

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



**REPERCUSIONES DE LOS EVENTOS DE SURGENCIA EN LAS POBLACIONES DE
MEJILLÓN *Mytilus californianus* A LO LARGO DE LA COSTA OCCIDENTAL DE
BAJA CALIFORNIA**

TESIS

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

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

MARITZA ESCAMILLA ESPINOZA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.

FEBRERO, 2015

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

**REPERCUSIONES DE LOS EVENTOS DE SURGENCIA EN LAS POBLACIONES DE
MEJILLÓN *Mytilus californianus* A LO LARGO DE LA COSTA OCCIDENTAL DE
BAJA CALIFORNIA**

TESIS

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


MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

MARITZA ESCAMILLA ESPINOZA

Aprobada por:


Dr. Eugenio de Jesús Carpizo Ituarte
Director de tesis


Dra. Tatiana N. Olivares Bañuelos
Miembro del comité


Dr. Eduardo Santamaria del Ángel
Miembro del comité


M.C. Roberto Escobar Fernández
Miembro del comité

I. RESUMEN

PALABRAS CLAVE: Surgencia, *Mytilus californianus*, Tasa de Calcificación

El mejillón *Mytilus californianus*, comúnmente denominado "choro", es un componente central de la comunidad del intermareal rocoso en Baja California. En esta región, sus poblaciones son explotadas en forma artesanal y al igual que el resto del planeta, están siendo afectadas por el cambio global, que implica en forma general el incremento de temperatura superficial del océano y la acidificación del mismo. Por lo tanto, resulta importante entender su capacidad de respuesta en esta región templada, caracterizada por la presencia de surgencias. Se analizó la densidad y el grosor de las conchas de mejillón, de tres localidades contrastes oceanográficamente de la costa oeste de Baja California, a partir del cálculo de la tasa de calcificación y la determinación de la intensidad de los eventos de surgencia, así como las diferencias en la temperatura superficial del agua de mar (TSM) y concentración de Clorofila α (Chl α). La metodología en este estudio incluyó el análisis de parámetros oceanográficos entre los años 1983-2013 de Bajamar (BM), Ejido Eréndira (ER) y Punta Baja (PB), con el objetivo de entender la dinámica y diferenciar la influencia de los procesos oceanográficos, tales como los eventos de surgencia. Se obtuvieron las series de tiempo mensuales y anuales de la TSM a partir los sensores AVHRR y MODIS-aqua, así como las de la concentración de Chl α a partir de los sensores SeaWiFS y MODIS-aqua. Se determinó la relación de la temperatura superficial del mar (TSM) y la concentración de la Chl α , y se calculó la relación porcentual de los mismos. En forma paralela, se procesaron 480 organismos incluidos en intervalos de talla desde 2 cm y mayores 10 cm, correspondientes a muestras preservadas de 2006 y recolectadas en 2014. Se realizó un análisis densitométrico de las conchas, se determinó el grosor en la región del umbo y se calculó la densidad de la región de interés (ROI). A partir de estos resultados, se determinó la edad, tasa de crecimiento y tasa de calcificación mensual de los organismos. Los valores promedio anuales de TSM y de la concentración de Chl α presentaron una variabilidad que osciló de los 15 a 21°C y 0.8 a 4 mg cm⁻³, respectivamente. La relación porcentual de la TSM y la concentración de Chl α en las tres localidades estudiadas, mostró que la mayor relación se observó en la localidad de ER, esto quiere decir que es el sitio con eventos de surgencia de más intensidad. El análisis densitométrico mostró que, no se observaron diferencias significativas del grosor entre sitios así como entre los años de colecta. La edad de los organismos muestreados durante las distintas temporadas osciló entre los 1.1 y 5.1 años. La tasa de crecimiento promedio osciló entre 4.21 y 4.59 cm/año. La tasa de calcificación promedio durante el periodo 2004-2013 fue 0.43 ± 0.04 gCaCO₃cm⁻³mes⁻¹, 0.52 ± 0.16 gCaCO₃cm⁻³mes⁻¹, 0.51 ± 0.09 gCaCO₃cm⁻³mes⁻¹ para BM, ER y PB, respectivamente, siendo BM el sitio con menor tasa de calcificación y ER el de mayor. Se observó una tendencia negativa en la tasa de calcificación en las tres localidades muestreadas, la cual se asocia la disminución de la TSM debida al periodo de enfriamiento reportado en la región por diversos autores, así como a los eventos ENOS presentes durante la última década.

DEDICATORIAS

A mis padres y hermanita, por todo el amor, apoyo y confianza depositada en mí, por caminar cada paso a mi lado y levantarme en los momentos más difíciles, por alentarme a ser mejor persona, por enseñarme todo lo que se y a ser quien soy. Los amo

A mi compañero y cómplice en la vida Octavio, por siempre estar a mi lado. Te amo.

A mi familia, Nana, tías, tíos y primos, gracias por siempre regalarme una sonrisa y los mejores momentos de mi vida.

A mis ángeles (Abue Goyita, Tata, abuelito Leonel, abuelita Juanita, Rubén y Aarón) que acompañan, guían y cuidan mi camino. Los amo y extraño.

*Tras las sombras de la duda, ya plateadas ya sombrías,
puede, bien surgir el triunfo no el fracaso que temías,
y no es dable a tu ignorancia figurarte cuan cercano,
puede estar el bien que anhelas y que juzgas tan lejano.
Lucha, pues por más que tengas en la brega que sufrir,
cuando todo este peor, más no debemos insistir,*

Anónimo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Eugenio J. Carpizo Ituarte, por creer en mí, apoyarme y guiarme en este trabajo, por su amistad y enseñanza, y sobre todo por ayudarme a crecer como persona.

A la Dra. Tatiana N. Olivares, primeramente por ser una buena amiga, consejera y guía, por jalarme las orejas cuando lo necesité, por escucharme, orientarme y tener toda la disposición de ayudarme y enseñarme. Eres una excelente investigadora, amiga y persona.

Al Dr. Eduardo Santamaría, por su amistad, confianza, tiempo y dedicación, por alentarme en cada paso de esta etapa en mi vida. Porque cada regaño, palabra de aliento y enseñanza, hicieron de mí una persona segura y diferente, porque siempre creyó en mí y no me permitió darme por vencida. Recupérate pronto

Al M.C. Roberto Escobar Fernández, por su apoyo y enseñanzas en el campo, por el tiempo de dicado a mi trabajo.

Al M.C. Carlos Orión Norzagaray López, por su amistad, por el tiempo y paciencia dedicados a enseñarme, por todos los consejos y aportaciones a este trabajo, porque sin su apoyo no lo hubiera logrado.

A mis compañeros y amigos del laboratorio Jimena, Viri (Santiago), Quetza, Julia, Carlos, Alejandro y Javier G. Pámanes, por su amistad, apoyo, consejos, momentos de relajación diversión y esparcimiento. Porque juntos somos ECODEL. En especial a Jimena por todos los momentos que compartimos en campo y laboratorio, por apoyarme y ser mi cómplice de trabajo, y una gran amiga.

A mis amigos y compañeros en la maestría Sofi, Ricardo, Lore, Mariana y Patricia Alvarado, por ser mis cómplices en los momentos malos y buenos, por las risas, palabras de aliento, ayuda y apoyo incondicional. Porque juntos no nos volvimos locos. Gracias por lo momentos de relajación y la convivencia diaria.

A mis amigos y compañeros de locuras, Paola, Sheila, Luis Alejandro, Ana Lucía, Cristina (Wera), Tenoch, Liz, Vladi, Beto, Anabel, Uriel y Caro, por siempre estar ahí, por ser tan buenos amigos y personas, por las risas, fiestas, comidas, viajes y todos los años compartidos, porque sin ustedes no sería esta loca persona que tanto los quiere.

A mi Bichita (hermana), por ser la mejor hermana y amiga del mundo, por siempre darme una palabra de aliento, tú me das fuerza.

A Octavio, mi novio, mejor amigo, cómplice, compañero y consejero, por aguantar mis locuras y malos ratos, por siempre escucharme y darme una palabra de aliento, por ser paciente y no dejarme caer, te amo.

Al CONACYT por otorgarme la beca No. 276210.

Al proyecto “Genes de respuesta al estrés como bioindicadores para evaluar el efecto del cambio global en organismos estructuradores del bentos en el Pacífico Mexicano”, Proyecto Ciencia Básica Conacyt 2012, No. 181597, responsable: Dr. Eugenio de J. Carpizo Ituarte.

Al proyecto “Ecología genómica de organismos del Pacífico Mexicano”, Proyecto Interno IIO-UABC, Clave 403/431, responsable: Dr. Eugenio de J. Carpizo Ituarte.

A todos aquellos que estuvieron conmigo, profesores, compañeros, técnicos y todos a quienes olvide mencionar.

Índice

I. RESUMEN	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	XI
1. Introducción general	1
1.1 Justificación	13
1.2 Hipótesis	14
1.3 Objetivo general	15
2. Área de estudio	16
2.1 <i>Bajamar (BM)</i>	18
2.2 <i>Ejido Eréndira (ER)</i>	19
2.3 <i>Punta Baja (PB)</i>	20
3. Materiales y métodos	21
3.1 <i>Condiciones oceanográficas</i>	21
• Serie de tiempo TSM 1983-2013.....	21
• Serie de tiempo [Chl α] 1998-2013.....	22
• Relación TSM/[Chl α].....	23
• Índice Antares.....	23
3.2 <i>Recolecta de organismos</i>	24
3.3 <i>Densitometría</i>	26
3.4 <i>Grosor</i>	29
3.5 <i>Parámetros de crecimiento</i>	32
3.6 <i>Series temporales de la calcificación</i>	35
4. Resultados	36
4.1 <i>Condiciones oceanográficas</i>	36
• Serie de tiempo [Chl α] 1998-2013	39
• Relación TSM/[Chl α].....	42
• Índice Antares.....	43

4.2	<i>Parámetros de crecimiento</i>	44
•	Grosor del umbo.....	44
•	Edad	46
•	Tasa de crecimiento.....	47
•	Tasa de Calcificación mensual	47
•	Análisis Clúster TSM-concentración de Chl α -TC	50
5.	Discusión	52
6.	Conclusiones	58
7.	Referencias	59

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
1	Valores de la anomalía de la TSM (MEI) para el periodo comprendido entre 2002 y 2014 (Modificado de Oceanic Niño Index, 2014	5
2	Estructura de la concha de mejillón <i>M. californianus</i> (Modificado de Marin et al. 2012).	7
3	Mejillón californiano (<i>Mytilus californianus</i>).	8
4	Ubicación espacial de los sitios de muestreo a lo largo de la costa de Baja California, México.	17
5	Panorama de la configuración espacial del intermareal rocoso de Bajamar, Baja California, México.	18
6	Panorama de la configuración espacial del intermareal rocoso de Ejido Eréndira, Baja California, México.	19
7	Panorama de la configuración espacial del intermareal rocoso de Punta Baja, Baja California, México.	20
8	Ubicación de las estaciones para obtención de datos oceanográficos ubicadas 5 km alejadas de la costa.	21
9	A) Zona del intermareal bajo, la línea muestra la separación entre el intermareal alto (parte superior) y bajo (parte inferior). B) <i>Mytilus californianus</i> colocados por intervalo de talla.	25
10	Conchas del mejillón <i>Mytilus californianus</i> lavadas y secadas a temperatura ambiente durante 48 horas.	26

LISTA DE FIGURAS (continuación)

11	A) Imagen de Rayos X con escala de aragonita de concha de almeja <i>Tridacna máxima</i> . B) Selección de región de interés para análisis de densidad. C) Serie de datos de densidad obtenidos con el programa ImageJ donde se muestran los valores de la escala de gris (0-255) de la región de interés (ROI) de cada muestra.	28
12	Cortadora de cierra de diamante utilizada para el corte de conchas de mejillón. Los cortes se realizaron en el Lab. De Esclerocronología, Ecología y Pesquerías de la Zona Costera (CICESE) a cargo del Dr. Luis E. Calderón Aguilera.	29
13	A) Imagen de conchas de mejillón escaneadas. B) Serie de datos obtenidos de la medición cada ~0.5 cm a lo largo del corte de la concha. La selección en rojo muestra región del umbo, y las mediciones a lo ancho del corte.	31
14	Curva de crecimiento proyectada para <i>M. californianus</i> , en la costa occidental de Baja California (Tomada de Chi-Barragán y García-Pámanes, 1983).	34
15	Serie de tiempo del promedio mensual de TSM a 5 km de la costa en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México, de 1983 a 2013 La selección representa el periodo de vida de los organismos muestreados en 2006 y 2014.	37
16	Serie de tiempo del promedio anual de TSM a 5 km de la costa en tres localidades de la costa occidental de Baja California, Baja California, México, de 1983 a 2013. La selección representa el periodo de vida de los organismos muestreados en 2006 y 2014.	38
17	Serie de tiempo del promedio mensual de la concentración de Chl α a 5 km de la costa en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México, de 1998 a 2013. El rectángulo en rojo representa el periodo de vida de los organismos muestreados en 2006 y 2014.	40

LISTA DE FIGURAS (continuación)

18	Serie de tiempo del promedio anual de la concentración de Chl α a 5 km de la costa en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México de 1998 a 2013. El rectángulo en rojo representa el periodo de vida de los organismos muestreados en 2006 y 2014.	41
19	Relación del promedio anual de la TSM y la concentración de Chl α , en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México.	42
20	Relación porcentual del promedio anual de la TSM y la [Chl α] en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México, de 1998 a 2013. La línea negra marca el valor porcentual correspondiente a 0.7, el cual determina una relación positiva entre las condiciones oceanográficas y los eventos de surgencia.	43
21	Serie de tiempo del promedio anual de la tasa de calcificación de los organismos muestreados durante 2006 y 2014 en las tres localidades de estudio. Las líneas punteadas muestran la tendencia de la tasa de calcificación.	49
22	Análisis de Cluster mediante la técnica de ligamiento promedio no ponderado. Donde <i>tsm a</i> , identifica la TSM alta; <i>chla a</i> , la concentración de Chl α , <i>TC a</i> , la tasa de calcificación alta; <i>tsm b</i> , la TSM baja; <i>chla b</i> , la [Chl α] baja; y <i>TC b</i> , la tasa de calcificación baja.	51
23	Anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México, de 2004 a 2013. La selección en amarillo representa el periodo de disminución de la temperatura máxima 2009-2011.	54

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>		<i>Página</i>
1	Grosor promedio del la region correspondiente al umbo (~1.5 cm) indicada para cada localidad de estudio y año de colecta.	45
2	Edad promedio de los organismos muestreados en los periodos correspondientes por intervalo de talla.	46
3	Tasa de crecimiento promedio correspondientes a cada localidad de estudio y año de colecta respectivamente.	47
4	Promedio mensual de la tasa de calcificación correspondiente a cada localidad de estudio y año de colecta respectivamente.	48

1. Introducción general

El océano absorbe cerca del 25% del CO₂ que se produce en el planeta, y actualmente se encuentra en una concentración entre 350-450 ppm (Hoppe *et al.*, 2012; IPCC,2013), sin embargo, la evidencia sugiere que la fracción de este gas en suspensión en el aire debida a emisiones antropogénicas se ha incrementado cada año durante los últimos 50 años, aproximadamente un 45 % (Le Quéré *et al.*, 2009), lo cual trae como consecuencia una reducción de la eficiencia del océano como sumidero de CO₂ (Canadell *et al.*, 2007), causando efectos en los ecosistemas, tales como elevación en la temperatura superficial, eutrofización e hipoxia (Hans-O., 2008).

