



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



**$\delta^{13}\text{C}$ Y $\delta^{15}\text{N}$ EN VIBRISAS DE LOBO MARINO
DE CALIFORNIA
(*Zalophus californianus*) COMO INDICADOR DE
LA VARIACIÓN TRÓFICA ESTACIONAL EN
BAHÍA MAGDALENA Y BAHÍA DE LA PAZ,
BCS, MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS
EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

PRESENTA:

BIÓL. SANDRA MOTE HERRERA

La Paz, B.C.S., Junio de 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 03 del mes de Junio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

" $\delta^{13}\text{C}$ Y $\delta^{15}\text{N}$ EN VIBRISAS DE LOBO MARINO DE CALIFORNIA (*Zalophus californianus*)

COMO INDICADOR DE LA VARIACIÓN TRÓFICA ESTACIONAL EN BAHÍA MAGDALENA Y

BAHÍA DE LA PAZ, BCS, MÉXICO"

Presentada por el alumno:

MOTE

Apellido paterno

HERRERA

materno

SANDRA

nombre(s)

Con registro:

A	0	9	0	1	3	8
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de Tesis

DR. DAVID AURIOLES GAMBOA
Director de Tesis

DR. EMILIO JOSÉ BEIER MARTIN
Director de Tesis

DRA. AIDA MARTÍNEZ LÓPEZ

DR. MANUEL JESÚS ZETINA REJÓN

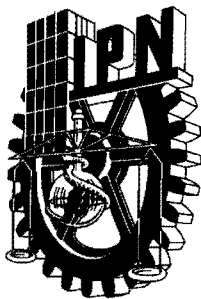
DR. ALBERTO SÁNCHEZ GONZÁLEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE



IPN
CICIMAR
DIRECCION



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 07 del mes Junio del año 2011, el (la) que suscribe BIOL. SANDRA MOTE HERRERA alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS con número de registro A090138 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de: DR. DAVID AURIOLES GAMBOA Y DR. EMILIO JOSÉ BEIR MARTIN y cede los derechos del trabajo titulado: " $\delta^{13}\text{C}$ Y $\delta^{15}\text{N}$ EN VIBRISAS DE LOBO MARINO DE CALIFORNIA (*Zalophus californianus*) COMO INDICADOR DE LA VARIACIÓN TRÓFICA ESTACIONAL EN BAHÍA MAGDALENA Y BAHÍA DE LA PAZ, BCS, MÉXICO" al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: sandmote@gmail.com - dgamboa@ipn.mx - ebeier@cicese.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


BIOL. SANDRA MOTE HERRERA
nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis directores de tesis Dr. David Auriol y Dr. Emilio Beier por brindarme su gran apoyo y conocimiento a lo largo de mi formación como maestra.

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas CICIMAR-IPN por las facilidades otorgadas en el uso de las instalaciones. Al Instituto Politécnico Nacional por la beca PIFI

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios.

A mi comité tutorial integrado por la Dra. Aída Martínez, el Dr. Alberto Sánchez, Dr. Manuel Zetina y Dr. Pablo del Monte por sus acertados comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al CP. Humberto Ceseña Amador por su cordialidad y eficiencia al dirigir el departamento de servicios escolares.

En la parte de laboratorio siempre estaré en deuda con Sonia Futema y Francisco que me brindaron las facilidades para procesar las muestras.

A todos mis amigos que siempre estuvieron presentes, unos lejos y otros cerca, pero todos ellos contribuyeron de alguna u otra forma. Me permito omitir sus nombres por temor a no mencionar a alguno, pero ellos saben quiénes son.

Finalmente, pero no menos importante, a mi familia que creyó en mí y siempre me ha apoyado. Gracias a ustedes fue posible que concluyera este capítulo más de mi vida.

Tabla de contenido

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	ix
GLOSARIO	x
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	6
JUSTIFICACIÓN	10
HIPÓTESIS	10
OBJETIVOS	11
General	11
Específicos	11
MATERIALES Y MÉTODOS	12
Área de estudio	12
Características oceanográficas de Bahía Magdalena y aguas adyacentes	13
Características oceanográficas de Bahía de La Paz	15
Colecta de material biológico	17
Procesamiento de las muestras para el análisis isotópico	18
Variables ambientales (físicas y biológicas) y su relación con la variación isotópica	19
Concentración superficial de clorofila “a” (Chl- a)	19
Índice de surgencia costera (CUI, por su acrónimo en inglés)	19

Ajuste estacional.....	20
Análisis de datos.....	21
RESULTADOS.....	22
Tamaño de muestra específicos	22
Análisis y perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de las vibrisas	24
Diferencias isotópicas entre localidades de estudio	31
Variaciones isotópicas entre sexos	32
Variables ambientales (físicas y biológicas) y su relación con la variación isotópica a lo largo de la vibrisa	33
Determinación de la tasa de crecimiento	36
Correlación de la variación isotópica con la variación de concentración de Clorofila a en el área adyacente a Bahía Magdalena.....	41
Correlación de la variación isotópica con la variación de concentración de Clorofila a en el área adyacente a Bahía de La Paz.	45
Índice de surgencia frente a la Bahía Magdalena.....	47
DISCUSIÓN	48
Variación isotópica	48
Tasa de crecimiento de la vibrisa	55
Correlación de las variables ambientales con la variación isotópica	57
Variabilidad estacional	59
CONCLUSIONES	65
LITERATURA CITADA	66
ANEXOS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de los folículos de los paquetes de vibrisas de un lobo marino de California. Tomado y modificado de Dehdardt <i>et al.</i> , 1998.....	4
Figura 2. Fotografía de vibrisas de <i>Zalophus californianus</i>	5
Figura 3. Área de estudio de las colonias reproductoras de lobo marino <i>Zalophus californianus</i> . Los puntos indican la ubicación de las zonas de estudio. ...	12
Figura 4. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (mediana $\pm$ mín y máx en ‰) comparando las localidades de Bahía de La Paz y de Bahía Magdalena de <i>Zalophus californianus</i>	24
Figura 5. Perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ (círculo) y de $\delta^{15}\text{N}$ (diamante) en ‰ (vs PDB y aire, respectivamente) de la vibrisa de <i>Zalophus californianus</i> colectados en Bahía Magdalena (BM). Indicando el código individual con el sexo y localidad de colecta.....	25
Figura 6. Perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ (círculo) y de $\delta^{15}\text{N}$ (diamante) en ‰ (vs PDB y aire, respectivamente) de la vibrisa de <i>Zalophus californianus</i> colectados en Bahía de La Paz (IS). Indicando el código individual con el sexo y localidad de colecta.	27
Figura 7. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (mediana $\pm$ mín y máx en ‰) de las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> de Bahía de La Paz (en el recuadro) y de Bahía Magdalena	29
Figura 8. Perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en ‰ (vs PDB y aire, respectivamente) de la vibrisa H391-BM, (a) perfil isotópico general y (b) la variación de $\delta^{13}\text{C}$ Vs $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de la misma	30
Figura 9. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (mediana $\pm$ mín y máx en ‰) de las vibrisas de las hembras de <i>Zalophus californianus</i> de Bahía de La Paz (BLP) y de Bahía Magdalena (BM).....	31
Figura 10. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (mediana $\pm$ mín y máx en ‰) de las vibrisas de hembras y machos de <i>Zalophus californianus</i> de Bahía Magdalena	32
Figura 11. Imagen de la concentración media de clorofila [Chl-a] a partir de MODIS, para las zonas adyacentes a Bahía Magdalena y Bahía de La Paz.....	34

- Figura 12.** Imagen de la desviación estándar de la concentración de clorofila [Chl-a] a partir de MODIS, para las zonas adyacentes a Bahía Magdalena y Bahía de La Paz.34
- Figura 13.** Serie de tiempo con valores semanales del verano de 2002 al del 2007 obtenidos por el sensor MODIS; a) de la clorofila a (mg.m^{-3}) (proxy de la productividad) y b) la temperatura superficial del mar (TSM, $^{\circ}\text{C}$) para la región adyacente a la lobera de Cabo San Lázaro.....35
- Figura 14.** Serie de tiempo de valores semanales del verano de 2002 al del 2007 obtenidos por el sensor MODIS; a) de la clorofila a (mg.m^{-3}) (proxy de la productividad) y b) la temperatura superficial del mar (TSM, $^{\circ}\text{C}$) para la región adyacente a la lobera de Los Islotes, en la Bahía de La Paz.36
- Figura 15.** Ajuste estacional realizado al perfil isotópico de $\delta^{15}\text{N}$ en las vibrisas de lobo marino, *Zalophus californianus*, únicamente se muestran los perfiles con un buen ajuste estacional ($>30\%$). Los datos están ordenados cronológicamente, en los dos últimos gráficos se muestran los perfiles obtenidos de los individuos de Bahía de La Paz (IS)38
- Figura 16.** Relación presente entre la longitud de la vibrisa y el número de oscilaciones anuales40
- Figura 17.** Perfil isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa más larga (41cm) perteneciente a M15 colectado en Bahía Magdalena. a) Muestra la variación isotópica a lo largo de la vibrisa, las líneas punteadas indican arbitrariamente las oscilaciones que podrían estar revelando aproximadamente 7 años de información alimentaria, y b) Indica el nicho isotópico de alimentación de este individuo, observando la dispersión de los datos41
- Figura 18.** Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo limitado por el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (3 años) y cuyo inicio fue alrededor de septiembre de 2006. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 39%.44
- Figura 19.** Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (1 año) y cuyo inicio fue alrededor de junio de 2007

aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 54%	46
Figura 20. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (media y desviación estándar) de la vibrisa de <i>Zalophus californianus</i> correspondiente a la categoría hembras colectadas en Bahía Magdalena y Bahía de La Paz	50
Figura 21. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (media $\pm$ DS) de la vibrisa de <i>Zalophus californianus</i> correspondiente a los machos y hembras colectados en Bahía Magdalena y las hembras encontradas en Bahía de La Paz	52
Figura 22. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (promedio $\pm$ DS en ‰) de las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> recolectados en Bahía Magdalena. El gráfico de la izquierda muestra los datos de $\delta^{13}\text{C}$ y el de la derecha los valores de $\delta^{15}\text{N}$, de las distintas categorías de edad	55
Figura 23. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (4 años) y cuyo inicio fue alrededor de marzo de 2005 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 36%	81
Figura 24. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila en base al tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (2.8 años) y cuyo inicio fue alrededor de mayo de 2006 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 40%	82
Figura 25. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (2.5 años) y cuyo inicio fue alrededor de octubre de 2006 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 45%	83
Figura 26. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (2.7 años) y cuyo inicio fue alrededor de septiembre de 2006	

aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 38%84

Figura 27. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila en base al tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (1 año) y cuyo inicio fue alrededor de junio 2007 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 67%85

Figura 28. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa de la Hembra 3 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 6.6 meses86

Figura 29. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa de la Hembra 6 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 3.6 meses86

Figura 30. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa de la Hembra 10 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 4.2 meses87

Figura 31. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa de la Hembra 391 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 2.3 meses87

Figura 32. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa del Macho 2 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 1.6 meses88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Registro de las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> de las zonas reproductivas en estudio. El área sombreada muestra a los organismos de Bahía de La Paz (denominados como IS). El código señala el sexo: Macho y H-hembra, así como la localidad: Bahía Magdalena BM.	22
Tabla 2. Estadística descriptiva de los valores isotópicos de las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> para cada una de las localidades.	23
Tabla 3. Valores isotópicos de las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> . Valor medio $\pm$ SD. En negrillas se resaltan los casos de las hembras con mayor variabilidad en sus datos.	28
Tabla 4. Valores de la correlación de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de las vibrisas de hembras y machos de <i>Zalophus californianus</i> de ambas localidades de estudio.	32
Tabla 5. A partir del análisis de Fourier se calculó la periodicidad del $\delta^{15}\text{N}$ obtenido de las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> , se consideraron únicamente los que mostraron una VE>20%. En gris se indica que las vibrisas se colectaron en Bahía de La Paz.....	37
Tabla 6. Reconstrucción del tiempo de la información contenida en cada una de las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> en base al modelo propuesto. En gris se indican las muestras de Bahía de La Paz	42
Tabla 7. Representación del tiempo de desfase del Índice de Surgencia para las vibrisas de <i>Zalophus californianus</i> en Bahía Magdalena.....	47
Tabla 8. Datos de la categoría de edad de los lobos marinos de California colectados en Bahía Magdalena. Edad estimada según Ascencio-Estrada (2011).....	53
Tabla 9. Análisis estadístico de la periodicidad de las vibrisas de lobo marino de California <i>Zalophus californianus</i> , donde se enlistan los parámetros del ajuste estacional.....	62

GLOSARIO

Alimentario: Propio de la alimentación.

Análisis de Fourier: Analiza funciones periódicas a través de la descomposición de dicha función en una suma infinitesimal de funciones senoidales mucho más simples (como combinación de senos y cosenos con frecuencias enteras).

Armónico anual: función senoidal de la forma $F = A_a \cos(\omega_a t - \varphi_a)$ que se entiende de la siguiente manera, la función ondulatoria F alcanza su máximo (la **amplitud** A_a) en el instante de tiempo en que $\omega_a t$ es igual a la **fase** anual φ_a y $\omega_a = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{365.25 \text{ días}}$ donde T es el período anual en días del año a partir de la cual la onda se repite en el tiempo t .

Armónico semianual: *Idem* armónico anual con $\omega_s = \frac{2\pi}{182.625} = \frac{2\pi}{T_s}$

BAC (Centro de Actividad Biológica): Zona que se caracteriza por niveles de concentración pigmentaria, volúmenes de desplazamiento macrozooplanctónico y abundancia relativa de huevos y larvas de peces neríticos, que son claramente superiores a los que se presentan en la zona costera.

Capa mínima de oxígeno (CMO): Capa profunda constituida por una masa de agua con concentraciones de oxígeno por debajo de los $10 \mu\text{mol l}^{-1}$. El proceso de desnitrificación ocurre en esta zona debajo de los $2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ de oxígeno.

Clorofila a: Pigmento presente en las células de organismos capaces de llevar a cabo la fotosíntesis, como las microalgas. Está presente dentro de los cloroplastos y se considera que su concentración en el agua es proporcional (más no una medida precisa) de la biomasa fitoplanctónica.

$\delta^{13}\text{C}$: Diferencia expresada en partes por mil entre el contenido de ^{13}C de una muestra con respecto al del estándar Pee Dee Belemnite. En estudios de alimentación se usa para definir el tipo de ambiente que explotan los consumidores (*i.e.* costero/oceánico).

$\delta^{15}\text{N}$: Diferencia expresada en partes por mil entre el contenido de ^{15}N de una muestra con respecto al del estándar nitrógeno atmosférico. En estudios de alimentación se usa para definir la posición trófica de los consumidores.

Desnitrificación: Proceso microbiano anaeróbico mediante el cual se da la reducción secuencial de nitratos a nitritos, óxido nítrico y gas nitrógeno, para la

producción de N molecular (N_2). El déficit de nitratos guarda una relación lineal positiva con los valores de $\delta^{15}N$.

Enriquecimiento isotópico: Término utilizado para describir la cantidad de ^{13}C o ^{15}N con respecto a una cantidad previa. Por lo tanto, la sustancia enriquecida en ^{13}C o ^{15}N , están relativamente disminuidas en ^{12}C y ^{14}N , respectivamente.

Especialista plástico: Se considera así a una especie que aprovecha muchos recursos en pocas cantidades y pocos recursos en altas frecuencias.

Espectro de frecuencias: De un fenómeno ondulatorio, es la superposición de ondas de varias frecuencias, es una medida de la distribución de amplitudes de cada frecuencia.

Fidelidad al sitio: Patrón conductual a partir del cual un individuo regresa a un mismo sitio natal o no.

Filopatría: Patrón conductual a partir del cual un individuo regresa a un mismo sitio natal.

Fraccionamiento isotópico: Aumento en la concentración de un isótopo estable que se presenta en un consumidor respecto a su presa, resultado de una discriminación metabólica hacia el isótopo pesado.

Isótopo estable: Isótopo que no se desintegra tan fácilmente como los ligeros o que es discriminado a descomponerse durante procesos metabólicos debido a sus características atómicas.

Isótopo ligero: Son isótopos del mismo elemento que tienen un menor número de neutrones o masa atómica (A) que los otros isótopos que lo conforman. Generalmente son los más abundantes en los compuestos y en la naturaleza.

Material Orgánico Particulado (MOP): Comprende todo el material orgánico, como secreciones, exudados celulares, material fecal de organismo vivos, restos de fitoplancton y zooplancton y material detrítico parcial o totalmente degradado, cuyo diámetro sea mayor a $0.2\mu m$ y menor a $0.1cm$.

Nivel trófico: Posición o categoría en la que se clasifica un determinado organismo dentro de la cadena trófica; dicha posición está dada de acuerdo a la manera en la cual obtiene su materia y energía.

Oligotrófico: Término que se utiliza para describir un sistema acuático que posee niveles bajos de productividad primaria. Relativo a las aguas con bajas

concentraciones de nutrientes. Sistema infértil o maduro basado en la abundancia del plancton y variabilidad de nutrientes.

Oportunista: Describe al animal que saca ventaja de cualquier presa que esté disponible.

Poliginia: Sistema de apareamiento de algunas especies donde los machos se aparean con más de una hembra durante la temporada reproductiva.

Productividad primaria: Es definida como la cantidad total de carbono fijado por organismos autótrofos a través de la síntesis de material orgánico proveniente de compuestos inorgánicos como el CO_2 y H_2O utilizando energía derivada de la radiación solar o de reacciones químicas por unidad de tiempo. Esta se mide por el crecimiento y la reproducción de algas y de otras plantas. Sus unidades de medición se dan en gramos de carbono por unidad de área, por unidad de tiempo.

Razón isotópica: Se refiere a la relación o proporción del isótopo pesado entre el ligero del mismo elemento, también puede denominarse señal isotópica.

Surgencia: Proceso por el cual hay elevación de agua profunda hacia fuera de la costa. Las surgencias son más pronunciadas donde el viento sopla paralelo a la costa y a su izquierda (hemisferio norte) de manera persistente. Existen tres tipos de surgencias: costera, por accidentes topográficos y por divergencia de masas de agua (aducción vertical de dos masas de agua).

Varamiento: Evento en el que un mamífero marino se encuentra sobre la playa o confinado a aguas muy someras, de manera que no pueda liberarse por sus propios medios.

Vibrisa: Son un tipo de pelos especializados que poseen algunos animales (especialmente los mamíferos a modo de bigotes) como elemento sensorial táctil.

RESUMEN

Se exploró la vibrisa del lobo marino de California (*Zalophus californianus*) como un tejido que registra la variación isotópica estable asociada a cambios en la alimentación y la variación ambiental. El propósito principal de esta investigación fue analizar los patrones de variación de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de las vibrisas de lobo marino y compararlos con las variaciones de temperatura superficial del mar (TSM), la concentración de Clorofila-a [Chl-a] y el Índice de Surgencia en dos zonas reproductivas del lobo marino; Bahía Magdalena (BM) y Bahía de La Paz (BLP). Se seleccionaron un total de 13 vibrisas colectadas entre 2008 y 2009; seis de hembras y cuatro de machos de BM, y tres hembras de BLP. Cada vibrisa se cortó en aproximadamente 60 fragmentos, dependiendo de la longitud de la misma, que sumaron un total de 680 fragmentos que fueron analizados isotópicamente en un espectrómetro de masas de flujo continuo. Al comparar las hembras de las dos localidades se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\delta^{13}\text{C}$; $H=223.645$, g.l.=8, $p<0.05$ y $\delta^{15}\text{N}$; $H=250.947$, g.l.=8, $p<0.05$), donde los valores isotópicos de la mediana fue más alta para BLP, lo que puede sugerir valores más elevados desde la base de la red trófica, materia orgánica particulada (MOP). Se analizaron las oscilaciones estacionales (suma del valor medio, anual y semianual) de ambos isótopos mediante el análisis de Fourier para identificar la frecuencia de cada componente de la estacionalidad. Adicionalmente, se encontró una relación positiva entre el número de oscilaciones estacionales y la longitud de la misma ($r=0.97$; $p<0.001$), con lo que es posible calcular una tasa de crecimiento de 0.16 mm/día, similar a la encontrada en otros otáridos (*Eumetopias jubatus*). Con base a datos de TSM y foto-pigmentos tomados del sensor AquaMODIS desde 2002 a 2010, para las zonas aledañas a las localidades de estudio, se generará el patrón estacional presente en los perfiles isotópicos de la vibrisa. La variabilidad ambiental e isotópica observada en la vibrisa solo fue posible realizar el ajuste en el $\delta^{15}\text{N}$ de 8 vibrisas, obteniéndose para cada una un tiempo promedio de desfase de 3.52 meses para BM y de 6 meses para BLP entre el momento de mayor productividad y el tiempo en que se refleja este incremento en el tejido del animal..

Palabras clave: *Zalophus californianus*, $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, vibrisas, hábitos alimentarios, variabilidad ambiental.

ABSTRACT

We explored the vibrissae of the California sea lion (*Zalophus californianus*) as a tissue that records the isotopic variation associated with changes in food and environmental conditions. The main aim of this work was to analyze the patterns of variation $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ along the sea lion vibrissae and to compare with changes in sea surface temperature (SST) and satellite-derived chlorophyll pigment concentrations (CHL), interannual variability are examined for (CHL) and Upwelling Index (UI), in two breeding areas; Magdalena Bay (BM) and La Paz Bay (BLP). We selected a total of 13 vibrissae collected between 2008 and 2009, six females and four males of BM, and three females of BLP in 2001 and 2006. Each vibrissae was cut into about 60 pieces, depending on the length of the vibrissae; a total of 680 fragments were analyzed isotopically in a mass spectrometer of continuous flow. Comparison between females of the two sites gives a statistically significant differences by Kruskal-Wallis test ($\delta^{13}\text{C}$; $H=223.645$, g.l.=8, $p<0.05$ and $\delta^{15}\text{N}$; $H=250.947$, g.l.=8, $p<0.05$), where the median values for BLP was higher in both isotopes. It could reflect higher values from the base of the food web (MOP). Seasonal variations (the sum of the average, plus the sum of both the annual and the semiannual components) were analyzed of both isotopes by Fourier analysis to identify the frequency of each component of seasonality. Additionally, we found a positive relationship in 8 vibrissae analyzed between the number of seasonal fluctuations and the length of the vibrissae; finding a significant correlation ($r= 0.97$, $p<0.001$), from which is possible to calculate a growth rate 0.16 mm / day, comparable to that found in other sea lions. Based on data from SST and CHL from 2002 to 2010 for surrounding areas the study sites, we performed the seasonal patterns in the isotopic vibrissae profiles. The correlation between the environmental and the isotopic variability was possible using the $\delta^{15}\text{N}$ in 8 selected vibrissae. Results showed an average time lag of 3.52 months for BM and 6 months for BLP between the time of increased productivity and the time reflected this increase in the animal tissue.

Keywords: *Zalophus californianus*, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$, vibrissae, feeding habits, environmental variability.

INTRODUCCIÓN

La Península de Baja California se ubica al noroeste de México y separa las aguas del Océano Pacífico del Golfo de California. Ambas costas presentan características ambientales y oceanográficas distintas debido a la influencia que tienen las masas de agua que predominan en cada región, mostrando una actividad de surgencia estacional distinta en cada costa. Pese a esas diferencias, ambas regiones forman hábitats adecuados para el desarrollo de colonias reproductivas de lobo marino de California, localizadas desde las Islas Canal en California hasta la parte sur de la Península de Baja California en México, incluyendo el Golfo de California (King, 1983, Le Boeuf *et al.*, 1983).

El lobo marino de California (*Zalophus californianus*) es un carnívoro (pinnípedo) perteneciente a la Familia Otariidae (King, 1983), con la distribución más amplia y de mayor abundancia en México. Se puede encontrar desde aguas templadas y subtropicales de la costa oeste del Pacífico Norte desde la Columbia Británica, Canadá hasta Mazatlán y las Islas Marías, México, incluyendo el Golfo de California (King, 1983; Lowry *et al.*, 1991; Szteren *et al.*, 2006). Existen registros aislados de individuos muy al norte de su distribución en el Golfo de Alaska y muy al sur hasta Puerto Madero, México, en el paralelo 14°N (Le Boeuf *et al.*, 1983; Gallo y Solórzano, 1991).

Esta especie es poligínica y con un marcado dimorfismo sexual, tanto físicamente como en el comportamiento de cada sexo como por ejemplo, la migración, donde los machos adultos migran después del periodo reproductivo y regresan al siguiente año, mientras que las hembras tienden a quedarse todo el año en las áreas reproductivas (Peterson y Bartholomew, 1967; Mate, 1975; Odell, 1975; Auriolles-Gamboa *et al.*, 1983; Hernández-Camacho, 2001; Hernández-Camacho *et al.*, 2008; Auriolles-Gamboa y Trillmich, 2008).

A diferencia de los machos, las hembras son filopátricas, es decir, que permanecen la mayor parte de su vida en el sitio o área de nacimiento. Esto se debe en parte a que permanecen en estos sitios por la prolongada lactancia (de un año o

más) y por los repetidos nacimientos a lo largo de su vida reproductiva que puede ser de entre 10 y 15 años consecutivos (Hernández-Camacho, 2001). Es por ello que su alimentación se ve restringida a la región en donde se reproducen, estableciéndose así áreas de alimentación específicas (Sánchez-Arias, 1992; García-Rodríguez y Auriolles-Gamboa, 2004; Porras-Peters *et al.*, 2008). Debido a esta residencia casi permanente de las hembras al sitio de reproducción, se convierten en mejores indicadoras de las condiciones ambientales locales, lo que sugiere cierta especialización en el aprovechamiento de los recursos locales en esta especie (Porras-Peters *et al.*, 2008) así como en el lobo marino de Galápagos *Zalophus wolfebaeki* (Páez-Rosas y Auriolles-Gamboa, 2010). Con base en lo anterior, podría esperarse que con el tiempo los hábitos alimentarios de cada colonia se tornen característicos con dietas, niveles y amplitud tróficos distintos, debido al consumo de diferentes presas y a las características ambientales particulares de cada región (Auriolles-Gamboa *et al.*, 2000).

