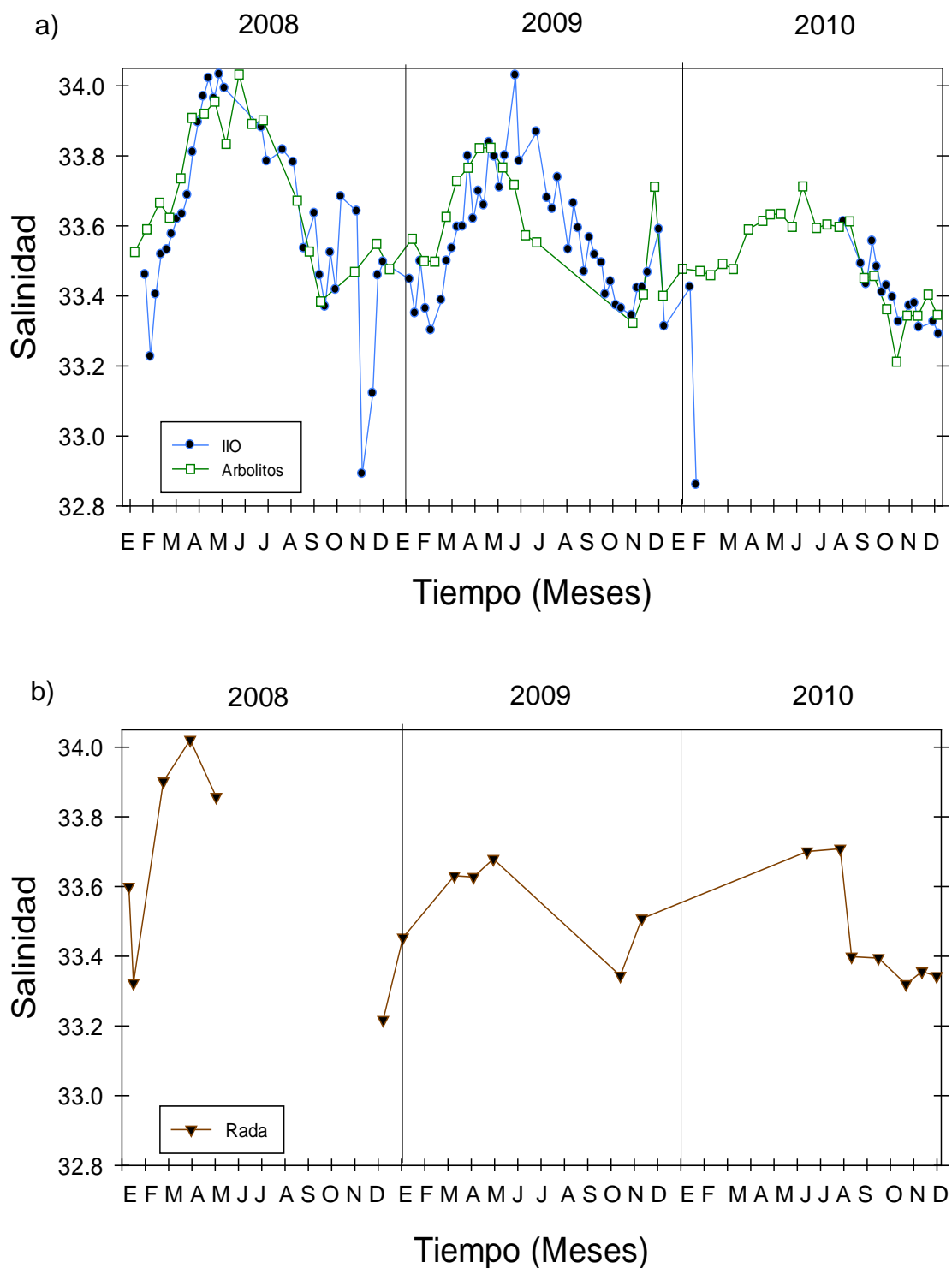


Figura 4.- Variación temporal de la salinidad en la región de la BTS durante el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.

6.3. Variación estacional de Cl “a” y PO₄⁻³ superficial en la zona costera de la BTS.

La variación estacional de la Cl “a” en la estación IIO y Arbolitos, siguió la variación estacional de la surgencia (Fig.2), con concentraciones máximas durante la primavera (2.50-3.34 mg m⁻³), y mínimas durante el otoño (0.44-2.00 mg m⁻³; Fig. 5a, Tabla III). La estación La Rada presentó un patrón estacional diferente, se registraron las concentraciones máximas durante primavera-verano (6.00-9.90 mg m⁻³) cuando las temperaturas superficiales fueron más cálidas (Fig. 3) y valores mínimos durante el invierno (0.27-3.34 mg m⁻³; Fig. 5b, Tabla III).

Las concentraciones de Cl “a” también presentaron una variación interanual bien definida en toda la región. La estación IIO y la estación Arbolitos presentaron concentraciones máximas durante la primavera del 2008 (3.34 ± 0.27 mg m⁻³ y 3.01 ± 0.55 mg m⁻³, respectivamente) y del 2010 (2.66 ± 1.08 mg m⁻³; IIO y 3.10 ± 0.32 mg m⁻³; Arbolitos) en comparación con los valores máximos registrados en la primavera del 2009 (1.93 ± 0.28 mg m⁻³; IIO y 2.52 ± 0.84 mg m⁻³; Arbolitos; Tabla III). La Rada presentó las concentraciones de Cl “a” más bajas en otoño del 2009 (0.37 ± 0.00 mg m⁻³) e invierno del 2010 (0.27 ± 0.14 mg m⁻³; Tabla III).

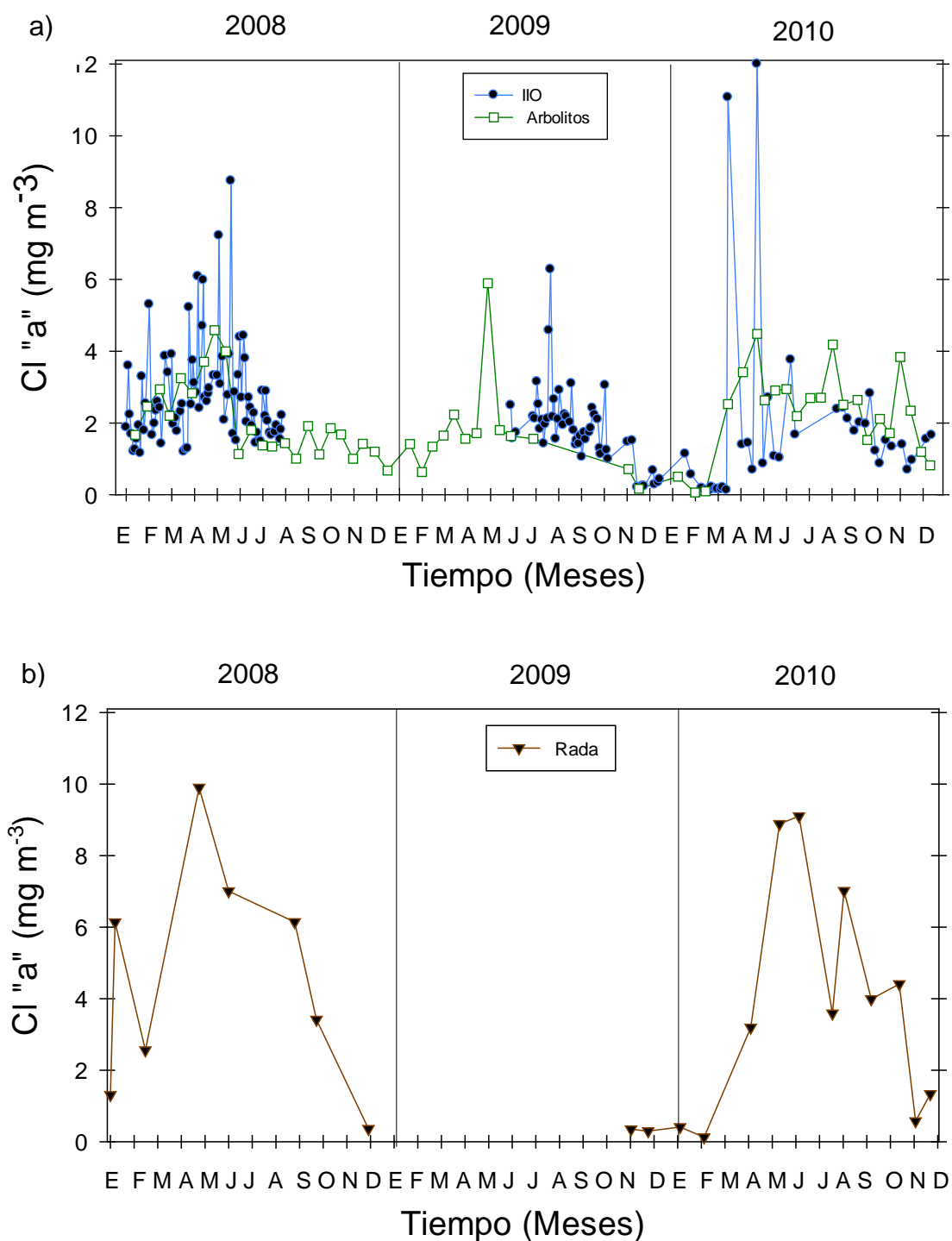


Figura 5.- Variación temporal de la biomasa fitoplanctónica (Cl "a") en la región de la BTS durante el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.