Como resultado de lo anterior, la química del océano también se está modificando y una de sus consecuencias es lo que se ha denominado la acidificación del océano. La acidificación en el océano es un proceso causado por el aumento de CO₂ en la atmósfera, el cual modifica las propiedades químicas del agua, incrementando el CO₂ acuoso (CO_{2(aq)}), lo cual produce una disminución en el pH, así como en la concentración de ion carbonato (CO₃²⁻), y nivel de saturación de aragonita (Ω_{arag}) y calcita (Ω_{cal}) (Zeebe, 2012), incrementando la solubilidad del carbonato de calcio. La aragonita es al menos un 50% más soluble en el agua de mar que la calcita, lo cual sugiere que los organismos que requieren ésta especie de carbonato, durante sus distintas etapas de desarrollo se verán afectados. Cuando $\Omega_{arag} > 1$, el agua de mar está

sobresaturada, mientras que $\Omega_{\text{arag}} < 1$ caracteriza un estado de subsaturación. Actualmente, casi la totalidad de las aguas superficiales del océanos se encuentran sobresaturadas con respecto a la aragonita (Ω_{arag} de ~ 3.0), sin embargo, las regiones de surgencia tienen un pH naturalmente bajo y sustancialmente menor, debido a que estas aguas se encuentran enriquecidas en CO_2 como efecto de la remineralización de la materia orgánica en el fondo del océano (Gruber et al. 2012).

Algunas estimaciones sugieren que el pH ha disminuido ~ 0.1 y ~ 0.4 Ω_{arag} (Gruber et al. 2012). A pesar de que el carácter corrosivo de estas aguas es el resultado natural de los procesos de respiración en profundidades intermedias por debajo de la zona eufótica, esta región sigue acumulando CO_2 antropogénico y, por lo tanto, los procesos de surgencia exponen a los organismos costeros de estas zonas a aguas subsaturadas con respecto a los carbonatos, lo que agrava los efectos biológicos de la acidificación de los océanos (Feely et al. 2008).

En esta condición se encuentra lo que se conoce como El Sistema de la Corriente de California (**SCC**), el cual es particularmente vulnerable a la acidificación debido a las abundantes surgencias. Observaciones recientes en el SCC muestran que las regiones cercanas a la costa se encuentran mayormente expuestas a condiciones químicas previstas para el océano en situaciones proyectadas hasta varias décadas en el futuro, lo cual facilita la apreciación en estas zonas, de los posibles efectos en los organismos (Hauri et al., 2008).

El SCC está localizado principalmente en la región oceánica de la costa oeste de Norte América, y se extiende aproximadamente desde el Estrecho de Juan de Fuca (Canadá) hasta la Península de Baja California (México) (Hickey, 1998). Está constituido por una corriente superficial con dirección al Ecuador llamada Corriente de California (CC), por la Subcorriente de California (CU) la cual presenta un flujo subsuperficial con dirección hacia el polo norte y por la Contracorriente de California (CCC) que es costera y con una estacionalidad intermitente. Estas corrientes cambian en intensidad a escalas estacionales e interanuales debido a su interacción con varios procesos océano atmosfera (Lynn y Simpson, 1987).

El limite sureño del SCC se encuentra en la región oceánica frente a la costa occidental de la Península de Baja California, caracterizada por surgencias en respuesta a vientos a lo largo de la costa, un flujo superficial predominante hacia el ecuador y una contracorriente subsuperficial dirigida hacia el polo que fluye a lo largo de la talud continental (Durazo, *et al.* 2010). Esta interacción genera el desplazamiento de agua superficial hacia afuera de la costa, la cual debe ser reemplazada con agua profunda fría y rica en nutrientes. Estos eventos tienen una intensidad máxima de abril a junio, con un índice de surgencia costera de 50 a 300 m³/s por cada 100 m de costa. Su intensidad puede variar de acuerdo a las condiciones locales de viento y de la topografía del fondo (Hickey, 1979). La fuerte variabilidad estacional e interanual de estos eventos se ve reflejada en la biomasa del fitoplancton, caracterizada por concentraciones menores en los

meses de otoño e invierno (máximos entre 0.5 a 1.0 mg m⁻³) y mayores en primavera y verano (máximos entre 2.0 y 5.0 mg m⁻³) (Gaxiola-Castro *et al.* 2010).

Se identifican dos provincias, al norte y al sur de Punta Eugenia, diferenciadas debido a la circulación profunda (200/500 dbar). La provincia norte se caracteriza como de dominio subártico debido a la dominancia de agua de ese origen durante todo el año, con aguas costeras de relativamente baja salinidad (~33.5) y temperatura (14°-19°), y alto contenido de oxígeno. La región sur muestra una alternancia entre el dominio subártico, con las características antes mencionadas durante el invierno y primavera, o tropical-subtropical, durante verano y otoño. Así mismo en la región norte las surgencias persisten todo el año, mientras que en la región sur son más evidentes en primavera y verano (Durazo, *et al.* 2010). Se ha reportado que la región norte puede funcionar como fuente (verano-otoño) o sumidero (invierno-primavera) de CO₂ atmosférico (Hérendez-Ayón *et al.* 2010).

De igual forma durante las últimas décadas se han reportado en el SCC importantes cambios en las condiciones oceanográficas, debido a eventos como el Niño, caracterizado por aguas más salinas y cálidas; y la Niña, evento en el cual se observan etapas de relativa baja temperatura y salinidad (Fig. 1) (Ocenic Niño Index, 2014).

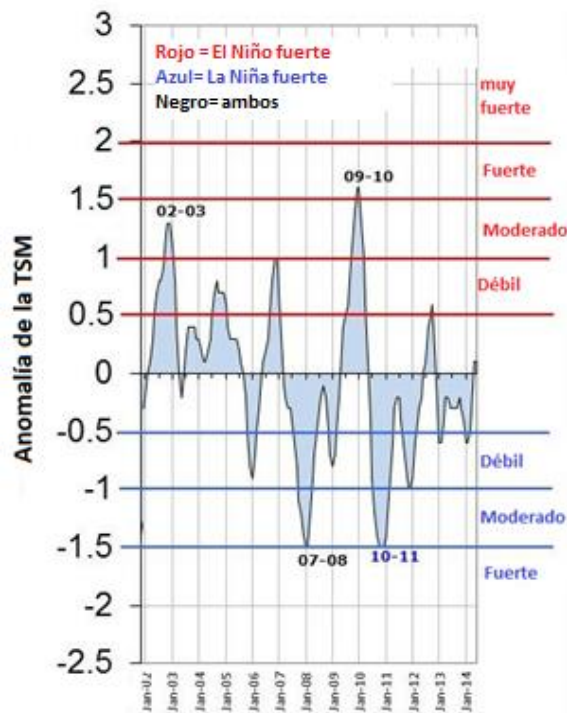


Figura 1. Valores de la anomalía de la TSM (MEI) para el periodo comprendido entre 2002 y 2014 (Modificado de Oceanic Niño Index, 2014).

El medio ambiente pelágico frente a Baja California es un ecosistema que soporta una red trófica abundante, el cual exhibe afloramientos costeros estacionales, modulados por la intensidad del viento, aunque la topografía local y características propias del ambiente costero juegan un papel importante en su variabilidad, estos aspectos tienen impactos significativos en la diversidad y abundancia de las poblaciones de invertebrados y peces que viven en estas latitudes (Gaxiola-Castro y Durazo, 2010).

Por otra parte, los moluscos en general, tienen una gran importancia ecológica y económica, son considerados reguladores de flujos de nutrientes y energía en

ecosistemas costeros, proveen de hábitat a una gran cantidad de organismos bentónicos, y forman parte importante de la cadena trófica. Así mismo son organismos calcificadores.

Los moluscos emplean el carbonato de calcio amorfo y la aragonita como la forma principal de biomineralización de CaCO_3 , en estadios larvales, y calcita y aragonita en adultos, dependiendo de la especie (Skinner y Jahren, 2003). Independientemente del origen taxonómico, forman sus valvas a partir de la superposición de algunas capas calcificadas, generalmente de dos a cinco y una capa orgánica (periostraco) (Fig. 2) (Marin *et al.*, 2012). Utilizan el periostraco y las células epiteliales del manto para la formación de las valvas. Asimismo, elaboran una matriz comprendida principalmente de quitina-b, una proteína de seda hidrofóbica y un complejo de proteínas hidrófilas ricas en ácido aspártico, así como los minerales antes mencionados (Addadi *et al.*, 2006). Los cristales crecen en forma preferencial definiendo texturas características de cada especie o género, variando de una posición a la otra de las valvas o a lo largo del espesor de los mismas. En algunos casos ambas estructuras cristalográficas se hallan presentes en las diferentes capas, en otras la valva se presenta totalmente calcítica u aragonítica (Chateigner *et al.*, 2000).

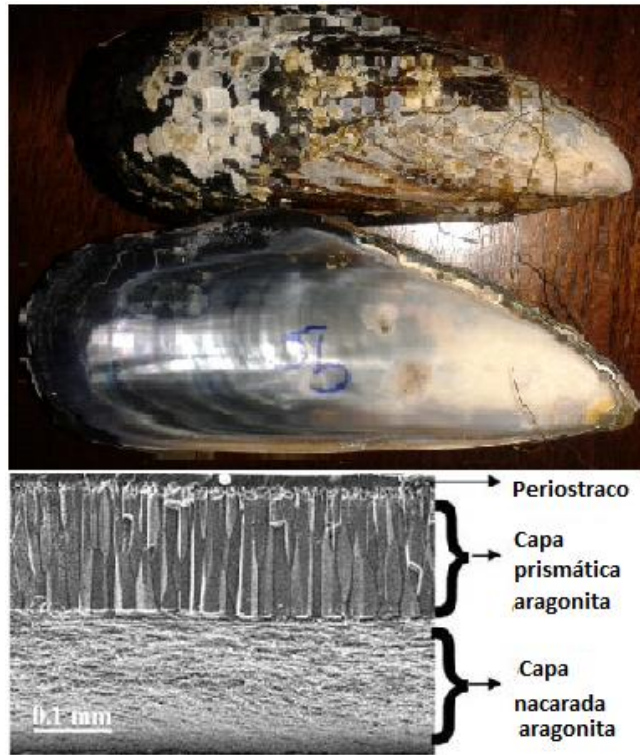


Figura 2. Estructura de la concha de mejillón *M. californianus* (Modificado de Marin et al. 2012).

Dentro de los moluscos, el mejillón californiano *Mytilus californianus*, también denominado “choro”, es una especie ingeniera en el intermareal rocoso de Baja California. El género *Mytilus* pertenece a la familia de Mytilidae, la cual data del Jurásico y originalmente consideraba un total de 22 especies, las cuales actualmente han sido asignadas a distintos géneros y únicamente 4 pertenecen a éste: *Mytilus californianus* (mejillón de California), *M. edulis* (mejillón azul), *M. galloprovincialis* (mejillón del Mediterráneo) y *M. trossulus*. Los mejillones son moluscos bivalvos que habitan las costas del mundo y se cultivan con fines de consumo humano.

El mejillón californiano (*M. californianus*), se distribuye desde las Islas Aleutianas en Alaska, hasta la Isla Socorro en México (Chi-Barragán y García Pámanes, 1983). Esta distribución está limitada principalmente por las temperaturas de congelación hacia el norte y la alta temperatura del agua al sur (Schmidt, 1999).

Mytilus californianus, es un molusco bivalvo, de concha triangular, la cual se puede distinguir fácilmente de otras especies debido a que es muy gruesa, de color azulado en el periostraco, y presenta una composición que contiene un 83 % de aragonita, su carne es de color naranja brillante, en comparación al color marrón de otros mejillones. Al igual que las otras especies presenta una glándula del biso que genera las fibras por medio de los cuales el organismo se mantiene sujeto al sustrato; en *M. californianus* estas estructuras son más fuertes, ya que habita el intermareal rocoso, en donde la fuerza del oleaje es alta (Fig. 3) (Schmidt, 1999).



Figura 3. Mejillón californiano (*Mytilus californianus*).

Este bivalvo coloniza exitosamente el hábitat rocoso, formando bancos homogéneos al ocupar casi la totalidad del sustrato disponible cuando no está sujeto a la depredación intensa, perturbaciones o explotación (Chi-Barragán y García Pámanes, 1983). A pesar de ser dominante en la mayoría de las áreas que habita, se ha estimado que puede tomar entre 5 y 100 años recolonizar un sitio, por lo que en virtud de su papel como especie clave en la comunidad resulta crítico el adecuado manejo del recurso con base en el conocimiento de los procesos que regulan la estructura y la dinámica de la población, de sus principales depredadores y de la comunidad en su conjunto (Schmidt, 1999).

El mejillón *M. Californianus*, tiene una clara preferencia por las costas expuestas, lo cual es debido a su poca tolerancia a baja salinidad y sedimentación. Las agrupaciones más altas de esta especie se encuentran en la zona intermareal entre los 2.4 y 3 m por encima de la línea de bajamar inferior, lo cual varía estacionalmente debido a la temperatura (Paine 1974) y en función de la ubicación geográfica. Los límites inferiores de *M. californianus* en la zona intermareal son determinados por la presencia de depredadores, principalmente la estrella de mar, *Pisaster ochraceus*. Por debajo de la zona intermareal, esta especie de mitílido se ha observado a profundidades de 30 m y hasta 100 m (Schmidt, 1999), sin embargo, estas camas submareales no son continuas (Paine, 1976) y se producen en parches muy aislados.

El mejillón californiano presenta sexos separados con fertilización externa y de acuerdo a los pocos registros que se tienen para las costas de Baja California,

se reproduce principalmente a finales de otoño y primavera, aunque parece mantener un nivel bajo de actividad reproductiva durante todo el año (Rojas-Guiot y Santiago-Bravo, 1982). El desarrollo larvario dura alrededor de cuatro semanas y es afectado por la temperatura, la baja salinidad y la disponibilidad de alimento (Anguiano Beltrán, 1989). La abundancia de larvas en la zona costera presenta importantes variaciones espaciales y temporales (Olguín-Espinoza, 1983).

Las tasas de crecimiento en *M. californianus* pueden variar debido a la temperatura del agua, la salinidad, tipo de sustrato, disponibilidad de alimento, elevación en la zona intermareal y el hacinamiento en relación del banco de mejillones. De acuerdo con estudios previos realizados por Chi-Barragán y García-Pámanes (1983), el choro, crece aproximadamente ~4.5 cm/año en la región de Baja California, y su máximo crecimiento se observa durante los meses fríos (17-20°C) y disminuye durante los meses cálidos ($T > 20^{\circ}\text{C}$). Cuanta más alta es la posición en la zona intermareal, más lenta es la tasa de crecimiento, esto debido a que el mejillón está expuesto al aire durante un mayor período de tiempo, reduciendo el tiempo que pasa alimentándose y respirando. Se sugiere que la edad máxima de esta especie oscila entre 50 y 100 años en poblaciones que no han sido alteradas (Shaw *et al.* 1988).

Los mejillones se han establecido como una de las especies indicadoras más utilizados para vigilancia del medio ambiente, debido a su gran abundancia, dispersión, ciclo de vida y tipo de alimentación (por filtración).

Estudios previos que investigan el impacto de la acidificación del océano en mejillones han demostrado que la reducción en el pH del agua de mar tiene un impacto significativo y con frecuencia negativo en estos bivalvos. Michaelidis y colaboradores (2005) demostraron que los mejillones adultos de la especie *M. galloprovincialis*, redujeron su tasa metabólica y el aumento de la degradación de proteínas cuando se expusieron a la reducción del pH del agua de mar. En contraste Thomsen y Melzner (2010) demostraron que mejillones de la especie *M. edulis* durante una exposición de 2 meses, a un aumento de pCO₂ (380, 1120, 2400 y 4000 µatm) no muestran supresión metabólica global; sin embargo, estos autores observaron un aumento del metabolismo de proteínas, disminución de longitud de concha y reducción de la masa de la concha. Además también se ha demostrado que la acidificación del océano tiene efectos tales como reducción del crecimiento (Berge *et al.*, 2006), disminución en la tasa de calcificación (Gazeau *et al.*, 2007), disminución en la función inmune (Bibby *et al.*, 2008) y alteraciones en la salud de los organismos (Beesley *et al.*, 2008) en el género *Mytilus*.