El lobo marino de California se ha descrito como oportunista, por el gran número de especies de las que se alimenta, principalmente de peces que se agregan en grandes cardúmenes y en menor proporción de cefalópodos y crustáceos (Antonelis *et al.*, 1984; Bautista-Vega, 2002; García-Rodríguez y Auriolles-Gamboa, 2004; Auriolles-Gamboa y Camacho, 2007; Porras-Peters *et al.*, 2008); pero recientemente se ha clasificado como especialista plástico, ya que se alimenta de un espectro dominado por 4-5 especies que cambian su porcentaje de importancia estacionalmente (Lowry *et al.*, 1991; García-Rodríguez y Auriolles-Gamboa, 2004; Auriolles-Gamboa y Camacho-Ríos, 2007). Este cambio de dieta parece estar modulado por variaciones en la diversidad, abundancia y calidad alimenticia de sus presas (Rodríguez-Valenzuela, 2009) lo que podría asociarse al efecto estacional de la productividad del ecosistema (Mercuri, 2007).

Por décadas ha existido interés por el estudio de los hábitos alimentarios del lobo marino en diferentes colonias del Golfo de California, se han empleado diversas técnicas como: análisis de contenido estomacal (Ej. Fiscus y Baines, 1966) e identificación de partes duras de peces y cefalópodos en muestras fecales (Ej.

Antonelis *et al.*, 1984; Auriolles-Gamboa *et al.*, 1983; Lowry *et al.*, 1991; García-Rodríguez, 1995; Orr, 1998; García-Rodríguez y Auriolles-Gamboa, 2004). Sin embargo, estos métodos están limitados a un cierto periodo de alimentación y no es posible identificar la variación de la dieta en un ciclo anual o escalas de tiempo mayores.

Cuantificar los isótopos estables en un tejido animal puede ser una excelente alternativa a las técnicas convencionales del análisis de la dieta por contenido estomacal o de excretas (Cherel *et al.*, 2007). Dependiendo de la tasa de recambio isotópico específico del tejido, las medidas de los isótopos estables reflejan en promedio los registros alimentarios durante días o años pudiendo resolver la variación nutricional en diferentes escalas de tiempo (Tieszen *et al.*, 1983; Hobson y Clark, 1992; Hobson *et al.*, 1996) que como en el caso de las vibrisas pueden reflejar variaciones alimentarias intra e interanuales (Hirons *et al.*, 2001b; Cherel *et al.*, 2009).

Los pinnípedos al igual que los mamíferos terrestres, tienen vibrisas faciales muy innervadas, que son los principales órganos de la percepción táctil, además les permite orientarse bajo el agua y detectar a sus presas durante la alimentación (Hyvärinen, 1989; Dehnhardt y Kaminski, 1995; Dehnhardt *et al.*, 1998). Existen tres grupos principales de estos pelos sensitivos: vibrisas supraorbitales localizadas por encima de los ojos, vibrisas rinales ubicadas junto a la nariz y las vibrisas mysticiales alrededor de la boca, éstas son las más largas y numerosas, se localizan en folículos con numerosos vasos sanguíneos, además están provistas de mecano-receptores y terminaciones nerviosas lo que las provee de aspectos funcionales del sentido del tacto (Dehnhardt, 1994; Dehndardt *et al.*, 1998; Fig. 1).

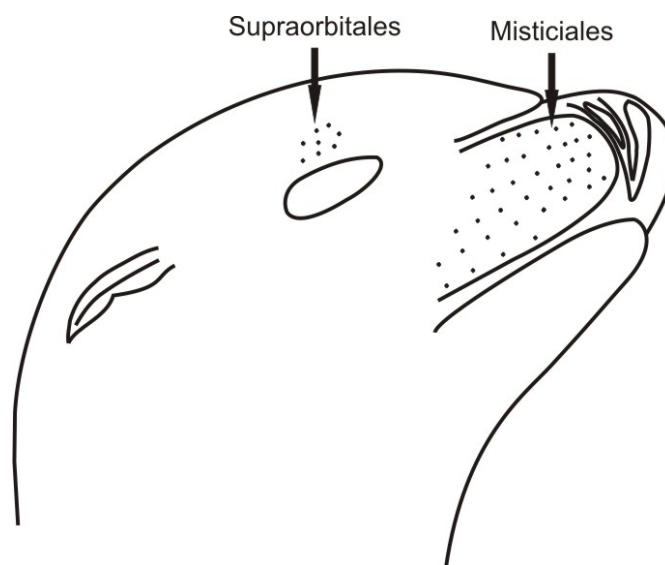


Figura 1. Distribución de los folículos de los paquetes de vibrisas de un lobo marino de California. Tomado y modificado de Dehndardt *et al.*, 1998.

Debido a la importancia de las vibrisas misticiales en el proceso sensitivo tanto para la navegación como para detectar a sus presas y su mayor longitud, los estudios se han enfocado básicamente en este grupo de vibrisas. En cuanto a lo referente a este sistema se han hecho trabajos en diversos rubros, que van desde la descripción morfo-fisiológica de la vibrisa fundamentalmente en fócidos (Ginter, 2010), detectando que ayudan como receptor hidrodinámico en la navegación, para la discriminación de forma, talla y texturas de superficies, y para la termorregulación (Dehnhardt, 1994; Hyvärinen, 1989; Dehnhardt *et al.*, 1998), hasta el uso de hábitat y registro de la dieta interpretando los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en un muestreo serial a lo largo de la vibrisa (Cherel *et al.*, 2009).

La vibrisa o bigote es un tejido queratinizado que almacena información isotópica de carbono y nitrógeno al igual que otros tejidos que refleja los cambios de dieta en el tiempo a lo largo de la misma debido a que por estar formada de queratina es metabólicamente inerte después de su síntesis (Hobson, 1999; Rubenstein y Hobson, 2004). Además se sabe que las vibrisas de los otáridos crecen continuamente a una tasa constante y no se mudan (Hirons *et al.*, 2001a) lo que permite hacer una reconstrucción de una parte de la historia trófica de los individuos.

Sin embargo, para poder realizar una interpretación adecuada de los cambios isotópicos a lo largo de la vibrisa, es necesario determinar su tasa de crecimiento.

Conociendo las aplicaciones de los isótopos estables en la dinámica trófica de los organismos marinos y en particular reconociendo la utilidad de medir su variación en un tejido inerte de mediana duración (de 1 a 4 años) como es la vibrisa (Fig. 2), en este estudio se pretende analizar e interpretar las variaciones de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en vibrisas de *Zalophus californianus* y relacionar éstas con los cambios estacionales de la productividad (estimada la concentración de clorofila “a”) en las zonas aledañas a dos colonias reproductivas; Isla Santa Margarita-Cabo San Lázaro (fuera de Bahía Magdalena) y Los Islotes (Bahía de La Paz).

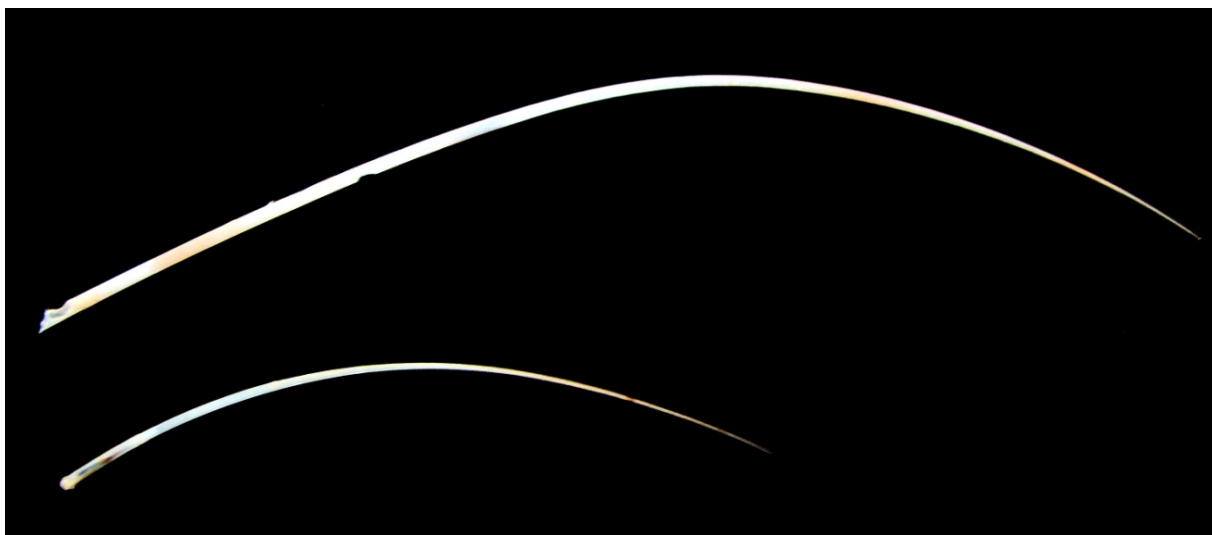


Figura 2. Fotografía de vibrisas de *Zalophus californianus*.

ANTECEDENTES

Principalmente, para los estudios de análisis de dieta se han empleado los isótopos estables de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ varían alrededor de 1‰ a cada nivel de la trama trófica pero es utilizado principalmente como un indicador del hábitat utilizado durante la alimentación, ya que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ es muy diferente entre las plantas que sostienen los ecosistemas (fitoplancton, macroalgas o pastos marinos). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en los sistemas marinos están directamente influenciados por factores que actúan en el nivel primario de la producción, como el tamaño, morfología, y tasa de crecimiento del fitoplancton (DeNiro y Epstein, 1978). Por lo que, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ pueden indicar la proveniencia del alimento, contrastando entre ambientes costero vs oceánico, o pelágico vs. bentónico (Hobson *et al.*, 1994). Además en latitudes bajas el fitoplancton como base de la cadena trófica está más enriquecido en ^{13}C en relación a aguas de altas latitudes. Esto se debe a que el CO_2 atmosférico que está más enriquecido en C^{12} se disuelve más rápidamente en el agua de mar a bajas temperaturas (Rau *et al.*, 1992; Goericke y Fry, 1994).

La razón isotópica de nitrógeno ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ o $\delta^{15}\text{N}$) se utiliza extensivamente en ecología como indicador de la posición trófica del consumidor (Hobson, 1999; Vander Zanden *et al.*, 1999; Yoshii *et al.*, 1999; Kurle, 2002) y últimamente para estimar la amplitud de la dieta o su plasticidad (Post, 2002; Bearhop *et al.*, 2004). Estudios recientes han mostrado que las razones isotópicas en los tejidos de los animales presentan un enriquecimiento promedio en ^{13}C de 0.5-1‰ y en ^{15}N de 3-5‰ que aquellas encontradas en su dieta (DeNiro y Epstein, 1978; Fry *et al.*, 1984; Hobson y Welch, 1992; Minagawa y Wada, 1984).

La proporción de los isótopos en el tejido de un depredador, refleja la integración de isótopos contenidos en todas las presas que ha ingerido sobre un periodo determinado por la tasa de renovación de ese tejido (Burton y Koch, 1999; Kurle y Worthy, 2002). La información de los isótopos estables de carbono y nitrógeno obtenida de recursos alimenticios, requiere de un periodo de asimilación

hasta que son incorporados completamente en el tejido del depredador (Kurle, 2002; Hobson *et al.*, 1994); siendo este período el tiempo en el cual la partícula cambia de ser parte de la dieta, a ser derivado de un tejido específico del consumidor (Tieszen *et al.*, 1983).

Una vez incorporada la señal isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$, esta permanecerá en los tejidos dependiendo de la tasa de recambio de los mismos, ya que estos tienen distinta composición bioquímica y son anabolizados y catabolizados a diferentes tasas (Tieszen *et al.*, 1983; Walker *et al.*, 1999). Esta actividad metabólica proporciona información de la dieta en escalas de tiempo distintos (Tieszen *et al.*, 1983; Hobson y Clark, 1992) que van de pocos días (plasma e hígado) a meses (células rojas, músculo y grasa) dependiendo del tejido que se analice (Tieszen *et al.*, 1983; Hobson y Clark, 1992; Darimont y Reimchen, 2002). Por ejemplo, las bandas de dentina en los dientes de mamíferos marinos se han usado para identificar la variación interanual de la dieta (Hobson y Sease, 1998; Hobson *et al.*, 2004). Los cambios a lo largo de las barbas de las ballenas han provisto de un registro isotópico de la variación estacional en sus sitios de alimentación (Best y Schell, 1996; Hobson y Schell, 1998; Lee *et al.*, 2005) y la dieta (Schell *et al.*, 1989; Hobson y Schell, 1998). De este modo, las vibrisas pueden ser un tejido útil para el análisis isotópico en el estudio de la variación de la dieta estacionalmente y a escalas anuales.

Algunos estudios han demostrado que las vibrisas de los otáridos, a diferencia de los fócidos, crecen a una tasa constante y no mudan anualmente, pudiendo registrar información sobre la alimentación del animal por varios años (hasta 4 - 5 años) permitiendo la reconstrucción de la historia trófica individual y de los cambios estacionales intra e interanuales (Hirons *et al.*, 2001a; Greaves *et al.*, 2004; Hall-Aspland *et al.*, 2005; Cherel *et al.*, 2009).

El cálculo de la tasa de crecimiento se ha hecho a partir de ensayos con animales, ya sea en cautiverio o en vida libre, inyectando Glicina enriquecida con ^{15}N a una dosis de 5mg glicina/kg de masa corporal (Zhao y Schell, 2004). Para la foca gris (*Halichoerus grypus*) la tasa de crecimiento fue de 0.24 mm/día (Zhao y Schell,

2004; Greaves *et al.*, 2004) mientras que para la foca leopardo (*Hydrurga leptonyx*) de 0.10 mm/día (Hall-Aspland *et al.*, 2005). Por su parte, Hirons *et al.* (2001a) realizaron un estudio comparativo entre la foca de puerto (*Phoca vitulina*) con un crecimiento por día de 0.33 mm y el lobo marino de Steller (*Eumetopias jubatus*) con un crecimiento de 0.10-0.17 mm/día. Cherel *et al.* (2009) determinaron la tasa de crecimiento para el lobo fino antártico (*Arctocephalus gazella*) a partir de una correlación entre la longitud de la vibrisa (promedio 49 ± 8 mm) y el número de oscilaciones isotópicas para los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ (4.8 ± 1.1) dando como resultado un crecimiento de 0.13 mm/día.

El lobo marino de California al igual que muchos otros mamíferos marinos se considera como una especie centinela (Bossart, 2006), ya que es un buen indicador de la salud de los ecosistemas costeros, debido a que es altamente visible, es residente permanente de islas y ambientes costeros, de longevidad larga, es un depredador de alto nivel trófico y con alto metabolismo, además de alimentarse preferentemente de especies que se asocian en densos cardúmenes como los llamados pelágicos menores (sardinas, anchovetas, macarelas (Auriolles *et al.*, 2000). Es por ello que en esta investigación se consideró a esta especie y en particular a las hembras por su alta filopatría (Hernández-Camacho, 2001) como indicadores de la variabilidad ambiental que se presenta cercano a sus zonas de reproducción.

La zona costera adyacente al sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas se ha descrito como una región de alta productividad primaria debido a la actividad de surgencias costeras que inyectan nutrientes a la capa fótica, presentándose la máxima intensidad de este proceso entre abril y junio (Zaytsev *et al.*, 2003). Se han calculado valores isotópicos de la materia orgánica particulada (MOP) para la región de $\delta^{13}\text{C}$ de -21.76‰ y para $\delta^{15}\text{N}$ de 8.27‰ (Camalich-Carpizo *et al.*, *en prensa*)

En cuanto a la Bahía de La Paz, se ha señalado como una zona de elevada productividad fitoplanctónica principalmente durante la primavera (Martínez-López *et al.*, 2001; Reyes-Salinas *et al.*, 2003). Por su parte, Pardo (2009) describió las

condiciones oceanográficas de Bahía de La Paz a partir de datos satelitales, mencionando tres periodos con altas concentraciones de Chl-a en relación a la costa occidental y el centro del Golfo; el primer periodo muy corto durante febrero (2.0 a 4.0mg.m^{-3}), un segundo periodo cuando las concentraciones más altas (2.0 a 2.2mg.m^{-3}) se presentan entre mediados de abril e inicios de septiembre y un tercero con valores altos (3.0mg.m^{-3}) entre diciembre e inicios de febrero; durante agosto a diciembre se presentó baja concentración en la Bahía y el resto del Golfo (-1.0mg.m^{-3}). Los valores isotópicos de la MOP que presenta la Bahía fueron calculados por Aguiñiga *et al.* (2010) para el periodo 2002 a 2005, donde el $\delta^{13}\text{C}$ varió entre -19‰ y -23‰ , muy cercanos a los característicos del fitoplancton marino (-18‰ a -22‰) mientras que para $\delta^{15}\text{N}$ estuvieron entre 8‰ y 12‰ . Ambos isótopos mostraron una variabilidad estacional e interanual importante.

JUSTIFICACIÓN

El análisis de isótopos estables ha llegado a ser una herramienta muy útil para entender la estructura de las redes tróficas en ecosistemas marinos, arrojando información de periodos que varían de acuerdo al tejido utilizado. En tejidos inertes como: pelo, dientes y vibrisas, la información obtenida describe periodos largos de la vida de los organismos e incluso la totalidad de la misma, lo cual es de vital importancia en el entendimiento de la ecología de las especies y su interacción con el ambiente. En el presente trabajo se propone el estudio isotópico de las vibrisas de *Zalophus californianus* y su relación con series ambientales de tiempo de clorofila y temperatura superficial del océano en Bahía Magdalena y Bahía de La Paz.

HIPÓTESIS

Diversos estudios de isótopos estables de C y N realizados en vibrisas de Otáridos (Hirons *et al.*, 1991a; Cherel *et al.*, 2009) muestran evidencia de que este tejido presenta una tasa metabólica lenta lo que provee una excelente fuente de información de varios años de la vida del organismo (4 a 5 años). Por tal motivo, se espera que los cambios estacionales en la dieta se puedan observar en los valores isotópicos de las vibrisas de hembras de lobo marino y estén potencialmente asociados a los cambios estacionales de temperatura superficial del mar, surgencia y pigmentos de Chl-a en cada sitio de estudio.

OBJETIVOS

General

- Explorar los patrones de variación isotópica en las vibrisas de *Zalophus californianus* en dos zonas con distintos regímenes oceanográficos.

Específicos

- Definir el patrón estacional isotópico en las vibrisas *Zalophus californianus* de Bahía Magdalena (Cabo San Lázaro) y Bahía de La Paz (Los Islotes).
- Analizar la variación estacional de la concentración de clorofila e índice de surgencia en la región adyacente a Bahía Magdalena (Cabo San Lázaro) y Bahía de La Paz (Los Islotes).
- Comparar los perfiles de la variación isotópica en las vibrisas y el patrón de variación estacional en las áreas de estudio

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo con muestras provenientes de dos colonias reproductivas con regímenes oceanográficos distintos. La primera colonia se encuentra en la costa occidental de la Península de Baja California, en el complejo lagunar Magdalena-Almejas e incluye la colonia reproductiva de Isla Santa Margarita, así como la colonia de descanso en Cabo San Lázaro en isla Magdalena. La segunda colonia es Los Islotes, que se localiza en la costa oriental de la Península, al Norte de la Isla Espíritu Santo perteneciente a la Bahía de La Paz (Fig. 2).

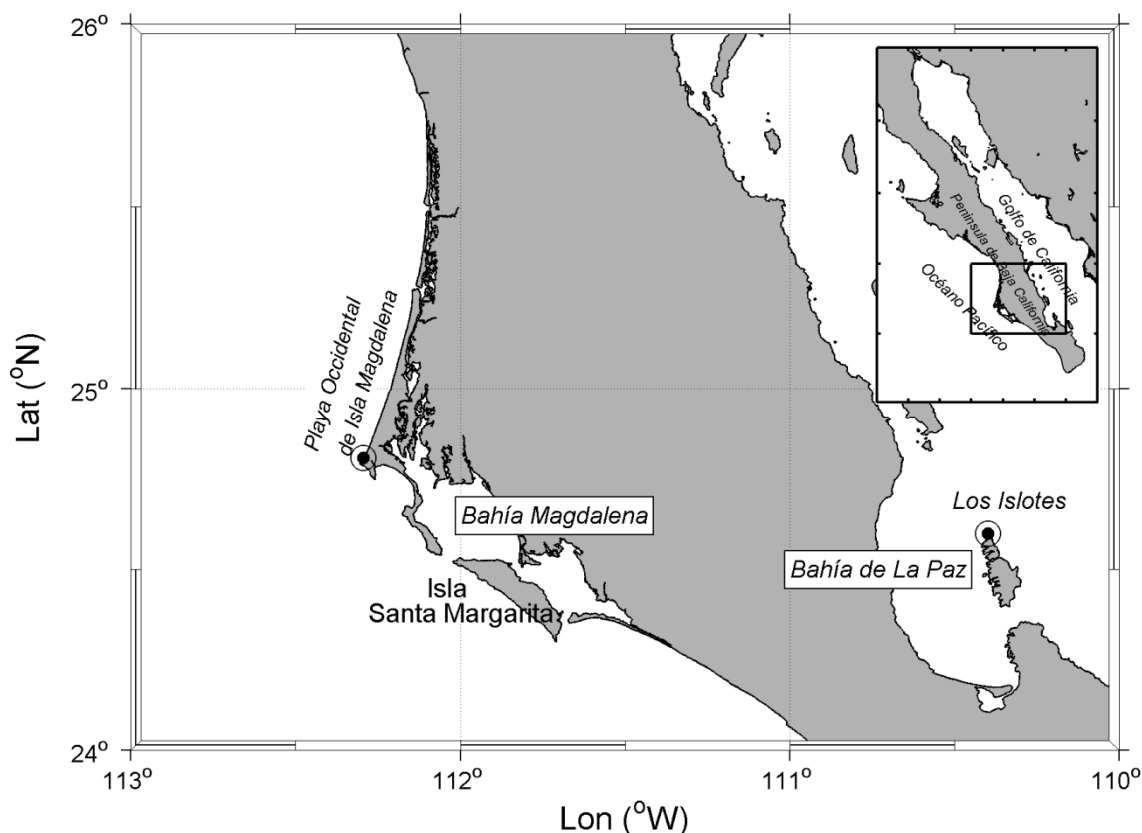


Figura 3. Área de estudio de las colonias reproductoras de lobo marino *Zalophus californianus*. Los puntos indican la ubicación de las zonas de estudio.

La Isla Magdalena es un sitio con alto índice de varamientos de distintas especies de mamíferos marinos cuya frecuencia esta aparentemente determinada por la abundancia de estas especies en la zona (Mercuri, 2007). La especie de la que se encuentra un mayor número de animales es *Zalophus californianus*, y la colonia que produce estos organismos es principalmente la que se encuentra al sur, Isla Santa Margarita (Fig. 2), que es la única colonia reproductora en un radio de 450 km (Mercuri, 2007). Por esa razón, se asume que las vibrisas colectadas en Isla Magdalena corresponden a animales de la región y originados en Isla Santa Margarita.

Características oceanográficas de Bahía Magdalena y aguas adyacentes.

El estudio se realizó con organismos varados provenientes de la localidad de Cabo San Lázaro en Bahía Magdalena, localizada en la costa del Pacífico de Baja California Sur, entre 24° 15' latitud norte y 111° 30' longitud oeste (Fig. 2). Está protegida por tres islas que actúan como barrera (Magdalena, Margarita y Creciente), la principal abertura al Pacífico tiene cerca de 4 km de ancho y más de 40 m de profundidad (Koch *et al.*, 2006). Es considerada un área importante en términos de explotación de sardina, macarela, camarón, entre otras especies. Debido a que esta zona representa una transición entre un ecosistema templado y uno tropical, en ella se observa una alta diversidad de especies, tanto de peces como de invertebrados (Lluch-Belda, 2000).

Esta zona está influenciada por el Sistema de la Corriente de California (SCC) está constituido por una corriente superficial con dirección al ecuador llamada Corriente de California (CC), por la Subcorriente de California (CU) que tiene un flujo subsuperficial con dirección hacia el polo y por la Contracorriente de California (CCC) que es costera y con una estacionalidad intermitente (Durazo *et al.*, 2005). Estas corrientes cambian en intensidad a escalas estacionales e interanuales. El área de estudio es considerada como una zona de transición oceanográfica entre latitudes medias y condiciones oceánicas tropicales (Espinoza-Carreón *et al.*, 2004).

Desde hace tiempo se sabe que la zona costera es considerablemente más productiva que el resto de los océanos, especialmente en las áreas de surgencia a lo largo de los márgenes orientales de los grandes giros, en los que el enriquecimiento proviene en parte del aporte de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes (Lluch-Belda, 2000). Estacionalmente, el SCC está sujeto a una gran variabilidad.

Los cambios estacionales del fitoplancton están ligados a los cambios en los patrones de viento y circulación de gran escala. Se han identificado tres procesos físicos que contribuyen a mantener una producción primaria relativamente alta a lo largo del año: a) las surgencias en Isla Margarita, principalmente durante marzo-junio; b) la presencia de frentes térmicos en el verano, y c) la advección de agua con concentraciones elevadas de fitoplancton provenientes de la parte oceánica frente a Punta Eugenia durante verano-invierno (Martínez-López y Verdugo-Díaz, 2000).