La variación estacional de los PO_4^{-3} no presentó un patrón bien definido. La estación IIO presentó concentraciones máximas a finales de la primavera y durante el otoño del 2008 (0.83-0.87 μM) y valores mínimos durante el verano (0.70 μM ; Fig. 6a, Tabla III). Sin embargo, en el 2009 se registraron concentraciones máximas en invierno-primavera (0.91-0.93 μM) y mínimas en otoño (0.80 μM ; Fig. 6a, Tabla III). Finalmente, en 2010, no se observó una variación estacional bien definida (Fig. 6). En la estación Arbolitos se presentaron valores máximos durante primavera-verano (0.91-1.36 μM), que corresponde a la época de intensificación de surgencias (Figs. 2 y 6a); mientras que los valores mínimos se registraron durante el otoño (0.75-0.82 μM ; Fig. 6a, Tabla III). En la estación La Rada solo se registraron concentraciones de PO_4^{-3} durante el 2008, con concentraciones máximas durante el invierno y valores mínimos en verano (Fig. 6b, Tabla III).

En la variación interanual, se observó que la estación IIO, durante la primavera del 2009 se registró una mayor concentración de PO_4^{-3} ($1.36 \pm 0.10 \mu\text{M}$) en comparación con la primavera del 2008 ($1.14 \pm 0.19 \mu\text{M}$) y del 2010 ($0.97 \pm 0.06 \mu\text{M}$). Esta misma tendencia se observó en Arbolitos (Fig. 6, Tabla III), por lo que estos resultados sugieren que tanto en la estación IIO como en la estación Arbolitos los cambios interanuales en relación al PO_4^{-3} no fueron evidentes.

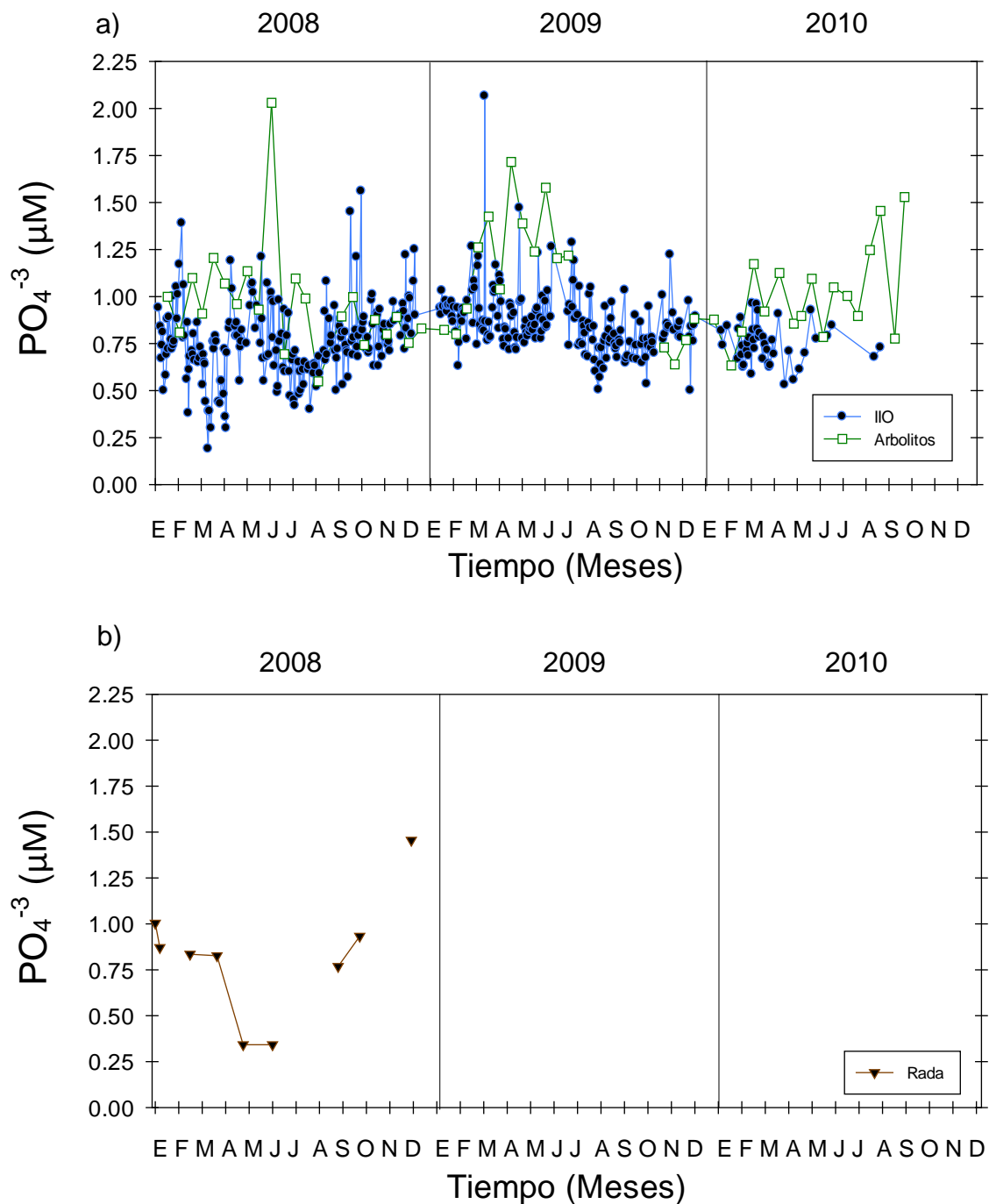
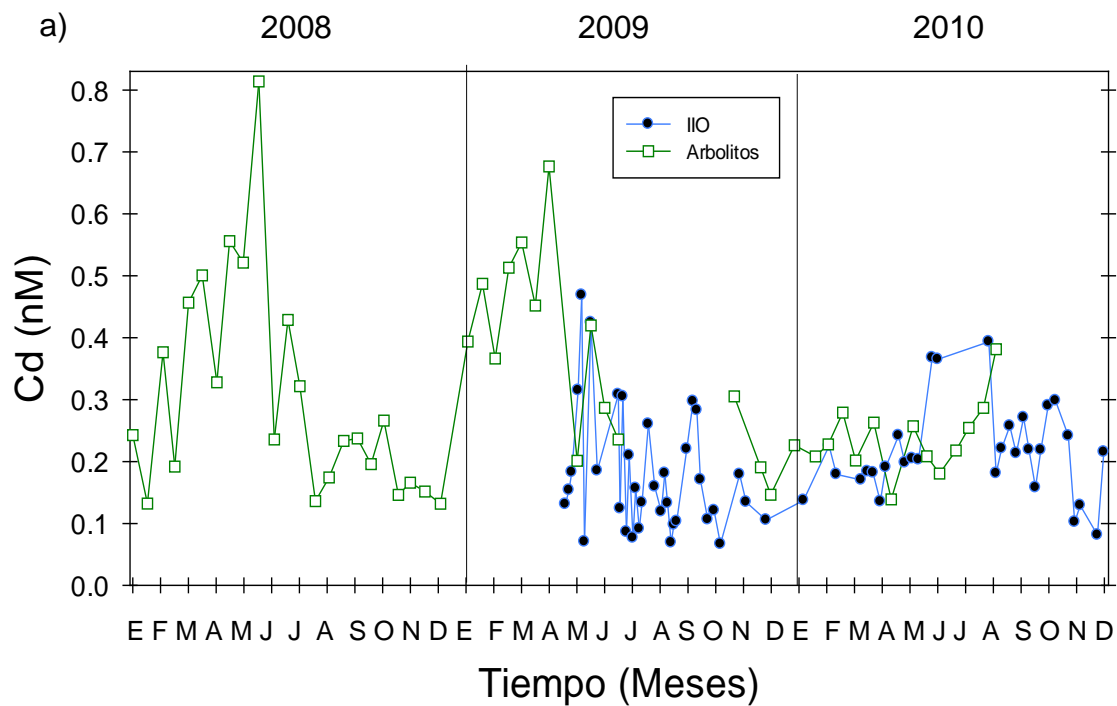


Figura 6.- Serie de tiempo de la concentración de fosfatos (PO_4^{-3}) en la región de la BTS durante el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada. Las concentraciones de PO_4^{-3} para la estación La Rada sólo se registraron durante el 2008.

6.4. Variación estacional del Cd superficial de la zona costera de la BTS.

En la estación IIO se observó una variación estacional bien definida de la concentración de Cd, con valores máximos en la primavera (0.24 ± 0.05 nM) y mínimos durante el otoño del 2009 (0.15 ± 0.02 nM; Fig. 7a, Tabla III). Sin embargo, en el 2010 se registraron valores máximos durante el verano (0.26 ± 0.03 nM) y valores mínimos en invierno (0.18 ± 0.03 nM; Fig. 7a, Tabla III). La estación Arbolitos registró concentraciones máximas de Cd en 2008 durante la primavera (0.49 ± 0.08 nM) y mínimas en otoño (0.18 ± 0.02 nM; Fig. 7a, Tabla III). En contraste, en el 2009, los valores máximos se registraron durante el invierno (0.46 ± 0.04 nM) y mínimos durante el otoño (Fig. 7a, Tabla III). Finalmente, en el 2010 se observó una tendencia con mayores concentraciones durante la primavera tardía y el inicio del verano (0.21 ± 0.05 nM; Fig. 7a, Tabla III). En la estación La Rada no se observó una tendencia bien definida (Fig. 7b), En general, la estación Arbolitos presentó la mayor concentración de Cd, a lo largo de todo el periodo de muestreo, en comparación con la estación IIO y La Rada.