Las primeras etapas del ciclo de vida se consideran en general más vulnerables que la etapa adulta ante las perturbaciones ambientales. Gazeau y colaboradores (2010) demostraron que las larvas de mejillón expuesto a un aumento de pCO₂, tenían conchas más pequeñas y delgadas después de 2 días de desarrollo. Estos cambios en las etapas tempranas de la vida podrían tener

un considerable efecto en la dinámica de la población en general, y por lo tanto en el funcionamiento del ecosistema en su conjunto.

Smith y colaboradores (2006), realizaron un estudio en el cual reportaron una disminución de la diversidad de especies para el caso del mejillón *M. californianus* entre los años 1960,1970 y 2002, con el 58,9 % de esta pérdida media de la diversidad, la cual atribuyen al cambio global. Teniendo en cuenta este resultado y la comprensión de los cambios climáticos proyectados, tales como el aumento en la temperatura y la reducción en el pH del agua de mar podrían tener un efecto considerable sobre la biodiversidad de la comunidad y el funcionamiento del ecosistema.

1.1 Justificación

Los impactos negativos debido al cambio climático en los mejillones no sólo tendrían un impacto en la biodiversidad costera y funcionamiento de los ecosistemas, sino que además se traduciría en pérdida económica significativa (Cooley y Doney, 2009; Gazeau *et al.*, 2007). La importancia de los mejillones, tanto económica como ecológica en Baja California, nos urge a la necesidad de investigar el impacto de los factores estresantes asociados al cambio global en estas comunidades costeras.

Por esta razón es importante conocer el efecto debido a los eventos de surgencia en la composición de las poblaciones de mejillón en la región, siendo este proceso físico uno de los más importantes y prevalecientes en la zona, el cual como ya se ha mencionado produce de forma natural cambios en la composición química del agua de mar. Lo anterior sumado al aumento del CO₂ refleja cambios importantes y por lo tanto produce efectos en las poblaciones que habitan la región. Tal es el caso del mejillón *M. californianus* el cual es objeto de estudio debido a su abundancia e importancia económica. La información resultante de este trabajo pretende resaltar los efectos de los eventos de surgencia en las conchas de mejillón, como reflejo del cambio químico en el agua de mar al que han sido sometidos a lo largo del tiempo.

1.2 Hipótesis

Como resultado de la presencia de surgencias, se espera observar un cambio en la tasa de calcificación de las conchas de mejillón *M. californianus*, en tres localidades distintas de la costa oeste de Baja California, las cuales se encuentran influenciados en distinta magnitud por surgencias y se caracterizan por procesos tales como variaciones en la Temperatura Superficial (**TSM**) y concentración de Clorofila α (**[Chl α]**).

1.3 **Objetivo general**

Relacionar el efecto de la presencia de eventos de surgencia y condiciones oceanográficas, con las características de la concha (densidad y grosor) de mejillón *Mytilus californianus*, en tres regiones contrastantes en la costa Oeste de Baja California.

1.3.1 **Objetivos particulares**

- Analizar la densidad y grosor de las conchas de mejillón *M. californianus* de Baja Mar, Ejido Eréndira y Punta Baja en muestras preservadas del 2006 y recolectadas durante 2014.
- Determinar y diferenciar la tasa de calcificación de las muestras preservadas de 2006 y recolectadas durante 2014.
- Determinar el proceso oceanográfico con mayor influencia en la calcificación de los mejillones.

2. Área de estudio

Para este estudio se establecieron tres sitios a lo largo de la costa occidental de Baja California, diferenciados debido a sus características oceanográficas contrastantes (Fig. 4). Los muestreos se realizaron en los años 2006 y 2014. Los muestreos realizados durante 2006, formaron parte del proyecto titulado “Caracterización de las poblaciones de *Mytilus californianus* y *Pisaster ochraceus*, especies estructuradoras de la comunidad del intermareal rocoso y que son explotadas a lo largo de la costa Pacífico de Baja California” (10^a Conv. de Proy. de Investigación UABC a cargo del Dr. Eugenio Carpizo Ituarte). Las localidades y su ubicación de norte a sur fueron:

- Bajamar (**BM**) (31°55'25.38"N, 116°45'20.12"O)
- Ejido Eréndira (**ER**) (31°17'31.40"N, 116°24'49.80"O)
- Punta Baja (**PB**) (29°57'31.54"N, 115°48'33.55"O)



Figura 4. Ubicación espacial de los sitios de muestreo a lo largo de la costa de Baja California, México.

2.1 *Bajamar* (BM)

Localidad situada a 30 km al norte del puerto de Ensenada, y 5 km al sur de la marina de La Salina ($31^{\circ}58'49''$ N, $116^{\circ}47'38'$ O). Forma parte de la extensión del litoral rocoso que se prolonga por más de 20 km desde la playa de La Salina, al norte, hasta la playa Salsipuedes. Está caracterizado por una terraza costera expuesta al oleaje intenso. La orientación con vista al mar es hacia el suroeste, y su intermareal se extiende por más de 40 m, a través de una pendiente pronunciada de más de 30 grados de elevación (Peña-Mejía, 2011).



Figura 5. Panorama de la configuración espacial del intermareal rocoso de Bajamar, Baja California, México.

2.2 *Ejido Eréndira* (ER)

Se sitúa a 60 km al sur de Ensenada, B.C. ($31^{\circ}16'41''$ N, $116^{\circ}22'16''$ O). Su costa esta semiexpuesta a la energía del oleaje y su orientación hacia el mar es suroeste. Su plataforma se extiende hasta por 30 m (Peña-Mejía, 2011).



Figura 6. Panorama de la configuración espacial del intermareal rocoso de Ejido Eréndira, Baja California, México.

2.3 *Punta Baja (PB)*

Localizada a la mitad de la costa occidental de Baja California, 50 km al sur de la Bahía de San Quintín y 15 km al suroeste del poblado El Rosario ($29^{\circ}57'15''$ N, $115^{\circ}48'35''$ O). Con pendiente menor a 15 grados, que presenta significativa exposición al oleaje con orientación al noroeste y su zona intermareal se extiende por más de 100 m (Peña-Mejía, 2011).



Figura 7. Panorama de la configuración espacial del intermareal rocoso de Punta Baja, Baja California, México.

3. Materiales y métodos

3.1 Condiciones oceanográficas

Se realizó una serie de tiempo de temperatura superficial del mar (TSM) y concentración de Clorofila a [Chl α], de Bajamar, Ejido Eréndira y Punta Baja respectivamente.

- Serie de tiempo TSM 1983-2013

Se obtuvieron datos de TSM de Bajamar, Ejido Eréndira y Punta Baja, de dos sensores remotos distintos (AVHRR y MODIS-aqua), con una estación alejada 5 km de la costa (Fig. 8). Se realizó una regresión lineal de ambos sensores con el fin eliminar las diferencias debidas al sensor al que correspondían y la hora del día a la que fueron tomadas dichas temperaturas.



Figura 8. Ubicación de las estaciones para obtención de datos oceanográficos ubicadas 5 km alejadas de la costa.

Se graficó la serie de tiempo anual y mensual de cada sitio, con el fin de comparar las diferencias entre sitios. Así mismo se calculó la climatología, es decir el año promedio, el cual se comparó con la serie de tiempo mensual, para observar los cambios del comportamiento de la temperatura en el tiempo. Se realizó además una comparación del mínimo y máximo (anomalía de la temperatura) de temperatura con respecto al tiempo, el cual refleja si la temperatura tiende a disminuir o aumentar. Finalmente, se comprobaron las diferencias estadísticamente significativas entre sitios, aplicando el estadístico de Wilcoxon para dos muestras independientes con la corrección de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

- Serie de tiempo [Chl α] 1998-2013

Se obtuvieron datos de [Chl α] de Bajamar, Ejido Eréndira y Punta Baja, de dos sensores remotos distintos (SeaWiFS y MODIS-aqua), con una estación alejada 5 km de la costa (Fig. 8). Se realizó una regresión lineal de ambos sensores con el fin de eliminar las diferencias debidas al sensor al que correspondían y la hora del día a la que fueron tomadas dichas temperaturas.

Se graficó la serie de tiempo anual y mensual de cada sitio, con el fin de comparar las diferencias entre ambos sitios. Así mismo se calculó la climatología, es decir el año promedio, el cual se comparó con la serie de tiempo mensual, para observar los cambios del comportamiento de la [Chl α] en el tiempo.

Se comprobaron las diferencias estadísticamente significativas entre sitios, aplicando el estadístico de Wilcoxon para dos muestras independientes con la corrección de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

- Relación TSM/[Chl α]

Se realizó una relación de la TSM y [Chl α], con el fin de asociar las dos variables oceanográficas y observar las diferencias en dichos procesos entre las localidades de estudio.

- Índice Antares

Se realizó el cálculo a partir de una regresión lineal, la relación porcentual de la TSM y [Chl α], con el fin de conocer en que sitio y durante que años hubo una relación entre estas variables, y así determinar si estos procesos son influenciados por los eventos de surgencia o no. De acuerdo con los estudios realizados por Santamaría Del Ángel et al. (En prensa) determinaron que los sitios se encuentran mayormente influenciados por los eventos de surgencia cuando tienen una relación porcentual entre TSM y [Chl α] mayor al 70%.

3.2 Recolecta de organismos

Se realizaron dos muestreos en los sitios seleccionados, los cuales fueron elegidos con las características más similares posibles, pero con influencia contrastante de las surgencias, esto es, se eligieron sitios con fuerte influencia de eventos de surgencia, medio y con bajo efecto de dichos eventos, los cuales se llevaron a cabo durante enero, febrero y marzo del año 2014, utilizando un método de muestreo aleatorio de grupos, misma exposición en el intermareal, así como al oleaje.

La franja de mejillón en el intermareal se dividió en dos estratos (bajo y alto) paralelos a la línea de costa, con el fin de definir cuál era la zona del intermareal bajo, es decir el que se encontraba la mayor parte del tiempo sumergido y solo se expone durante la mayor amplitud de marea (Fig. 9 A).

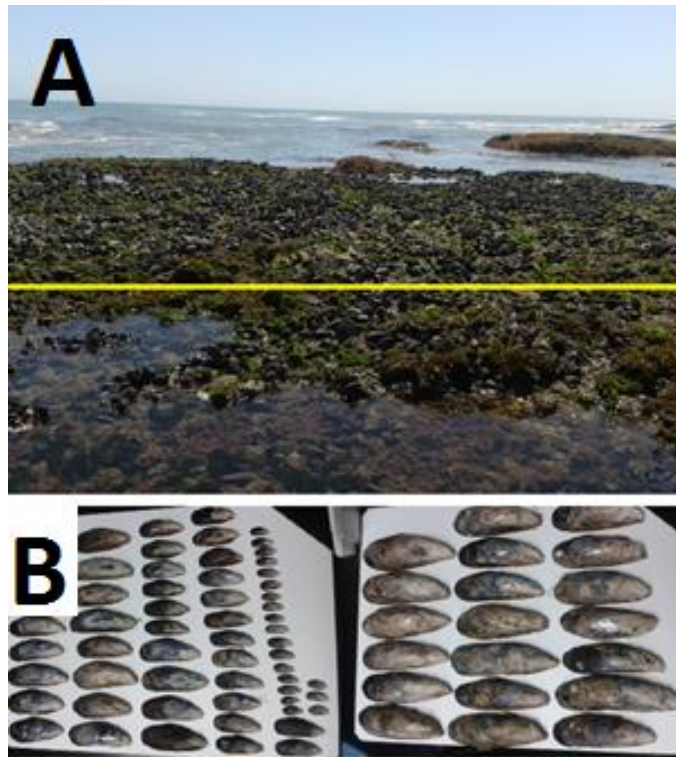


Figura 9. A) Zona del intermareal bajo, la línea muestra la separación entre el intermareal alto (parte superior) y bajo (parte inferior). B) *Mytilus californianus* colocados por intervalo de talla.

Se recolectaron manualmente 240 organismos incluidos en cada unidad de muestreo, los cuales fueron seleccionados en intervalos de talla de 2-4 cm, 5-6 cm, 8-9 cm y >10 cm con el fin de tener un rango de tallas amplio (Fig. 9B). De la misma forma de las muestras preservadas, las cuales fueron recolectadas durante el año 2006 (proy. “Caracterización de las poblaciones de *Mytilus californianus* y *Pisaster ochraceus*, especies estructuradoras de la comunidad del intermareal rocoso y que son explotadas a lo largo de la costa Pacífico de Baja California”, 10ª. Conv. de UABC) se realizó una selección de 240 organismos incluidos en los intervalos de talla antes mencionados.

3.3 Densitometría

En el laboratorio se eliminó la materia orgánica de las conchas, se lavaron con agua dulce y se secaron a temperatura ambiente durante 48 horas para disminuir la humedad en la muestra (Fig.10). Para el análisis densitométrico de las conchas de mejillón, fue ajustada la técnica de acuerdo con lo reportado por Carricart-Ganivet y Barnes (2007) conocida para determinar la densidad esquelética de corales ($\text{g CaCO}_3/\text{cm}^3$). Se utilizó una escala de aragonita, obtenida de concha de almeja *Tridacna máxima* (densidad conocida de: $2.83 \text{ g CaCO}_3/\text{cm}^3$), utilizada para el análisis densitométrico de corales (Carricart-Ganivet y Barnes, 2007).



Figura 10. Conchas del mejillón *Mytilus californianus* lavadas y secadas a temperatura ambiente durante 48 horas.

Se determinó la densidad de la concha de los 480 organismos muestreados, para lo cual se tomaron placas de radiografía utilizando la valva derecha a partir de imágenes de Rayos X con un equipo SEIMENS L550-27, con 52 kVp, 1.0 mAs con un tiempo de exposición de 100s a una distancia focal de 1m. Las radiografías tuvieron una resolución de ~64 pixeles/cm. Al final se obtuvieron un total de 12 radiografías para su análisis posterior.

Posterior a la obtención de las imágenes de los Rayos X se seleccionó una región de interés (**ROI**=región de interés) de 0.4 cm de ancho por el largo de la valva, desde el eje de máximo crecimiento al umbo, utilizando el programa ImageJ 1.48v, para obtener valores de la escala de gris de cada muestra (0-255 valores) (Fig. 11).