Dentro del ámbito del SCC, lo mismo que en otras regiones altamente productivas, existen sub-áreas de escala espacial mucho menor, las cuales al parecer soportan grandes biomásas de organismos a lo largo del año a las cuales se las ha denominado Centros de Actividad Biológica (BAC). La producción de estos BAC está asociada con diferentes mecanismos físicos en los ecosistemas donde se presentan (Martínez-López y Verdugo-Díaz, 2000).

En el Centro de Actividad Biológica (BAC) de Bahía Magdalena la presencia de altas densidades de fitoplancton, de zooplancton (incluyendo agregaciones altas de crustáceos como las langostillas), los productos de desove de sardinas y anchovetas, así como la presencia de mamíferos marinos, sugiere la existencia de una productividad marina alta así como relaciones tróficas cortas. Así en el BAC de Bahía Magdalena la principal actividad del fitoplancton ocurre entre abril y junio asociada con la generación de surgencias y se refleja en los valores altos de productividad primaria y concentración de clorofila en superficie, los cuales son del orden de 0.31 mg.m^{-3} y 4.5 mg.m^{-3} respectivamente. En tanto que durante el periodo de influencia de la Contracorriente se han reportado valores menores de

productividad y biomasa fitoplanctónica, los cuales fluctúan alrededor de 0.08 mg.m^{-3} y 0.36 mg.m^{-3} .

Características oceanográficas de Bahía de La Paz

La Bahía de La Paz, B.C.S., constituye el cuerpo de agua costero más extenso en la costa oriental de la península de Baja California y uno de los más importantes en el Golfo de California. Se encuentra situada en la región suroeste del Golfo de California entre los paralelos $24^{\circ}45'$ y $24^{\circ}15'$ Norte y los meridianos $110^{\circ}15'$ y $110^{\circ}45'$ Oeste, con dimensiones aproximadas de 80 km de largo y 35 km de ancho. La Bahía presenta un gradiente batimétrico con profundidades al sur desde 10 m, hasta 450 m en su parte norte, lugar donde se localiza la Cuenca Alfonso (Obeso-Nieblas *et al.*, 2008).

En cuanto a las masas de agua que influyen en esta zona se ha detectado la presencia de 3 de ellas: Agua del Golfo de California (AGC; $S \geq 35.00$, $T \geq 12.00^{\circ}\text{C}$); Agua Superficial Ecuatorial (ASE; $S < 35.00$, $T \geq 18.0^{\circ}\text{C}$); Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt; $34.50 < S < 35.00$, $9^{\circ}\text{C} < T < 18^{\circ}\text{C}$) (Torres-Orozco, 1993; Monreal-Gómez *et al.*, 2001). Por su parte, Villegas-Aguilera (2008) observó la presencia de AGC y ASsSt, en julio se observaron los 3 tipos de agua (AGC, ASsSt y ASE) y posteriormente entre agosto y noviembre se presentó la substitución del AGC por el ASE.

El intercambio de agua entre el golfo y la Bahía también ha sido reportado (Sánchez-Velasco *et al.*, 2006) lo que determina que la Bahía tenga tres masas de agua que son un común denominador en todo el Golfo de California. La Bahía tiene una conexión con el Golfo de California a través de dos aperturas: la boca principal (Boca Grande) amplia y profunda, se localiza entre Punta Cabeza Mechudo y el extremo norte de la Isla La Partida; y una boca secundaria (Canal San Lorenzo), somera y estrecha que se localiza al sureste entre el extremo sur de la Isla Espíritu Santo y Punta Pilitas (Villegas-Aguilera, 2008). Los Islotes se encuentran en el

extremo sur de la Boca Grande y su ecosistema adyacente corresponde a la región norte de la Bahía que es profunda (400m) y donde la dinámica muestra una importante variación estacional dada por giros ciclónicos que hasta el momento sólo han sido reportados en primavera y verano, mientras que en invierno se han reportado giros anticiclónicos débiles (Sánchez-Velasco *et al.*, 2006). El origen de los giros ciclónicos en la Bahía es aún un tema de investigación pero su efecto es bien conocido; los remolinos ciclónicos mueven las isopícnas hacia la superficie exponiendo agua rica en nutrientes a la zona eufótica y de esta manera incrementando la productividad primaria y la riqueza biológica del ecosistema. La dinámica superficial, aquella importante para el desarrollo de la riqueza biológica de la Bahía de La Paz, al igual que sus aguas adyacentes del golfo responden al forzamiento del Océano Pacífico, (Beier, 1997; Ripa, 1997; Beier y Ripa, 1999). En menor medida la circulación superficial es forzada por esfuerzo del viento y al transporte de Ekman asociado, que genera surgencias en la costa occidental del Golfo de California en verano y del lado continental en invierno.

El Golfo de California es considerado como una cuenca de evaporación, con condiciones especiales de entrada y salida, mezcla y hundimiento de las masas de agua y consecuente formación de frentes y giros, mismos que varían de acuerdo con la profundidad y época climática (Soto-Mardones *et al.*, 1999). Presenta una alta productividad primaria (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) en contraste con otros mares semicerrados como el Mediterráneo y Mar Rojo (Lavín *et al.*, 1995), debido a la alta disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica originada por la circulación termohalina (Bray y Robles, 1991), mezcla vertical (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) y surgencias costeras en la costa oeste principalmente en verano (Espinoza-Carreón y Valdez-Holguín, 2007).

El Golfo de California con base a las diferentes condiciones oceanográficas, físicas y biológicas, se ha dividido generalmente en tres regiones geográficas: la región sur (al sur de los 25°N), la región media (entre 25 y 27°N) y la región norte (al norte de los 27°N; Roden y Groves, 1959). La Bahía de la Paz se encuentra en la región correspondiente a la región sur, presentando las tasas promedio máximas de

productividad ocurren durante la primavera, en donde los valores alcanzan los 16 mg C m⁻³ h⁻¹ asociados con una baja estratificación y una columna de agua de relativamente más homogénea. En contraste, durante verano y otoño la productividad disminuye a valores entre los 2 y 5 mg C m⁻³ h⁻¹, siendo este periodo el que presenta máximos de estratificación y bajas concentraciones de nutrientes (Reyes-Salinas 1999, Reyes-Salinas et al., 2003)

Colecta de material biológico

Se tomaron vibrisas preferentemente de hembras de las dos colonias del estudio (Isla Magdalena y la lobera de Los Islotes) separándolas desde su raíz. Se seleccionaron las vibrisas más largas encontradas entre los años 2008 y 2009 (Tabla 1), con la idea de que podrían tener un mayor tiempo acumulado y explorar el mayor caso de fenómenos oceanográficos ocurridos durante el período de crecimiento de esa vibrisa. El material biológico se encuentra bajo resguardo del laboratorio de Ecología de Pinnípedos “Burney J. Le Boeuf” del CICIMAR-IPN.

Para Isla Magdalena, las vibrisas fueron colectadas de animales recién muertos varados a lo largo de la playa occidental. Mensualmente se realiza un recorrido en esa playa para recuperar los organismos que mueren en el sitio, de los cuales se extraen colmillos, pelo, vibrisas y en algunos casos el cráneo. Los organismos muestreados son etiquetados con datos como sexo, longitud corporal, coordenadas geográficas de ubicación, estado de descomposición (Mercuri, 2007), y son catalogados y resguardados en la colección osteológica del CICIMAR.

En el caso de las muestras colectadas en la colonia reproductiva de Los Islotes, Isla Espíritu Santo, fueron tomadas de animales vivos capturados en el verano de 2008 a los cuales se les extrajo la vibrisa desde la raíz con ayuda de unas pinzas, además de una vibrisa colectada en 2001 de un animal encontrado muerto, y de igual modo fueron etiquetados y catalogados.

Procesamiento de las muestras para el análisis isotópico

El análisis de isótopos estables de nitrógeno y carbono consistió en dos fases: 1) la preparación de muestras y 2) la determinación analítica. La primera parte se realizó en el Laboratorio de Química Marina del departamento de Oceanología de CICIMAR. Ésta etapa del proceso, inició con el lavado de cada vibrisa con jabón libre de fosfatos y agua destilada para retirar los restos de grasa e impurezas. Posteriormente, cada una se dividió en aproximadamente en 60 fragmentos, ajustándose a la longitud total de la misma. Para realizar los cortes, los vibrisas se introdujeron en una funda de papel con una reglilla métrica impresa, ya que al ser un tejido queratinizado y relativamente flexible los segmentos resultantes saltaban y con esto se evitó la pérdida de material. A continuación, se realizó un lavado sumergiendo las muestras en una solución 1:1 de hexano-acetona y se dejaron bajo la campana de extracción hasta su total evaporación (aprox. 24h; Zeppelin y Orr, 2010), para con esto eliminar los residuos de lípidos que se ha demostrado están enriquecido en ^{12}C y pueden sesgar los resultados isotópicos hacia valores negativos afectando la interpretación ecológica (Tieszen *et al.*, 1983). A continuación, cada uno de los segmentos de las vibrisas se cortó finamente, hasta obtener un peso de 0.800 mg en una microbalanza de alta precisión (Mettler Toledo MX5, con una precisión de 1 μg), lo cual se introdujo en micro-cápsulas de estaño de 3,3 x 5 mm.

En la segunda etapa, cada micro-cápsula se colocó en un contenedor de celdas con tapa especializada para su transporte y se enviaron al Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de California en Davis (UCD) para determinar las abundancias naturales de carbono y nitrógeno y sus razones isotópicas. Las muestras se analizaron en un espectrómetro de masas de razones isotópicas de flujo continuo (CF-IRMS) con un analizador elemental PDZ Europa ANCA-GSL conectado a un espectrómetro de masas (PDZ Europa 20-20, Sercon Ltd) con una precisión de $\pm 0.2\text{‰}$ para ambos isótopos. Cada 12 muestras se utilizaban los estándares de calibración de la señal isotópica de nitrógeno y la sacarosa para el carbono. Los cuales son calibrados periódicamente contra los estándares internacionales, para el caso del nitrógeno es N_2 atmosférico ($\delta^{15}\text{N} = 0,004\text{‰}$) y carbonato de calcio conocido

como Pee Dee Belemnita (PDB) ($\delta^{13}\text{C} = 0,011\text{‰}$) para el carbono. Las proporciones isotópicas resultantes de cada muestra se convirtieron y reportaron en los valores convencionales delta (δ), en partes por mil, mediante la siguiente fórmula:

$$\delta^{15}\text{N} \text{ o } \delta^{13}\text{C} = [(R_{\text{muestra}} / R_{\text{estándar}}) - 1] \times 1000$$

Donde $\delta^{15}\text{N}$ o $\delta^{13}\text{C}$ es la proporción expresada en partes por mil (‰) entre el contenido de ^{15}N o ^{13}C de la muestra y la del estándar. R_{muestra} y $R_{\text{estándar}}$ son las razones de $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ o $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de la muestra y el estándar. Un valor positivo o alto de δ indica que la muestra presenta más isótopos pesados que el estándar, mientras que un valor negativo o bajo de δ indica que la muestra presenta menos isótopos pesados que el estándar (Unkovich *et al.*, 2001). De esta manera se asegura que todos los datos entre los diferentes estudios y laboratorios sean comparables (Santiago *et al.*, 2005).

Variables ambientales (físicas y biológicas) y su relación con la variación isotópica

Se relacionó la variación de los isótopos estables de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo del tiempo de permanencia de la vibrisa con las medias mensuales de las variables ambientales, de:

Concentración superficial de clorofila “a” (Chl-a), [mg.m^{-3}] obtenida a partir de los promedios mensuales desde 2002 hasta 2009 de imágenes satelitales del sensor MODIS del satélite AQUA con 4 km de resolución, de la página de internet: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/level3.pl>

Índice de surgencia costera (CUI, por su acrónimo en inglés), se obtuvo el promedio diario a partir de datos (cada 6 horas) de los campos de presión del nivel del mar calculado por el PFEL (Laboratorio Ambiental de Pesquerías del Pacífico) de la NOAA para la posición comprendida entre los 24°N y 113°O, en el sitio web: http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell_menu_NA.html

Ajuste estacional

Este ajuste estacional se aplicó a las siguientes variables: Chl-a y CUI, y consiste en determinar cinco parámetros (tres amplitudes y dos fases) con el fin de construir una serie de tiempo compuesta de la suma del valor medio, el armónico anual y el semianual. Los cálculos de las componentes de Fourier se realizan mediante una técnica de ajuste por cuadrados mínimos. El método implementado permite estimar el error en la predicción y los errores del ajuste a los cinco parámetros y de esta manera observar las incertidumbres del ajuste. Una descripción detallada del método se puede encontrar en Ripa (2002).

La fórmula (1) muestra la combinación de los cinco parámetros que determinan el ciclo estacional. Debido a que la estacionalidad se calculó mediante una descomposición en series de Fourier (ortogonales entre sí), la descomposición en la fórmula (1) permite que la correlación entre el ciclo estacional y los residuos sea nula y por tanto tengan información nula sobre la estacionalidad de las observaciones. Los residuos, segundo término del lado derecho de la ecuación (1), contienen información de frecuencias entre dos y cinco meses, e información de las variaciones interanuales.

$$F(t) = \underbrace{(F_m + A_a \cos(\omega t - \varphi_a) + A_s \cos(2\omega t - \varphi_s))}_{\text{Ciclo estacional}} + \underbrace{R_e(t)}_{\text{Residuo}} \quad (1)$$

donde, F_m, A_a, A_s son el valor medio, amplitud anual y semianual respectivamente.

$\omega t = \frac{2\pi}{365d}$ es la frecuencia angular anual, φ_a, φ_s las fases anuales y semianuales respectivamente, R_e los residuos no estacionales y F las series de tiempo de los registros isotópicos (vibrisas) y las variables ambientales utilizadas (clorofila e índice de surgencias).

Previo a los cálculos de la Eq.1, en principio es necesario calcular los valores temporales de cada vibrisa que originalmente están dados en fragmentos. El procedimiento es: calcular el espectro de Fourier de cada vibrisa en función de los

fragmentos; luego determinar del espectro de frecuencias en ($\frac{\text{ciclos}}{\text{fragmentos}}$) que contiene la mayor energía espectral; contar la cantidad ciclos presentes en la serie isotópica; y finalmente suponiendo que esta representa la variabilidad anual, calcular su crecimiento en el tiempo. La suposición de que los picos espectrales más amplios corresponden a la escala anual está basada en que el ecosistema muestra sus mayores oscilaciones en esta escala (aquellas que explican la mayor parte de la varianza), es decir como ocurre en la clorofila, la temperatura superficial y el índice de surgencias.

Análisis de datos

Se verificó la normalidad y homocedasticidad de los datos utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov y Levene, respectivamente. Debido a que los datos no presentaron normalidad fueron analizados con pruebas estadísticas no paramétricas. En todos los casos en los que se aplicó el análisis estadístico se manejó por separado el $\delta^{13}\text{C}$ del $\delta^{15}\text{N}$, ya que cada uno presenta distintas escalas e implicaciones ecológicas.

Para comparar los valores isotópicos de las vibrisas de los animales entre las dos colonias, se analizaron únicamente a las hembras por medio de una prueba de Mann-Whitney. Así mismo, para tratar de identificar diferencias entre machos y hembras se compararon los individuos de Bahía Magdalena. Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para comparar los valores isotópicos de los animales entre las dos colonias, considerando el nivel de significancia de $p < 0.05$.

El análisis de correlación simple permitió determinar la relación entre la longitud de la vibrisa y el número de oscilaciones estacionales, para calcular la tasa de crecimiento diario de la vibrisa.

Los análisis estadísticos fueron realizados con el programa Statistica® ver. 7.0 y SigmaPlot® ver. 11.0; mientras que los perfiles isotópicos y las correlaciones de la variabilidad ambiental se hicieron con el programa MatLab® 2007.

RESULTADOS

Tamaño de muestra específicos

Se analizaron los valores de los isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de un total de 680 fragmentos de vibrisas de 13 organismos; es decir seis hembras y cuatro machos de Isla Magdalena (BM, del código individual), procedentes de organismos varados, y tres hembras de la lobera de Los Islotes en Bahía de La Paz (IS, del código individual). En la Tabla 1 se muestran los datos cronológicamente y en el texto de aquí en adelante. El criterio de selección de las vibrisas se basó en la idea de cubrir los diferentes eventos oceanográficos (condiciones eutróficas y oligotróficas) a lo largo del año que pudieran marcar cambios en la abundancia y disponibilidad de alimento en cada uno de los sitios de estudio.

Tabla 1. Registro de las vibrisas de *Zalophus californianus* de las zonas reproductivas en estudio. El área sombreada muestra a los organismos de Bahía de La Paz (denominados como IS). El código señala el sexo: M-macho y H-hembra, así como la localidad: Bahía Magdalena BM.

Código por individuo	Localidad	Longitud de la vibrisa (mm)	Número de fragmentos	Fecha de colecta
M15_BM	Bahía Magdalena	410	40	09-may-08
M11_BM		330	61	22-jul-08
H1_BM		260	40	28-jul-08
H212_BM		200	61	31-oct-08
M2_BM		235	60	15-dic-08
H391_BM		165	59	08-ene-09
M7_BM		245	60	21-ene-09
H3_BM		152	52	15-mar-09
H6_BM		165	56	17-may-09
H10_BM		175	60	20-jul-09
H143_IS	Bahía de La Paz	113	76	02-may-01
H5_IS		62	23	25-jun-08
H6_IS		62	32	25-jun-08

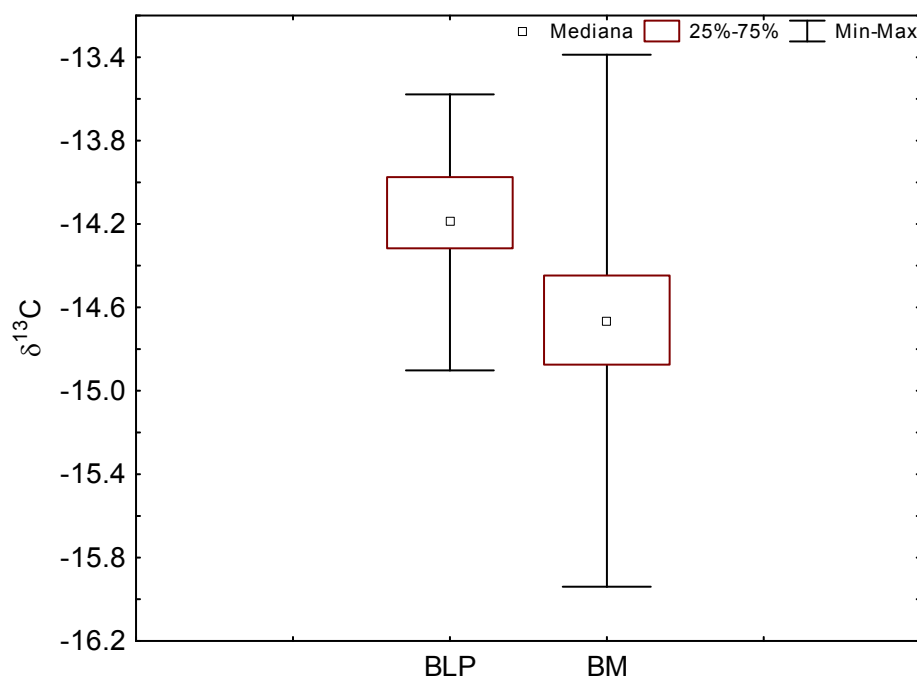
Para la localidad de Bahía Magdalena se obtuvieron un total de 549 fragmentos, de los cuales a 328 correspondieron a hembras (denominadas con la letra H en el código individual) y 221 de machos (denominados con la letra M); mientras que en Bahía de La Paz se analizaron 131 fragmentos (Tabla 1). A partir de

los promedios de $\delta^{13}\text{C}$ y de $\delta^{15}\text{N}$ y la desviación estándar de las dos localidades de estudio fue posible determinar que Bahía de La Paz presentó un mayor enriquecimiento en carbono con respecto a Bahía Magdalena separando isotópicamente a ambas localidades (Tabla 2).

Tabla 2. Estadística descriptiva de los valores isotópicos de las vibrisas de *Zalophus californianus* para cada una de las localidades.

Localidad	Isótopo	Muestra	Media $\pm$ SD	Mínimo	Máximo
Bahía Magdalena	$\delta^{15}\text{N}$	549	20.05 $\pm$ 0.84	18.83	24.28
	$\delta^{13}\text{C}$		-14.65 $\pm$ 0.35	-15.94	-13.39
Bahía de La Paz	$\delta^{15}\text{N}$	131	19.15 $\pm$ 0.98	14.39	20.99
	$\delta^{13}\text{C}$		-14.17 $\pm$ 0.29	-15.26	-13.58

Debido a que se superponen los valores de la desviación estándar de ambos isótopos entre las dos localidades, se aplicó una prueba no paramétrica de Mann-Whitney *U*-Test sugiriendo diferencias significativas entre ambas localidades tanto para $\delta^{13}\text{C}$ ($U = 8,451$; $p < 0.001$) como para $\delta^{15}\text{N}$ ($U = 17,213$; $p < 0.001$; Fig. 4).



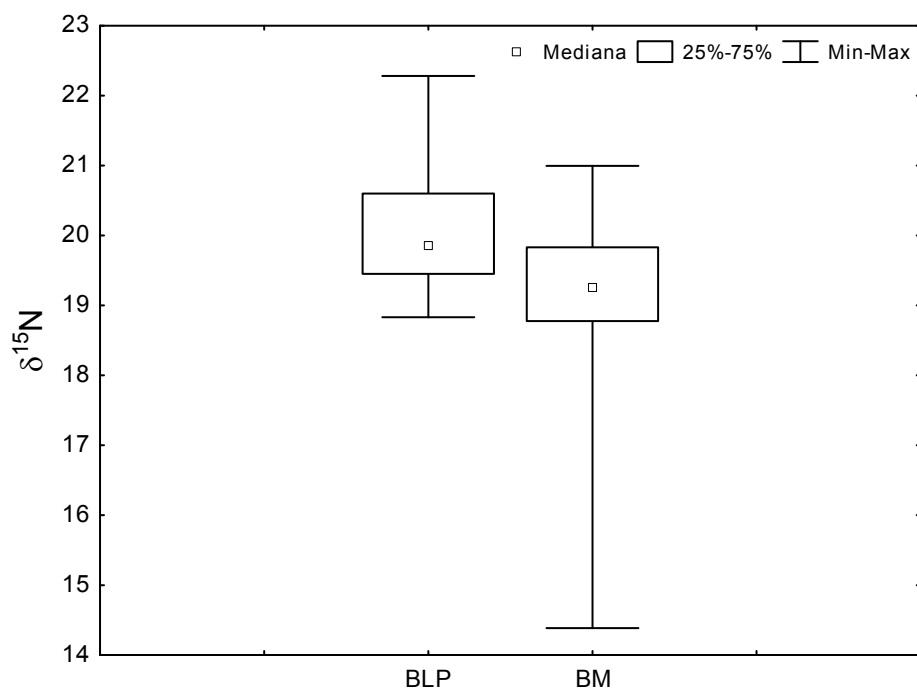


Figura 4. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (mediana $\pm$ mín y máx en ‰) comparando las localidades de Bahía de La Paz y de Bahía Magdalena de *Zalophus californianus*.

Análisis y perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de las vibrisas

Los 13 perfiles isotópicos de las vibrisas presentaron fluctuaciones similares a lo largo de la vida de permanencia en los animales, en BM y BLP. Las oscilaciones del $\delta^{13}\text{C}$ fueron menos conspicuas en todos los animales, a diferencia del $\delta^{15}\text{N}$ que presentó oscilaciones más pronunciadas en todos los perfiles (Fig. 5a, b y 6).

En el caso de los perfiles isotópicos de las vibrisas de los 10 animales de Bahía Magdalena (seis hembras y cuatro machos) se observan varias oscilaciones a lo largo de la vibrisa (Fig. 5a, b).