La variación interanual en las concentraciones de Cd no fueron muy evidentes en algunas de las estaciones de muestreo (Fig. 7), para la estación IIO las concentraciones mínimas se registraron durante el otoño, siendo 0.05 nM menos en 2009 en comparación con el 2010 (Tabla III). En estación Arbolitos, las concentraciones máximas se registraron durante la primavera, con 0.08 nM más en 2008 con respecto al 2009 y 0.21 nM más que en 2010 (Tabla III). En la estación La Rada se observó una tendencia inversa con respecto a la estación Arbolitos, registrando valores mínimos durante la primavera con 0.06 nM menos en 2009 en comparación con el 2010 (Tabla III).



b)

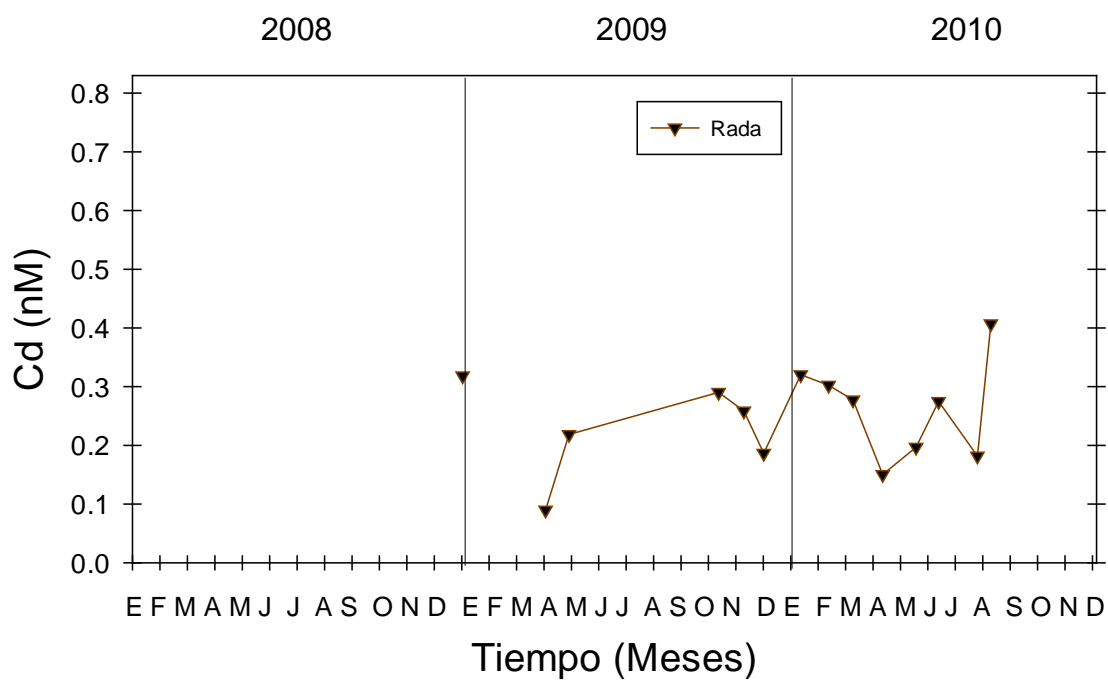


Figura 7.- Serie de tiempo de la concentración de Cd disuelto (Cd) en la región de la BTS durante un periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada.

6.5. Variación estacional de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ en la zona costera de la BTS.

En la estación IIO, durante el 2009, se registró el promedio máximo de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ en la primavera (0.26 ± 0.04 nM/ μM) y el valor promedio mínimo durante el verano (0.19 ± 0.02 nM/ μM). En el 2010, el promedio máximo de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ se presentó en verano (0.41 ± 0.017 nM/ μM) y el mínimo durante el invierno (0.25 ± 0.04 nM/ μM , Fig. 8a, Tabla IV). En la estación Arbolitos se registró una variación estacional diferente para los tres periodos de muestreo (Fig. 8a, Tabla IV). En el 2008, la variación estacional de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ fue clara; el valor promedio máximo se registró durante la primavera (0.43 ± 0.04 nM/ μM) y la razón promedio mínima durante el otoño (0.22 ± 0.02 nM/ μM). En el 2009, el promedio máximo se registró en otoño (0.57 ± 0.30 nM/ μM) y el valor promedio mínimo de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ se obtuvo durante el verano (0.19 ± 0.00 nM/ μM). Finalmente, para el 2010 no se registró una variación estacional bien definida y aún durante el periodo de primavera los valores de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ estuvieron por debajo del valor de la provincia del Pacífico Nororiental (0.35 nM/ μM ; Fig. 8a). La estación La Rada registró una razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ promedio máxima durante el otoño del 2009 (0.57 ± 0.10 nM/ μM), mientras que el promedio mínimo se registró en primavera del mismo año (0.24 ± 0.07 nM/ μM ; Fig. 8b, Tabla IV).

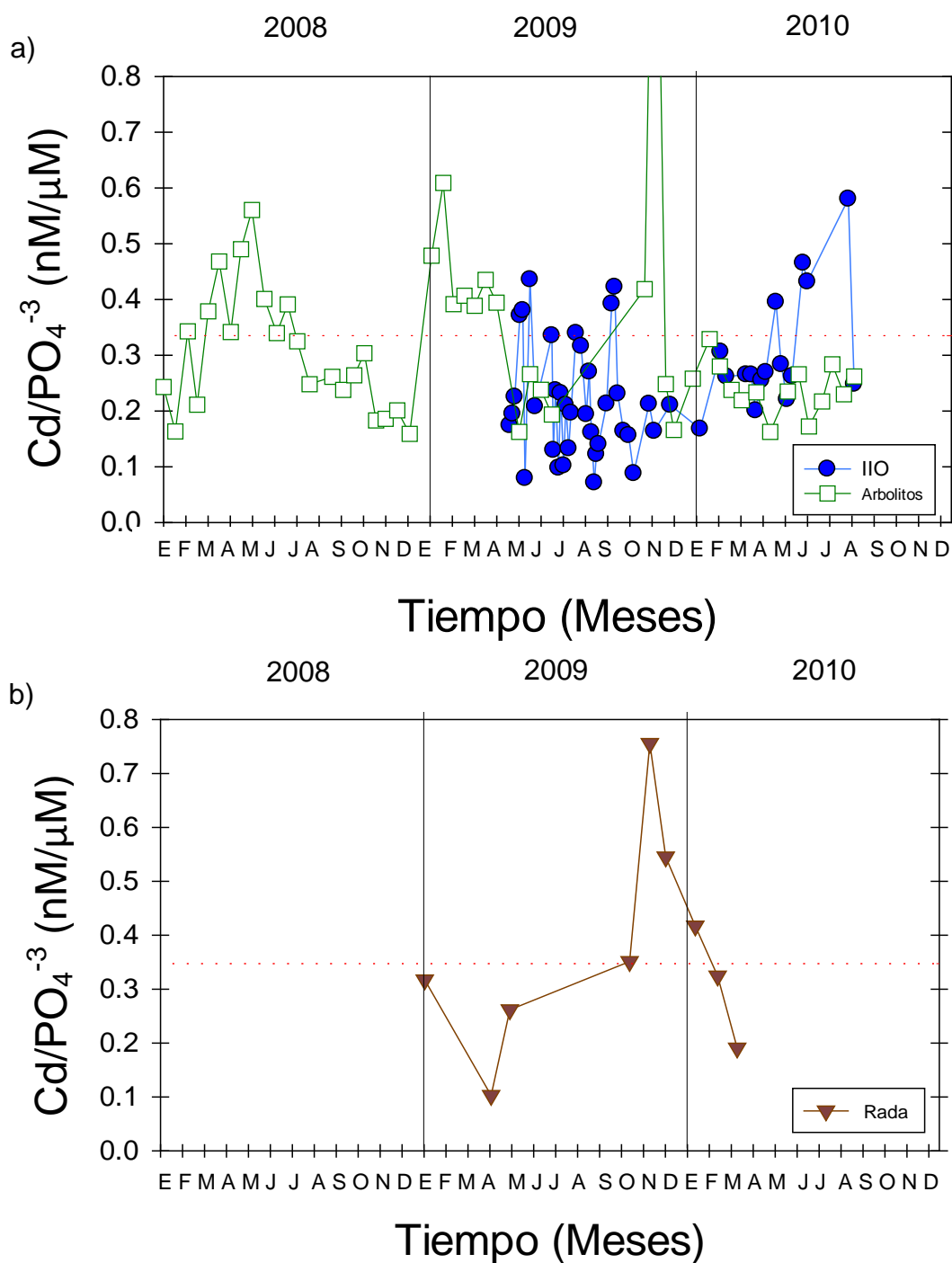


Figura 8.- Relación Cd/PO_4^{-3} de la zona costera de la BTS para el periodo de enero de 2008 a diciembre de 2010. a) Estación IIO y Arbolitos, b) Estación La Rada. La línea punteada corresponde a la razón Cd/PO_4^{-3} reportada para aguas del Pacífico Nororiental (0.35 nM/ μ M, Bruland, 1980).

Tabla IV.- Promedios de la variación estacional de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ en aguas superficiales (promedio \pm error estándar). El promedio de las primaveras, los veranos, etc., se calcularon utilizando todos los datos de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ de cada una de las épocas.

	Razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ (nM/ μM) IIO	Razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ (nM/ μM) Arbolitos	Razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ (nM/ μM) Rada
2008		0.30 ± 0.02	
2009	0.22 ± 0.02	0.42 ± 0.08	0.39 ± 0.08
2010	0.31 ± 0.03	0.24 ± 0.01	0.26 ± 0.07
Primaveras	0.28 ± 0.02	0.32 ± 0.03	0.24 ± 0.07
Veranos	0.22 ± 0.03	0.27 ± 0.02	
Otoños	0.23 ± 0.04	0.33 ± 0.12	0.57 ± 0.10
Inviernos	0.25 ± 0.04	0.33 ± 0.03	0.28 ± 0.04
Primavera 2008		0.43 ± 0.04	
Verano 2008		0.29 ± 0.03	
Otoño 2008		0.22 ± 0.02	
Invierno 2008		0.27 ± 0.04	
Primavera 2009	0.26 ± 0.04	0.28 ± 0.04	0.24 ± 0.07
Verano 2009	0.19 ± 0.02	0.19 ± 0.00	
Otoño 2009	0.23 ± 0.04	0.57 ± 0.30	0.57 ± 0.10
Invierno 2009		0.46 ± 0.04	0.32 ± 0.00
Primavera 2010	0.30 ± 0.03	0.21 ± 0.02	
Verano 2010	0.41 ± 0.17	0.25 ± 0.02	
Otoño 2010			
Invierno 2010	0.25 ± 0.04	0.26 ± 0.02	0.26 ± 0.07
Razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ (2008-2010)	0.25 ± 0.02	0.30 ± 0.02	0.36 ± 0.06

7. DISCUSIÓN.

7.1. Análisis hidrográfico de las aguas superficiales de la zona costera de la BTS.

La variación estacional de la temperatura fue diferente entre la zona externa y la zona interna de la BTS (Tabla III). En general, en la zona externa se registraron temperaturas más frías en comparación con la zona interna, a lo largo de los tres periodos de muestreo. En la estación Arbolitos, los valores máximos de temperatura se registraron durante el otoño (Fig. 3a) debido a la presencia de los vientos provenientes del sur y a la circulación subsuperficial hacia el polo que causan el debilitamiento de las surgencias costeras (Hickey, 1979; Sverdrup y Fleming, 1941; Lynn y Simpson, 1987; Álvarez-Santamaría, 1994). En contraste, los valores mínimos de temperatura se presentaron durante la primavera debido al surgimiento de aguas frías provenientes de profundidades >50 m (Durazo *et al.*, 2010), asociado a la intensificación de los vientos provenientes del noroeste (Zaitsev *et al.*, 2003), con un incremento de la circulación oceánica hacia el sur, favoreciendo el surgimiento de las aguas de surgencia como respuesta del mecanismo forzante y lo cual es una característica de todo el SCC (Kindyushev, 1970; Durazo, 2009).

El análisis de la temperatura en la estación IIO indicó que las aguas del interior de la bahía fueron mayores que en el exterior, evidenciándose la presencia de un frente térmico entre la BTS y el océano Pacífico adyacente (Fig. 3). Este calentamiento en la zona interna puede explicarse por la interacción del patrón de circulación y las características geomorfológicas de la BTS (Fig. 9). Trabajos previos que han descrito la circulación superficial de la bahía, por medio de mediciones directas de corrientes (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1988; Argote *et al.*, 1975) o de resultados de modelos numéricos (Argote *et al.*, 1991; Mateos *et al.*, 2009), sugieren la ocurrencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos asociados a la forma de "C" invertida de la BTS. Estos remolinos promueven la recirculación del agua y provocan que el flujo de agua proveniente del océano adyacente quede retenido en el interior de la bahía y por lo tanto, se favorece el calentamiento del agua superficial (Mateos-Farfán, 2010). Una consecuencia de la generación del frente térmico entre el océano y la bahía, así como del

confinamiento del agua en su interior, es que jugarán un papel muy importante en controlar las características fisicoquímicas de las aguas de la BTS.

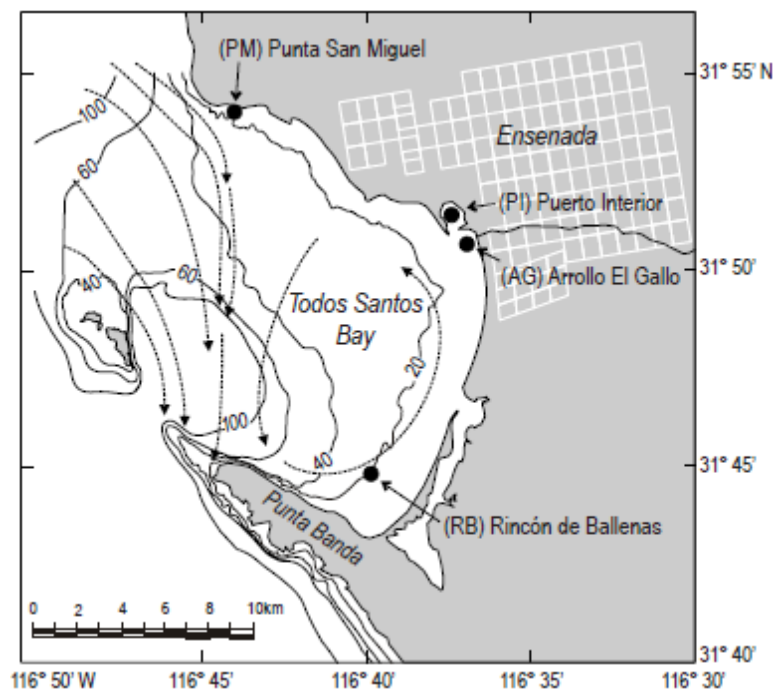


Figura 9.- Batimetría y circulación superficial (flechas punteadas) durante primavera-verano en la BTS (tomado de Peña-Manjarrez *et al.*, 2009).

Los resultados de este trabajo muestran que la temperatura en la región de la BTS presenta una clara variación interanual, de manera similar a lo reportado previamente para la región de Baja California (Durazo, 2009; Linacre *et al.*, 2010). Tanto en la estación Arbolitos como IIO, las temperaturas más bajas se registraron durante la primavera del 2008 (Tabla III, Fig. 2a) asociadas al fenómeno de La Niña. En contraste, durante las primaveras del 2009 y 2010 las temperaturas fueron más cálidas asociadas al evento de El Niño y al periodo de transición de El Niño a La Niña, respectivamente (Durazo, 2009; Linacre *et al.*, 2010; Cervantes-Díaz, 2013).

La variación estacional de la salinidad fue muy similar dentro y fuera de la BTS (Figs. 3 y 4). En la estación Arbolitos se registraron los valores más altos de salinidad durante primavera-verano asociado al fenómeno de surgencia ($r=0.522$ S vs ISB_{15} ; Tabla V) y lo cual ha sido consistente con estudios previos para la región adyacente a la BTS (Mancilla-Peraza y Martínez, 1991; Durazo,

2009; Cervantes-Díaz, 2013; Salamanca-Quevedo, 2013). Los valores más bajos de salinidad se presentaron durante el invierno que corresponde a la época de relajación de los eventos de surgencia, la entrada de aguas poco salinas provenientes de la CC al interior la BTS, así como a la época de lluvias (KW; $p=0.001$; Hickey, 1979; Lynn y Simpson, 1987; Durazo, 2009; Mateos-Farfán, 2010; Fig. 4, Tabla III). Por lo tanto, la zona adyacente a la BTS introduce agua fría y salina hacia el interior de la bahía (Pérez-Brunius *et al.*, 2005; Torres *et al.*, 2006; Mateos-Farfán, 2010). Además, las características fisicoquímicas de las aguas superficiales de la BTS se ven afectadas por la masa de agua de origen Sub Ártico (ASA) que se encuentra <100 m en el océano adyacente (Pérez-Brunius *et al.*, 2007; Linacre *et al.*, 2010; Oliva-Méndez, 2013; Salamanca-Quevedo, 2013) y al introducirse a la bahía es modificada asociada al patrón de circulación (Torres *et al.*, 2006; Mateos-Farfán, 2010).

La salinidad mostró cambios interanuales al igual que la temperatura, lo cual se debe principalmente a los fenómenos del El Niño y La Niña. Durante el 2008 se registraron salinidades altas en comparación con el 2009 y el 2010 en las tres estaciones de muestreo, asociado a la presencia del evento de La Niña (Fig. 4, Tabla III; Durazo, 2009; Linacre *et al.*, 2010; Cervantes-Díaz, 2013).

En general, la variación estacional de la temperatura y la salinidad en la zona externa de la BTS refleja la influencia del agua del Océano Pacífico adyacente, mientras que la variación estacional de la temperatura y salinidad en la zona interna de la BTS refleja una modificación de las características fisicoquímicas del agua del océano adyacente debido a la retención del agua en su interior a causa de su morfología.

Tabla V.- Correlaciones de las variables físicas, químicas y biológicas de los tres sitios costeros de la BTS.

IIO							
	T	S	Cl "a"	PO ₄ ⁻³	Cd	Cd/PO ₄ ⁻³	ISB ₁₅
T							
S							
Cl "a"		0.491**					
PO ₄ ⁻³			0.0855				
Cd				-0.0155			
Cd/PO ₄ ⁻³					0.019		
ISB ₁₅						-0.195	0.0115
							0.451***
							0.231**
							-0.0618
							0.101
							0.256
Arbolitos							
	T	S	Cl "a"	PO ₄ ⁻³	Cd	Cd/PO ₄ ⁻³	ISB ₁₅
T							
S							
Cl "a"		0.0299					
PO ₄ ⁻³			-0.221				
Cd				-0.509***			
Cd/PO ₄ ⁻³					-0.479***		
ISB ₁₅						-0.0875	0.183
							0.522***
							0.422***
							0.296**
							0.351*
							0.185
Rada							
	T	S	Cl "a"	PO ₄ ⁻³	Cd	Cd/PO ₄ ⁻³	ISB ₁₅
T							
S							
Cl "a"		0.093					
PO ₄ ⁻³			0.717***				
Cd				-0.675			
Cd/PO ₄ ⁻³					0.141		
ISB ₁₅						-0.0828	-----

*p<0.01

**p<0.05

***p<0.001

7.2. Efecto de los procesos físicos sobre la variación temporal del Cd en aguas superficiales de la zona costera de la BTS.