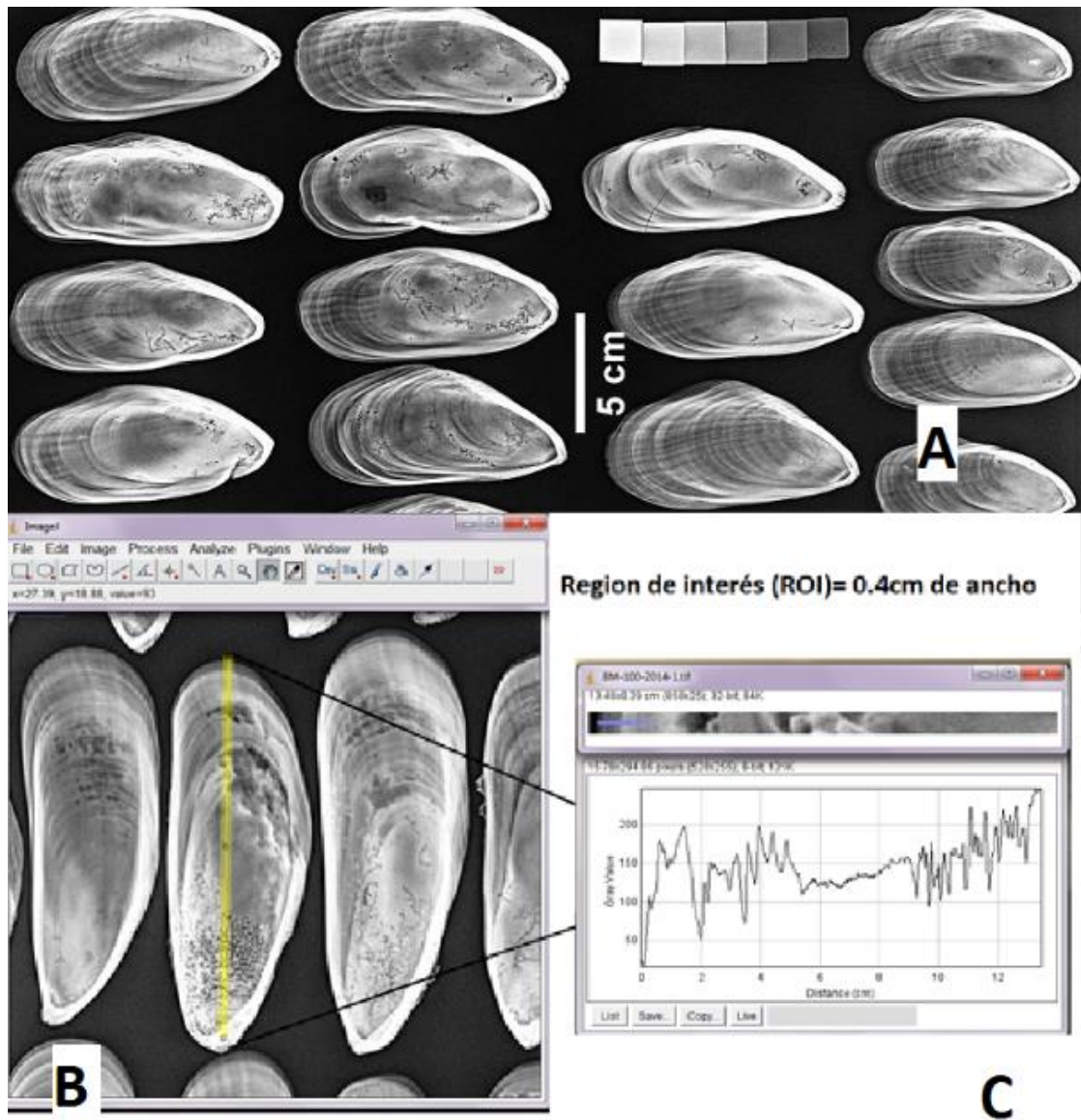


Figura 11. A) Imagen de Rayos X con escala de aragonita de concha de almeja *Tridacna máxima*. B) Selección de región de interés para análisis de densidad. C) Serie de datos de densidad obtenidos con el programa ImageJ donde se muestran los valores de la escala de gris (0-255) de la región de interés (ROI) de cada muestra.

3.4 Grosor

Las conchas se cortaron a lo largo del eje máximo de crecimiento de cada valva derecha, utilizando una cortadora con sierra de diamante (barranca) en el Laboratorio de Esclerocronología, Ecología y Pesquerías de la Zona Costera (CICESE), proporcionada por el Dr. Luis E. Calderón Aguilera (Fig.12). Para este análisis no se pudieron utilizar las muestras correspondientes al intervalo entre 2-3 cm, debido a que no pudieron ser cortadas debido a su pequeño tamaño.



Figura 12. Cortadora de sierra de diamante utilizada para el corte de conchas de mejillón. Los cortes se realizaron en el Lab. De Esclerocronología, Ecología y Pesquerías de la Zona Costera (CICESE) a cargo del Dr. Luis E. Calderón Aguilera.

Posteriormente se escanearon las valvas por la cara del corte, en un escáner HP Photosmart D110 series, obteniendo imágenes con una resolución de ~114 pixeles/cm. Se midió el grosor de cada valva desde el umbo hasta el extremo distal en intervalos de ~0.5 cm (Fig.13).

Finalmente, se realizó una comparación del grosor promedio en la región del umbo (desde el inicio del umbo ~1.5 cm de cada muestra) por intervalo de talla, para cada localidad de estudio y año de colecta. Se probaron la diferencias estadísticamente significativas del grosor del umbo, entre sitios por año de recolecta y entre años de colecta por sitio, respectivamente, aplicando el estadístico de Wilcoxon para dos muestras independientes con la corrección de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

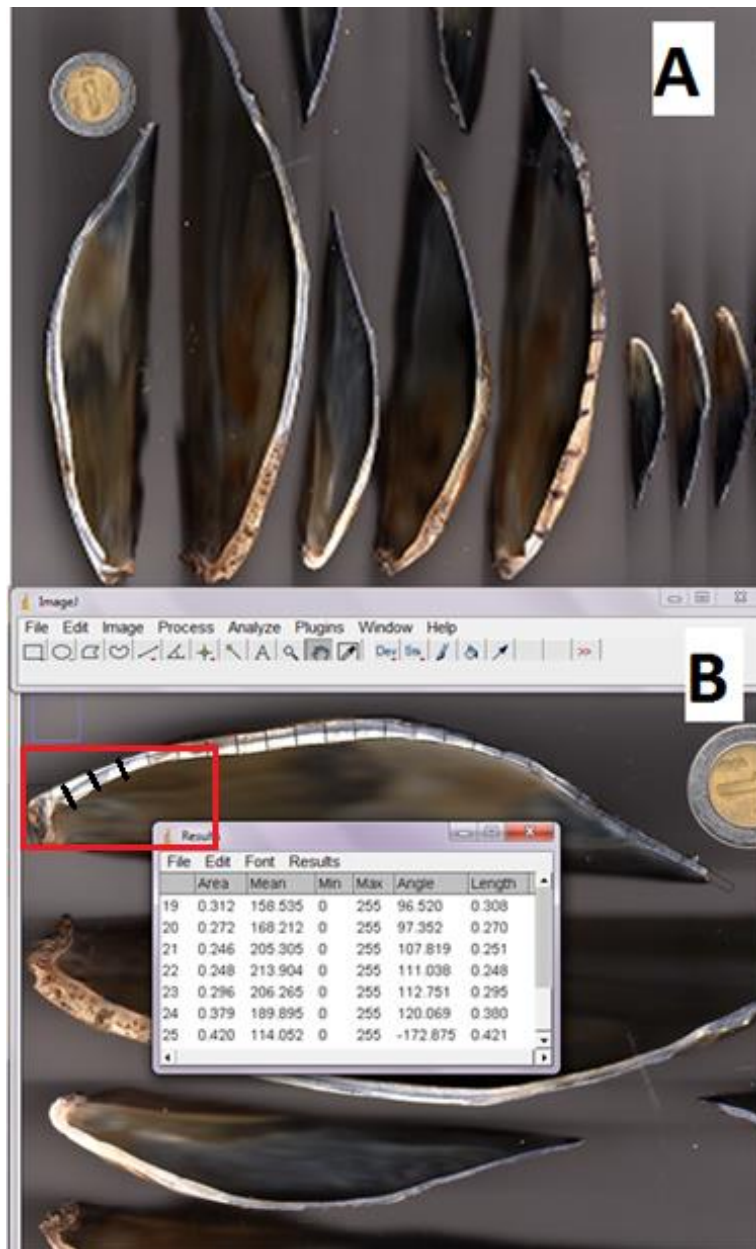


Figura 13. A) Imagen de conchas de mejillón escaneadas. B) Serie de datos obtenidos de la medición cada ~ 0.5 cm a lo largo del corte de la concha. La selección en rojo muestra región del umbo, y las mediciones a lo ancho del corte.

3.5 Parámetros de crecimiento

La densidad promedio se calculó como la media de la ROI, excluyendo 3 mm de cada extremo de la concha (corrección), sin excluir regiones con daños por bioerosión.

Los valores de la escala de gris o densidad óptica (DO) fueron transformados al logaritmo natural ($\ln(\text{DO})$), se obtuvo un ajuste lineal ($y=ax+b$) y coeficiente de determinación (r^2) de la densidad laminar y el $\ln(\text{DO})$. La densidad laminar se obtuvo mediante el producto del grosor y la densidad del bloque del estándar (grosor x densidad, $\text{gr} \cdot \text{cm}^{-2}$). Los valores de gris de $\ln\text{DO}$ del estándar de aragonita fueron puntuales, ya que provienen de 2 piezas del estándar y el fondo de la radiografía. La elección del número de valores de $\ln(\text{DO})$ a usar en el ajuste se basó en el mejor ajuste de datos en el modelo (Carricart-Ganivet y Barnes, 2007, Norzagaray-López, 2010).

La ecuación del ajuste de la escala de grises ($y=ax+b$) muestra la relación entre la densidad ($\rho_{\text{estándar}}$), el grosor del bloque de aragonita ($X_{\text{estándar}}$) y la densidad óptica ($\ln\text{DO}$):

$$\rho_{\text{estandar}} * X_{\text{estandar}} = \ln(\text{DO} - b)/a \quad (1)$$

Donde a y b son las constantes del ajuste lineal; a representa el factor de ajuste de densidad, b intercepto o densidad mínima por radiografía.

Posteriormente se estableció la siguiente ecuación cuando el tiempo y la exposición de rayos X de la concha de mejillón fueron igual al estándar de aragonita en una misma radiografía:

$$\rho_{mejillon} * X_{mejillon} = \rho_{estandar} * X_{estandar} \quad (2)$$

De esta forma la densidad del mejillón ($\rho_{mejillon}$) y su grosor ($X_{mejillon}$) son equivalentes a la densidad ($\rho_{estandar}$) y grosor del estándar ($X_{estandar}$), permitiendo conocer la densidad del mejillón:

$$\rho_{mejillon} = \rho_{estandar} * X_{estandar} / X_{mejillon} \quad (3)$$

Con el fin de calcular la densidad de la concha dentro de una radiografía, se combinaron la ecuación 1 y 3, obteniendo:

$$\rho_{mejillon} = \frac{\left[\frac{(InDO - b)}{a} \right]}{X_{mejillon}}$$

La tasa de crecimiento fue calculada a partir de la longitud máxima y edad calculada del organismo (cm/año). La edad se calculó siguiendo la ecuación generada por Chi-Barragán y Garcia-Pámanes (1983) para esta misma especie en la región de Baja California (Fig.14). La ecuación utilizada para la determinación de la edad (años) fue:

$$\text{Edad} = \ln \left[\left(\frac{\text{Longitud máxima}}{163.22} - 1 \right) \div (-0.9984) \right] / -0.40918$$

Se probaron la diferencias estadísticamente significativas de la edad y la tasa de calcificación, entre sitios por año de colecta y entre años de colecta por sitio, respectivamente, aplicando el estadístico de Wilcoxon para dos muestras independientes con la corrección de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

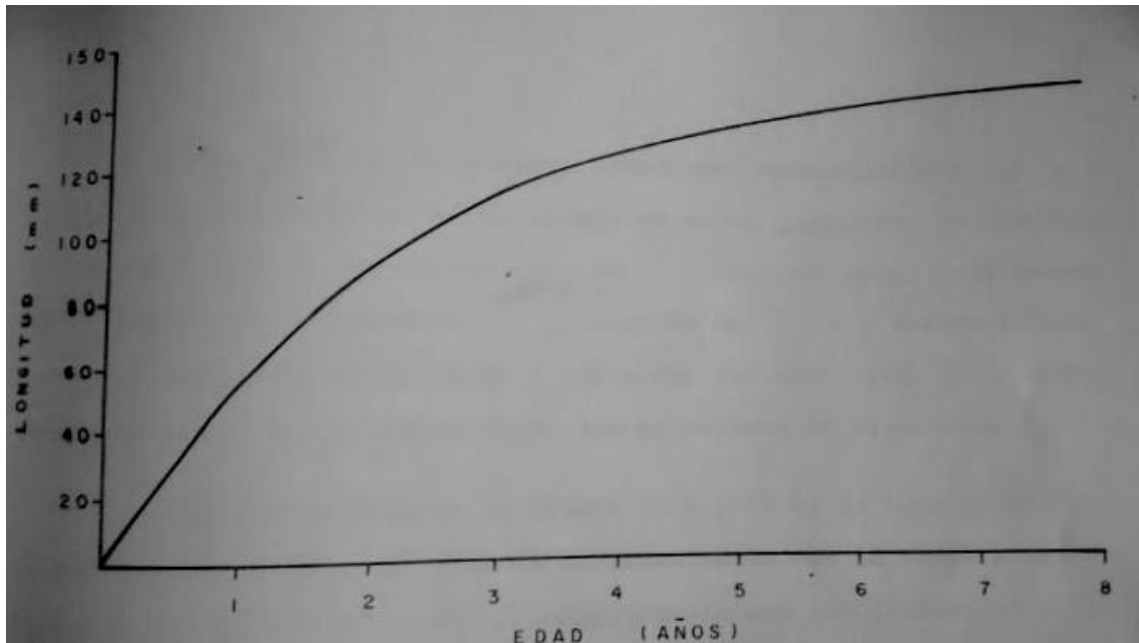


Figura 14. Curva de crecimiento proyectada para *M. californianus*, en la costa occidental de Baja California (Tomada de Chi-Barragán y García-Pámanes, 1983).

3.6 Series temporales de la calcificación

Para relacionar la tasa de calcificación mensual de los organismos con la serie de tiempo de TSM y concentración de Chl α , se calculó la tasa de calcificación ajustando un modelo (Carricart-Ganivet y Barnes 2007) en el cual se utilizó la tasa de crecimiento mensual correspondiente a cada organismo.

Se utilizaron ~5 organismos por sitio correspondientes a cada año considerando los siguientes criterios:

- Muestras con longitud mayor a 10 cm
- Sin bioerosión o mínimo de erosión en la región de interés.
- Conchas completas (del eje máximo de crecimiento al umbo)
- Bando de densidad evidente

A partir de las anomalías de la serie de tiempo de TSM mensual y concentración de Chl α , así como de la tasa de calcificación mensual (TC), se generó una matriz en código binario separando las anomalías positivas y negativas, las cuales se asociaron, aplicando un análisis de Clúster, mediante la técnica de ligamiento promedio no ponderado, para conocer la relación de las variables. Se identificó si la TC tiene una mayor relación con la TSM o la concentración de Chl α .

4. Resultados

4.1 Condiciones oceanográficas

- Serie de tiempo TSM 1983-2013

Los valores promedio mensuales de TSM en las tres localidades de estudio presentaron una variabilidad estacional que osciló entre los 13 y 22°C en BM, 14 y 22°C en ER, así como 14 y 23°C en PB, con menores temperaturas durante el invierno y primavera, y los valores más altos durante el verano (Fig. 15). BM y ER no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí, es decir los valores más bajos de temperatura, pero fueron distintos de PB, debido a que es la localidad ubicada más al sur, donde la temperatura se encuentra influenciada por características tropical-subtropical durante el verano y otoño.

Tanto los valores promedio anuales de TSM como la variabilidad interanual que osciló entre los 15 y 21°C se presentan en la Figura 16. Se observan ciclos de aproximadamente 10 años en el comportamiento de la temperatura promedio anual, los cuales en el periodo que comprende el ciclo de vida de los organismos muestreados (2004-2013) reflejan una disminución del orden de ~ 1 °C de magnitud.