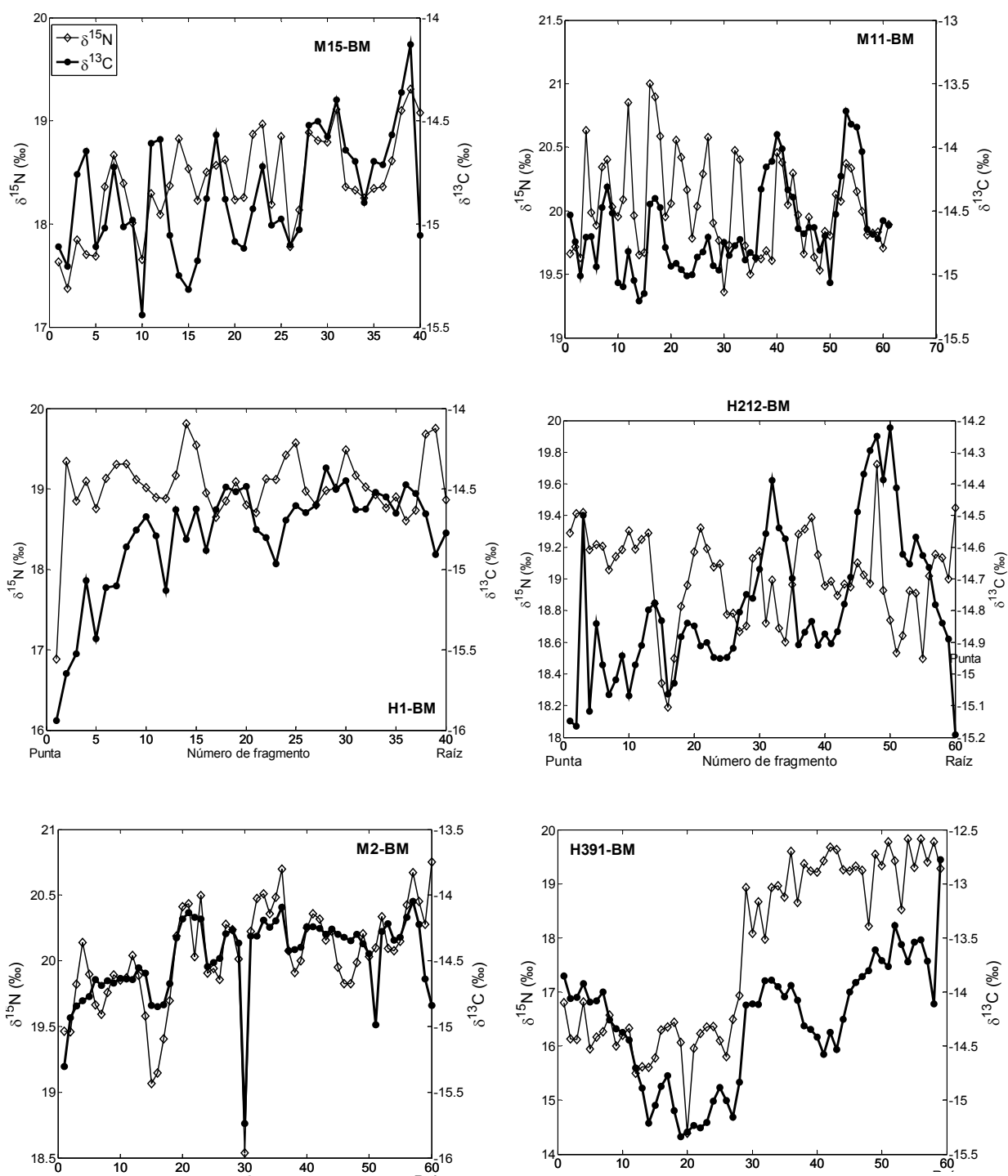


Figura 5a. Perfiles del $\delta^{13}\text{C}$ (círculo) y de $\delta^{15}\text{N}$ (diamante) en ‰ (vs PDB y aire, respectivamente) de la vibrisa de *Zalophus californianus* colectados en Bahía Magdalena (BM). Indicando el código individual con el sexo y localidad de colecta.

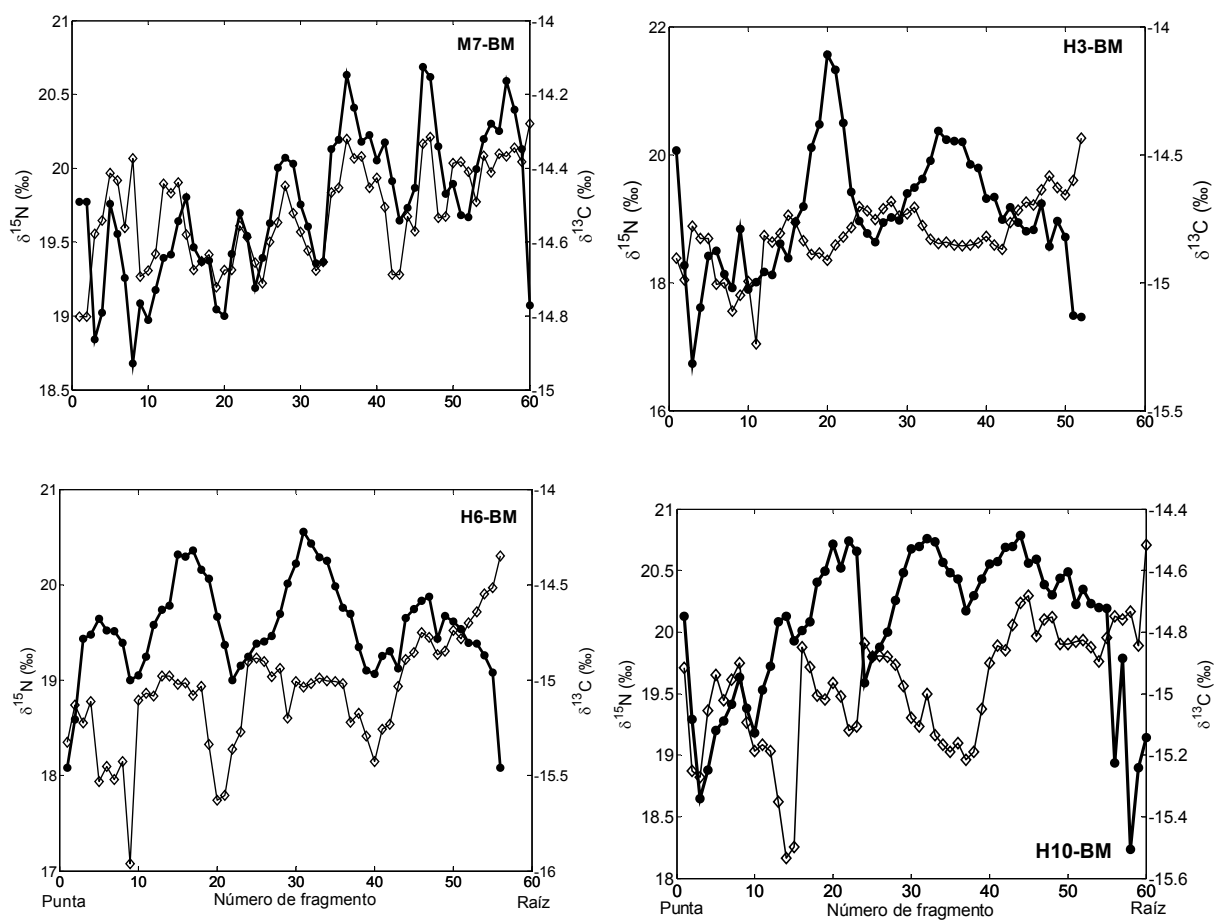


Figura 5b. Perfiles del $\delta^{13}\text{C}$ (círculo) y de $\delta^{15}\text{N}$ (diamante) en ‰ (vs PDB y aire, respectivamente) de la vibrisa de *Zalophus californianus* colectados en Bahía Magdalena (BM). Indicando el código individual con el sexo y localidad de colecta.

Los perfiles generados de las vibrisas provenientes de tres hembras de Bahía de La Paz, mostraron oscilaciones variadas (Fig. 6).

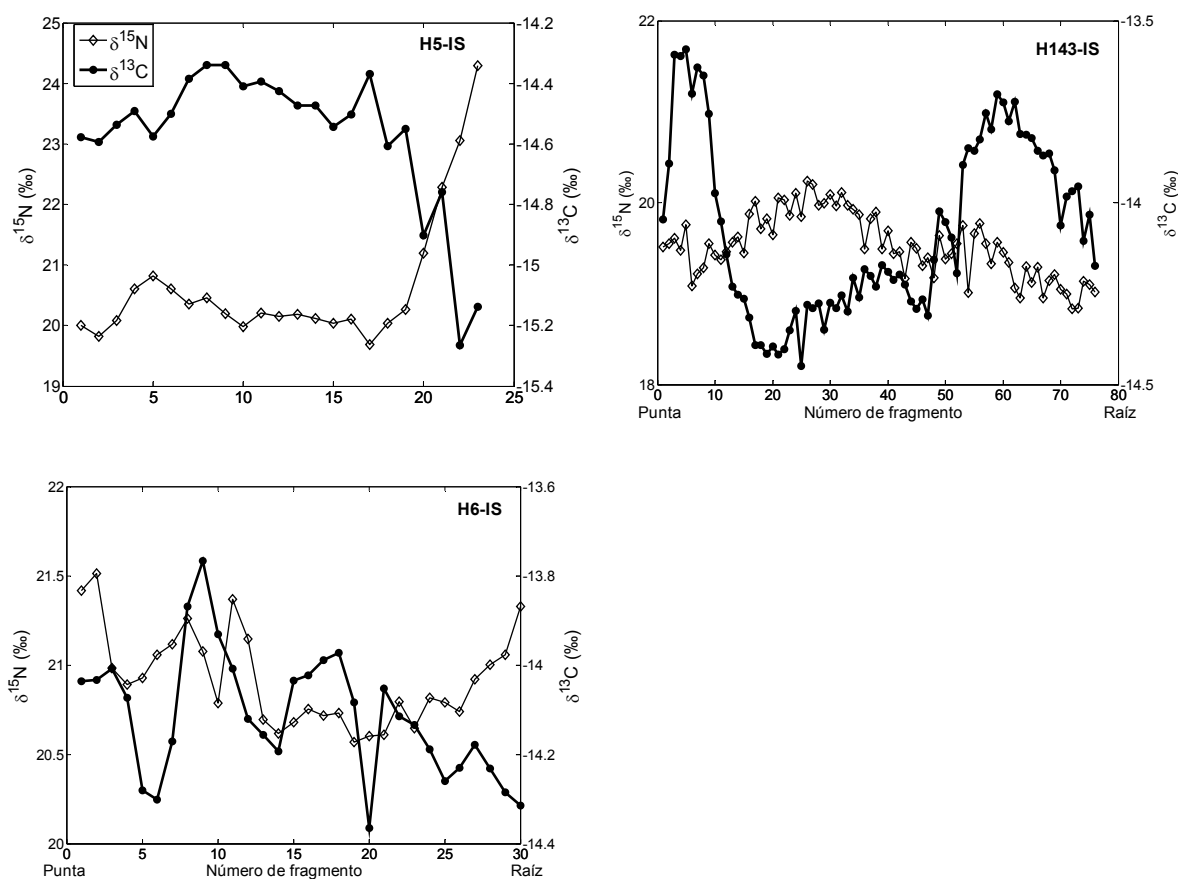


Figura 6. Perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ (círculo) y de $\delta^{15}\text{N}$ (diamante) en ‰ (vs PDB y aire, respectivamente) de la vibrisa de *Zalophus californianus* colectados en Bahía de La Paz (IS). Indicando el código individual con el sexo y localidad de colecta.

A partir de la estadística descriptiva de los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de cada una de las vibrisas (Tabla 3) es posible resaltar dos casos, el de la hembra H391-BM (-14.29 ± 0.57 y 17.73 ± 1.61 , respectivamente) de Bahía Magdalena y H5-IS (-14.57 ± 0.24 y 20.63 ± 1.11 , respectivamente) en Bahía de La Paz, que tuvieron la mayor variabilidad en sus datos de ^{15}N .

Tabla 3. Valores isotópicos de las vibrisas de *Zalophus californianus*. Valor medio $\pm$ SD. En negrillas se resaltan los casos de las hembras con mayor variabilidad en sus datos.

Individuo n(13)	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
M15_BM	-14.85 $\pm$ 0.29	18.40 $\pm$ 0.46
M11_BM	-14.64 $\pm$ 0.36	20.03 $\pm$ 0.37
H1_BM	-14.80 $\pm$ 0.35	19.02 $\pm$ 0.46
H212_BM	-14.80 $\pm$ 0.24	19.02 $\pm$ 0.29
M2_BM	-14.48 $\pm$ 0.31	20.03 $\pm$ 0.40
H391_BM	-14.29$\pm$0.57	17.73$\pm$1.61
M7_BM	-14.51 $\pm$ 0.19	19.71 $\pm$ 0.32
H3_BM	-14.73 $\pm$ 0.24	18.76 $\pm$ 0.55
H6_BM	-14.73 $\pm$ 0.25	18.86 $\pm$ 0.59
H10_BM	-14.78 $\pm$ 0.25	19.56 $\pm$ 0.49
H143_IS	-14.07 $\pm$ 0.24	19.53 $\pm$ 0.35
H5_IS	-14.57$\pm$0.24	20.63$\pm$1.11
H6_IS	-14.11 $\pm$ 0.14	20.92 $\pm$ 0.29

En la figura 7 se muestra el comportamiento de los valores medios y su desviación estándar, de cada una de las vibrisas analizadas en ambas localidades. Resaltando que los organismos de Bahía de La Paz (dentro del recuadro) muestran valores más altos en ambos isótopos que para la mayoría de los de Bahía Magdalena.

Al comparar las señales isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de los 13 organismos estudiados en cada una de las localidades, se encontraron diferencias significativas entre ellos por medio de la prueba Kruskal-Wallis ($H = 286.947$, g.l.=12, $P < 0.001$ y $H = 460.708$, g.l.=12 y $P < 0.001$, respectivamente) donde los valores de la mediana de las hembras de Bahía de La Paz resultaron ser más altos en ambos isótopos (prueba de comparaciones múltiples entre medianas), a pesar de que visualmente esas diferencias no se aprecien.

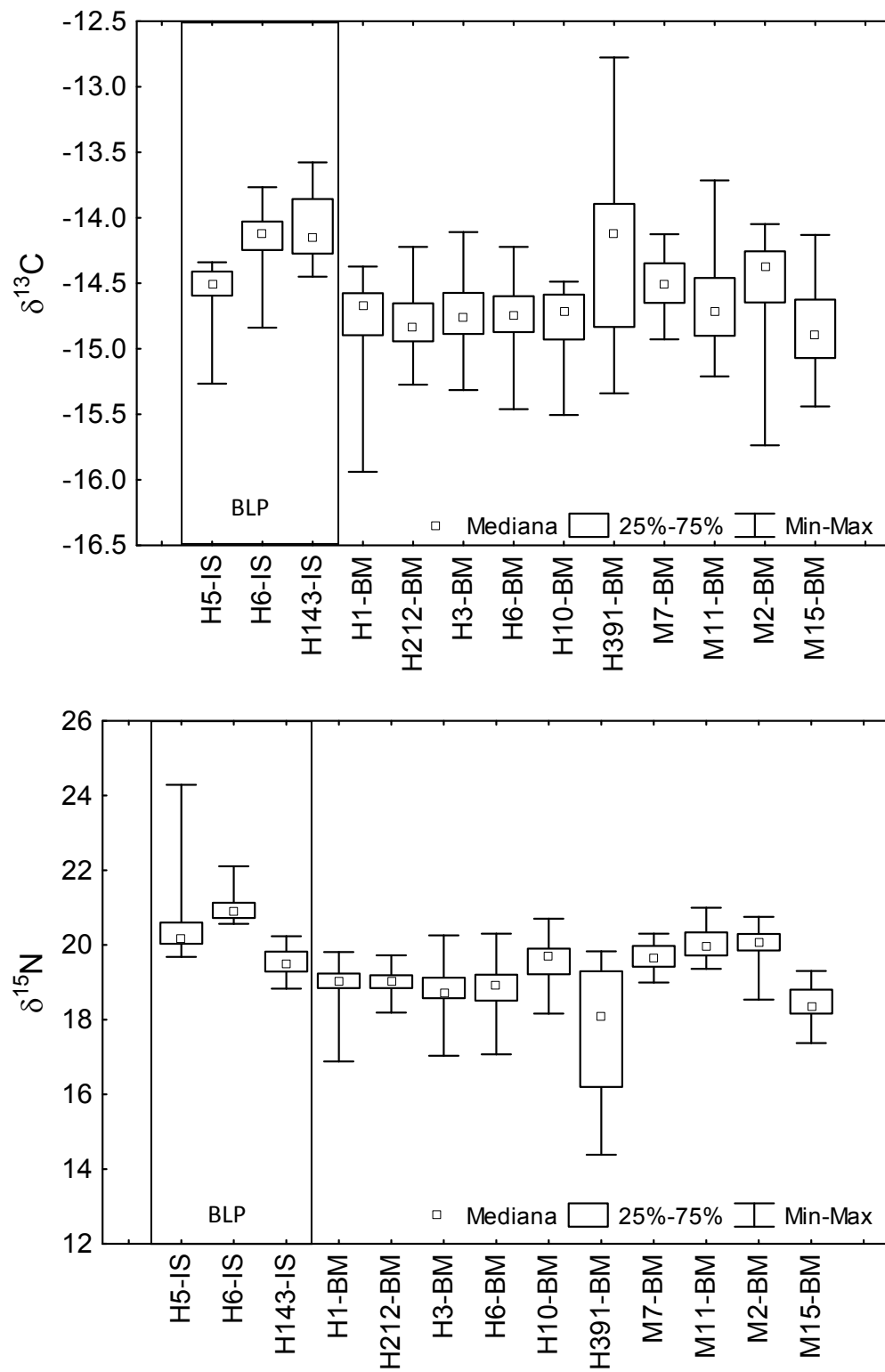


Figura 7. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (mediana $\pm$ mín y máx en ‰) de las vibrisas de *Zalophus californianus* de Bahía de La Paz (en el recuadro) y de Bahía Magdalena.

La H391 de Bahía Magdalena en particular mostró una mayor variación en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ que oscilaron entre -15.34 y -13.39‰ con una diferencia entre el menor y mayor valor de hasta -2‰, lo que podría indicar cambio de alimentación o hábitat (Fig. 8). Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ fluctuaron entre 14.39 y 19.83‰ con un enriquecimiento isotópico de 5.44‰.

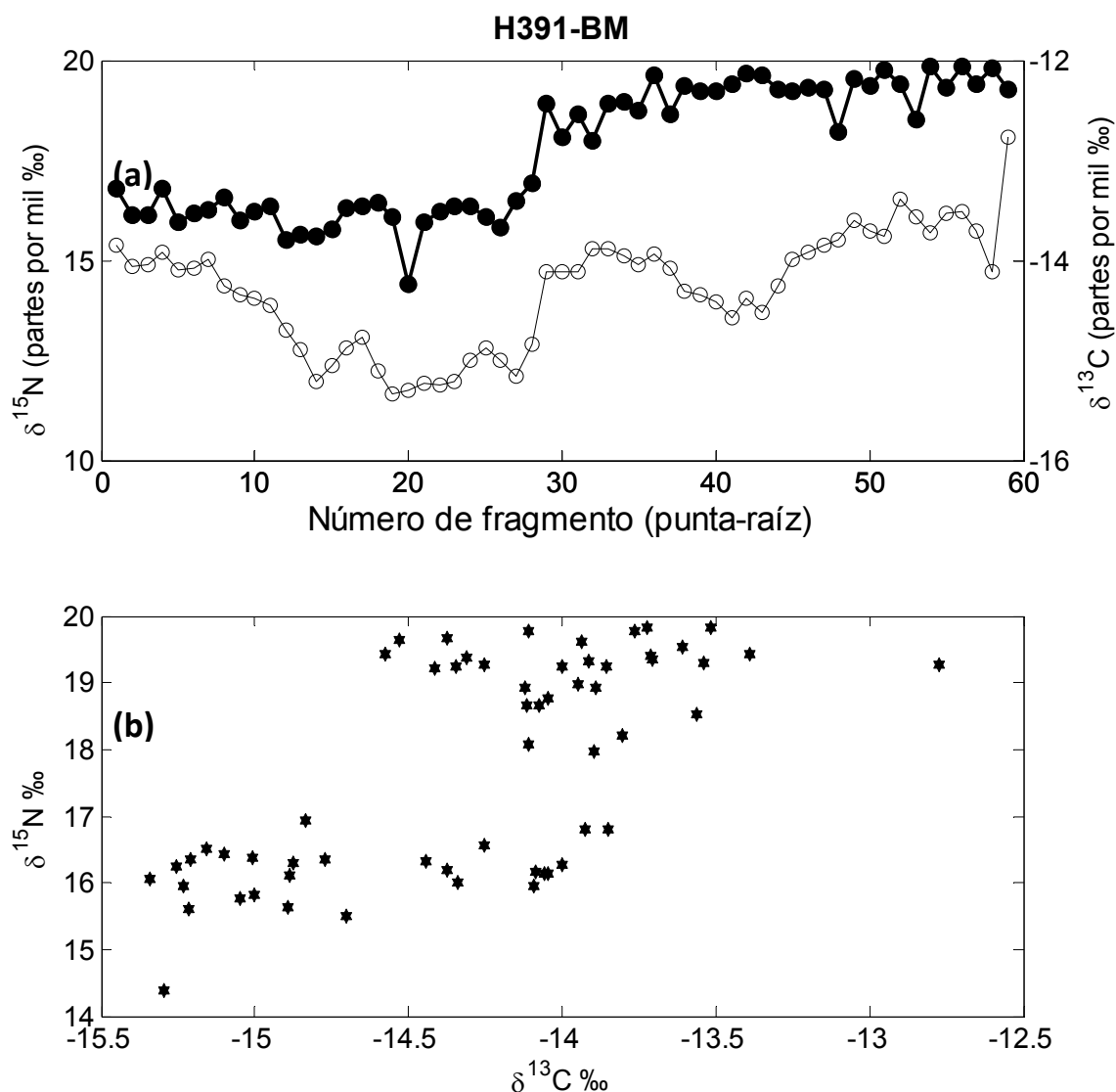


Figura 8. Perfiles de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en ‰ (vs PDB y aire, respectivamente) de la vibrisa H391-BM, (a) perfil isotópico general y (b) la variación de $\delta^{13}\text{C}$ Vs $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de la misma.

Diferencias isotópicas entre localidades de estudio

En trabajos previos (Hobson *et al.*, 1997; Altabet *et al.*, 1999; Takai *et al.*, 2000; Aurióles-Gamboa *et al.*, 2006) se menciona que en ambientes marinos los valores isotópicos disminuyen con el aumento de la latitud, para el caso del $\delta^{13}\text{C}$ se presenta el aumento de 1‰ por cada 5° de disminución de la latitud y que por cada 4° que disminuye la latitud se presenta un incremento de $\delta^{15}\text{N}$ en 1‰. En este estudio se compararon las señales isotópicas de las vibrisas de las hembras entre las localidades Bahía Magdalena y Bahía de La Paz, debido a la filopatría que presentan estos organismos.

La prueba no paramétrica de Mann-Whitney *U*-Test sugirió diferencias significativas entre las hembras de Bahía Magdalena y Bahía de La Paz tanto para $\delta^{13}\text{C}$ ($U=46,151$; $p<0.05$) como para $\delta^{15}\text{N}$ ($U=46,083$; $p<0.05$; Fig. 9).

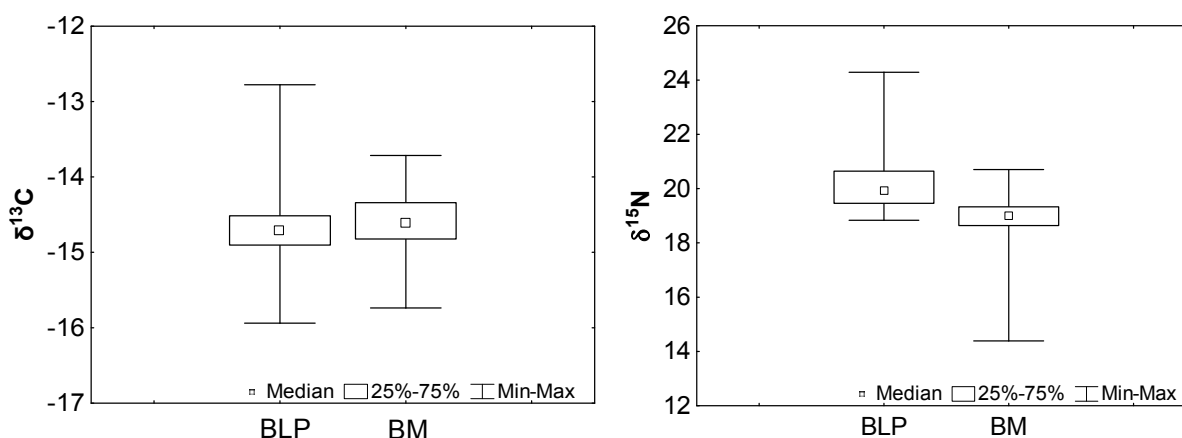


Figura 9. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (mediana $\pm$ mín y máx en ‰) de las vibrisas de las hembras de *Zalophus californianus* de Bahía de La Paz (BLP) y de Bahía Magdalena (BM).

Por otro lado, se correlacionaron los valores de ambos isótopos ($\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{15}\text{N}$) de los machos de Bahía Magdalena (M15_BM, M11_BM, M2_BM y M7_BM) para tratar de identificar el efecto latitudinal medido con la diferencia de los valores que presenta el $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de un año aproximadamente; a pesar de que el análisis comparativo entre ellos no fue un objetivo del estudio, pero fue interesante el efecto resultante. Para los cuatro individuos existió una relación lineal positiva con ambos

isótopos con una $p < 0.05$. Mientras que, para las hembras de ambas localidades solo cuatro individuos (H143_IS, H5_IS, H1_BM y H391_BM) tuvieron una relación lineal con una $p < 0.05$ ver tabla 4.

Tabla 4. Valores de la correlación de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de las vibrisas de hembras y machos de *Zalophus californianus* de ambas localidades de estudio.

Código del animal	Sexo	Valor r	Significancia $p < 0.05$
M15_BM	Machos	0.53	0.0004
M11_BM		0.28	0.0327
M2_BM		0.77	0
M7_BM		0.57	0.0000003
H1_BM	Hembras	0.36	0.025
H212_BM		-0.16	0.224
H391_BM		0.64	0.0000007
H10_BM		-0.00	0.96
H3_BM		-0.09	0.51
H6_BM		0.04	0.72
H143_IS		-0.53	0.0000008
H5_IS		-0.86	0.0000001
H6_IS		0.17	0.30

Variaciones isotópicas entre sexos

Se compararon las señales isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de los machos y hembras (221 y 328 fragmentos respectivamente) colectados en Bahía Magdalena. La prueba de distribución no paramétrica de Mann-Whitney encontró diferencias significativas al comparar los sexos en ambos isótopos ($T=66,719.5$; $p < 0.05$; $\delta^{13}\text{C}$ y $T=80,632$; $p < 0.05$, $\delta^{15}\text{N}$; Fig. 10).

Los valores isotópicos para los machos fueron $\delta^{13}\text{C} = -14.60 \pm 0.32\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = 19.65 \pm 0.72\text{‰}$; y para hembras fueron $\delta^{13}\text{C} = -14.68 \pm 0.39$, $\delta^{15}\text{N} = 18.82 \pm 0.99\text{‰}$.