En la zona costera externa de la BTS las concentraciones de Cd fueron muy similares a las encontradas en las costas del Océano Pacífico Nororiental (Bruland *et al.*, 1978; Bruland, 1980; Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1991; van Geen y Husby, 1996; Takesue *et al.*, 2002; Lares *et al.*, 2008, 2009). Las concentraciones máximas de Cd fueron registradas durante las primaveras (0.35-0.50 nM) asociadas al proceso de surgencia costera y estos valores fueron muy similares a lo reportado en zonas de surgencia (0.034-0.46 nM; Tabla VI; Martin *et al.*, 1976; Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1996; Segovia-Zavala *et al.*, 1998; Salamanca-Quevedo, 2013). La correlación entre el Cd y el ISB₁₅ fue positiva ($r=0.351$, $p<0.01$; Figs. 2 y 7a, Tabla V) sugiriendo que el aporte de Cd hacia la superficie ocurre a través de la surgencia costera, un hallazgo similar a lo reportado para las costas de Oregon y del Norte de California (van Geen y Louma, 1993; van Geen y Husby, 1996; Takesue *et al.*, 2002). En contraste, las concentraciones mínimas de Cd se registraron durante otoño-invierno (0.18-0.30 nM; Fig. 7) asociadas a la disminución de aportes de aguas subsuperficiales de Cd hacia las aguas superficiales y a la advección de las aguas de la CC con bajo contenido de Cd, característico de las aguas superficiales de las costas de California (0.04-0.16 nM; Bruland *et al.*, 1978; van Geen y Husby, 1996; Takesue *et al.*, 2004). En la zona interna de la BTS, la variación estacional del Cd en la estación IIO presentó concentraciones máximas durante primavera asociadas a la advección del agua de surgencia rica en Cd de la zona adyacente hacia el interior de la bahía ($r=0.451$ S vs ISB₁₅ y $r=0.101$ Cd vs ISB₁₅; Tabla V).

Aunque la estación La Rada se encuentra afectada por la actividad antropogénica, registró concentraciones de Cd similares a la zona influenciada por la surgencia (t_{student} , $p=0.001$; Fig. 7), lo que sugiere que los aportes asociados a las descargas de aguas residuales contienen concentraciones de este metal suficientemente altas para incrementar los niveles de Cd a valores similares a los registrados en la zona de enriquecimiento natural (Tabla III). De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1996) las concentraciones de Cd en La Rada quedan por debajo del límite máximo

permisible (1780-3560 nM) para aguas costeras, por lo que a pesar de que La Rada recibe aportes de origen antropogénico, estos no son un factor predominante que afecte las concentraciones y la variabilidad temporal del Cd a la escala de toda la BTS.

La variación interanual de la concentración de Cd en la bahía está estrechamente relacionada con los eventos del El Niño y La Niña, ya que estos fenómenos influyen en la intensidad de los eventos de surgencia que aportan Cd a las aguas superficiales en esta región del Pacífico. En la estación Arbolitos durante el 2008 y 2010 se registraron altas concentraciones de Cd, similar al comportamiento de las estaciones internas de la BTS durante el 2010 (Tabla III, Fig. 7), asociado al evento de La Niña que intensifica la surgencia (Durazo, 2009; Linacre *et al.*, 2010; Cervantes-Díaz, 2013). Sin embargo, durante el 2009 las concentraciones disminuyeron con respecto al 2008 y 2010 (Tabla III, Fig. 7) asociado a la presencia del evento de El Niño, un evento débil y de corta duración, con dominio de un mayor volumen de ASA (Durazo, 2009; Linacre *et al.*, 2010) que introdujo aguas ricas en Cd.

Tabla VI.- Concentraciones de Cd y PO_4^{-3} medidos en el Pacífico.

	Pacífico Norte (CC)	Costas del Pacífico	BTS	Aguas de surgencia costera
Cd (nM)	0.04-0.16 Bruland, 1980	0.1-1.0 Takesue <i>et al.</i> , 2004	0.09-0.46 Salamanca- Quevedo, 2013	0.16 Bruland <i>et al.</i> , 1978; Bruland, 1980
PO_4^{-3} (μM)	0.02-1.60 Boyle <i>et al.</i> , 1976	0.5-2.5 van Geen y Luoma, 1993	0.49-1.39 Salamanca- Quevedo, 2013	0.30-0.52 Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1991

En general, las principales fuentes de Cd en la zona costera de la BTS se deben a los procesos oceanográficos asociados a las surgencias costeras y a la advección, por lo que podría considerarse al Cd como un trazador de agua de surgencia (Boyle, 1988; van Geen y Husby, 1996; Takesue y van Geen, 2002) para esta región del sur SCC. Finalmente, las concentraciones de Cd superficial en la zona costera de la BTS (0.15-0.49 nM) se encuentran

influencias por aguas del Pacífico Nororiental y son similares a las reportadas para las costas del Pacífico y zonas de surgencias (Tabla VI).

7.3. Efecto de los procesos biológicos sobre la variación temporal del Cd superficial en la zona costera de la BTS.

La distribución vertical del Cd y del PO_4^{-3} en el océano están estrechamente relacionados (Fig. 10) y se encuentran asociados a procesos biogeoquímicos similares que regulan su concentración. Ambos elementos presentan bajas concentraciones en la superficie debido al consumo de los organismos fitoplanctónicos durante el proceso de la fotosíntesis y altas en aguas sub-superficiales, asociado a la remineralización de la materia orgánica (Boyle *et al.*, 1976; Bruland *et al.*, 1978; Bruland, 1980).

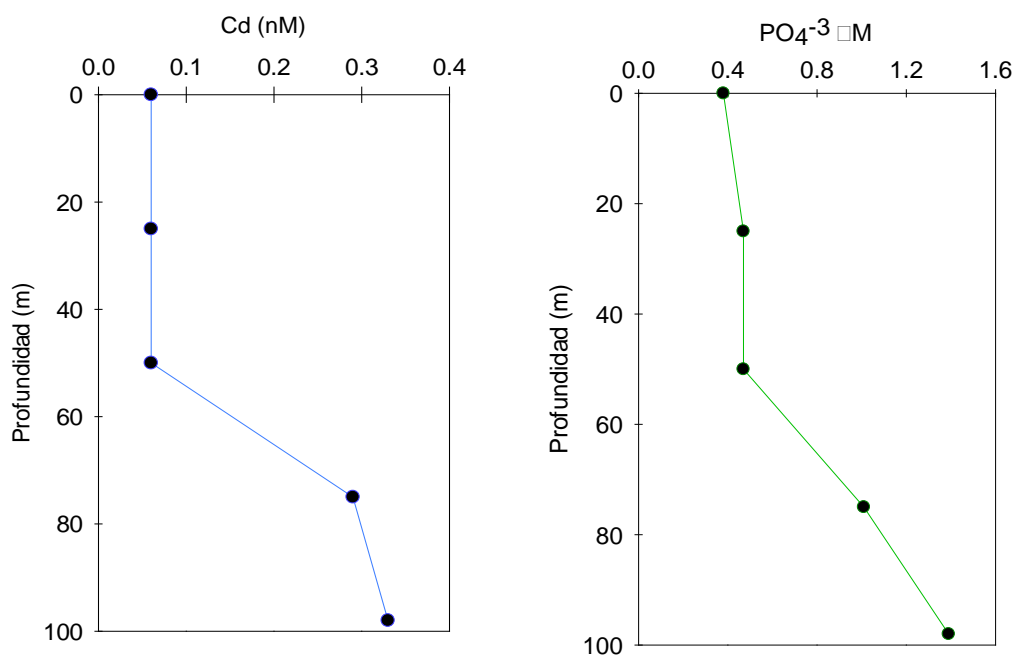


Figura 10.- Perfiles de Cd y PO_4^{-3} para aguas del Pacífico Nororiental (tomados de Bruland, 1980).

En la estación externa de la BTS se registraron las concentraciones más altas de Cd y de PO_4^{-3} en comparación con las estaciones internas (t_{student} , $p=0.001$; Tabla III). Sin embargo, tanto en la zona externa como en la interna, el Cd y el PO_4^{-3} , siguieron la misma variación estacional a lo largo del periodo de muestreo. La concentración promedio máxima de ambos elementos se presentó durante invierno-primavera (Tabla III; Fig. 6a y 7a). En Arbolitos los

valores altos están relacionados al aporte natural de Cd y PO_4^{-3} por la surgencia costera ($r=0.351$ y $r=0.296$; Tabla V) tal como ha sido descrito por Takesue *et al.* (2004) y Salamanca-Quevedo (2013) para la zona adyacente a la BTS y además con valores muy similares a los reportados para la zona de surgencia de California y Oregón en EUA (van Geen *et al.*, 1992; van Geen y Husby, 1996; Takesue y van Geen, 2002). Sin embargo, los eventos de surgencia también favorecen las concentraciones de Cl "a" como las de Cd y PO_4^{-3} durante primavera-verano ($r=0.422$ y 0.231 Cl"a" vs ISB_{15} ; Tabla V; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010). De acuerdo a los resultados obtenidos, existe una fuerte correlación entre el Cd y el PO_4^{-3} en la estación Arbolitos ($r=0.711$, $p=0.001$; Tabla V) lo que sugiere que ambos elementos están siendo afectados por procesos similares de consumo y remoción en la columna de agua. Además, la relación Cd vs PO_4^{-3} de los datos de la zona externa de la BTS presentan una pendiente positiva y un intercepto ligeramente negativo ($\text{Cd}=0.390 \text{ nM}/\mu\text{M} * \text{PO}_4^{-3} - 0.0898$; $r^2=0.506$; Tablas IV y V, Fig. 11) sugiriendo un consumo de Cd y de PO_4^{-3} por parte de los organismos fitoplanctónicos como resultado del proceso de fotosíntesis en la capa superficial (Bruland, 1980; De Baar *et al.*, 1994; Lares y Marinone, 2009). Esta relación es similar a la encontrada en el Pacífico Nororiental (Tabla VII; Fig. 11, Bruland, 1980), lo que indica que las aguas de la BTS pertenecen a esta provincia oceanográfica del Pacífico (Tabla VI).