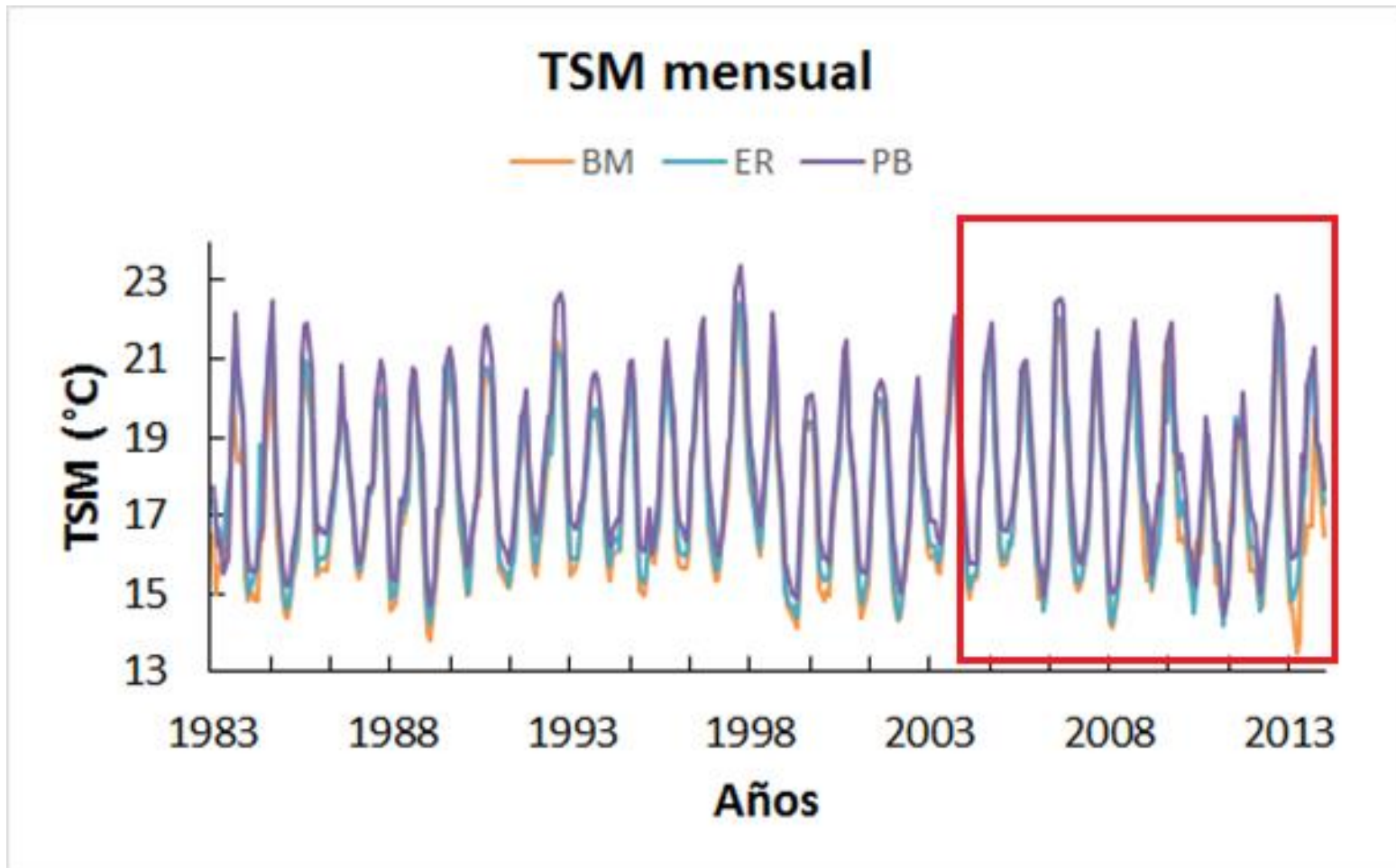


Figura 15. Serie de tiempo del promedio mensual de TSM a 5 km de la costa en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México, de 1983 a 2013 La selección representa el periodo de vida de los organismos muestreados en 2006 y 2014.

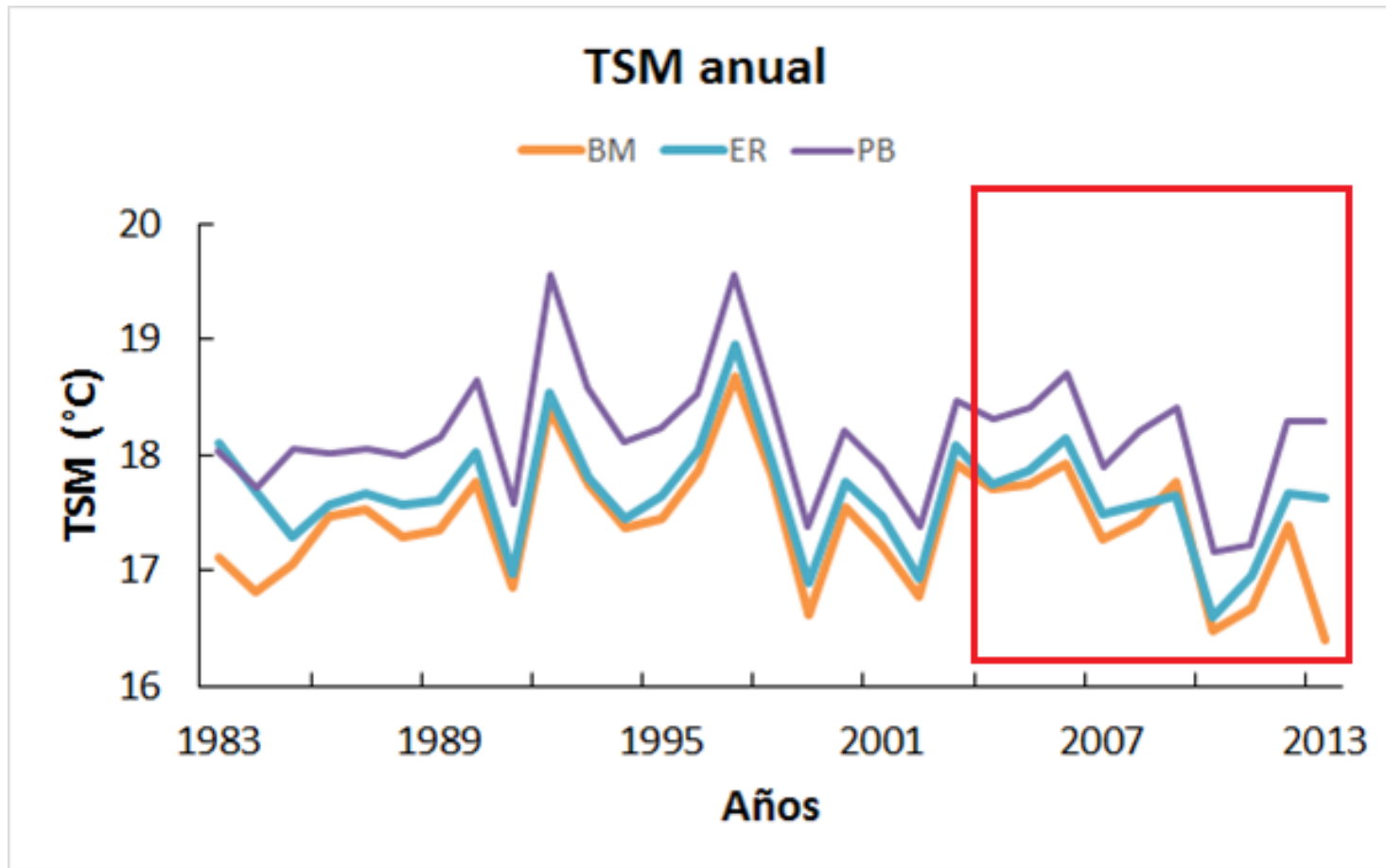


Figura 16. Serie de tiempo del promedio anual de TSM a 5 km de la costa en tres localidades de la costa occidental de Baja California, Baja California, México, de 1983 a 2013. La selección representa el periodo de vida de los organismos muestreados en 2006 y 2014.

- Serie de tiempo [Chl α] 1998-2013

Los valores promedio mensuales de la concentración de Chl α para las tres localidades de estudio presentaron una alta variabilidad estacional que osciló entre 0.41 y 6.1 mg cm⁻³ en BM, 0.52 y 9.1 mg cm⁻³ en ER, así como 0.23 y 9.7 mg cm⁻³ en PB (Fig. 17). Los valores mínimos de concentración de Chl α se encontraron en BM, y los valores más altos en ER y PB, los cuales se observaron durante la primavera y el verano, meses que corresponden a los periodos de surgencia intensa en la región.

Los valores promedio anuales de la concentración de Chl α para las tres localidades de estudio presentaron distinto comportamiento; dependiendo de la localidad, esto pudiera estar asociado a las características topográficas y oceanográficas particulares, y los valores oscilaron entre 0.8 y 4 mg cm⁻³ (Fig. 18). Se observó un aumento en la concentración de Chl α durante el periodo 2004-2005, el cual pudiera estar asociado a la disminución en TSM, y posiblemente a un mayor número de eventos de surgencia y más intensos. Así mismo se observa un aumento en la concentración de Chl α en ER durante el año 2013, el cual no se observa en las otras localidades; esto puede deberse a que esta región presenta una mayor intensidad y número de eventos de surgencia.

No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre BM y PB, no así con ER., es decir la concentración de Chl α fue mayor en ER a la observada en BM y PB.

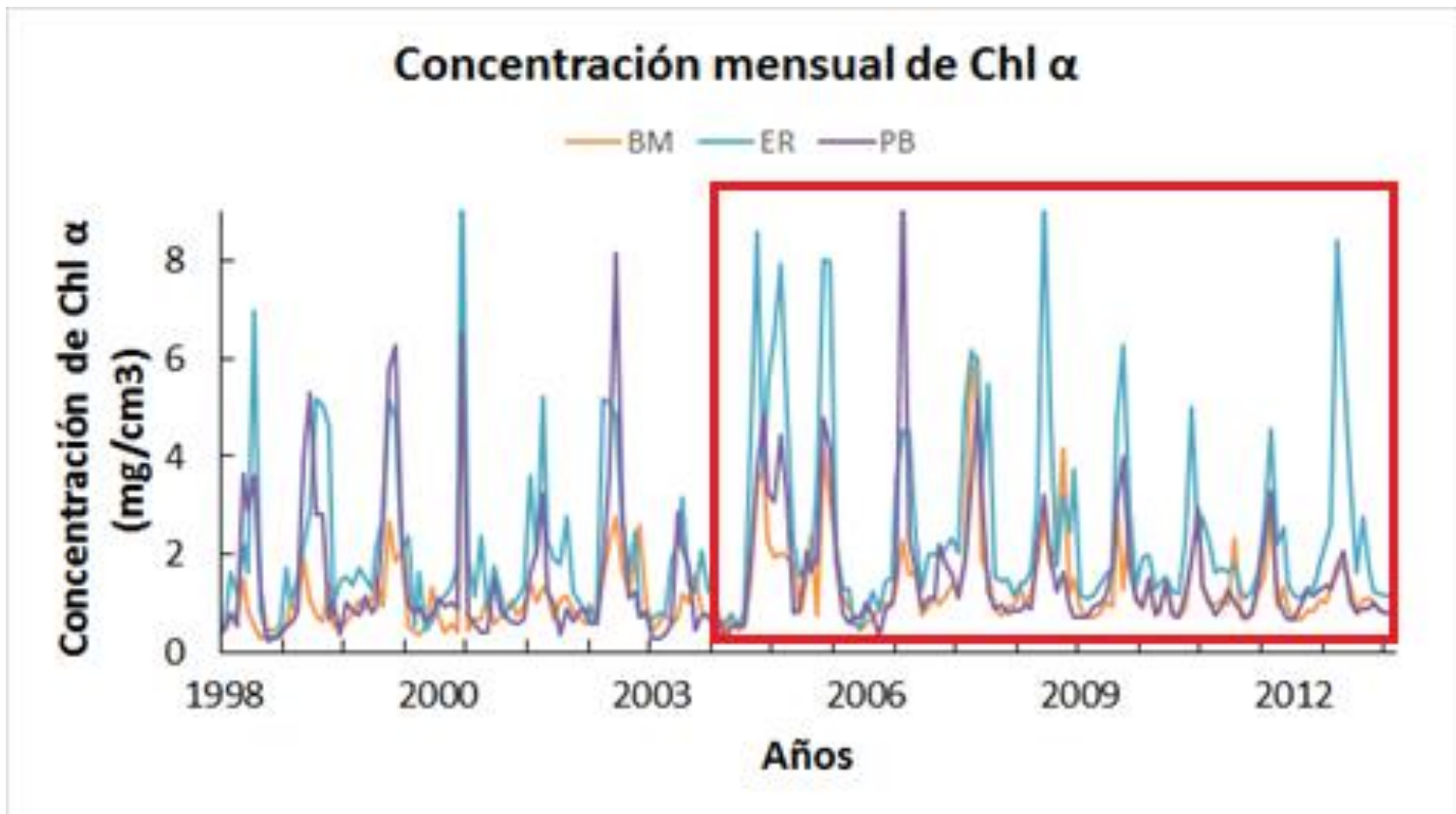


Figura 17. Serie de tiempo del promedio mensual de la concentración de Chl α a 5 km de la costa en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México, de 1998 a 2013. El rectángulo en rojo representa el periodo de vida de los organismos muestreados en 2006 y 2014.

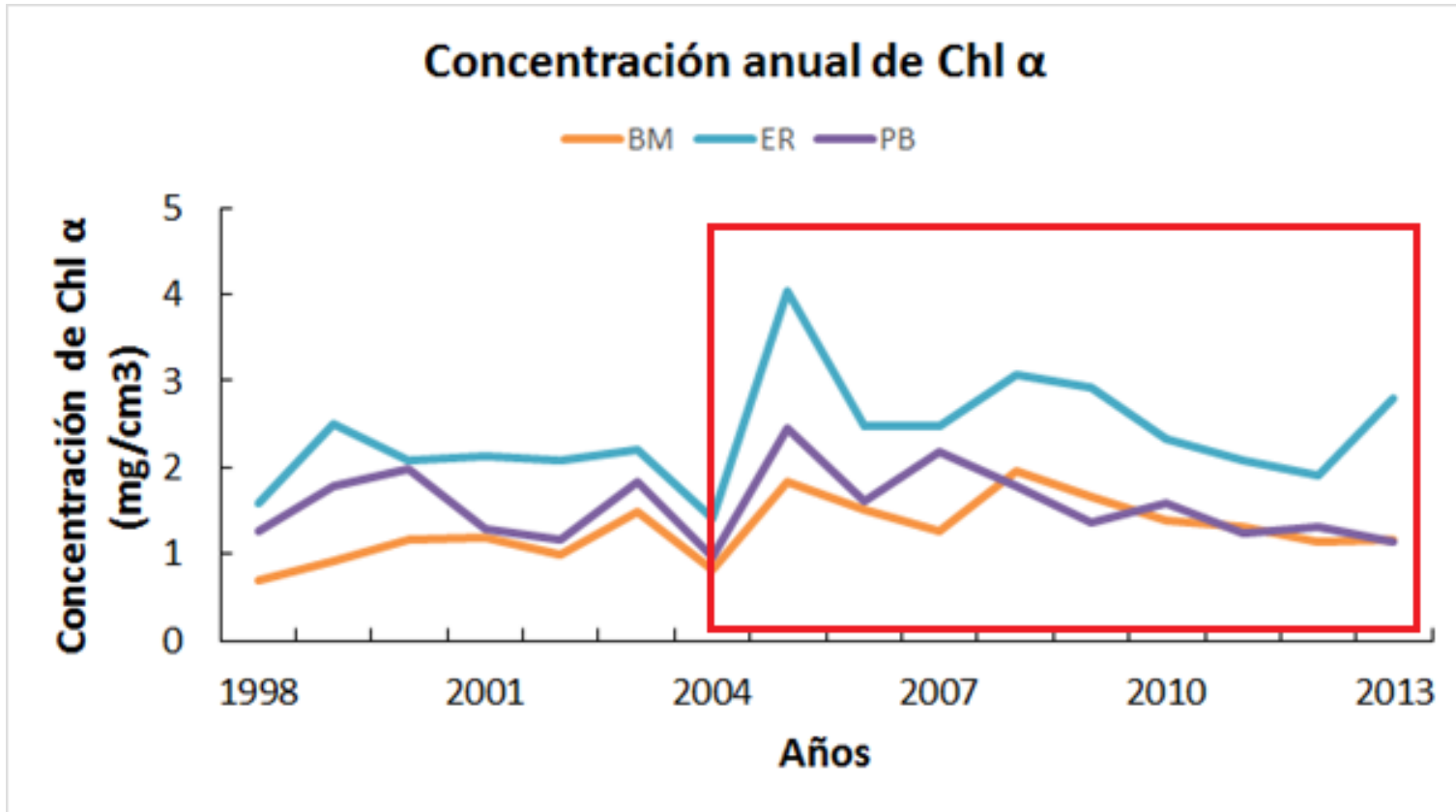


Figura 18. Serie de tiempo del promedio anual de la concentración de Chl α a 5 km de la costa en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México de 1998 a 2013. El rectángulo en rojo representa el periodo de vida de los organismos muestreados en 2006 y 2014.