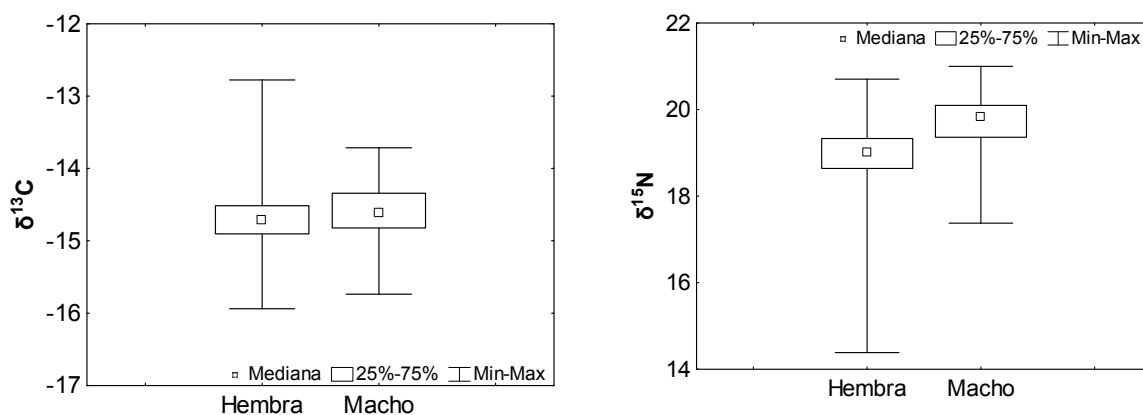


Figura 10. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (mediana $\pm$ mín y máx en ‰) de las vibrisas de hembras y machos de *Zalophus californianus* de Bahía Magdalena.

Variables ambientales (físicas y biológicas) y su relación con la variación isotópica a lo largo de la vibrisa

A partir de los valores promedios semanales del sensor AquaModis de la concentración de la clorofila a [Chl-a ; (mg.m^{-3})] considerada como un indicador indirecto de la producción primaria, se analizó una serie de tiempo de 2002 a 2010 (Fig. 11), en un área delimitada entre los $23^{\circ}30'$ a 26° de latitud norte y los 110° a $113^{\circ} 30'$ de longitud oeste. Esta delimitación geográfica de datos se hizo con el propósito de abarcar toda la zona aledaña a cada localidad de estudio. De ésta serie de 8 años se obtuvo un promedio general de 5 mg.m^{-3} dentro de la Bahía Magdalena, mientras que en la región oceánica el promedio fue 3.5 mg.m^{-3} . Por otra parte, la Bahía de La Paz tuvo promedio general de 2.5 mg.m^{-3} , sin embargo dentro del Canal San Lorenzo, zona cercana a la lobera de Los Islotes, el promedio fue más elevado con un valor de 3.5 mg.m^{-3} .

En la figura 11 se observa la variación promedio espacio-temporal que presentan los datos de la [Chl-a] a lo largo de la serie de tiempo. Destacando el caso de Bahía Magdalena que presentó una gran variación promedio (10 mg.m^{-3}) durante este periodo, tanto dentro como fuera de la Bahía. Mientras que en Bahía de La Paz las concentraciones fueron más constantes a lo largo del tiempo (4.5 mg.m^{-3}) y el canal de San Lorenzo sigue presentando valores de variación más elevados de 7 mg.m^{-3} .

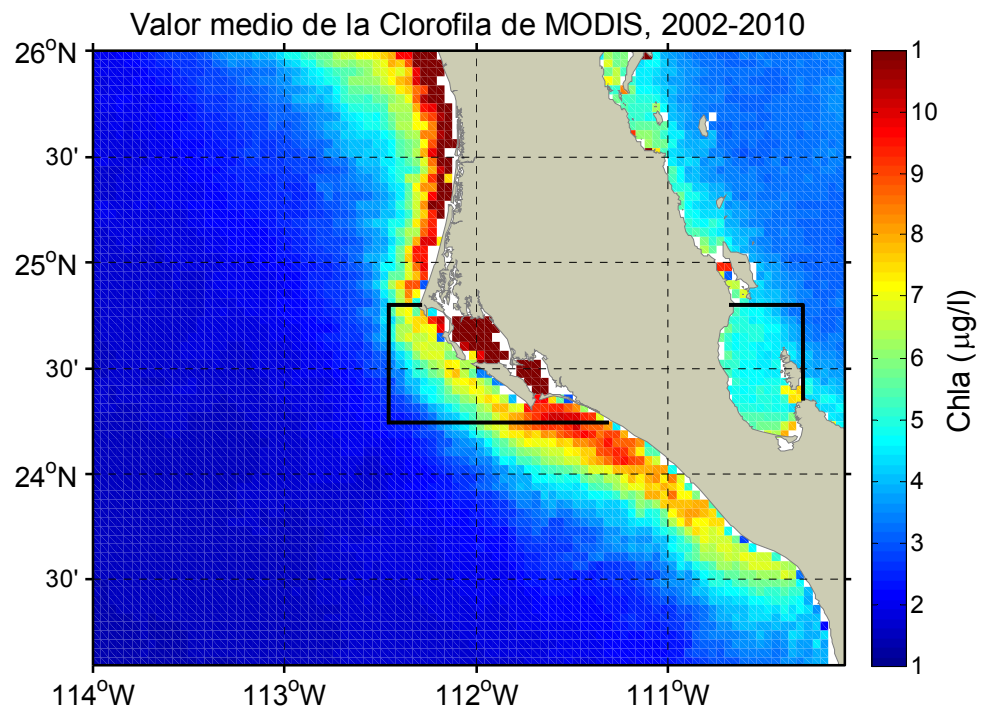


Figura 11. Imagen de la concentración media de clorofila [Chl-a] a partir de MODIS, para las zonas adyacentes a Bahía Magdalena y Bahía de La Paz.

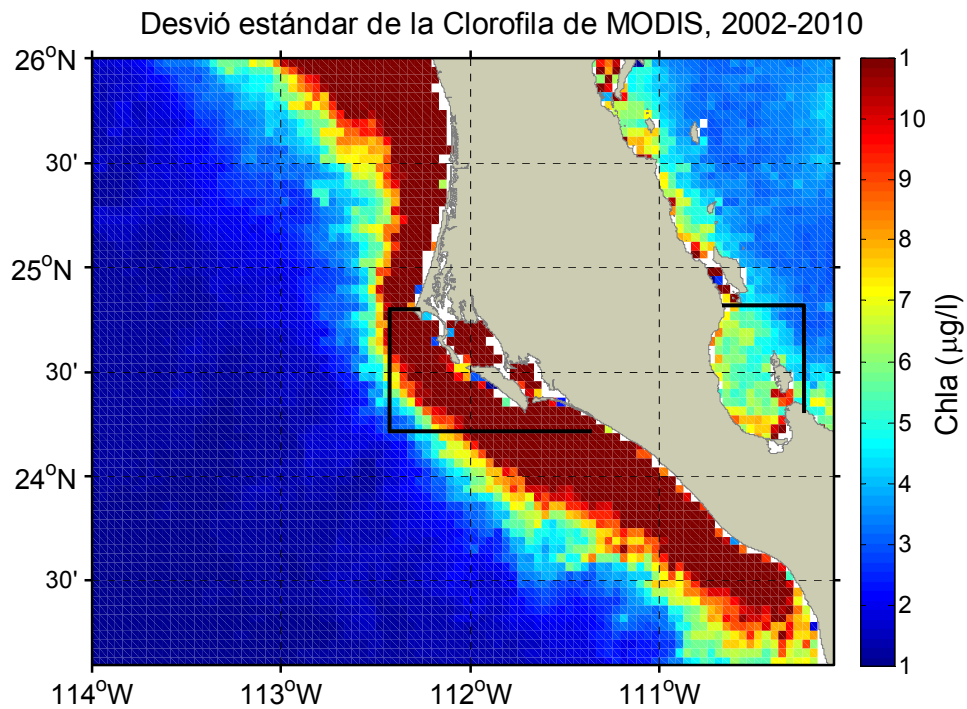


Figura 12. Imagen de la desviación estándar de la concentración de clorofila [Chl-a] a partir de MODIS, para las zonas adyacentes a Bahía Magdalena y Bahía de La Paz.

Utilizando las variables de la [Chl-a] y de la TSM del área adyacente a Bahía Magdalena, donde se sugiere que las hembras del lobo marino se alimentan la mayor parte del tiempo, se muestra la variabilidad estacional e interanual de la [Chl-a] en la Fig. 13a de una serie de tiempo obtenida de datos de promedios semanales del sensor MODIS, desde junio de 2002 a junio de 2010, destacándose que: en el momento de que la TSM alcanza su máximo de 27°C (Fig. 13b) la concentración de clorofila disminuye a 0mg.m⁻³ y en período de surgencias costeras, a mitad de año, la temperatura fue < 17.5°C. La TSM tuvo una diferencia de 8°C entre el momento más frío y el más cálido en el año.

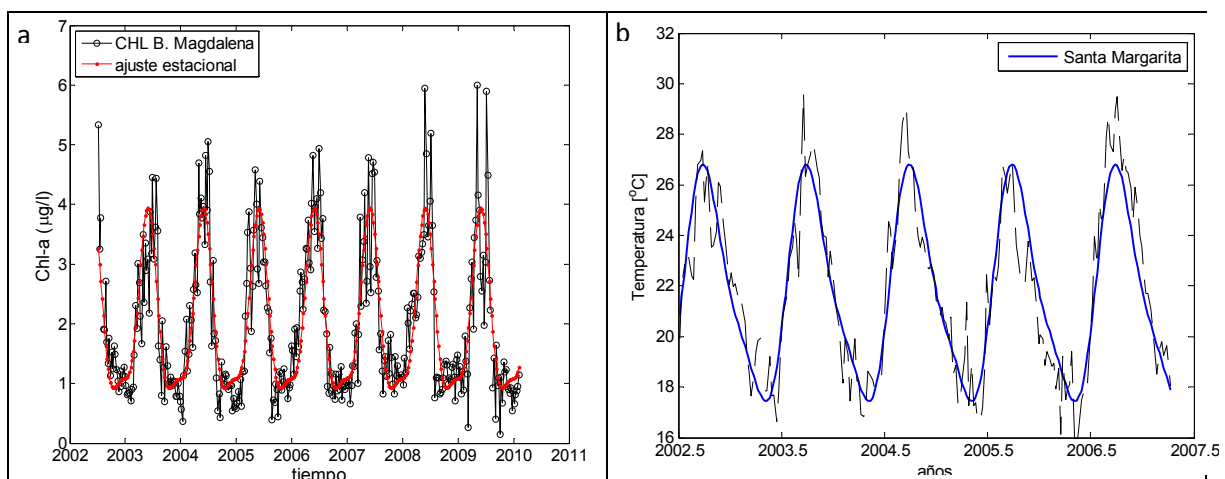


Figura 13. Serie de tiempo con valores semanales del verano de 2002 al del 2007 obtenidos por el sensor MODIS; a) de la clorofila a (mg.m⁻³) (proxy de la producción primaria) y b) la temperatura superficial del mar (TSM, °C) para la región adyacente a la lobera de Cabo San Lázaro.

En el área alrededor de la Bahía de La Paz las condiciones oceanográficas son diferentes a las de Bahía Magdalena. La temperatura a lo largo del año varía hasta en 10°C (Fig. 14b) mientras que los valores promedio de la clorofila a obtenidos del sensor MODIS, son relativamente bajos en ese período (aprox. 0.5 a 1.5 mg.m⁻³). Sin embargo, se presentan dos momentos de alta concentración de clorofila, uno al inicio de la primavera y otro en verano, coincidiendo el primero con la temperatura más baja de 21°C favoreciendo la proliferación fitoplanctónica generando procesos de surgencia.

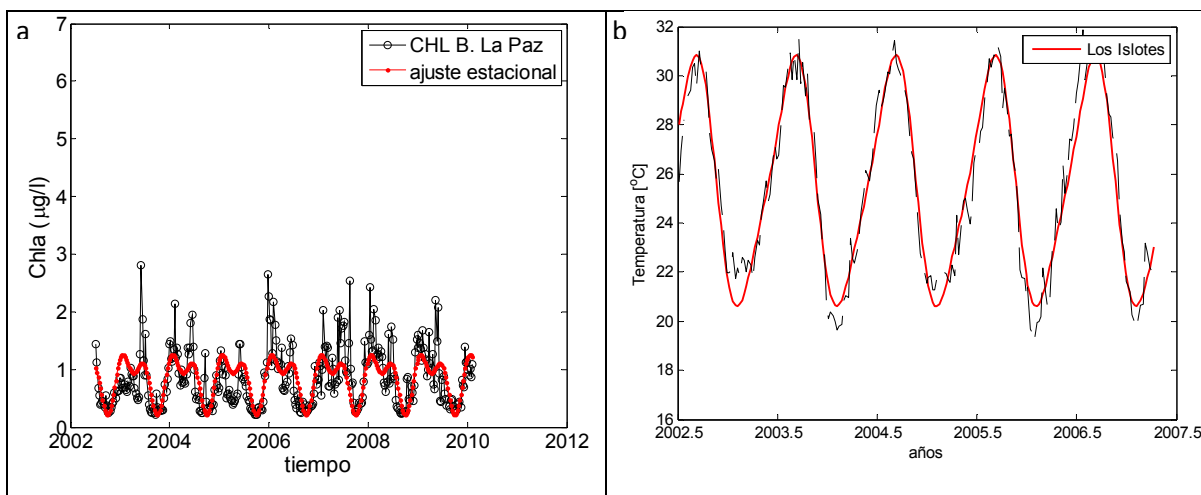


Figura 14. Serie de tiempo de valores semanales del verano de 2002 al del 2007 obtenidos por el sensor MODIS; a) de la clorofila a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) (proxy de la producción primaria) y b) la temperatura superficial del mar (TSM, °C) para la región adyacente a la lobera de Los Islotes, en la Bahía de La Paz.

Con base a tres variables ambientales y a la captura de sardina, Mercuri (2008) desarrolló un modelo conceptual de la evolución del ecosistema adyacente a Bahía Magdalena, mostrando la evolución temporal del ecosistema y su relación con la abundancia de varamientos de mamíferos marinos. Estos últimos reflejan el aprovechamiento de las condiciones productivas del ambiente marino adyacente. Observó que el máximo de surgencias ocurre prácticamente al mismo tiempo que el mínimo de la temperatura superficial del mar y unos días después se manifiesta el máximo de la clorofila. Es decir, las surgencias (reflejadas por el Índice de Surgencias), la temperatura superficial y la clorofila son variables muy correlacionadas lo cual hace innecesario la correlación de las variaciones isotópicas con estas tres variables ambientales. Por esta razón presentamos en esta tesis sólo las correlaciones con el CUI y la Chl-a, que reflejan el forzamiento (CUI) y un proxy de los productores primarios (Chl-a).

Determinación de la tasa de crecimiento

Para determinar el número de fragmentos en que se cortarían las vibrisas analizadas de *Z. californianus*, con el fin de detectar la variación estacional intra e inter-anual, se hizo un análisis exploratorio con dos vibrisas (M15_BM y H1_BM) de

distintas longitudes (40 y 26cm, respectivamente) las cuales se cortaron en 40 secciones (e.g. Hirons *et al.*, 2001a) y usando la tasa diaria de crecimiento propuesta por ellos para *Eumetopias jubatus* de 0.17mm/d, fue posible establecer que 60 segmentos era el número adecuado para muestrear un período mínimo de un mes por fragmento para posteriormente identificar la frecuencia estacional que debe estar rigiendo con mayor intensidad la variabilidad isotópica.

A las series temporales de los valores isotópicos de ^{15}N de cada una de las 13 vibrisas, se aplicó la transformada rápida de Fourier (espectro de frecuencias de una función o amplitudes en función de cada frecuencia) para obtener el ajuste estacional en los datos. Se ha considerado que cada oscilación corresponde a un año de vida de permanencia de la vibrisa en el animal (Hirons *et al.*, 2001a; Cherel *et al.*, 2009).

El ajuste estacional obtenido mediante la ecuación (1), primer término del lado derecho, a la serie de valores de $\delta^{15}\text{N}$ de cada una de las vibrisas, se muestra en la figura 15 para aquellos casos que el ajuste fue significativo, es decir por arriba del 20% de la variancia explicada (VE). La variancia explicada por el armónico anual y el semianual varió desde un 20% hasta un 67% (Tabla 5).

Tabla 5. A partir del análisis de Fourier se calculó la periodicidad del $\delta^{15}\text{N}$ obtenido de las vibrisas de *Zalophus californianus*, se consideraron únicamente los que mostraron una $\text{VE} > 20\%$. En gris se indica que las vibrisas se colectaron en Bahía de La Paz.

Código individuo (n=8)	Longitud de la vibrisa (mm)	Fecha de colecta	Ciclos Análisis de Fourier ($\delta^{15}\text{N}$)	Variancia explicada (%)
M15_BM	410	09-may-08	sin periodicidad	
M11_BM	330	22-jul-08	sin periodicidad	
H1_BM	260	28-jul-08	sin periodicidad	
H212_BM	200	31-oct-08	sin periodicidad	
M2_BM	235	15-dic-08	3.93	29
H391_BM	165	08-ene-09	1.95	43
M7_BM	245	21-ene-09	sin periodicidad	
H3_BM	152	15-mar-09	2	47
H6_BM	165	17-may-09	2.65	20
H10_BM	175	20-jul-09	3.03	40
H143_IS	113	02-may-01	sin periodicidad	
H5_IS	62	25-jun-08	1	67
H6_IS	62	25-jun-08	1	51

En la figura 15a y b se muestra el resultado obtenido al aplicar la Transformada de Fourier, la línea en azul muestra el ajuste estacional aplicado a los datos normalizados de la serie de tiempo de cada una de las vibrisas utilizando el $\delta^{15}\text{N}$.

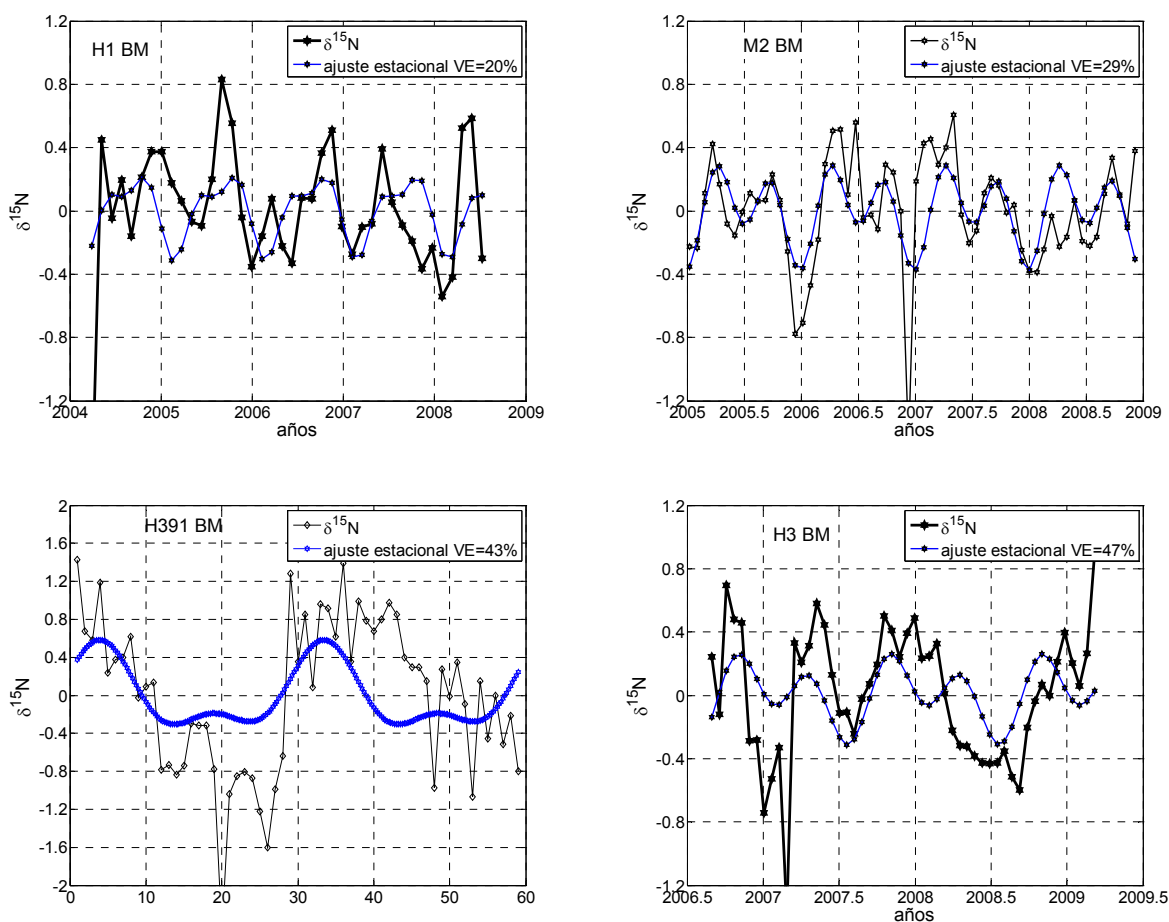


Figura 15a. Ajuste estacional realizado al perfil isotópico de $\delta^{15}\text{N}$ en las vibrisas de lobo marino, *Zalophus californianus*, únicamente se muestran los perfiles con un buen ajuste estacional (>30%). Los datos están ordenados cronológicamente, en los dos últimos gráficos se muestran los perfiles obtenidos de los individuos de Bahía de La Paz (IS).

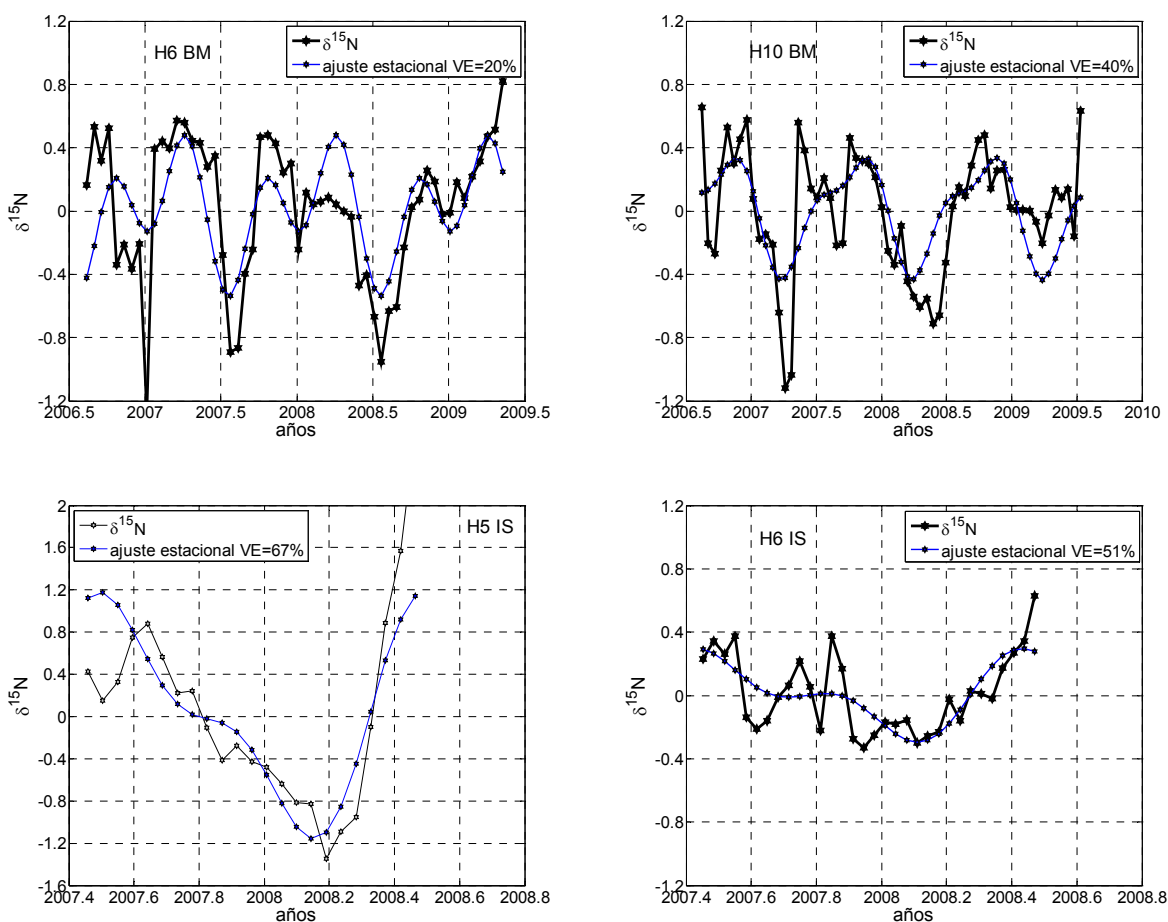


Figura 15b. Ajuste estacional realizado al perfil isotópico de $\delta^{15}\text{N}$ en las vibrisas de lobo marino, *Zalophus californianus*, únicamente se muestran los perfiles con un buen ajuste estacional ($>30\%$). Los datos están ordenados cronológicamente, en los dos últimos gráficos se muestran los perfiles obtenidos de los individuos de Bahía de La Paz (IS).

Las tres vibrisas de organismos de Bahía de La Paz fueron más cortas a las colectadas en Bahía Magdalena, con un promedio de 7.9 cm (Tabla 1). Por ser muy cortas, sólo se encontró una oscilación, lo que dificultó el análisis estacional posterior ya que en las vibrisas H5_IS y H6_IS, solo se explica el efecto de eventos de frecuencia mínima generados en períodos cortos. Mientras que en el caso de la vibrisa de H143_IS, colectada en mayo de 2001 no fue posible evaluar su ajuste con la concentración de Chl-a debido a que no se contó con dicha información para el período de muestreo, a pesar de ser la más larga para esta localidad (11.3 cm) y presentar un buen ajuste estacional (VE=65%).