Las concentraciones de Cd y PO_4^{-3} en la parte interna de la BTS, están asociadas a la advección de las aguas desde el océano adyacente y las concentraciones de los dos elementos son menores que en el exterior, debido al consumo de ambos por parte de los organismos fitoplanctónicos dentro de la bahía (Figs. 6 y 7, Tabla V). De acuerdo con esta interpretación, las altas concentraciones de Cl "a" en el interior de la BTS (Fig. 5) reflejan que el crecimiento de los organismos fitoplanctónicos es favorecido por la retención del agua en el interior de la bahía. Al igual que en la estación Arbolitos, en la estación IIO se registró una correlación positiva entre el Cd y el PO_4^{-3} ($r=0.351$, $p=0.01$; Tabla V) y a partir de la relación Cd vs PO_4^{-3} se obtuvo una pendiente y un intercepto positivo ($\text{Cd}=0.227 \text{ nM}/\mu\text{M} * \text{PO}_4^{-3} + 0.0138$; $r^2=0.123$; Tablas IV y V, Fig. 11), sugiriendo que el PO_4^{-3} y el Cd son consumidos por los organismos

fotosintetizadores e incorporados al tejido fitoplanctónico en el interior de la BTS. Además, la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ en la estación IIO sugiere que en algunos momentos durante el periodo de primavera-verano existe una acumulación de Cd en relación al PO_4^{-3} en las aguas superficiales, quizá por un consumo preferencial de Cd en relación al PO_4^{-3} por parte del fitoplancton (Figs. 8 y 11).

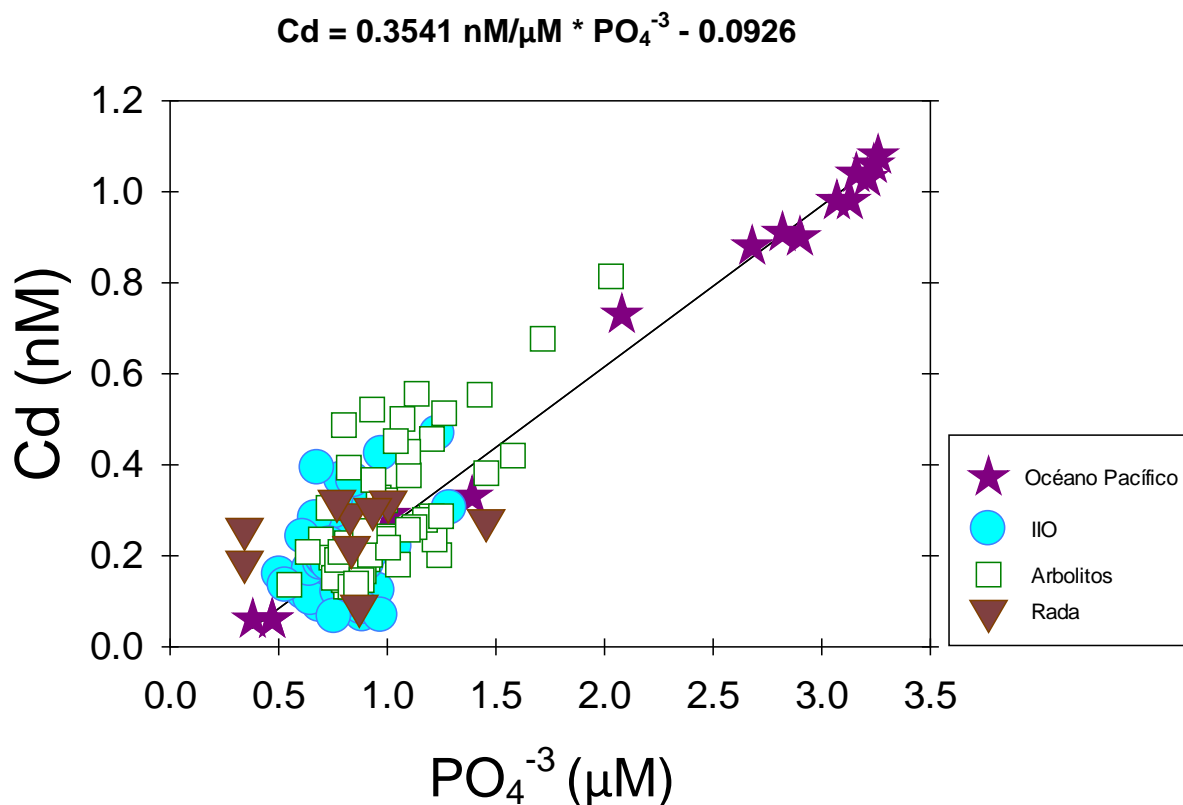


Figura 11.- Relación Cd vs PO_4^{-3} en la zona costera de la BTS comparada con la del Pacífico Nororiental (Bruland, 1980).

Los valores de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ mostraron cambios interanuales en toda la región de la BTS. En la estación Arbolitos, durante la primavera del 2008 se registró el mayor valor de la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ ($0.43 \pm 0.04 \text{ nM}/\mu\text{M}$) con respecto a las primaveras del 2009 ($0.28 \pm 0.04 \text{ nM}/\mu\text{M}$) y 2010 ($0.21 \pm 0.02 \text{ nM}/\mu\text{M}$), sugiriendo la adición de aguas enriquecidas con Cd y PO_4^{-3} a las aguas superficiales de la zona externa de la BTS, asociado al fenómeno de La Niña que se presentó en las costas de Baja California durante el 2008 (Durazo, 2009; Linacre *et al.*, 2010). Aunque en el 2010 se registró un evento de la Niña, durante el primer trimestre del año se registró la transición del evento El Niño a

La Niña asociándose al desplazamiento de la intensidad de la surgencia hacia el verano y en el incremento de las concentraciones de Cd para esta época del año (Tabla IV, Figs. 2 y 8).

Durante el 2009, la razón estuvo por debajo a lo reportado para el Pacífico Nororiental (Tabla IV, Fig. 8) que corresponde al evento del Niño que trae como consecuencia el debilitamiento de las surgencias (Durazo y Baumgartner 2002; Durazo, 2009; Linacre *et al.*, 2010), así como la deficiencia de Cd y PO_4^{-3} disponibles en las aguas superficiales y en algunos momentos como la primavera y el verano, sugiriendo una remoción preferencial del Cd en relación al PO_4^{-3} por parte de los organismos fitoplanctónicos.

En conclusión, este trabajo muestra que en la zona costera de la BTS, el Cd y el PO_4^{-3} son suministrados a la capa superficial por el fenómeno de surgencia y son removidos de la fase disuelta para luego ser incorporados en el tejido orgánico particulado a través de la fotosíntesis. Estos procesos juegan un papel muy importante, desde un punto de vista biogeoquímico, ya que modulan la magnitud de la variabilidad espacial y temporal del Cd y el PO_4^{-3} en este sistema costero del sur del SCC.

Tabla VII.- Relación Cd/PO₄⁻³ en diferentes sistemas costeros de los mares del mundo.

Región	Relación Cd/PO ₄ ⁻³ (nM/μM)	Referencia
Pacífico Nororiental	0.31	Bruland <i>et al.</i> , 1978
Pacífico Norte	0.33	De Baar <i>et al.</i> , 1994
Pacífico Ecuatorial	0.10	Abe, 2001
Océano Pacífico (SO)	0.58	Matsunaga y Abe, 1985
Océano Índico (SE)	0.19	Notling <i>et al.</i> , 1989
Océano Atlántico (NE)	0.20	Danielsson <i>et al.</i> , 1985
Océano Atlántico (NO)	0.25	Bruland y Franks, 1983
Mar de Weddell	0.53	Sañudo-Wilhelmy <i>et al.</i> , 2002
Golfo de California	0.37	Delgadillo-Hinojosa <i>et al.</i> , 2001
Arbolitos	0.32 y 0.39	Salamanca-Quevedo, 2013 y Este estudio
La Rada	0.36	En este estudio
IIO	0.25	En este estudio

8. CONCLUSIONES.

La temperatura superficial de las estaciones internas de la BTS varía principalmente por el ciclo de irradiación solar, mientras que la variación temporal de la temperatura en la zona externa sigue la variación estacional de la surgencia costera.

La variación temporal de la salinidad siguió la variación estacional de la surgencia costera tanto en la zona interna como en la zona externa de la BTS. En la zona externa por la ocurrencia del fenómeno de surgencia y en la zona interna por la advección del agua de surgencia hacia el interior de la BTS.

La variación temporal del Cd y del PO_4^{-3} en la zona externa de la bahía fue similar a la variación estacional de la surgencia costera con concentraciones máximas durante primavera-verano y mínimas en otoño. La variación temporal del Cd en la zona interna de la BTS está sujeta a la advección de las aguas del océano adyacente y al consumo por parte de los organismos fitoplanctónicos debido a la retención de sus aguas en el interior de la bahía.

Las altas concentraciones de Cd, PO_4^{-3} y Cl "a" durante 2008 y 2010 se asoció a las condiciones de La Niña, mientras que las concentraciones más bajas de estas variables durante el 2009 se relacionaron con condiciones de El Niño.

La concentración de Cd y la razón $\text{Cd}/\text{PO}_4^{-3}$ promedio de la zona externa e interna de la BTS fueron similares a la del Pacífico Nororiental, indicando que este cuerpo de agua costero pertenece a esta provincia oceanográfica del Océano Pacífico.

El análisis hidrográfico indica que los procesos físicos como la surgencia y la advección, así como los procesos biológicos como la fotosíntesis, juegan un papel muy importante en la variación espacial y temporal del Cd en la zona costera de la BTS, un sistema costero del sur de SCC.