- Relación TSM/[Chl α]

La relación de la TSM y la concentración de Chl α nos muestra la asociación de estos procesos oceanográficos, los cuales reflejan a que temperatura se observó una mayor producción primaria y en qué localidad existe una mayor asociación de estos procesos. En la figura 19 se puede observar que la localidad de ER presenta una mayor relación cuando la temperatura se encuentra entre los 17 y 18 °C, temperatura observada en la región durante la primavera, estación en la que se presentan con mayor intensidad los eventos de surgencia. Por otro lado BM y PB presentaron una concentración de Chl α similar pero en relación con distintas temperaturas, en BM esta relación se presenta mayormente entre los 16 y 18 °C, mientras en PB se presenta entre los 17 y 19°C.

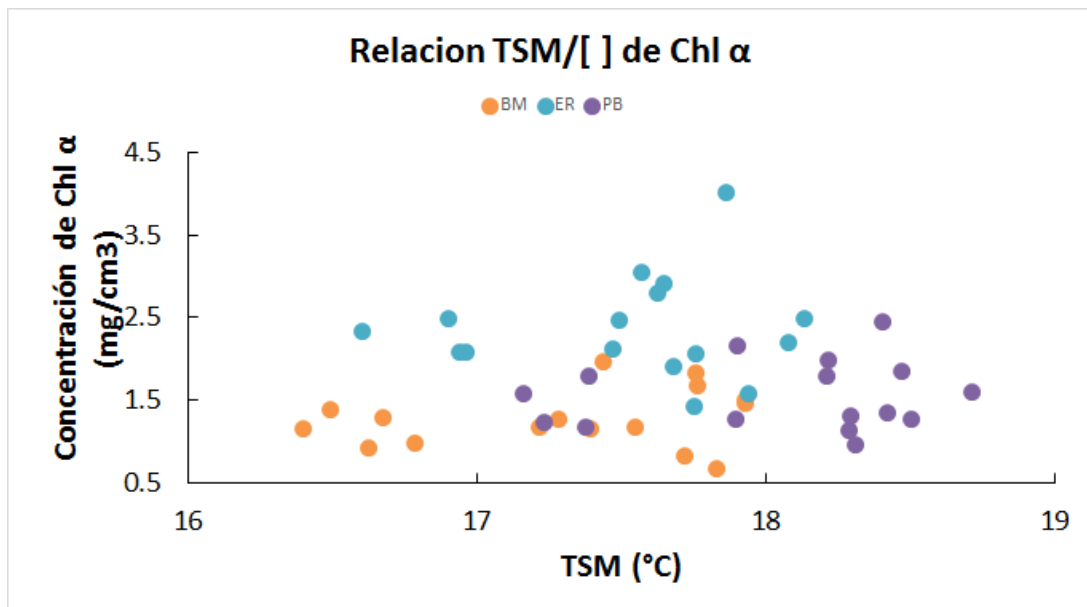


Figura 19. Relación del promedio anual de la TSM y la concentración de Chl α , en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México.

- Índice Antares

En la figura 20 se observa la relación porcentual de la TSM y la concentración de Chl α en las tres localidades estudiadas; la mayor relación se observó en la localidad de ER, esto quiere decir que es el sitio con eventos de surgencia con más intensidad, no obstante durante el año 2010 se observó una disminución en dicha relación.

Los valores de la relación TSM/ [Chl α] en BM y PB son similares, esto quiere decir, que en estos sitios los eventos de surgencia son de menor intensidad con respecto ER; así mismo se puede observar una disminución en dicha relación a partir del año 2010.

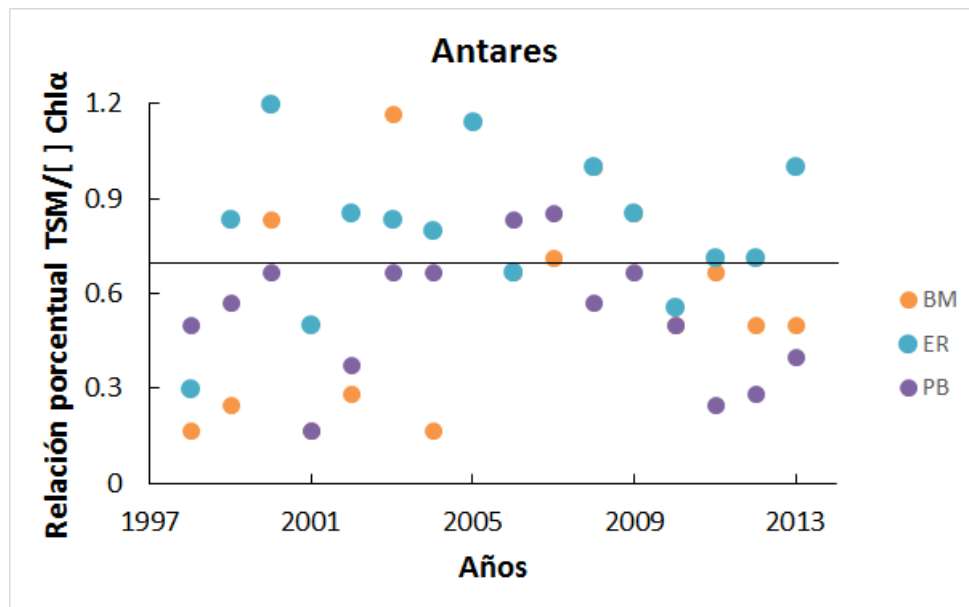


Figura 20. Relación porcentual del promedio anual de la TSM y la [Chl α] en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México, de 1998 a 2013. La línea negra marca el valor porcentual correspondiente a 0.7, el cual determina una relación positiva entre las condiciones oceanográficas y los eventos de surgencia.

4.2 Parámetros de crecimiento

- Grosor del umbo

Se determinó el grosor promedio de la región del umbo en cada intervalo de talla por sitio y año de recolecta (Tabla 1). Los datos muestran diferencias de aproximadamente 0.1 ordenes de magnitud entre intervalos de talla, presentando un mayor grosor las muestras >10cm y menor grosor las muestras entre 5-6cm. Se observaron diferencias estadísticamente significativas de BM con PB y ER, no así entre ER y PB, esto quiere decir que los organismos de BM presentaron un menor grosor promedio. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los años de muestreo.

Tabla 1. Grosor promedio del la region correspondiente al umbo (~1.5 cm) indicada para cada localidad de estudio y año de colecta.

<i>Sitio</i>	Intervalo de talla (cm)	<i>Grosor (cm)</i>	
		2006	2014
<i>BM</i>	>10	0.38 ±0.05	0.46 ±0.09
	8-9	0.27 ±0.06	0.31 ±0.07
	5-6	0.17 ±0.05	0.18 ±0.05
<i>ER</i>	>10	0.4 ±0.06	0.37 ±0.08
	8-9	0.31 ±0.05	0.37 ±0.05
	5-6	0.21 ±0.04	0.25 ±0.04
<i>PB</i>	>10	0.34 ±0.05	0.38 ±0.05
	8-9	0.27 ±0.05	0.24 ±0.04
	5-6	0.2 ±0.05	0.18 ±0.04

- Edad

Las edad de los organismos muestreados durante las distintas temporadas osciló entre los 1.1 y 5.1 años (Tabla 2). Encontrando los organismos de mayor edad durante la colecta de 2014, los cuales pertenecen al intervalo de las muestras >10cm. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los intervalos de 5-6 y 8-9 cm respectivamente entre sitios ni temporadas.

Tabla 2. Edad promedio de los organismos muestreados en los periodos correspondientes por intervalo de talla.

<i>Sitio</i>	intervalo de talla (cm)	<i>Edad (años)</i>	
		2006	2014
<i>BM</i>	>10	4.1 ±0.5	5.1 ±0.6
	8-9	1.9 ±0.4	2.1 ±0.4
	5-6	1.1 ±0.5	1.1 ±0.4
<i>ER</i>	>10	2.83 ±0.6	4.7 ±0.5
	8-9	1.9 ±0.4	2.1 ±0.5
	5-6	1.1 ±0.4	1.1 ±0.4
<i>PB</i>	>10	3.4 ±0.5	4.1 ±0.6
	8-9	1.9 ±0.4	1.9 ±0.4
	5-6	1.1 ±0.5	1.1 ±0.4

- Tasa de crecimiento

La tasa de crecimiento promedio osciló entre 4.21 y 4.59 cm/año. Se observó una disminución de ~0.1 orden de magnitud entre 2006 y 2014 en las tres localidades muestreadas. Así mismo podemos observar que existe una diferencia de ~0.1 orden de magnitud entre localidades, siendo BM la localidad con menor tasa de crecimiento, el cual pudiera estar influenciado por la TSM, debido a que este es el sitio que muestra menores temperaturas a lo largo de la serie de tiempo en comparación con ER y PB (Tabla 3).

Tabla 3. Tasa de crecimiento promedio correspondientes a cada localidad de estudio y año de colecta respectivamente.

Tasa de Crecimiento (cm/año)

	2006	2014
<i>BM</i>	4.38±0.84	4.21±1
<i>ER</i>	4.59±0.59	4.29±1
<i>PB</i>	4.49±0.72	4.37±0.89

- Tasa de Calcificación mensual

El promedio mensual de la tasa de calcificación osciló entre 0.4 y 0.63 gCaCO₃cm⁻³mes⁻¹ (Tabla 4). Los valores más altos se observaron en las muestras recolectadas de 2006, siendo BM el sitio con menor tasa de calcificación y ER el de mayor, lo cual pudiera estar relacionado con la alta productividad presente en este sitio (Fig. 21).

Se observó una disminución de la tasa de calcificación de los organismos muestreados durante 2014 en comparación con los de 2006 (Fig. 21), presentando los valores más bajos de calcificación durante el 2009 para el caso de BM y ER, y 2012 en PB. Lo anterior pudiera estar asociado a los cambios tanto en la TSM y [Chl α] durante el periodo de desarrollo de dichos organismos, relacionados con eventos ENOS y periodos de enfriamiento. Asimismo se observó que el sitio con mayor tasa de calcificación es ER, lo que pudiera estar mayormente asociado a la elevada productividad en la zona a diferencia de BM y PB.

Tabla 4. Promedio mensual de la tasa de calcificación correspondiente a cada localidad de estudio y año de colecta respectivamente.

Tasa de Calcificación ($gCaCO_3cm^{-3}mes^{-1}$)

	2006	2014
<i>BM</i>	0.46±0.09	0.40±0.09
<i>ER</i>	0.63±0.04	0.41±0.11
<i>PB</i>	0.59±0.17	0.45±0.1

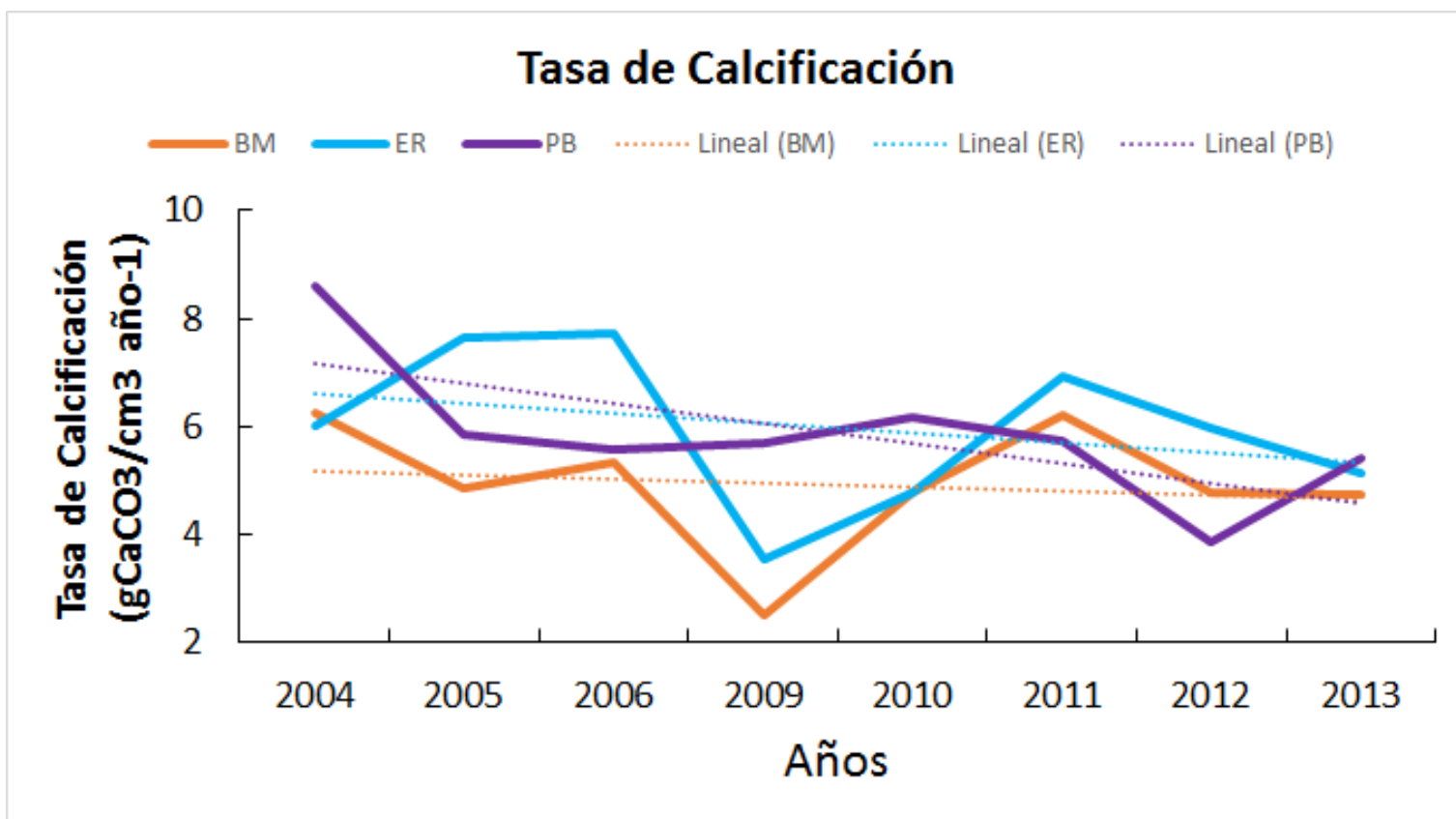


Figura 21. Serie de tiempo del promedio anual de la tasa de calcificación de los organismos muestreados durante 2006 y 2014 en las tres localidades de estudio. Las líneas punteadas muestran la tendencia de la tasa de calcificación.