Las ocho vibrisas que presentaron consistencia en las oscilaciones (Tabla 5) fueron empleadas en la construcción de la correlación entre la longitud de la vibrisa y el número de oscilaciones, para calcular la tasa de crecimiento. Tomando en cuenta aquellas vibrisas que sí presentaron periodicidad (n=8; Tabla 5) se realizó una regresión lineal entre la longitud de la vibrisa y el número de ciclos contenidos en cada una, obteniendo una correlación lineal significativa ($r=0.96$; $p<0.05$; Fig. 16). Se calculó una tasa de crecimiento general para la especie *Zalophus californianus* que fue de 5.92 cm al año, y se determinó que la vibrisa tiene un crecimiento diario aproximadamente constante de 0.16 mm/d.

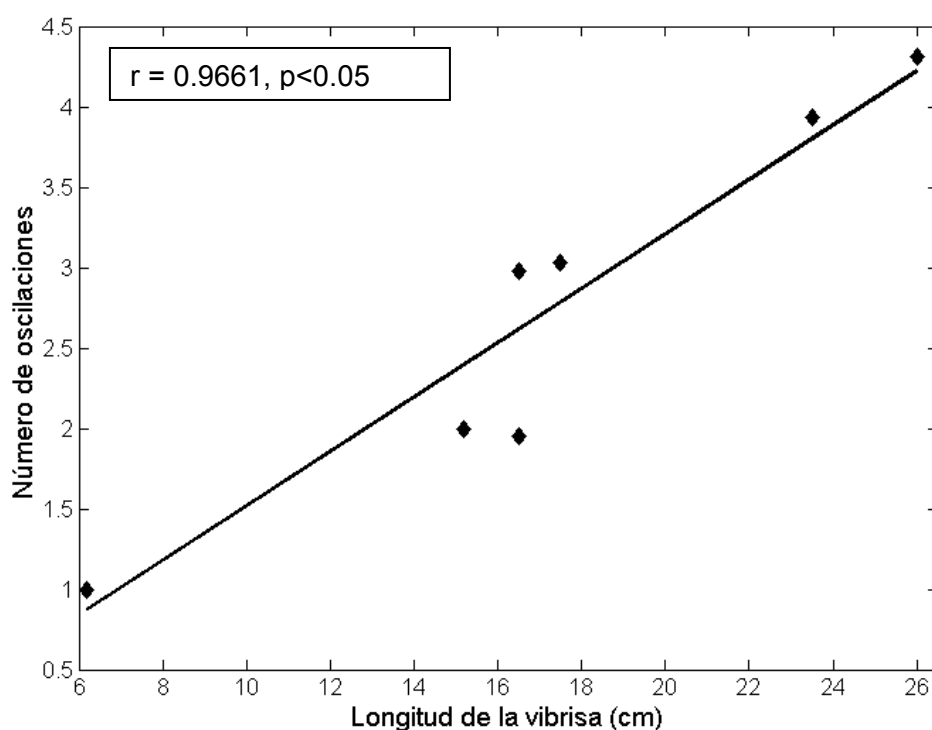


Figura 16. Relación presente entre la longitud de la vibrisa y el número de oscilaciones anuales.

El resto de los cinco animales (Tabla 5) que no fueron considerados para este análisis, se descartaron debido a que la variancia explicada del ajuste estacional fue muy baja en todos estos casos ($< 20\%$). En este sentido es posible que la variabilidad estacional no esté explicando el comportamiento de los datos y que algún evento ambiental adicional haya afectado el patrón isotópico. Resalta la vibrisa

del macho M15_BM de Bahía Magdalena que fue la más larga del estudio (41cm; Fig. 17), sin embargo el número de fragmentos (n=40) se considera menor al del criterio propuesto anteriormente. No obstante, a partir del cociente realizado de la longitud de vibrisa con la tasa de crecimiento anual encontrada (5.92 cm/año), resultó que la información contenida podría ser de 6.9 años, misma que se observa en las oscilaciones como se muestra en la figura 17 con las líneas punteadas. Por esta razón, no fue posible analizar su correlación con la concentración de clorofila a y el Índice de Surgencias.

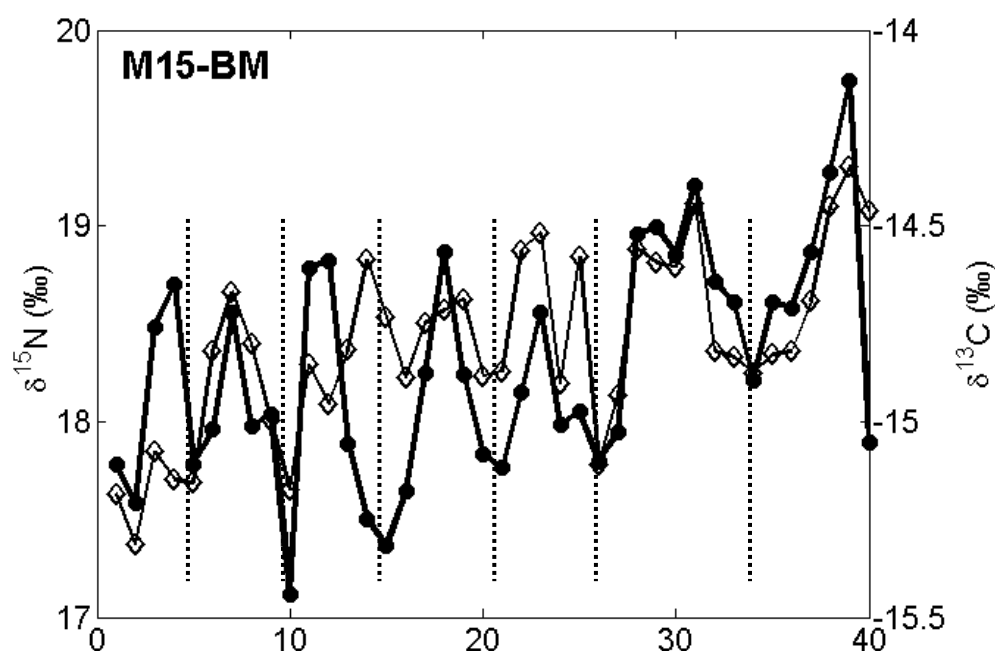


Figura 17. Perfil isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa más larga (41cm) perteneciente a M15 colectado en Bahía Magdalena. Muestra la variación isotópica a lo largo de la vibrisa, las líneas punteadas indican arbitrariamente las oscilaciones que podrían estar revelando aproximadamente 7 años de información alimentaria.

Correlación de la variación isotópica con la variación de concentración de Clorofila a en el área adyacente a Bahía Magdalena

Una vez que se estableció que el $\delta^{15}\text{N}$ tuvo mejor ajuste estacional y que algunas vibrisas sí mostraron una periodicidad clara (Tabla 5), se procedió a realizar

la correlación de cada una de las vibrisas, tanto de Bahía Magdalena como de Bahía de La Paz, con la concentración de la Chl-a de su zona correspondiente.

A continuación se describe el tratamiento matemático aplicado para las siete vibrisas consideradas. En primer lugar, en base al cociente obtenido a partir de la longitud de la vibrisa y la tasa anual de crecimiento, calculada para *Zalophus californianus* en este estudio (5.92 cm/año), se obtuvo la cantidad de años de información isotópica contenidos en cada vibrisa (Tabla 6). Resultando que el M2_BM y la H10_BM tuvieron las vibrisas con mayor número de años de información con 4 y 3 años, respectivamente. Debido a que se conoce la fecha en la que murió el animal y se colectó la vibrisa, es decir la fecha en la que metabólicamente dejó de crecer, es posible reconstruir la historia alimentaria del individuo para el periodo de crecimiento de la vibrisa. Por tanto es posible, calcular la fecha aproximada de la punta de la vibrisa con base en el tiempo transcurrido a lo largo de la misma y su fecha de colecta (Tabla 6). Por ejemplo, la vibrisa con fecha más antigua resultó la M2_BM con crecimiento inicial del 5 de marzo de 2005.

Debido a que previamente se ha extraído la componente anual y semi-anual de las series de tiempo (fórmula 1), tanto de los valores isotópicos del $\delta^{15}\text{N}$ de cada una de las vibrisas así como de la concentración de Chl-a de cada una de las zonas, es posible correlacionar ambas variables y establecer el tiempo de desfase en el que se presenta el máximo de clorofila y el cambio en los valores isotópicos en vibrisas de *Zalophus californianus*.

Tabla 6. Reconstrucción del tiempo de la información contenida en cada una de las vibrisas de *Zalophus californianus* en base al modelo propuesto. En gris se indican las muestras de Bahía de La Paz.

Código individuo	Años representados*	Fecha de inicio de crecimiento*	Tiempo de desfase (meses)**	Variancia explicada (%)***
M2_BM	4	05-mar-05	4	36
H391_BM	2.8	14-may-06	4	40
H3_BM	2.5	04-oct-06	2.4	45
H6_BM	2.7	20-sep-06	1.8	38
H10_BM	3	26-sep-06	5.4	39

H5_IS	1	26-jun-07	7.2	67
H6_IS	1	26-jun-07	4.8	54

* Datos calculados a partir del programa generado en MatLab.

** Tiempo de desfase calculado por el modelo, entre el momento de mayor [Chl- a] y la mayor relación isotópica.

*** La variabilidad que se explica por el modelo.

En cuanto a las vibrisas colectadas en Bahía Magdalena, donde el número de muestra fue mayor (n=10), las vibrisas más largas y con más años representados, fue posible hacer el análisis a 5 de las vibrisas seleccionadas (Tabla 6). La hembra con más tiempo muestreado H10-BM y cuya vibrisa fue colectada el 20 de julio de 2009, se calculó una periodicidad de 3.03 ciclos con una VE alta de 40%. Al aplicar la tasa anual de crecimiento con base a la longitud total (175mm) se determinó que la fecha en que comenzó a registrar información alimenticia fue alrededor del 26 de septiembre de 2006. Finalmente, al correlacionar la periodicidad establecida para la Chl-a de la región y acoplando las fechas de inicio de crecimiento y de colecta para ambas series de tiempo se obtuvo un desfase, a partir del momento en que los nutrientes son aprovechados por los productores primarios pasando por toda la cadena trófica hasta que se refleja en el tejido del animal, de 5.4 meses con una VE alta de 39% (Tabla 6; Fig. 18). El resto de las vibrisas tuvo un tratamiento similar (Anexo 1).

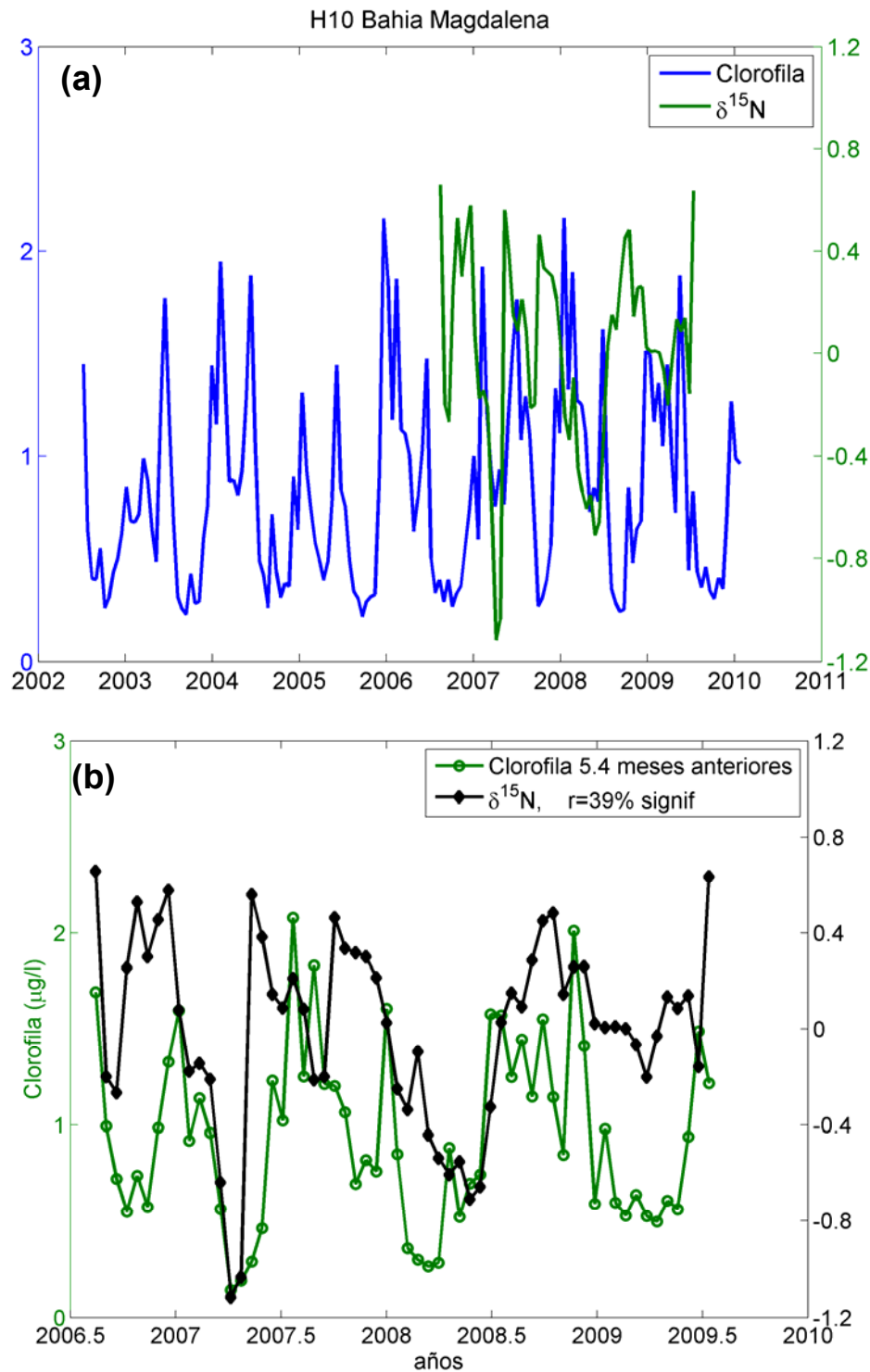


Figura 18. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo limitado por el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (3 años) y cuyo inicio fue alrededor de septiembre de 2006. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 39%.

Correlación de la variación isotópica con la variación de concentración de Clorofila a en el área adyacente a Bahía de La Paz

Las vibrisas colectadas en Bahía de La Paz tuvieron un tratamiento matemático similar al descrito previamente. En este caso, el área de estudio se delimitó entre los 24° y 25° latitud norte y 110° y 111° longitud oeste, en un periodo de los datos semanales de Chl-a que abarcó desde 2002 a 2010. De estas muestras solo fue posible calcular la relación de la variación isotópica con la variación de la clorofila para dos vibrisas (H5-IS y H6-IS) colectadas el 25 de junio de 2008. Acerca de la tercer vibrisa, no fue posible realizar el análisis debido a que fue colectada en mayo de 2001 cuando aún no se disponía de datos satelitales de clorofila.

La vibrisa H6-IS cuya longitud total fue de 62mm completó un ciclo anual de información isotópica con una VE de 51%. Para este periodo se estableció que hubo un tiempo de desfase de 4.8 meses entre el pico máximo de clorofila y de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ con una correlación de 54% (Tabla 5; Fig. 19).

Una vez calculado el tiempo de desfase para cada una de las vibrisas, se calculó que en promedio para Bahía Magdalena se presenta en 3.5 ± 1.4 meses, mientras que para Bahía de La Paz el promedio fue de 6 ± 1.7 meses, aunque hay que considerar que solo 2 vibrisas fueron analizadas para este propósito en la Bahía de La Paz.

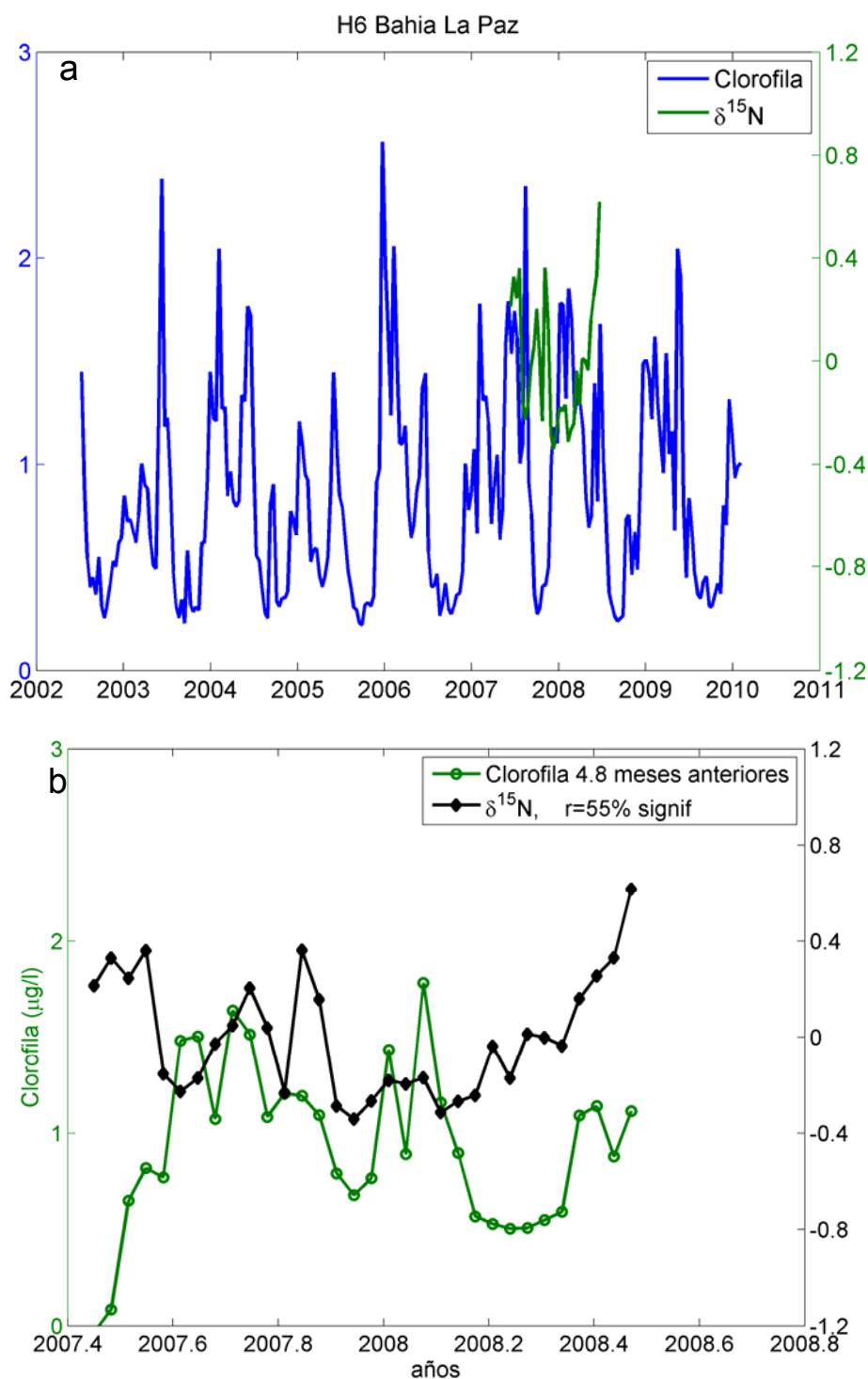


Figura 19. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limitó el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ que fue 1 año y cuyo inicio fue alrededor de junio de 2007 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 54%.

Índice de surgencia frente a la Bahía Magdalena

Para el caso de las vibrisas colectadas en Bahía Magdalena, sus valores isotópicos también fueron correlacionados con el índice de surgencia (CUI), tomando los datos de la boya oceanográfica de la NOAA ubicada en la latitud 24°N y la longitud 113°O frente a la Bahía Magdalena, para el periodo de 2002 a 2010. Para tal caso, las muestras llevaron un tratamiento matemático similar al ya descrito con antelación.

Dado que inicialmente se ha extraído la componente anual y semi-anual de las series de tiempo (fórmula 1), tanto de los valores isotópicos del $\delta^{15}\text{N}$ de cada una de las vibrisas así como del índice de surgencia para la zona, es posible correlacionar ambas variables y establecer el tiempo de desfase entre el momento de mayor concentración de clorofila (cuando se presentan las condiciones favorables para el desarrollo de surgencias) hasta observar el cambio en los valores isotópicos en vibrisas de *Zalophus californianus*.

Dicha correlación se llevó a cabo con 5 vibrisas (Tabla 7) cuyo tiempo de desfase para el índice de surgencia en promedio fue 3.66 ± 1.95 meses para ver reflejado en el tejido el momento de mayor concentración de clorofila del ambiente (Anexo 2).

Tabla 7. Representación del tiempo de desfase del Índice de Surgencia para las vibrisas de *Zalophus californianus* en Bahía Magdalena.

Código individuo	Longitud	Años representados	Tiempo de desfase (meses)**	Variancia explicada (%)***
H10_BM	175 mm	3	4.2	40
H391_BM	165 mm	2.8	2.3	18
H3_BM	152 mm	2.5	6.6	24
H6_BM	165 mm	2.7	3.6	29
M2_BM	235 mm	4	1.6	20

DISCUSIÓN

Variación isotópica

Se han desarrollado diversas investigaciones de los hábitos alimentarios del lobo marino de California, *Zalophus californianus*, utilizando la técnica del análisis de isótopos estables en diversos tejidos (Porrás-Peters *et al.*, 2008; Elorriaga-Verplanken, 2009) para identificar niveles tróficos y patrones alimentarios ontogénicos, poblacionales e inter-poblacionales.

Los estudios de hábitos alimentarios empleando las vibrisas son muy limitados, la importancia de este tejido radica en que archiva la historia de alimentación del individuo por varios años con intervalos de 15 a 30 días. Por esta razón se empleó este tejido con el fin de entender como varia su dieta en relación a los cambios ambientales estacionales en la zona de estudio (e.g., Cherel *et al.*, 2009).

La señal isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en los tejidos de un depredador se enriquecen conforme aumenta el nivel trófico de sus presas. Se ha mencionado que existe un incremento aproximado de $\sim 3\text{‰}$ en $\delta^{15}\text{N}$ y $\sim 1\text{‰}$ en $\delta^{13}\text{C}$ conforme se incrementa el nivel trófico, siendo éste un mejor indicador del hábitat que utilizan los consumidores (Hobson *et al.*, 1996; Kelly, 2000). Con base en estas diferencias para ambos isótopos es razonable encontrar una mayor gama de valores de $\delta^{15}\text{N}$ (19.31 a 22.28‰) que para el $\delta^{13}\text{C}$ (-13.39 a -14.49‰) en todos los organismos muestreados, debido al amplio espectro de presas del cual se alimentan.

Las diferencias en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ en *Z. californianus* podrían deberse a dos aspectos: 1) cambio de nivel trófico de las presas consumidas a lo largo del periodo; y/o 2) cambios estacionales en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ desde la base de la red trófica que afectaría en cascada hasta los depredadores tope. Aguiñiga *et al.* (2010) reportan valores de $\delta^{15}\text{N}$ en Bahía de La Paz para materia orgánica particulada (MOP) obtenida en trampas de sedimentos que varían de 8.3 a 12‰ entre

estaciones. Esta variación de 4‰ en los valores basales de $\delta^{15}\text{N}$, explicarían la variación de $\delta^{15}\text{N}$ en un ciclo anual de las vibrisas de lobo marino.

La variación en la señal de $\delta^{13}\text{C}$ puede deberse a: 1) variación de nivel trófico de las presas consumidas que tendrían un impacto de 1‰ entre un nivel trófico y otro; 2) diferencias en las áreas de alimentación utilizadas entre estaciones del año (costero-pelágico, bentónico-pelágico); y 3) variaciones basales en los valores de $\delta^{13}\text{C}$, como ocurren con el $\delta^{15}\text{N}$, que pueden reflejarse en los animales debido a las migraciones entre ecosistemas. En este caso los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en la MOP, tienen una variación de hasta 2 y 3‰ dentro de un mismo año (Aguiñiga *et al.*, 2010). La ecología alimentaria de esta especie revela que podría considerarse como un especialista plástico, ya que presenta una marcada preferencia por unas cuantas especies como la anchoveta del norte (*Engraulis mordax*), la sardina Monterey (*Sardinops sagax*) y la merluza del Pacífico (*Merluccius productus*), entre otras. Sus hábitos alimentarios varían geográficamente en función de la distribución de sus presas principales y de las características oceanográficas de distintas regiones (Espinosa de los Reyes, 2007).

El espectro trófico de la especie se compone de una gran cantidad de presas principalmente de peces (160 especies), las más comunes fueron la anchoveta del norte (*Engraulis mordax*), la sardina Monterey (*Sardinops sagax caeruleus*), la merluza del Pacífico (*Merluccius productus*), el sable del Atlántico (*Trichiurus lepturus*) y el pez sapo (*Porichthys sp.*), en general estas especies presentan valores isotópicos altos para $\delta^{15}\text{N}$ (entre 12 y 16‰; Camalich, 2010) y se encuentran presentes en todos los grupos de alimentación, excepto en Los Islotes donde predominan especies demersales como el serrano de agua profunda (*Serranus aequidens*) e igualmente se ha encontrado una especie de cefalópodo dentro de su dieta (*Loligo opalescens* $\delta^{15}\text{N} = 13\text{‰}$; Antonelis *et al.*, 1984; Bautista-Vega, 2002; García-Rodríguez y Auriolles-Gamboa, 2004; Auriolles-Gamboa y Camacho, 2007; Porras-Peters *et al.*, 2008; Camalich, 2010). Se desconoce si el lobo marino consume de manera directa langostilla (*Pleuroncodes planipes*; 14.5‰ de $\delta^{15}\text{N}$),

pero Bautista-Vega (2002) la reporta como presa importante, al estar presente en los copros de lobo marino (julio y diciembre 1999 y marzo 2000) con un alto porcentaje junto con peces y cefalópodos.