9. REFERENCIAS.

- Abe, K., y Matsunaga, K. (1988). Mechanism controlling Cd and PO₄ concentration in Funka Bay, Japan. *Marine Chemistry* 23: 145-152.
- Abe, K. (2001). Cd in the western equatorial Pacific. *Marine Chemistry* 74: 197-211.
- Álvarez, L. (1977). Vientos en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas*, 4(1): 81-89.
- Álvarez-Borrego, J., y Álvarez-Borrego, S. (1982). Temporal and spatial variability of temperatura in two coastal lagoons. *CalCOFI Reports*. 33:188-197.
- Álvarez-Sánchez, L.G., Hernández, R., y Durazo, R. (1988). Patrones de deriva de los trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 14:135-162.
- Álvarez-Sánchez, L. G. (1971). Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 68 pp.
- Álvarez-Santamaría, L. (1994). Caracterización de masas de agua y zonas de surgencia en la costa Noroccidental de Baja California. Mayo (1990). Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. UABC. 70 p.
- Argote, M. L., Gavidia, F. J., y Amador, A. (1991). Wind-induced circulation in Todos Santos Bay, B. C., México. *Atmósfera*, 4:101-115.
- Argote-Espinoza, M. L., Amador-Buenrostro, A., Morales-Zúñiga, C. (1975) Distribución de los parámetros de salinidad y temperatura y tendencias de la circulación en la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. 100 pp.
- Barton, E. D., y Argote, M. L. (1980). Hydrographic variability in an upwelling area off northern Baja California in june 1976. *Journal of Materials Research*.38(4): 631-649.
- Bakun, A., y Nelson, C. S. (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. California Cooperative Oceanic Fisheries. Investigations. Reports. 19:107-127.
- Bakun, A. (1973). Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-71. U.S. Dep. Commerce, NOAA Technical Report., NMFS SSRF-671, 103 p.
- Boyle, E. A., Sclater, F. R. y Edmond, J. M. (1976). On the marine geochemistry of cadmium. *Nature* 263: 42-44.
- Boyle, E. A., Husted, S.S., y Jones, S. P. (1981). On the distribution of copper, nickel, and cadmium in the surface waters of the North Atlantic and North Pacific Ocean, *Journal Geophysics. Research*, 86. 8048-8066, 1981.

Boyle, E. A., Hapnick, X., Bai., y Spivack, A. (1985). Trace metals enrichment in the Mediterranean Sea. *Earth and Planetary Sciences Letter* 74: 405-419.

Boyle, E. (1988). Cadmium: chemical tracer of deepwater. *Paleoceanography*. 3:471-489.

Bruland, K. W., Knauer, G.A., Martin, J. H. (1978). Cadmium in Northeast Pacific waters. *Limnology Oceanography*. 23:618–625.

Bruland, K. W., Franks, R. P, Knauer, G. A., y Martin, J. H. (1979). Sampling and analytical methods for the determination of copper, cadmium, zinc, and nickel at the nanogram per liter level in seawater. *Analytica Chimica*. 105: 233-245.

Bruland, K. W., y Franks, R. P. (1983). Manganese, nickel, copper, zinc and cadmium in the Western North Atlantic.p. 395–414. In *Trace Metals in Sea Water*, eds. by C. S. Wong, E. Boyle, K. W.Bruland, J. D. Burton and E. D. Goldberg, Plenum, New York, NY.

Bruland, K. W., Orians, K. J., y Cowen, J. P. (1994). Reactive trace metals in the stratified central North Pacific. *Geochimica et Cosmochimica. Acta* 58: 3171-3182.

Bruland, K. W. (1980). Oceanographic distribution of cadmium, zinc, nickel and copper in the North Pacific. *Earth and Planetary Sciences Letter* 47: 176-198.

Cervantes-Díaz G. Y. (2013). Variabilidad temporal del sistema del CO₂ y nutrientes frente a las costas de Baja California. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas-Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. 132 pp.

Chavez, F. P., Strutton, P. G., Friederich, G. E., Feely, R. A., Feldman, G. C., Foley, D. G., y Mc Phaden, M. J. (1999). Biological and chemical response of the equatorial Pacific Ocean to the 1997–98 El Niño, *Science*, 286, 2126–2131, doi:10.1126/science.286.5447.2126.

Chen Hung-Yu., Fang Tien-His., Wen Liang-Saw. (2005). A preliminary study of the distributions of Cd in the South China Sea. *Continental Shelf Research*.25: 297-310.

Cotte-krief, M. C., Thomas A., y Martin J. (2000). Sources of Cd, Cu, Ni and Zn in the Portuguese coastal waters. *Marine Chemistry*. 71:199-214.

Cruz-Colín, M. E. (1997). Variabilidad de temperatura del mar en la Bahía de Todos Santos, B. C., México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C. Ensenada, B. C. 98 pp.

Danielsson, L.G. (1980). Cadmium, cobalt, copper, iron, lead, nickel and zinc in the Indian Ocean. *Marine Chemistry*. 8: 199-215.

De Baar, H. J., Saager, P. M., Nolting, R. F., y Vander Meer, J. (1994). Cadmium versus phosphate in the world ocean. *Marine Chemistry*. 46: 261-281.

- Delgadillo-Hinojosa, F., Segovia-Zavala, J. A., y Torres-Valdés, S. (2001). Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Marine Chemistry*. 75, 109-122.
- Delgadillo-Hinojosa F. (2000). Biogeoquímica del cadmio y manganeso en el Golfo de California. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México. 181 pp.
- Durazo, R. y Baumgartner, T. R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 54 :7-31.
- Durazo, R., Ramírez-Manguilar, A. M., Miranda, L. E., Soto-Mardones, L. A. (2010). Climatología de variables hidrográficas en la Corriente de California frente a Baja California. *Climatología hidrográfica de la región IMECOCAL*. 45 pp.
- Durazo, R. (2009). Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Progress in Oceanography*. 83: 361–368
- Elbaz-Poulichet, F. y Martin, J. (1987). Dissolved Cd behavior in some selected French and Chinese estuaries. Consequences on Cd supply to the ocean. *Marine Chemistry*. 22: 125-136.
- Espinosa-Carreón, T. L., Gaxiola-Castro, G., Robles-Pacheco, J. M. y Najera-Martínez, S. (2001). Temperatura, Salinidad, Nutrientes y Clorofila *a* en aguas costeras de la Ensenada del Sur de California. *Ciencias Marinas*. 27:397-422.
- Espinosa-Carreón, T. L., Strub, P. T., Beier, E., Ocampo-Torres, F., Gaxiola-Castro, G. (2004). Seasonal and interannual variability of satellitederived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *Journal Geophysics Research*. 109: C030389, doi: 10.1029/2003JC002105.
- Falkowsky, P. G., Barber, R. T. y Smetacek, V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Nature*. 281:200-206.
- Gaxiola-Castro, G., De la Cruz-Orozco, M. E., Nájera-Martínez, S., Martínez-Gaxiola, M. D., Rodríguez-Gamboa, A. (2010). Nutrientes: efectos de procesos locales y de gran escala. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1977–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Pp. 59-85.
- Graham, W .M. (1993). Spatio-Temporal Scale Assessment of an “Upwelling Shadow” in Northern Monterey Bay, California. *Estuaries*. Vol. 16. No1, 83-91.
- Granados-Guzmán, A., Hidalgo-González, R. y Álvarez-Borrego, S. (1995). Variabilidad temporal de la temperatura en las Islas Todos Santos y San Jerónimo, Baja California, durante mayo de 1992 a marzo de 1993. Informe técnico CTECT9501. Comunicaciones académicas. Serie de Ecología. CICESE. 24 pp.
- Gómez-Valdés, J. (1983). Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California. *Ciencias Marinas*. 9: 75-86.
- Gordon, L. I., Jennings, J. C., Jr. Ross, A. A., Krest, J. M. (1993). A suggested protocol for continuous flow automated analysis of seawater nutrients

(phosphate, nitrate, nitrite and silicic acid) in the WOCE Hydrographic Program and the Joint Global Ocean Fluxes Study. WOCE Hydrographic Program Office, Methods Manual WHPO 91-1. 55 pp.

Hayward, T. L., T. R. Baumgartner, D. M. Checkley, R. Durazo, G. Gaxiola-Castro, K. D. Hyrenbach, A. W. Mantyla, M. M. Mullin, T. Murphere, F. B. Schwing, P. E. Smith, y M. J. Tegner. (1999). The State of the California Current 1998-1999: Transition to cool-water conditions. California. Cooperative Oceanic Fisheries Investigations. Reports., 40: 29-62.

Hernández-Walls, R. (1986). Circulación inducida por el viento en la zona costera. Tesis de licenciatura. ESCM. UABC. Ensenada. B.C. México 89 pp.

Hickey, B. M. (1979). The California Current System "hypotheses and facts". *Progress in Oceanography*. 8: 191-297.

Hayward, T. L. y Venrick, E. L. (1998). Nearsurface pattern in the California Current: coupling between physical and biological structure. *Deep-Sea Research II* 45(8-9): 1617-1638.

Jeffery, S. W. y Humphrey, G. F. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁, and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemistry Physiology Pflanzen*. 167: 191-194.

Jiménez-Pérez, L. C. (1989). Variación temporal de zooplancton de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. *Ciencias Marinas* 15 (3): 81-96.

Klinkhammer, G. y Bende, Mr. (1980). The distribution of manganese in the Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letter*. 46: 361-384.

Kindyushev, V. I. (1970). Seasonal variations of water masses in the California region of the Pacific Ocean. *Oceanology* 10:456-464.

Knauer, G. A. y Martin, J. H. (1981). Phosphorus-cadmium cycling in northeast Pacific waters. *Journal of Marine Research*. 39: 65-76.

Kremling, K. (1983). Determination of trace metals. En: *Methods of Seawater Analysis*. (Grasshoff, K., Ehrhardt, M. and Kremling, K., eds). Verlag Chemie Press. Weinheim. Germany. 419 pp.

Kremling, K. (1985). The distribution of cadmium, copper, nickel, manganese, and aluminum in surface waters of the open Atlantic and European shelf area. *Deep-Sea Research*. 32: 531-555.

Gomez-ValdezLares, M. L., Marinone, S. G., Rivera-Duarte, I., Beck, A., Sañudo-Wilhelmy, S. (2008). Spatial Variability of Trace Metals and Inorganic Nutrients in Surface Waters of Todos Santos Bay, Mexico in the Summer of 2005 During a Red Tide Algal Bloom. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*., DOI 10.1007/s00244-008-9210-x.