- Análisis Clúster TSM-concentración de Chl α -TC

La figura 22 muestra el resultado del análisis de Clúster, en el cual se observan diferencias entre las localidades de estudio y los años de recolecta. En las muestras recolectadas en 2006, para el caso BM, se encontró una mayor relación entre la TC alta con la TSM alta y Chl α alta. Para el caso de las muestras de 2014 esta relación se modificó con respecto a la Chl α , es decir la TC alta mostró una mayor relación con la TSM alta y Chl α baja, lo cual podría coincidir con la disminución de la concentración de la Chl α , y reflejaría la adaptación de los organismos a las condiciones presentes en el ambiente.

Las localidades de ER y PB presentaron un patrón similar en las muestras recolectadas en ambos años. En las muestras de 2006 se observó una mayor relación entre la TC alta con la TSM baja y la Chl α alta, condiciones oceanográficas asociadas a temporadas frías y eventos de surgencia; y para las muestras colectadas en 2014 se observó un cambio en los patrones, es decir la TC alta se encontró mayormente relacionada con la TSM alta y Chl α baja, comportamiento similar al observado en BM.

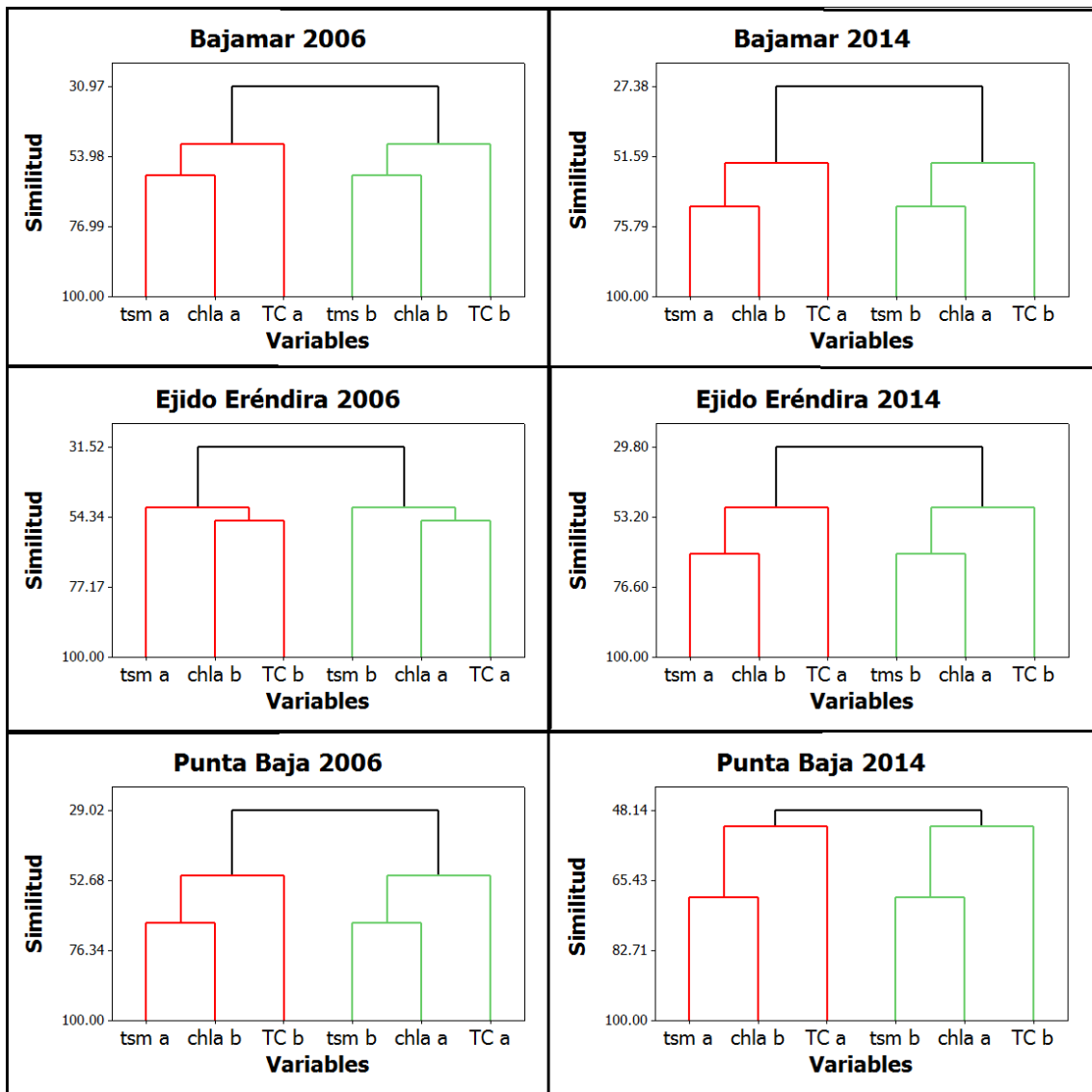


Figura 22. Análisis de Cluster mediante la técnica de ligamiento promedio no ponderado. Donde *tsm a*, identifica la TSM alta; *chla a*, la concentración de Chl α , *TC a*, la tasa de calcificación alta; *tsm b*, la TSM baja; *chla b*, la [Chl α] baja; y *TC b*, la tasa de calcificación baja.

5. Discusión

La variación temporal de las serie de TSM y concentración de clorofila Chl α en las regiones muestreadas coinciden con la serie de cambios en las condiciones físicas reportadas durante la última década en el SCC, tales como el aporte de aguas menos salinas entre 2002 y 2006, debidas principalmente a la advección anómala de aguas de la Corriente del Pacífico Norte y el bombeo de Ekman vertical debido a la intensificación del rotor del esfuerzo del viento como lo mencionan Durazo et al. (2010). Particularmente durante 2004 se observó una fase fría en la cual solo algunos parámetros físicos y biológicos respondieron a esta fase, debido a que este cambio estaba influenciado por un ciclo El Niño débil (Goericke et al.,2005), ésta disminución en la TSM se reportó en los tres sitios de estudio.

De acuerdo con Peterson et al. (2006), durante 2005 y 2006 las temperaturas fueron ligeramente más frías que el promedio y la concentración de clorofilas se reportó por debajo del promedio en la región, condiciones relacionadas principalmente al tiempo y la fuerza de los eventos de surgencia. En las localidades de estudio se reportó un índice Antares >1 , es decir los cambios en la temperatura y concentración de Chl α estuvieron mayormente influenciados por los eventos de surgencia.

En el año 2007 se produjeron surgencias costeras intensas asociadas a índices biológicos cercanos al promedio (McClatchie et al. 2009), los cuales se pudieron apreciar en los sitios de estudio, y en los cuales se observó una disminución en la temperatura. Estas condiciones causaron que el evento El Niño a inicios de dicho

año fuera de corta duración, y favorecieron el desarrollo de La Niña de finales de 2007 y hasta 2008 (Durazo, et al. 2010), las cuales fueron apreciadas en la región debido a un aumento en la temperatura y disminución de los eventos de surgencia.

El año 2009 y principios de 2010 se reportaron como años estrechamente asociados con la disminución de las condiciones de La Niña más que los efectos directos incluyeron el aumento de la temperatura (cercana al promedio) y la disminución en la producción primaria en el SCC (Bjorksted et al/2010). A pesar de ello en la región sur del SSC, específicamente en las tres localidades de estudio, estas condiciones no se reflejaron, por el contrario, se observó una disminución drástica del índice Antares (<0.6), así como de la concentración de Chl α y un ligera disminución de la TSM, la cual se intensificó a partir de la primavera de 2010 y hasta el invierno de 2011.

Es claro el aumento de la concentración de Chl α en las regiones particularmente influenciadas por las oscilaciones de temperatura y la intensidad de las surgencias. Como se observa en la figura 23 durante el periodo 2009-2011 se observaron las condiciones más frías reportadas en la región, presentándose temperaturas máximas por debajo del promedio, y cercanas a las temperaturas mínimas, haciendo evidente el enfriamiento. Así mismo el índice Antares se mantuvo por debajo de 0.6 y las concentración de Chl α por debajo del promedio. Lo anterior fue contrario a lo reportado por Bjorksted et al. (2011), para el norte y centro del SCC, donde se experimentaron surgencias a niveles cercanos y por encima al promedio, favoreciendo condiciones de productividad particulares.

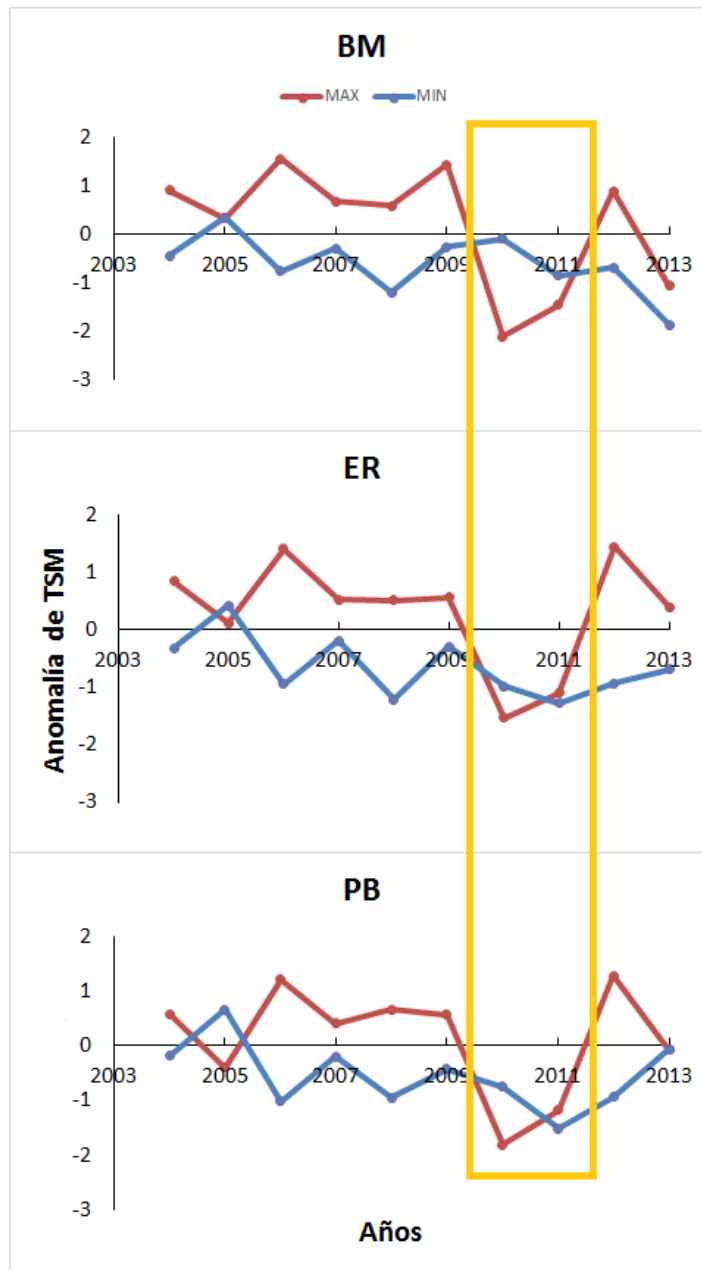


Figura 23. Anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) en tres localidades de la costa occidental de Baja California, México, de 2004 a 2013. La selección en amarillo representa el periodo de disminución de la temperatura máxima 2009-2011.

Finalmente durante el 2012-2013 las temperaturas se mantuvieron más frías que el promedio, y ligeramente más salinas que en 2011; así mismo las surgencias y la producción primaria se mantuvieron cercanas al promedio. A principios de 2013 se observó un invierno excepcionalmente fuerte y un periodo de afloramiento de primavera, el cual actuó en forma predecible con la hidrografía regional; es decir mayores salinidades y temperaturas bajas (Wells et al. 2013). En la localidad de ER se apreció que dichas condiciones oceanográficas (temperaturas bajas y aumento de la concentración de Chl α), estuvieron estrechamente ligadas a un aumento en el índice de surgencia.

La disminución en la temperatura durante los años 2004-2005 y 2010-2011, pudiera tener efectos en el desarrollo de los organismos recolectados, debido a que ambos se presentaron durante el primer año de desarrollo de los mismos, no obstante se puede observar que la disminución de la temperatura durante el 2010-2011 se presenta con mayor magnitud.

Las condiciones oceanográficas observadas durante el periodo 2004-2013, las cuales experimentaron cambios debido a los eventos ENOS y aun periodo de enfriamiento, estuvieron directamente ligadas a la tasa de calcificación de los mejillones como se aprecia en la Figura 21. Durante los años reportados como El Niño (2005, 2009, 2012 y 2013), y de acuerdo con su intensidad, se observó una disminución en la TC, siendo el año 2009 el año con la mayor intensidad reportada y menor TC en BM ($2.51 \text{ gCaCO}_3\text{cm}^{-3}\text{año}^{-1}$) y ER ($3.54 \text{ gCaCO}_3\text{cm}^{-3}\text{año}^{-1}$), así durante éste año en la región se observó el inicio de un periodo de enfriamiento de mayor

intensidad. La menor TC reportada en la localidad de PB ($3.88 \text{ gCaCO}_3\text{cm}^{-3}\text{año}^{-1}$) se presentó durante el año 2012.

En contraste, durante los años La Niña (2006, 2010 y 2011) se observó un aumento en la tasa de calcificación (por encima del promedio). Se observó que el comportamiento de BM y PB fue similar a partir del 2005, pero distinto de ER, esto se asocia principalmente a que el sitio con mayor intensidad y presencia de eventos de surgencia es ER, características por las cuales los organismos de éste localidad se encuentran expuestos a mayores cambios y son mayormente susceptibles a posibles afectaciones, tales como depredación, bioerosión y enfermedades.

En este respecto, se ha comprobado que la tasa de crecimiento del mejillón *M. californianus* disminuye cuando las temperaturas son bajas y existe una alta exposición al oleaje (Blanchette et al. 2006), por lo tanto la tasa de calcificación también disminuiría. Estos efectos se pudieron observar en las tres localidades de estudio, siendo ER el sitio de mayor impacto, debido a las características oceanográficas antes mencionadas. Sin embargo, no debemos olvidar que todos los factores tanto físicos, químicos y biológicos (TSM, [Chl α], surgencias, oleaje, mareas y química del agua) se encuentran altamente relacionados entre sí.

Por otro lado el cambio en las relaciones TSM/ [Chl α]/ TC (Fig. 21), se asocia con el periodo de enfriamiento presente en el SSC, el cual se intensificó durante el año 2010 y principios del 2011 (Bjorksted et al 2011). Esto se relaciona con la temperatura óptima de crecimiento del mejillón ($17\text{-}20^\circ\text{C}$), la cual debido a las condiciones

oceanográficas antes mencionadas ha disminuido, debido a la disminución de la temperatura promedio en la región. Así mismo se observó una relación entre los eventos de surgencia y la disminución en la concentración de Chl α , es decir a medida que la intensidad y frecuencia de los eventos de surgencia han disminuido, se ha observado la disminución en la concentración promedio de Chl α en las regiones estudiadas.

Con el método de densitometría, al obtener valores de densidad bajos y bajas tasas de calcificación, se puede inferir que la formación de la concha ocurrió en un ambiente con “bajas temperaturas”. Si resultan valores elevados de densidad y calcificación, no necesariamente implica una precipitación de CaCO_3 en condiciones térmicas favorables, puede ser la sinergia de los factores ambientales, tales como TSM óptima, disponibilidad de alimento, exposición al oleaje y química del agua, siendo esta última un factor determinante en la calcificación de los organismos, debido a la disponibilidad de CaCO_3 , la cual como ya hemos mencionado se ha visto afectada debido a la acidificación del océano.