Rodríguez-Valenzuela (2009) analizó el contenido energético de las principales presas del lobo marino (*Sardinops sagax*, *Merluccius angustimanus*, *Kathetostoma avaruncus* y *Pleuroncodes planipes*), comparando entre el período frío (marzo) y cálido (noviembre) presente en Bahía Magdalena. Encontrando que *S. sagax* como la especie de mayor contenido energético durante los dos periodos, sin embargo cuando ésta tiene la menor disponibilidad durante el período cálido las otras especies mostraron un alto contenido energético.

Cuando se analizaron estadísticamente los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de las hembras de las colonias de Bahía Magdalena y Bahía de La Paz, se encontraron diferencias significativas, confirmando que no existe una superposición de las zonas de alimentación entre los individuos de ambas localidades de estudio como se muestra en la figura 20. La separación entre los individuos de las dos localidades puede deberse a la diferencia isotópica que se presenta desde la MOP, que en el caso de Bahía Magdalena fueron para $\delta^{13}\text{C}$ de -21.76‰ y para $\delta^{15}\text{N}$ de 8.27‰ (Camalich-Carpizo *et al.*, *en prensa*); por su parte en Bahía de La Paz la composición isotópica de la MOP en el $\delta^{13}\text{C}$ varió entre -19 y -23‰ y para el $\delta^{15}\text{N}$ entre 8 y 12‰ (Aguñiga *et al.*, 2010).

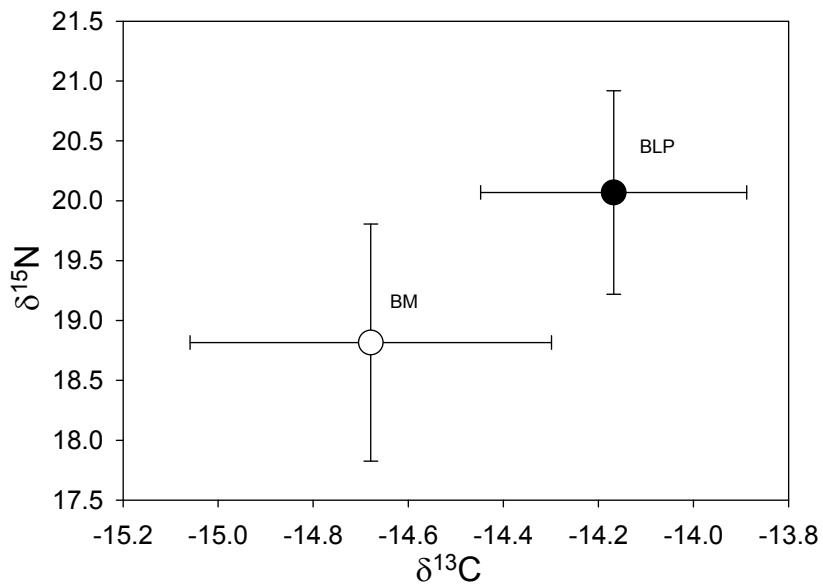


Figura 20. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (media $\pm$ SD) de la vibrisa de *Zalophus californianus* correspondiente a la categoría hembras colectadas en Bahía Magdalena y Bahía de La Paz.

A partir del análisis estadístico de la señal isotópica realizada a las dos categorías, machos y hembras (estas últimas muestreadas en ambas localidades de estudio), fue posible observar que no existe una superposición de nichos tróficos explotados (Fig. 21). La variabilidad en el $\delta^{15}\text{N}$ que se presenta entre los sexos, puede ser explicada por el dimorfismo sexual (masa corporal) que presentan los lobos marinos, los machos adultos presentan una mayor capacidad para almacenar oxígeno que las hembras y por ende una mayor capacidad de buceo, dando como resultado distintas estrategias de alimentación y esfuerzo entre sexos (Kuhn *et al.*, 2006; Weise y Costa, 2007) así como una mayor capacidad de dispersarse a zonas muy lejanas de la colonia durante la temporada no reproductiva, se cree que podrían estar viajando al Norte hacia California como lo muestra el censo (*e.g.* Odell, 1975) donde el número de individuos en Islas Canal aumenta considerablemente con respecto a la época de reproducción (Aurioles-Gamboa *et al.*, 1983).

Se han reconocido fuentes de variación alimentaria intra-específica en varias especies tanto de invertebrados (Grantham *et al.*, 1995) como de vertebrados (Schindler *et al.*, 1997; Daltry *et al.*, 1998; Annett y Pierotti, 1999; Kruuk y Moorhouse, 1990; Ragg, 1998). Recientemente se habla de una diversificación de

dietas a nivel poblacional, considerando las variaciones individuales y el gran valor adaptativo que les provee. Estas variaciones se basan en la diversificación de la dieta que tiene un carácter fenotípico en función del sexo y de la edad. Debido a su mayor masa corporal.

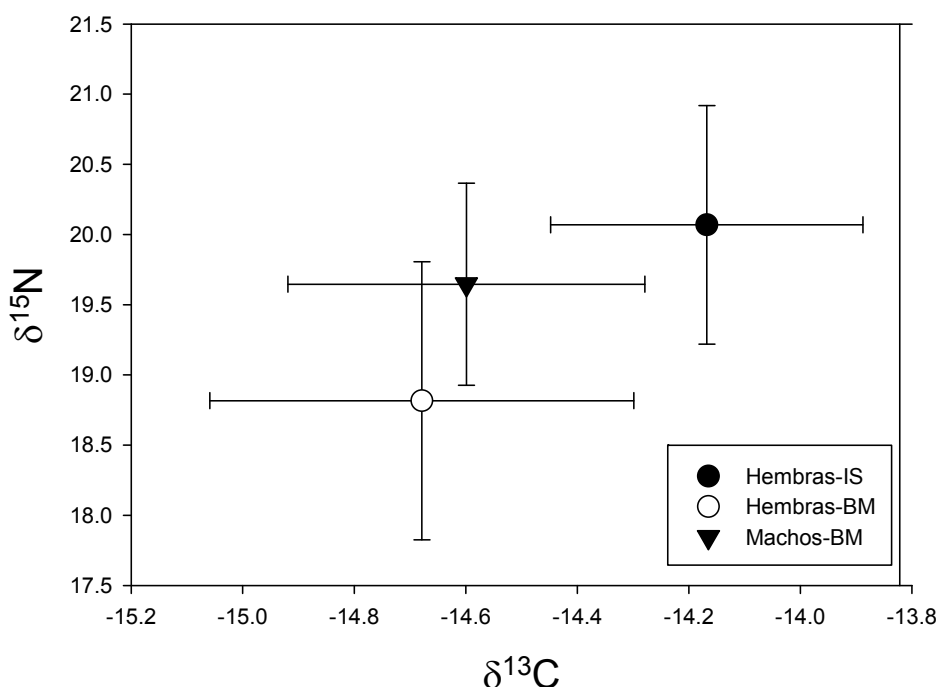


Figura 21. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (media $\pm$ DS) de la vibrisa de *Zalophus californianus* correspondiente a los machos y hembras colectados en Bahía Magdalena y las hembras encontradas en Bahía de La Paz.

Los resultados isotópicos de los segmentos de vibrisa muestreados (n=680; Tabla 3; Fig. 5a, b y 6) mostraron que la población de lobos marinos tiene un gran espacio isotópico de alimentación. La variación entre los segmentos de vibrisa refleja la variabilidad intra e inter-individuo debida a la disponibilidad y preferencia de especies presas por parte de cada individuo. Para examinar la dispersión del patrón intra-individual de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, se realizó un histograma de los valores de la desviación estándar presente en las vibrisas individuales (Fig. 22).

En el caso de la localidad de Bahía Magdalena fue posible obtener muestras tanto de hembras como de machos. Se hizo un análisis comparativo entre las

categorías encontradas, machos subadultos y adultos y hembras (Tabla 8), la categoría se asignó en base al criterio y edad calculada para la población de Cabo San Lázaro por Ascencio-Estrada (2011).

La separación de los individuos por categoría de sexo se estableció de acuerdo a los criterios establecidos por Peterson y Bartholomew (1967) y Orr *et al.* (1970), donde: 1) la fase de cría son individuos de ambos sexos menores a un año de edad, color gris oscuro o negro, donde al nacer los machos miden 75.7 ± 2.9 cm y las hembras 72.3 ± 4.2 cm; 2) la fase de juvenil son individuos inmaduros de ambos sexos (no es posible distinguir uno del otro), que presentan a partir del segundo año de edad cumplido hasta el final del cuarto año; con color café claro y longitud de 1-1.3 m; 3) la fase de hembra adulta son aquellos lobos marinos de 5 años de edad en adelante; color café claro y 1.4-1.6 m de longitud, sin cresta sagital; 4) la fase de macho subadulto son aquellos individuos con edades que van desde el quinto año cumplido hasta el final del octavo; de color obscuro con longitud de 1.5-2 m, con cresta sagital parcialmente desarrollada y cuello más grueso que las hembras adultas; y. 5) la fase de macho adulto son aquellos de 9 años de edad en adelante; que presentan un color similar al de los machos subadultos, que miden entre 2 y 2.5 m y su cresta sagital y cuello están completamente desarrollados.

Tabla 8. Datos de la categoría de edad de los lobos marinos de California colectados en Bahía Magdalena. Edad estimada según Ascencio-Estrada (2011).

Individuo	Sexo	Edad estimada (años)	Categoría
M15-BM	macho	7	subadulto
M11-BM	macho	8	subadulto
H1-BM	hembra	4	juvenil
H212-BM	hembra	5	adulto
M2-BM	macho	+19	adulto
H391-BM	hembra	4	juvenil

M7-BM	macho	11	adulto
H3-BM	hembra	3	juvenil
H6-BM	hembra	3	juvenil
H10-BM	hembra	5	adulto

A partir del análisis estadístico, al comparar la naturaleza de los datos por medio de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis fue posible identificar que las cuatro categorías muestreadas (Tabla 9) mostraron diferencias estadísticas significativas entre ellas ($H=186.90$, g.l.=3, $p<0.001$), destacando con la prueba *post hoc* Dunn que únicamente el grupo formado por las hembras juveniles y machos adultos no mostraron diferencia estadística significativa ($Q=1.59$, $p>0.05$; Fig. 22).

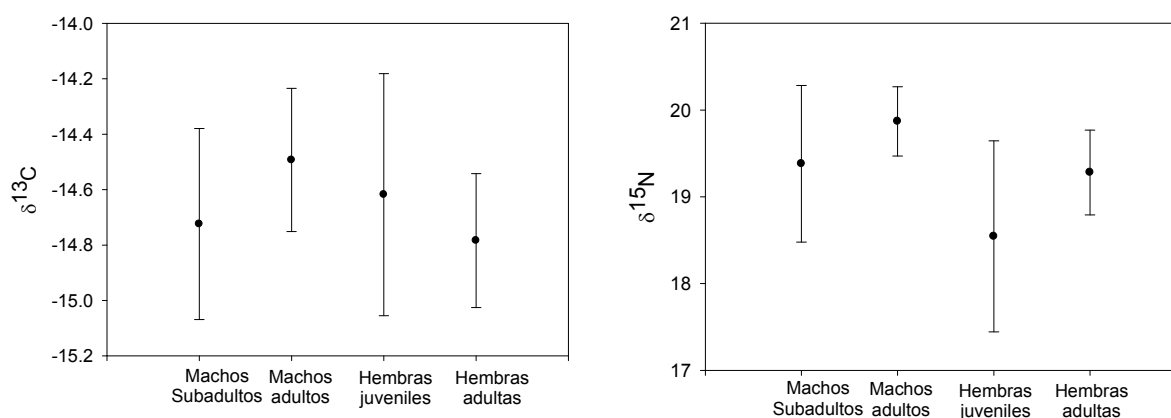


Figura 22. Valores de $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$ (promedio $\pm$ DS en ‰) de las vibrisas de *Zalophus californianus* recolectados en Bahía Magdalena. El gráfico de la izquierda muestra los datos de $\delta^{13}C$ y el de la derecha los valores de $\delta^{15}N$, de las distintas categorías de edad.

A pesar de que este estudio se basó en el análisis isotópico de las hembras por presentar filopatría a sus áreas reproductivas. Fue interesante la variación encontrada en los machos, a partir de la diferencia en sus valores del $\delta^{15}N$, se determinó una variación isotópica promedio de 1.36‰ a lo largo de un año que es posible relacionar con la probable migración al norte hacia las Islas Canal al sur de California que ellos realizan durante la temporada no reproductiva (Odell, 1975).

Con lo que se conoce acerca del gradiente latitudinal decreciente (de sur a norte) para ambos isótopos (Burton y Koch, 1999; Aurióles-Gamboa *et al.*, 2006), se deberían esperar valores más bajos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en machos adultos de lobo marino, respecto a las hembras, sin embargo ocurrió de modo inverso. Esto hace pensar que independientemente de que estos machos adultos estén realizando desplazamientos migratorios hacia el norte, es posible que las presas que forman su dieta tengan una posición trófica más elevada o sean de mayor talla, generando un enriquecimiento isotópico en ^{13}C y ^{15}N (Hobson *et al.*, 1997; Aurióles-Gamboa *et al.*, 2006; Mendes *et al.*, 2007).

La vibrisa resultó ser un tejido excelente para medir variaciones isotópicas interanuales debido a que es un tejido inerte, que metabólicamente ya no se modifica después de su síntesis por lo que archiva la información isotópica reflejo de las variaciones en el ambiente durante su crecimiento (Cherel *et al.*, 2009).

Tasa de crecimiento de la vibrisa

A fin de evaluar los cambios estacionales y espaciales en la dieta de *Z. californianus* se midieron las firmas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ a lo largo de la vibrisa. Las vibrisas largas pueden transformarse en medidas de tiempo, las cuales pueden relacionarse con razones isotópicas (Hall-Aspland *et al.*, 2005).

Para poder interpretar la variación estacional presente en las vibrisas es necesario determinar su tasa de crecimiento. En este sentido se han hecho algunos experimentos con fócidos y otáridos, inyectando a los animales una dosis de glicina enriquecida en ^{15}N y/o ^{13}C , aminoácido presente en la queratina formadora de pelo. Dado que la asimilación de la glicina enriquecida ocurre a los pocos días de la inyección, es posible seguir el movimiento del pico producido por esta glicina a lo largo del bigote y calcular el crecimiento con base en las fechas de inyección y de colecta (Hirons *et al.*, 2001).

Con base en este tipo de experimentos se ha determinado la tasa de crecimiento de la vibrisa para varias especies de pinnípedos. Para fócidos las

vibrisas presentan un crecimiento irregular o variable (Hirons *et al.*, 2001a; Zhao y Schell, 2004) además de ser reemplazadas o mudadas anualmente (Greaves *et al.*, 2004). En cambio en otáridos, se ha demostrado que presentan un crecimiento continuo y no mudan las vibrisas (Hirons *et al.*, 2001a; Cherel *et al.*, 2009), únicamente se desgastan y llegan a acumular información por varios años.

Se ha determinado que las oscilaciones isotópicas a lo largo de las vibrisas se pueden interpretar como el reflejo del ciclo anual de migración en el lobo marino de Steller (*Eumetopias jubatus*; Hirons *et al.*, 2001a) y en el lobo fino del Antártico (*Artocephalus gazella*; Cherel *et al.*, 2009), pudiendo identificar en este último la migración que hacen los machos entre la zona Antártica y Subantártica, ya que mostraron valores isotópicos propios de cada sitio donde se alimentan; demostrando que tienen preferencia inter-individual por distintos nichos isotópicos.

Con base en este marco teórico, se sabe que la vibrisa muestra un patrón de cambios periódicos en los perfiles isotópicos que están estrechamente relacionados con los periodos y sitios de alimentación de los animales. Para este estudio se calculó la tasa de crecimiento de la vibrisa de *Zalophus californianus* en base a la relación significativa (Fig. 16) que se presentó entre la longitud de la vibrisa y el número de ciclos anuales presentes en la misma (Tabla 9). Se determinó una tasa de crecimiento continuo de 0.16mm/día muy similar a la establecida para *Eumetopias jubatus* (0.17mm/día) en vida libre, su congénere más cercano al norte (Hirons *et al.*, 2001a).

Se ha empleado el tejido queratinizado o barbas de las ballena boreal y ballena franca austral, para explorar la periodicidad anual con respecto a la variación isotópica resultado de sus migraciones alimentarias (Hobson, 1999). Por otro lado, Best y Schell (1996) demostraron que la variabilidad en el $\delta^{13}\text{C}$ a lo largo de toda la barba de la ballena franca (*Eubalaena australis*) estaba asociada a su desplazamiento entre las costas de Sudáfrica, en donde la MOP presenta bajos valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, en contraste con la Convergencia Subtropical (CST) donde la MOP presenta valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ significativamente más altos. Estos autores

asociaron la variabilidad del $\delta^{15}\text{N}$ a los cambios espacio-temporales en las tasas metabólicas de esta especie, ya que durante su migración al norte aparentemente dejan de alimentarse. En otro estudio realizado por Lee *et al.* (2005) mostraron resultados similares en muestras de músculo y barbas de la ballena de Groenlandia (*Balaena mysticetus*), asociando la variabilidad del $\delta^{13}\text{C}$ al cambio de dieta de las ballenas, entre sus áreas de alimentación en el mar de Bering-Chukchi se alimentan principalmente de eufáusidos (herbívoros) y en el mar de Beaufort incrementa su consumo de copépodos (carnívoros).

Correlación de las variables ambientales con la variación isotópica

Muchas especies de vertebrados muestran una fuerte variación temporal en sus dietas, ya sea como producto de cambios estacionales o como un efecto a largo plazo producto de variaciones interanuales. La variación estacional en las fuentes de comida puede ser crucial para entender la dinámica poblacional (Reid *et al.*, 1997) y la tendencia a largo plazo en la dieta puede ser importante para evaluar los efectos ecológicos del cambio ambiental tal como el calentamiento global (Brown *et al.*, 2001; Dalerum y Angerbjörn, 2005).

El éxito de las poblaciones de pinnípedos como depredadores tope depende de las características de la base de la red trófica, es decir, que están asociados a aguas de alta calidad (en general sistemas fríos) y con corrientes y/o surgencias, lugares que generan condiciones de alta productividad biológica.

El efecto de la estacionalidad en las poblaciones de pinnípedos presenta un patrón latitudinal. Conforme se está más lejos del ecuador la estacionalidad es más marcada y la disponibilidad de alimento se hace más predecible debido al afloramiento marino producido durante la temporada cálida, hasta llegar a las regiones polares, con máxima abundancia de alimento.

La estacionalidad se ve reflejada en los perfiles isotópicos reportados por Hirons *et al.* (2001a) y por Cherel *et al.* (2009) para el lobo marino de Steller y el lobo fino Antártico, respectivamente. Perfiles donde se observan oscilaciones anuales

muy claras en las concentraciones de isótopos de carbono y nitrógeno. Las variaciones isotópicas se relacionan con la disponibilidad de alimento e incluso con la migración que realizan los animales. En contraste, los perfiles isotópicos que se observaron en esta investigación, no mostraron un patrón tan marcado (Fig. 5a, b y 6). Esto se explica por la ubicación de los sitios reproductivos y los sitios de alimentación de la especie, que se localizan en latitudes de la convergencia tropical-subtropical, donde la estacionalidad tiene una contribución menor en la variabilidad total, siendo además los recursos más impredecibles.

Es posible comparar diferentes secciones de un tejido que tienen un crecimiento progresivo, tal como el pelo, plumas, garras y dientes, ya que estos tejidos retienen los valores isotópicos en orden cronológico (Bearhop *et al.*, 2003; Schwertl *et al.*, 2003). La mayoría de los tejidos muestran un tiempo de renovación, aunque algunos son metabólicamente inertes, por ejemplo, pelo, plumas y en nuestro caso, las vibrisas.

Las variaciones de $\delta^{15}\text{N}$ que se encontraron entre las hembras, están influenciadas por los valores que existen a nivel de la base de la red trófica, más que a diferencias de nivel trófico entre los individuos. Esto se debe a que las diferencias en los valores de $\delta^{15}\text{N}$ a nivel de material orgánico particulado (MOP) se reflejan en los siguientes niveles tróficos con su respectivo enriquecimiento, hasta llegar a los depredadores tope (Rau *et al.*, 1983; Kelly, 2000). En este sentido, Altabet *et al.* (1999) demostró que el Golfo de California es un sistema enriquecido en ^{15}N en comparación con otras regiones (Altabet, 1996), registrando valores de la MOP en un rango entre 9 a 12‰.

Recientemente, Aguiñiga *et al.* (2010) reportan los valores isotópicos determinados para la Cuenca Alfonso en la Bahía de La Paz siendo para $\delta^{15}\text{N}$ entre 8‰ y 12‰, igualmente altos lo cual lo relacionan con la presencia de áreas de desnitrificación localizadas cerca de la boca del Golfo de California (22°N 115°O y 15°N 110°O), y cuyas aguas enriquecidas en ^{15}N (producción regenerada como factor importante), son transportadas hacia el Golfo de California por la Corriente

Subsuperficial Ecuatorial (Voss *et al.*, 2001; Beier *et al.*, 2003). En regiones geográficas más afines a Bahía Magdalena, los valores $\delta^{15}\text{N}$ en sedimentos son más bajos ($\sim 8.5\text{‰}$; Altabet *et al.*, 1999).

Camalich-Carpizo *et al.* (*en prensa*) determinaron el valor de esta razón isotópica frente al complejo lagunar de Bahía Magdalena en 11.2‰ . Estos valores pueden relacionarse a la importante influencia que tiene la Corriente de California sobre la región alrededor de Bahía Magdalena (Lluch-Belda *et al.*, 2000), que acarrea propiedades de altas latitudes.

Los valores isotópicos de cada región desde la base de la red trófica, se reflejan en los lobos marinos, para el caso de Bahía Magdalena fue 18.82‰ contra los encontrados en Bahía de La Paz de 20.37‰ , para el caso del nitrógeno.

Variabilidad estacional

A partir de la integración de la información oceanográfica y biológica, de la que se observan tendencias temporales que parecen obedecer a cambios estacionales típicos de la región o a fenómenos más locales de mesoescala como, meandros, frentes, etc.

Además considerando: 1) que el período reproductivo de la especie comienza en mayo cuando llegan los machos adultos y establecen los territorios, y termina a finales de julio cuando concluye el periodo de cópulas (Odell, 1975), y 2) que la mayoría de los nacimientos ocurren a finales de junio, aunque puede variar latitudinalmente; se hizo el análisis para identificar si este aprovechamiento de los recursos se veía reflejado en el tejido y cuanta relación temporal existía entre los eventos oceánicos.

En la Corriente de California, lo mismo que en otras regiones altamente productivas, existen áreas de escala espacial mucho menor que soportan grandes biomásas de organismos a lo largo del año y a los que se les ha denominado Centros de Actividad Biológica (BAC). La producción de estos BAC está asociada a

diferentes mecanismos físicos de los ecosistemas donde se presentan (Martínez-López y Verdugo-Díaz, 2000). La presencia de proliferación de fitoplancton, las altas densidades de zooplancton (incluyendo agregaciones altas de crustáceos como las langostillas), los productos de desove de sardinas y anchovetas, así como la presencia de mamíferos marinos, sugiere la existencia de una productividad alta así como redes tróficas cortas.

En este sentido fue posible definir que en cuanto a la concentración de clorofila para la región del BAC de Magdalena, se presenta un claro incremento que comienza a finales de mayo produciéndose la mayor intensidad a mediados de junio, sugiriendo una elevada producción en la zona (Fig. 13). Previamente, se ha podido relacionar que este fenómeno sucede cuando se presenta el mínimo de temperatura superficial en el mes de mayo, con un importante aporte de agua fría del fondo (Mercuri, 2007) y donde se menciona un desfase de 23 días entre uno y otro evento. Los altos valores de clorofila coinciden con los obtenidos por Espinoza-Carreón *et al.* (2004) para una región cercana al norte de la Bahía, ambos $>1\text{mg.m}^{-3}$, así como a los valores obtenidos en este trabajo que en promedio se obtuvo 5mg.m^{-3} .

Es bien conocido que las surgencias son especialmente importantes para el desarrollo de las cadenas tróficas a nivel regional. En la región de Bahía Magdalena, el máximo de capturas de sardina (principal alimento para el lobo marino de California) ocurre a principios de julio, poco más de un mes después de presentarse los máximos de clorofila considerándose así como un ecosistema altamente productivo, permitiendo una alta presencia de mamíferos marinos alimentándose en la zona (Mercuri, 2007). Estos datos son consistentes con el desfase se que obtuvo para el momento en que se exhibe la mayor frecuencia de variación isotópica que fue en promedio 3.4 ± 1.6 meses después del momento que se presenta la máxima concentración de clorofila y de 3.78 ± 1.9 meses después del máximo de surgencia en el medio (Tabla 9).