Lares, M. L. y Marinone, S. G. (2009). Comparison of cadmium and phosphate concentrations during red tide versus no red tide conditions. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium), pg-pg. Lisbon, Portugal, ISBN.

Libes, S. M. (1992). *An Introduction to Marine Biogeochemistry*. John Wiley y Sons, Inc. New York: 734pp.

Linacre, L., Durazo, R., Hernández-Ayón, J. M., Delgadillo-Hinojosa, F., Cervantes-Díaz, G., 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. J. y Simpson, J. J. (1987). The California Current System: the seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92: 12947-12966.

Lynn, R. J. (1967). Seasonal variation of temperature and salinity at 10 meters in the California Current. *CalCOFI Report* 11, 86–157.

Mancilla-Peraza, M. y Martínez-García, M. (1991). Variación estacional de la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en la Bahía de Todos Santos, B. C. México (marzo de 1986 a junio de 1987). *Revista de Investigación Científica*.2:33-45.

Martín, J. H., Bruland, K. W., Broenkow, W. W. (1976). Cadmium transport in the California current. In: Windom, H.L., Duce, R. A. (Eds). *Marine Pollutant Transfer*. Lexington Books, USA, pp. 159-184.

Mateos-Farfán, E., Marinone, S., y Parés-Sierra, A. (2009). Towards the numerical simulation of the summer circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, B. C., México. *Ocean Modelling*, 27: 107-112.

Mateos-Farfán, E. (2010). Modelación de la circulación costera estacional en la región norte de Baja California y Sur de California y de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y de educación superior de Ensenada. Ensenada, Baja California, México. pp. 135.

Matsunaga, K. y Abe, K. (1985). Relationship between Cadmium and Phosphate in the Northwest Pacific Ocean. *Journal Oceanographical Society. Japan*, 41, 183–187.

Millán-Núñez, R. y Rivas-Lozano, A. M. (1988). Nutrientes y clorofilas en la Bahía de Todos Santos (mayo 1983). *Ciencias Marinas* 14 (4): 23-42.

Morford, J. L. y Emerson, S. (1999). The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments. *Geochimica et Cosmochimical Acta* 63: 1735-1750.

Nameroff, T., Balistrieri, L. y Murray, W. (2002). Suboxic trace metals geochemistry in the eastern tropical North Pacific. *Geochimica et Cosmochimical Acta* 66: 1139-1158..

Nava-López, M. C. (2002). Biogeoquímica de metales traza en sedimentos frente a la costa noroccidental de Baja California, México. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Marinas-Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada Baja California, México. 164 pp.

NOAA:<http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA>

Nolting, R. F., Hutagalung, H. y Moeliyadi, D. (1989). Snellius II Expedition: results of the investigation on metals, phosphate and silicate. Neth. Inst. Sea Research Technical. Reports., 89/4, 118 pp.

Oliva-Méndez, N. L. (2013). Evaluación del estado de saturación de aragonita en las costas de Baja California, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas-Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. 105 pp.

Pavía, E. G. y Reyes, S. (1983). Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos, B.C. Ciencias Marinas. 9(1): 151-167.

Pavia, E. G., y Graef, F. (2002). The Recent Rainfall Climatology of the Mediterranean Californias. Climate Application. Meteorology. Vol. 15. 2697-2701.

Peña-Manjarrez, J. L., Gaxiola-Castro, G. y Helenes-Escamilla, J. (2009). Factores ambientales que influyen en la variabilidad de la producción de quistes de *Lingulodinium polyedrum* y *Scrippsiella trochoidea* (Dinophyceae). Ciencias Marinas, 35 (1): 1-14.

Pérez-Brunius, P., López, M., y Pineda, J. (2005). Hydrographic conditions near the coast of northwestern Baja California: 1997 to 2004. Continental Shelf Research (en revision).

Pérez-Brunius, P., López, M., Parés-Sierra, A., Pineda, J. (2007) Comparison of upwelling index off Baja California derived from three different wind data sources. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports., 48: 204-214.

Reyes-Coca, S. y Troncoso-Gaytán, R. (2004). Multidecadal variation of Winter rainfall in northwestern Baja California. Ciencias Marinas. 30 (1A): 99-108.

Roden, G. I. (1971). Aspects of the transition zone in the Northeastern Pacific. J. Geophysical Research, 76: 3462–3475.

Russell, A. y Morford, J. (2001). The behavior of redox-sensitive metals across a laminates massive laminated transition in Saanich Inlet, British Columbia. Marine Geology. 174: 341-354.

Saager, P. M., De Baar H. J. W. y Howland R. J. (1992). Cd, Zn, Ni and Cu in the Indian Ocean. Deep-Sea Research Part A. 39: 9-35.

Salamanca-Quevedo, E. (2013). Distribución especial y variabilidad temporal del Cadmio en la Bahía de Todos Santos: Una región influenciada por la Corriente de California y el fenómeno de surgencias. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas-Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. 103 pp.

Sañudo-Wilhelmy, S. A., y Flegal, A. R. (1991). Trace element distributions in coastal waters along the US-Mexican boundary: relative contributions of natural processes vs anthropogenic inputs. Marine Chemistry. 33:3372-392.

Sañudo-Wilhelmy, S. A. y Flegal, A. R. (1996). Trace metal concentrations in the surf zone and in coastal waters off Baja California, Mexico. *Environmental Science and Technology*, 30: 1575-1580.

Sañudo-Wilhelmy, S., Olsen K., Scelfo, J., Foster, T. y Flegal, A. (2002). Trace metal distributions off the Antarctic Peninsula in the Weddell Sea. *Marine Chemistry*. 77: 157-170.

Segovia-Zavala, J. A., Delgadillo-Hinojosa, F., Álvarez-Borrego, S. (1998). Cadmium in the coastal upwelling area adjacent to the California-Mexico Border. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences* 46: 475–481.

Segovia-Zavala, J. A., Delgadillo-Hinojosa, F., Vidal-Talamantes, R., Muñoz-Barbosa, A., Gutiérrez-Galindo, E. A. (2003). *Mytilus Californianus* transplantedos como bioindicadores de surgencia a dos zonas en Baja California, México. *Ciencias Marinas*. 24(4B): 665-675.

Segovia-Zavala, J. A., Delgadillo-Hinojosa, F., Muñoz-Barbosa, A., Gutiérrez-Galindo, E. A., Vidal-Talamantes, R. (2004). Cadmium and silver in *Mytilus californianus* transplanted to an anthropogenic influenced and coastal upwelling areas in the Mexican northeastern Pacific. *Marine Pollution Bulletin*. 48: 458-464.

Strub, P., Kosro, P. M., Huyer, A. (1991). The nature of the cold filaments in the California Current System. *Journal Geophysics Research*. 96: 14743-14768.

Strub, P. y James, C. (2000). Altimeter-derived variability of the surface velocities in the California Current System: 2. seasonal circulation and eddy statistics. *Deep-Sea Research II* , 47: 831{870.

Sverdrup, H. U. y Fleming, R. H. (1941). The waters off southern California March to July 1937. *Bull. Scripps Institution of Oceanography*. University of California., La Jolla, 4: 261-378.

Sverdrup, H., Johnson, M. y Fleming, R. (1942). *The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. N.J., 1087 p.

Takesue, R. y van Geen, A. (2002). Nearshore circulation during upwelling inferred from the distribution of dissolved cadmium off the Oregon coast. *Limnology and Oceanography*47: 176-185.

Takesue, R., van Geen, A., Carriquiry, J., Ortiz, E., Godínez-Orta, L., Granados, I., Saldívar, M., Ortlieb, L., Escribano, R., Guzmán, N., Castilla, J., Varas, M., Salamanca, M. y Figueroa, C. (2004). Influence of coastal upwelling and El Niño-Southern Oscillation on nearshore water along Baja California and Chile: shore-based monitoring during 1997-2000. *Journal of Geophysical Research*. 109: 1-14.

Torres-Moye, G. y Acosta-Ruiz, M. J. (1986). Algunas propiedades químicas indicadoras de eventos de surgencias costeras y de la corrientes subsuperficial en el área cercana a Punta Colonet, Baja California. *Ciencias Marinas*, 12(3): 10-25.

- Torres, C. R., Mejía, A., Argote, M. L., Ramírez, I., Mancillas, M. (2006). Three-dimensional circulation in Todos Santos Bay, Ensenada, BC, Mexico. In: Gámez B, Ojeda D, Larrazabal G, Cerrolaza M. (eds.), *Simulación y Modelado en Ingeniería y Ciencias*. SVMNI, pp. MF115–MF122.
- van Geen, A., Luoma, S., Fuller, C., Anima, R., Clifton, E. y Trumbore, S. (1992). Evidence from Cd/Ca ratio in foraminifera for greater upwelling off California 4,000 years ago. *Nature*. 358: 54-56.
- van Geen, A. y Luoma, S. N. (1993). Trace metals (Cd, Cu, Ni and Zn) and nutrients in coastal waters adjacent to San Francisco Bay. *Estuaries* 16:559-566.
- van Geen, A. y Husby, D. (1996). Cadmium in the California Current System: tracer of the past and present upwelling. *Journal of Geophysical Research* .101: 3489-3507.
- Venrick, E. L. y Hayward, T. L. (1984). Determining chlorophyll on the 1984 Calcofi surveys. *CalCOFI Reports*. 25: 74-79
- Walkowiak, A. M. y Solana, E. (1989). Distribución estacional de lluvias en Baja California, México. *Análisis de probabilidades*. *Atmósfera*. 209-218.
- Zaytsev, O., Cervantes-Duarte, R., Montante, O. y Gallegos, A. (2003). Coastal upwelling activity of the Pacific Shell of the Baja California Peninsula. *Journal Oceanography*, 59:489-502.