Los resultados de la serie de tiempo del promedio anual de la tasa de calcificación de los mejillones, son una herramienta valiosa para evaluar las condiciones de la comunidad intermareal, ya que podría ayudar a explicar parte de los efectos causados por los cambios oceanográficos en la región, tales como la disminución de la TSM y la [Chl α], así como los posibles efectos de la acidificación del océano.

6. Conclusiones

La tasa de calcificación promedio de *M. californianus* en la región de estudio fue de $5.59 \pm 0.57 \text{ gCaCO}_3\text{cm}^{-3}\text{año}^{-1}$.

La tasa de calcificación del mejillón *M. californianus* ha disminuido $\pm 0.1 \text{ gCaCO}_3\text{cm}^{-3}\text{mes}^{-1}$ en BM y PB, y $\pm 0.2 \text{ gCaCO}_3\text{cm}^{-3}\text{mes}^{-1}$ en ER, durante el periodo 2004-2013, lo cual pudiera indicar que los cambios reflejados en ER se deben a la disminución en la intensidad de los eventos de surgencia.

La tendencia negativa observada en la tasa de calcificación de los organismos de las tres localidades muestreadas, se asocia con la disminución de la TSM debida al periodo de enfriamiento reportado en la región por diversos autores, así como a los eventos ENOS presentes durante la última década.

La disminución en la tasa de calcificación del mejillón *M. californianus*, podría afectar negativamente a la población de dicha especie, debido a que los organismos son mayormente susceptibles a depredación, bioerosión y enfermedades.

7. Referencias

- Addadi L., Joester D., Nudelman F. y Weiner S. 2006. Mollusk shell formation: a source of new concepts for understanding biomineralization process. *Chem. Eur. J.* 12: 980-987
- Ahmad K. D., Reza R. y Francois B. 2012. The weak interfaces within tough natural composites: experiments on three types of nacre. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials.* 19: 50-60
- Anguiano Beltrán C. 1989. Efecto de la temperatura, salinidad y concentración de alimento sobre el desarrollo larval de *Mytilus californianus*. Tesis de Licenciatura en Oceanología. ESCM-UABC. 95 pp.
- Blanchette C.A., Broitman B.B. y Gaines S.D. 2006 Intertidal community structure and nearshore oceanography around Santa Cruz Island, California, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 149: 689-701.
- Beesley, A., Lowe D.M., Pascoe C.K. y Widdicombe, S., 2008. Effects of CO₂-induced seawater acidification on the health of *Mytilus edulis*. *Climate Research.* 37: 215-225.
- Berge, J.A., Bjerkeng, B., Pettersen, O., Schaanning, M.T. y Øxnevad, S., 2006. Effects of increased sea water concentrations of CO₂ on growth of the bivalve *Mytilus edulis* L. *Chemosphere* 62, 681-687.
- Bibby, R., Widdicombe, S., Parry, H., Spicer, J. y Pipe, R., 2008. Effects of ocean acidification on the immune response of the blue mussel *Mytilus edulis*. *Aquatic Biology.* 2: 67-74

- Bjorkstedt, E., Goericke R., McClatchie S., Weber E., Watson W., Lo N., Peterson B., Emmett B., Brodeur R., Peterson J., Litz M., Gomez- Valdez J., Gaxiola-Castro G., Lavaniegos B., Chavez F., Collins C. A., Field J., Sakuma K., Warzybok P., Bradley R., Jahncke J., Bograd S., Schwing F., Campbell G. S., Hildebrand J., Sydeman W., Thompson S., Largier J., Halle C., Kim S. Y., y Abell J. 2010. State of the California Current 2009–2010: Regional Variation persists through transition from La Niña to El Niño (and back?) California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report 51:1-31
- Bjorkstedt, E., Goericke R., McClatchie S., Weber E., Watson W., Lo N., Peterson B., Emmett B., Brodeur R., Peterson J., Litz M., Gomez- Valdez J., Gaxiola-Castro G., Lavaniegos B., Chavez F., Collins C. A., Field J., Sakuma K., Warzybok P., Bradley R., Jahncke J., Bograd S., Schwing F., Campbell G. S., Hildebrand J., Sydeman W., Thompson S., Largier J., Halle C., Kim S. Y., y Abell J. 2011. State of the California Current 2010–2011: Regional Variable Responses to a Strong (But Fleeting?) La Niña. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report 52:36–68.
- Blanchette C.A., Helmuth B. y Gaines S.D. 2007. Spatial patterns of growth in the mussel, *M. californianus*, across a major oceanographic and biogeographic boundary at Point Conception, California, USA. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 340:126-140.

- Canadell J.G., Le Quéré C., Raupach M. R., Field C. B., Buitenhuis E. T., Ciais P., Conway T.J., Gillett N. P., Houghton R. A y Marland G. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. PNAS. 104 : 18866-18870
- Carricart-Ganivet, J. P. y Barnes D. J. 2007. Densitometry from digitized images of Xradiographs:Methodology for measurement of coral skeletal density. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 344:67–72
- Chateigner D., Hedegaard C. y Wenk H.-R. 2000. Mollusc shell microstructures and crystallographic textures. Journal of Structural Geology 22: 1723-1735.
- Chi-Barragán G. y García-Pámanes F. 1983. Estudios preliminares sobre la biología, ecología y explotación comercial de *Mytilus californianus* en Baja California. Tesis de Licenciatura en Oceanología. ESCM-UABC 180pp.
- Ciais, P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R.B., Piao S. y P. Thornton, 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)].

Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA.

- Cooley, S.R. y Doney, S.C., 2009. Anticipating ocean acidification's economic consequences for commercial fisheries. *Environmental Research Letters* 4, 024007.
- Durazo, R., Ramírez-Manguilar A.M., Miranda L.E. y Soto-Mardones L.A. 2010. Climatología de variables hidrográficas. Dinámica del ecosistema pélagico frente a Baja California 1997-2007. Primera edición. 25-57
- Fairweather, P.G., 1991. A conceptual framework for ecological studies of coastal resources: an example of a tunicate collected for bait on Australian seashores. *Ocean and Shoreline Management*, 15: 125-142.
- Feely, R.A., Sabine C.L., Hernandez-Ayon J.M., Ianson D. y Hales, B. 2008. Evidence for upwelling of corrosive acidified water onto the continental shelf. *Science*, 320: 1490-1492.
- Gaxiola-Castro G., Cepeda-Morales J., Nájera-Martínez S., Espinosa-Carreón T.L., De la Cruz-Orozco M.E., Sosa-Avalos R., Aguirre Hernández E. y Cantú-Ontiveros J.P. 2010. Biomasa y producción de fitoplancton. Dinámica del ecosistema pélagico frente a Baja California 1997-2007. Primera edición. 59-85
- Gazeau F., J. J. Middelburg, C. Quiblier, C. H. R. Heip, J.M. Jansen y J. Gattuso. 2007. Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification. *Geophysical Research Letters* 34, L07603, doi:10.1029/2006GL028554.

- Gazeau F., Gattuso J.-P., Dawber C., Pronker A. E., Peene F., Peene J., Heip C. H. R. y Middelburg J. J. 2010. Effect of ocean acidification on the early life stages of the blue mussel *Mytilusedulis*. *Biogeosciences*, 7: 2051–2060.
- Goericke R., Venrick E., Mantyla A., Bograd S.J., Scwing F.B., Huyer A., Smith R.L., Wheeler P.A., Hoof R., Peterson W.T., Chavez F., Collins C., Marinovic B., Lo N., Gaxiola-Castro G., Durazo R., Hyrenbach K.D. y Sydeman W.J. 2005. The State of the California Current, 2004-2005: Still cool?. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report*. 46:1-40
- Gruber N., Hauri C., Lachkar Z., Loher D., Frölicher T. L. y Plattner G.K.. 2012. Rapid Progression of OceanAcidification in the California Current System. *Science* 337: 220-223
- Hans-O. Pörtner. 2008. Ecosystem effects of ocean acidification in times of ocean warming: a physiologist's view. *Mar. Eco. Prog. Ser.* 373: 203–217.
- Hauri C., Gruber N. , Plattner G., Alin S. y Wheeler P.A. 2008. Ocean acidification in the California Current System. *Oceanography* 22:60–71.
- Hernández-Ayón J.M., Gaxiola-Castro G., Chavez F., Takahashi T., Feely D., Sabine C.L., Hales B. y Lara-Lara R. 2010. Variabilidad espacial y temporal del flujo de CO₂ océano-atmósfera. *Dinámica del ecosistema pélagico frente a Baja California 1997-2007*. Primera edición. 197-208.

- Hickey, B.M. 1979. The California Current system-hypotheses and facts, Prog. Oceanogr. 8:191-279.
- Hickey, B.M. 1998. Coastal oceanography of western North America from the tip of Baja California to Vancouver Island. En: Robinson AR, Brink KH (Eds.), Coastal Segment, The Sea, Vol 11. Wiley, New York. Pp. 345–391.
- Hoppe C. J. M., Langer G., Rokitta S. D., Wolf-Gladrow D. A., y Rost B. 2012. Implications of observed inconsistencies in carbonate chemistry measurements for ocean acidification studies. Biogeosciences, 9: 2401–2405.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Jørgensen, C. B. (1990). Bivalve filter feeding: hydrodynamics, Bioenergetics, physiology and ecology. Olsen & Olsen. 140 pp.
- Le Quere, C., Raupach M.R., Canadell J.G., Marland G., Bopp L., Ciais P., Conway T.J., Doney S.C., Feely R.A., Foster P., Friedlingstein P., Gurney K., Houghton R.A., House J. L., Huntingford C., Levy P.E., Lomas M. R.,

Majkut J., Metzl N., Ometto J.P., Peters G.P., Prentice I.C., Randerson J.T., Running S.W., Sarmiento J.L., Schuster U., Sitch S., Takahashi T., Viovy N., Vander Werf G.R. y Woodward F.I. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* 2: 813-836.

- Lynn, R.J. y Simpson J.J. 1987. The California Current system: the seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.* 92: 12947–12966. *Frontiers of Bioscience* S4, 1099-1125.
- Marin F., Le Roy N. y Marie B. 2012. The formation and mineralization of mollusk Shell. *Frontiers in Bioscience* S4, 1099-1125
- McClatchie S., Charter R., Watson W., Lo N., Hill K., Manzano-Sarabia M., Goericke R., Collins C., Bjorkstedt E., Schiwing F.B., Bograd S.J., Kahru M., Mitchell G., Koslow J. A., Ralston S., Field J., Peterson W.T., Emmett R., Gomez-Valdes J., Lavaniegos B.E., Gaxiola-Castro G., Rogers-Bennet L., Munger L., Campbell G., Merkens K., Camacho D., Havron A., Douglas A., Hildebrand J., Gottschalck J., L'Heureux M., y Xue Y. 2009. The State of the California Current, spring 2008-2009: cold conditions drive regional differences in coastal production. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report*. 43-68
- McClintock J. B., Angus R. A., McDonald M. R., Amsler C. D., Catledge S. A. y Vohra Y. K. 2009. Rapid dissolution of shells of weakly calcified Antarctic benthic macroorganisms indicates high vulnerability to ocean acidification. *Antarctic Science* 21: 449–456

- Michaelidis, B.; Ouzounis, C.; Paleras, A. y Pörtner, H.O. 2005. Effects of long-term moderate hypercapnia on acid-base balance and growth rate in marine mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*293: 109-118.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) / NPC-NCEP. Climate Prediction Center, Oceanic Niño Index. <http://ggweather.com/enso/oni.htm>, 2014.
- Norzagaray-López C.O. 2010. Producción potencial de carbonato de calcio por *Porites panamensis* en dos comunidades arrecifales del Pacífico mexicano. Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencias en Ecología Marina. CICESE. 99 pp.
- Olgún Espinoza I. 1983. Descripción de la larva del mejillón *Mytilus californianus* y estudio de su abundancia y distribución en la costa del ejido Erendira, Baja California. Tesis de Licenciatura en Oceanología. ESCM-UABC. 73 pp.
- Paine R. T. 1974. Intertidal community structure: experimental studies between a dominant competitor and its principal predator. *Oecologia*. 15: 93-120.
- Paine R.T. 1976. Biological observations on a subtidal *Mytilus californianus* bed. *Veliger* 19: 125-130.
- Peña Mejía C. E. 2011. Estructura de las comunidades del intermareal rocoso asociadas al mejillón *Mytilus californianus* en la costa oeste de Baja

California. Tesis de Maestría en Ciencias en Oceanografía Costera. FCM-UABC. 161 pp.

- Peterson B., Emmett R., Ralston S., Forney K.A., Benson S., Goericke R., Venrick E., Mantyla E., Lavaniegos B.E., Weise M., Bograd S.J., Schwing F.B., Sydeman W.J., Hyrenbach D., Bradley R.W., Warzybok P., Harvey J., Gaxiola-Castro G., Hewitt R., Lo N., Watson W., Barlow J., Lowry M., Chavez F., Hunter K. y Durazon R. 2006. The State of the California Current, 2005-2006: Warm in the north, cool in the south. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report. 47:1-45.
- Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2014.
- Rao D. V., Swapna M., Cesareo R., Brunetti A., Zhong Z., Akatsuka T., Yuasa T., Takeda T., Gigante G. E. 2010. Use of synchrotron-based diffraction-enhanced imaging for visualization of soft tissues in invertebrates. Applied radiation and isotopes: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine. 68: 1687-1693
- Rojas Guiot P., R. Santiago Bravo. 1982. Determinación del ciclo reproductivo del mejillón *Mytilus californianus* en el ejido Eréndira, Baja California. Tesis de licenciatura en Oceanología. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC. 46 pp.

- Salas Garza A. y Oliva de la Peña A. 1983. Características poblacionales del bivalvo *Mytilus californianus* y algunos aspectos sobre su comunidad en la costa de Erendira, B. C. Tesis de Licenciatura en Oceanología ESCM-UABC. 183 pp.
- Schmidt, D. 1999. A review of California Mussel (*Mytilus californianus*) fisheries biology and fisheries programs. Canadian Stock Assessment Secretariat Research Document 99/187, 32pp
- Shaw, W.n., Hassler T.J., y Moran D.P.. 1988. Species profiles: life histories and environmental requirements of coastal fishes and invertebrates (Pacific Southwest) California sea mussel and bay mussel. U.S. Wildl. Serv. Biol. Rep. 82(11). U.S. Army Corps of Engineers, TR EL-82-4. 16 pp.
- Skinner H. C. W. y Jahren, A. H. 2003. Biomineralization. Treatise on Geochemistry. 8: 117-184
- Smith, J.R., Fong, P. y Ambrose, R.F. 2006. Dramatic declines in mussel bed community diversity: response to climate change? Ecology 87: 1153-1161.
- Thomsen, J. y Melzner, F. 2010. Moderate seawater acidification does not elicit long-term metabolic depression in the blue mussel *Mytilus edulis*. *Mar. Biol.* 157: 2667-2676.
- Wells B.K, Schroeder I.D., Santora J.a., Hanzen E.L, Bodgrad S.T. Bjorkstedt E.P., Sydeman W.J., Losekoot M., Thompson S.A., Gomez-Valdes J., Lavaniegos B., Gaxiola-Castro G., Largier J., Golightly R.T.,

Schneider S.R., Kim S., Lo N., Chavez F.P., Lo N., loeb V.j., McClatchie S., Watson W., Eber E.D., Thompson A. R., Warzybok P., Bradley R., Jahncke J., Fisher J., Morgan C., Peterson J., Daly E.A., Peterson W. T., Brodner R.D., Goericke R., Campbell G.S., Hildebrand J.A., Harding J., Field J., Sakuma K., Hayes S., Mantua N., Melin S.R., DeLong R.L., Auth T.D. y Abbel J. 2013. State of California Current 2012-13: Nosunch thing as an “Average” year. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report 54: 37-71

- Zeebe, R. E. 2012. History of seawater carbonate chemistry, atmospheric CO₂, and ocean acidification, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 40: 141–165