Se ha observado que el lobo marino coincide con el momento de mayor productividad para alimentarse intensamente de presas ricas en contenido energético

como las sardinas con alto valor proteico tanto en período frío como en el cálido, mientras que la otra presa importante la merluza, tiene un mayor valor proteico durante el periodo frío (Rodríguez-Valenzuela, 2009). La disponibilidad de alimento depende de las variaciones estacionales y la capacidad del animal para almacenar reservas de energía, imponiendo una serie de limitaciones para la reproducción de la especie (Guinet *et al.*, 2001). Estas variaciones ejercen presión sobre la población entera y particularmente sobre las hembras preñadas y lactantes debido a que el gasto energético de estos animales es más elevado. Por estas razones es que regularmente los organismos exhiben una intensa alimentación con la finalidad de almacenar la mayor cantidad de energía antes de la reproducción (Rodríguez-Valenzuela, 2009), lo que se confirma con un mayor contenido energético en la capa de grasa de las hembras de lobo marino durante el período frío. Esto coincide con el momento más productivo en el ecosistema en el que las hembras se preparan para el período reproductivo (principios de mayo a finales de julio; Odell, 1975). Se conoce que los requerimientos energéticos de las hembras lactantes, sólo pueden ser sostenidos en áreas altamente productivas como las regiones de surgencias donde las presas están concentradas y son predecibles (Costa, 1993), como es el caso del BAC de Bahía Magdalena.

Tabla 9. Análisis estadístico de la periodicidad de las vibrisas de lobo marino de California *Zalophus californianus*, donde se enlistan los parámetros del ajuste estacional.

Código individuo (n=8)	Longitud de la vibrisa (mm)	Fecha de colecta	Ciclos Análisis de Fourier ($\delta^{15}\text{N}$)	Años representados*	Fecha de inicio de crecimiento*	Tiempo de desfase [Chl-a] (meses)*	Tiempo de desfase (CUI) (meses)*
M15_BM	410	09-may-08	sin periodicidad				
M11_BM	330	22-jul-08	sin periodicidad				
H1_BM	260	28-jul-08	sin periodicidad				
H212_BM	200	31-oct-08	sin periodicidad				
M2_BM	235	15-dic-08	3.93	4	05-mar-05	4	1.0
H391_BM	165	08-ene-09	1.95	2.8	14-may-06	4	2.3
M7_BM	245	21-ene-09	sin periodicidad				
H3_BM	152	15-mar-09	2	2.5	04-oct-06	2.4	6.6
H6_BM	165	17-may-09	2.65	2.7	20-sep-06	1.8	4.2
H10_BM	175	20-jul-09	3.03	3	26-sep-06	5.4	4.2
H143_IS	113	02-may-01	sin periodicidad				
H5_IS	62	25-jun-08	1	1	26-jun-07	7.2	
H6_IS	62	25-jun-08	1	1	26-jun-07	4.8	

* Datos calculados a partir del programa generado en MatLab.

Por su parte, la región sur del Golfo de California exhibe una dinámica oceanográfica anual compleja, que no se limita a procesos derivados del cambio estacional (Castro *et al.*, 2000; Bernal *et al.*, 2001). Sin embargo, gran parte de esta dinámica obedece a la inversión en el régimen temporal de vientos (Parés-Sierra *et al.*, 2003; Marinone *et al.*, 2004), asociado al patrón de cambio monzónico estacional típico de la región (Anderson *et al.*, 2000; Bordoni *et al.*, 2004). Este régimen es de particular importancia para las condiciones ambientales del sur del Golfo de California, por lo que la sucesión de estaciones es un buen referente al momento de analizar los cambios temporales más importantes en el ambiente de la bahía.

Pardo-Rueda (2009) registró condiciones de mezcla a finales del invierno en la Cuenca Alfonso de Bahía de La Paz, que persiste por un periodo de aproximadamente cuatro meses, hasta la mitad del verano, dentro de la Bahía se mantiene la estratificación de la columna de agua, la profundidad de la capa de mezcla se redujo hasta los primeros 10m y la termoclina se hizo más pronunciada, bajo ésta se registraron aguas frías de hasta 15°C en los primeros 30 m de la columna. Favoreciendo un incremento de la concentración de clorofila a de incrementos sub-superficiales, muy cerca del límite superior de la termoclina. Enriqueciendo a la Bahía durante la primavera y gran parte del verano.

La alta productividad del área puede deberse al bombeo ocasionado por la formación de un giro ciclónico sobre la Cuenca Alfonso (Villegas-Aguilera, 2009). Dependiendo de su duración y velocidad de vórtice, este movimiento produce un flujo vertical divergente de agua profunda con sus respectivas consecuencias biológicas, derivadas de la inyección de nutrientes a la zona eufótica (Seki *et al.*, 2001).

Con relación a la concentración de clorofila *a* calculada para el periodo de 2002 a 2010, se observó la presencia de dos periodos de altas y medias concentraciones en un ciclo anual, uno durante el verano que es el más intenso y el segundo a finales del otoño de menor intensidad. Esto coincide con lo reportado con anterioridad en relación a las condiciones de mezcla, dos periodos de bajas concentraciones en gran parte de la columna de agua, cuando se presentaron

condiciones de estratificación y capa de mezcla profunda y un periodo de inyección de nutriente en altas concentraciones hacia capas superficiales durante el ascenso de agua profunda (Villegas-Aguilera, 2009; Pardo-Rueda, 2009).

Desafortunadamente para esta localidad solo se tenían tres vibrisas y el análisis solo fue posible realizarlo con dos de ellas. Así que este pequeño número de muestra y el hecho de que estas fueran cortas, reflejó únicamente un año de información trófica-ambiental. El resultado que se obtuvo por tanto, no refleja la variabilidad interanual y es complicado explicar su estacionalidad, ya que existen otros factores locales que intervienen en la interpretación.

El tiempo de desfase entre la mayor concentración de clorofila y el momento en que esta producción de nutrientes se ve reflejada en el tejido animal, transcurre en aproximadamente 6 meses.

CONCLUSIONES

- Las vibrisas largas (>15 cm) resultaron ser útiles para reconstruir de manera continua los cambios ambientales que se presentan por un periodo largo debido a que es un tejido inerte metabólicamente, es decir que ya no se modifica después de su síntesis y archivan de manera secuencial la variabilidad ambiental del sitio donde se alimento el lobo marino.
- Basados en variables como la temperatura superficial del mar (TSM) y la concentración de clorofila a, las regiones de Bahía Magdalena (BM) y Bahía de La Paz (BLP) mostraron diferencias marcadas. La temperatura promedio durante el periodo de verano de 2002 al verano de 2010 en BM fue 4°C más baja que en BLP. Con respecto a la Chl-a, BM tuvo una concentración promedio mayor que en BLP, sin embargo, en ésta región se presentan dos picos de intensidad en un año, favoreciendo la productividad de la zona.
- Al comparar las razones isotópicas en ambas regiones, se presentaron diferencias significativamente distintas atribuidas a la variabilidad oceanográfica que influye en valores distintos a la MOP en cada zona. En el caso de BM el valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ fueron más bajos que en BLP, a diferencia del $\delta^{15}\text{N}$ fueron mayores para BLP en aproximadamente 1‰.
- Se encontró una buena relación entre la longitud de la vibrisa y el número de ciclos extraídos por series de Fourier. Pudiendo con esto, calcular la tasa de crecimiento diario de la vibrisa de *Zalophus californianus* en 0.16mm/d. Con base en este resultado, se calculó la edad de la vibrisa y por tanto, el número de años de información archivada la cual varió entre 1 y 4 años.
- La razón isotópica que mejor mostró la estacionalidad de los datos fue el $\delta^{15}\text{N}$. Con base a esta razón fue posible correlacionar la variación isotópica con la variabilidad ambiental con una VE alta de 45.5%. Se presentó un tiempo de desfase, para BM de 3.5 meses mientras que en BLP fue de 6 meses, cuando se exhibe la máxima concentración de la clorofila con la máxima frecuencia del valor isotópico. Esta diferencia entre los ecosistemas pudo haber sido influenciada por el tamaño de muestra y características de las vibrisas en BLP.

LITERATURA CITADA

Abitia-Cárdenas, L.A., Rodríguez-Romero, J., Galván-Magaña, F., de la Cruz-Agüero, J. y Chavéz-Magaña, H. 1994. Lista sistemática de la ictiofauna de Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas*, 20(2): 159-191

Aguiñiga, S., A. Sanchez y N. Silverberg. 2010. Temporal variations of C, N, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$ in organic matter collected by a sediment trap al Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, SW Gulf of California. *Continental Shelf Research* 30:1692–1700

Altabet, M.A., 1996. Nitrogen and carbon isotopic tracers of the source and transformation of particles in the deep-sea. In: Ittekkot, V., Schäfer, P., Honjo, S., Depetris, P.J. (Eds.), *Particle Flux in the Ocean*. Wiley, London, pp. 155-184.

Altabet, M. A., C. PilskaIn, R. Thunell, C. Pride, D. Sigman, F. Chavez, y R. Francois. 1999. The nitrogen isotope biogeochemistry of sinking particles from the margin of the Eastern North Pacific. *Deep-sea research*. 46: 655-679.

Álvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California. In Ketchum, B.H. (eds) *Estuaries and enclosed areas*. Elsevier, Amsterdam, p.427-429.

Álvarez-Borrego, S. y J.R. Lara-Lara. 1991. The physical environment and productivity of the Gulf of California. In: Dauphin JP, Simoneit B (eds) *The Gulf and peninsular province of the Californias*. *Am Assoc Pet Geol Mem* 47:555–567

Anderson, B.T., J.O. Roads y S. Chen. 2000. Large-scale forcing of summertime monsoon surges over the Gulf of California and the Southwestern United States. *Journal of Geophysical Research* 105 (D19):24.455-24.667.

Annett, C.A. y Pierotti, R. 1999. Long-term reproductive output in western gulls: consequences of alternate tactics in diet choice. *Ecology*. 80: 288–297.

Antonelis, G. A., C. H. Fiscus y R. L. DeLong. 1984. Spring and summer prey of California sea lions, *Zalophus californianus*, at San Miguel Island, California, 1978-79. *Fishery Bulletin* 82: 67-75.

Ascencio-Estrada, H. 2011. Evaluación de la mortalidad del lobo marino de California (*Zalophus californianus*) en Isla Magdalena. Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN, 62p

Aurioles-Gamboa D., F. Sinsal, C. Fox, E. Alvarado y O. Maravilla. 1983. Winter migration of subadult male California sea lions (*Zalophus californianus*) in the southern part of Baja California. *Journal of Mammalogy*. 64 (3):513–518.

Aurioles-Gamboa, D., I. Castro-González, F. García-Rodríguez, S. Luque -Flores, C. Godínez- Reyes, D. M. Brousset, J. Montaña-Hirose, A. Parás, S. Montaña y F. Pérez-Gil Romo. 2000. Estado de salud de las poblaciones de lobo marino (*Zalophus californianus*) en el Golfo de California. Memorias del 1er. Congreso de Responsables de Proyectos de Naturales 8 al 11 de octubre del 2000, Veracruz, Veracruz.

Aurioles-Gamboa, D., P. L. Koch y B. J. Le Boeuf. 2006. Differences in foraging ecology of mexican and California elephant seals: Evidence from stable isotopes in pups. *Marine Mammal Science* 22: 1-13.

Aurioles-Gamboa, D. y F.J. Camacho-Ríos. 2007. Diet and feedings overlap of two otariids, *Zalophus californianus* and *Arctocephalus townsendi*: Implications to survive environmental Uncertainty. *Aquatic Mammals*. 33 (3):317-326.

Aurioles-Gamboa, D.. y F. Trillmich. 2008. *Zalophus californianus*. En: IUCN 2008. 2008 IUCN Red List of Threatened Species. <www.iucnredlist.org>. Downloaded on 12 May 2009).

Bautista-Vega, A.A. 2002. Alimentación del lobo marino de California (*Zalophus californianus californianus*, Lesson, 1828), y su relación con los pelágicos menores en Bahía Magdalena, B.C.S, México. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. México, D.F., México. 77 pp.

Bearhop, S., R. W. Furness, G. M. Hilton, S. C. Votier y S. Waldron. 2003. A forensic approach to understanding diet and habitat use from stable isotope analysis of (avian) claw material. *Functional Ecology* 17, 270–275

Bearhop S., C. Adams, S. Waldron, R. Fuller y H. Macleod. 2004. Determining trophic niche width: A novel approach using stable isotope analysis. *Journal of Animal Ecology*. 73:1007–1012.

Beier, E. 1997. A Numerical Investigation of the Annual Variability in the Gulf of California. *Journal of Oceanography*. 27: 615-632.

Beier, E. y P. Ripa. 1999. Seasonal Gyres in the Northern Gulf of California. *Journal of Oceanography*. 29: 305-311.

Beier, E., M.F. Lavín, J. Gómez, V. Godinez y J. García. 2003. La Corriente Costera Mexicana in GEOS, Reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana. 23: 152. Puerto Vallarta, México.

Bernal, G., P. Ripa y J.C. Herguera. 2001. Variabilidad oceanográfica y climática en el Bajo Golfo de California: Influencias del Trópico y pacífico Norte. *Ciencias Marinas* 27(4):595-617.

Best, P.B. y D.M. Schell. 1996. Stable isotopes in southern right whale (*Eubalaena australis*) baleen as indicators of seasonal movements, feeding and growth. *Marine Biology*. 124:483-494.

Bordoni, S., P.E. Ciesielski, R.H. Johnson, B.D. McNoldy y B. Stevens. 2004. The low-level circulation of the North American Monsoon as revealed by QuikSCAT. *Geophysical Research Letters* 31:1-4.

Bossart, G.D. 2006. Marine Mammals as Sentinel Species for Oceans and Human Health. *Oceanography* Vol. 19, No. 2

Burton, K., y P. Koch. 1999. Isotopic tracking of foraging and long-distance migration in northeastern Pacific pinnipeds. *Oecologia*. 199(4):578-585. 0029-8549 (Print) 1432-1939 (Online).

Bray, N. A. y J. M. Robles, 1991. Physical oceanography of the Gulf of California. In *The Gulf and Peninsular Province of the California*, J. P. Dauphin and B. R. T. Simoneit (eds.) American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma. 834p.

DeNiro, M. J. y S. Epstein. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 42: 495-506.

DeNiro, M. J. y S. Epstein. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 45: 341-353.

Camalich-Carpizo, J. 2010. Influencia de los procesos de nitrificación y desnitrificación en los valores del $\delta^{15}\text{N}$ en las redes tróficas del pacífico nororiental. Ensayo Predoctoral. CICIMAR-IPN. 55p.

Camalich-Carpizo, J.; A. Sánchez, S. Aguiñiga, E. F. Balart, D. Auriolles-Gamboa y B. López-Ortiz. *En prensa*. $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ y razón elemental C/N de la materia orgánica en sedimentos superficiales en el Pacífico Nororiental Mexicano.

Castro, R., A.S. Mascarenhas, R. Durazo y C.A. Collins. 2000. Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas* 26(4):561-583.

Cherel, Y., K.A. Hobson, C. Guinet y C. Vanpé. 2007. Stable isotopes document seasonal changes in trophic niches and winter foraging individual specialisation in diving predators from the Southern Ocean. *Journal of Animal Ecology*. 76, 826–836.

Cherel, Y., L. Kernaléguen, P. Richard y C. Guinet. 2009. Whisker isotopic signature depicts migration patterns and multi-year intra- and inter-individual foraging strategies in fur seals. *Biology Letters*. 5:830-832.

Costa. D.P., 1993: The relationship between reproductive and foraging energetics and the evolution of the Pinnipedia. *In: Recent Advances in Marine Mammal Science*, I. Boyd, ed_ Zoological Society of London, Oxford University Press. 66. 293-314.

Dalerum F. y A. Angerbjörn. 2005. Resolving temporal variation in vertebrate diets using naturally occurring stable isotopes. *Oecologia*. 144(4): 647-658.

Daltry, J. C., Wuster, W. y Thorpe, R. S. 1998. Intraspecific variation in the feeding ecology of the crotaline snake *Calloselasma rhodostoma* in Southeast Asia. *Journal of Herpetology*. 32: 198–205.

Darimont, C. y T. Reimchen. 2002. Intra-hair stable isotope analysis implies seasonal shift to salmon in Gray wolf diet. *Can J Zool*. 80:1638–1642.

Dehnhardt, G. 1994. Tactile size discrimination by a California sea lion (*Zalophus californianus*) using its mystacial vibrissae. *J Comp Physiol A* 175:791-800.

Dehnhardt, G. y A. Kaminski. 1995. Sensitivity of the mystacial vibrissae of harbour seals (*Phoca vitulina*) for size differences of actively touched objects. *The Journal of Experimental Biology* 198, 2317–2323.

Dehnhardt G., B. Mauck y H. Hyvärinen. 1998. Ambient temperature does not affect the tactile sensitivity of mystacial vibrissae in harbour seals. *The Journal of Experimental Biology* 201, 3023–3029)

Deniro, M. y S. Epstein. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *En: Geochimica et Cosmochimica Acta*. 3:341-351.

Durazo R., Gaxiola-Castro G., Lavaniegos B., Castro-Valdez R., Gómez-Valdés J. y Mascarenhas Jr. A.D.S. 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002–2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas*. 31: 537–552.

Elorriaga-Verplanken, F.R. 2009. Variación de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en colágeno dental de lobos marinos del género *Zalophus*: Patrones ontogénicos y geográficos. Tesis de

Doctorado. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, Baja California Sur. México. 163 pp

Espinosa de los Reyes Ayala, G. 2007. Variabilidad espacial de la dieta del lobo marino de California (*Zalophus californianus californianus*, Lesson 1828). Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior. 189pp.

Espinoza-Carreón y Valdez-Holguín, 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el golfo de california. *Ecología Aplicada*, 6(1,2): 83-92

Espinoza-Carreón, T. L., P. T. Strub, E. Beier, F. Ocampo-Torres, and G. Gaxiola-Castro. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California, *J. Geophys. Res.*, 109, C03039, doi:10.1029/2003JC002105

Estes, J. A., M. L. Riedman, M. M. Staedler, M. T. Tinker y B. E. Lyon. 2003. Individual variation in prey selection by sea otters: Patterns, causes and implications. *Journal of Animal Ecology* 72: 144-155.

Fiscus, C.H. y G.A. Baines. 1966. Food and feeding behavior of Steller and California sea lions. *Journal of Mammalogy.*, 47(2): 195-200.

France, R. y Peters, R. 1997. Ecosystem differences in the trophic enrichment of ^{13}C in aquatic food webs. En: *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54:1255-1258.

Fry, B., R.K. Anderson, L. Entzeroth, J.L. Bird y P.L. Parker. 1984. ^{13}C enrichment and oceanic food web structure in the northwest Gulf of Mexico. *Contributions in Marine Science*. 27: 49-63.

Gallo-Reynoso, J.P. y J.L. Solórzano-Velasco. 1991. Two new sightings of California sea lions on the southern coast of México. *Marine Mammal Science*. 7:96

García-Rodríguez, F.J. 1995. Ecología alimentaria del lobo marino de California, *Zalophus californianus californianus* en Los Islotes, B.C.S., Mexico. Tesis de Licenciatura. UABCS. La Paz, B.C.S. 106 pp.

García-Rodríguez, F.J y D. Aurióles-Gamboa. 2004. Spatial and temporal variation in the diet of the California sea lion (*Zalophus californianus*) in the Gulf of California, Mexico. *Fishery Bulletin*. 102: 47-62.

Ginter, C.C., F.E. Fish y C.D. Marshall. 2010. Morphological analysis of the bumpy profile of phocid vibrissae. *Marine Mammal Science*, 26(3): 733–743. DOI: 10.1111/j.1748-7692.2009.00365.x.

Goericke R & Fry B. 1994. Variations of marine plankton $\delta^{13}\text{C}$ with latitude, temperature, and dissolved CO₂ in the world ocean. *Global Biogeochemical Cycles*. 8: 85-90.

Guinet, C., L. Dubroca, M. A. Lea, S. Goldsworthy, Y. Cherel, G. Duhamel, F. Bonadonna y J. P. Donnay. 2001. Spatial distribution of foraging in female Antarctic fur seals *Arctocephalus gazella* in relation to oceanographic variables: A caledependent approach using geographic information systems, *Marine Ecology Progress Series*, 219, 251– 264.

Grantham, O. K., Moorhead, D. L. y Willig, M. R. 1995. Foraging strategy of the giant rams-horn snail, *Marisa cornuarietis*: an interpretive model. *Oikos*. 72: 333–342.

Greaves, D., M. Hammill, J. Eddington y J. Schreer. 2004. Growth rate and shedding of vibrissae in the gray seal, *Halichoerus grypus*: a cautionary note for stable isotope diet analysis. *Marine Mammals Science* 20(2):296-304.

Hall-Aspland, A., T. Rogers, y R. Canfield. 2005. Stable carbon and nitrogen isotope analysis reveals seasonal variation in the diet of leopard seals. En: *Marine Ecology Progress Series* 305:249–259.

Hernández-Camacho, C.J. 2001. Tabla de vida del lobo marino de California (*Zalophus californianus californianus*) en la lopera Los Islotes, B.C.S., México. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, Baja California Sur. México. 67 pp.

Hirons, A., D. Schell y D. Aubin. 2001a. Growth rates of vibrissae of harbor seals (*Phoca vitulina*) and Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*). *Can. J. Zool.* 79:1053–1061.

Hirons, A., S. Schell y F. Bruce. 2001b. Temporal records of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in North Pacific Pinnipeds: Inferences regarding environmental change and diet. *Oecologia.* 129:591–601.

Hobson, K.A. y G.R. Clark. 1992. Assessing avian diets using stable isotopes II: Factors influencing diet-tissue fractionation. *Condor.* 94, 189-197.

Hobson, K.A. y H.E. Welch. 1992. Determination of trophic relationships within a high arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology Progress Series.* 84: 9-18.

Hobson, K.A, F.J. Piatt y J. Pitocchelli. 1994. Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships. *Journal of animal ecology.* 63: 786-798.

Hobson, K.A, M.D. Schell, D. Renouf y E. Noseworthy. 1996. Stable carbon and nitrogen isotopic fractionation between diet and tissues of captive seals: implications for dietary reconstructions involving marine mammals. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* 53: 528-533.

Hobson, K.A., J.L. Sease, R.L. Merrick y J.F. Piatt. 1997. Investigating trophic relationships of pinnipeds in Alaska and Washington using stable isotope ratios of nitrogen and carbon. *Marine Mammal Science.* 13:114-132.

Hobson, K. A., y J. L. Sease. 1998. Stable isotope analysis of tooth annuli reveal temporal dietary records: An example using Steller Sea lions. *Marine Mammal Science* 14: 116-129.

Hobson, K.A. y D.M. Schell. 1998. Stable carbon and nitrogen isotope patterns in baleen from eastern Arctic bowhead whales (*Balaena mysticetus*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55: 2601–2607.

Hobson, K. 1999. Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review. *Oecologia*. 120, 314–326.

Hobson, K., E. Sinclair, J. Thomason y R. Merrick. 2004. Retrospective isotopic analyses of Steller sea lion tooth annuli and seabird feathers: A cross-taxa approach to investigating regime and dietary shifts in the Gulf of Alaska. *Marine Mammal Science*, 20(3):621-638.

Hyvärinen, H. 1989. Diving in darkness: whiskers as sense organs of the ringed seal (*Phoca hispida*). *Journal of Zoology*, Lond. 218, 663–678.

Kelly F. J. 2000. Stable isotopes of carbon and nitrogen in the study of avian and mammalian trophic ecology. *Canadian Journal of Zoology* 78, 1-27.

King, J. E. 1983. Seals of the world. Second ed. Ithaca, New York: Comstock Publishing Associates, 240 pp.

Koch V., W J. Nichols, H. Peckhamb y V. de la Toba. 2006. Estimates of sea turtle mortality from poaching and bycatch in Bahía Magdalena, Baja California Sur, Mexico. *Biological conservation* 128 327–334

Kunh, C. E., D. Aurióles-Gamboa, M. J. Weise y D. P. Costa. 2006. Oxygen stores of California sea lion pups: Implications for diving ability. Sea Lions of the World. Alaska Sea Grant College Program. AK-SG-06-01.

Kurle, C. 2002. Stable-isotope ratios of blood components from captive northern fur seals (*Callorhinus ursinus*) and their diet: applications for studying the foraging ecology of wild otariids. *Can. J. Zool.* 80:902–909.

Kurle, C. y G. Worthy. 2002. Stable nitrogen and carbon isotope ratios in multiple for dietary and migratory reconstructions. *Marine Ecology Progress Series*. 236:289–300.

Kruuk, H. y Moorhouse, A. 1990. Seasonal and spatial differences in food selection by otters (*Lutra lutra*) in Shetland (Scotland, UK). *Journal of Zoology* (Londres). 221: 621–638.

Lavín, M. F., G. Gaxiola-Castro, J.M. Robles y K. Richter. 1995. Winter water masses and nutrients in the northern Gulf of California: *Journal of Geophysical Research*, 100, 8587–8605.

Le Boeuf, B. J., D. Aurióles-Gamboa, R. Condit, C. Fox, R. Gisiner, S. Romero y F. Sinsal. 1983. Size and distribution of the California sea lion (*Zalophus californianus*) population in México. *Proceedings of the California Academy of Sciences*. 43: 77-85.

Lee, S.H., D.M. Schell, T.L. McDonald y W.J. Richardson. 2005. Regional and seasonal feeding by bowhead whales *Balaena mysticetus* as indicated by stable isotope ratios. *Marine Ecology Progress Series*. 285:271-287.

Lesage, V., O. Hammill y M. Kovacs. 2002. Diet-tissue fractionation of stable carbon and nitrogen isotopes in phocid seal. *Marine Mammal Science*. 18:182-193.

Lluch-Belda, D. 2000. Centros de Actividad Biológica en la costa occidental de Baja California. En: BACs: Centros de actividad Biológica del Pacífico Mexicano. pp. 49-64. Lluch-Belda, D. J. Elorduy-Garay, S. E. Luch-Cota y G. Ponce- Díaz.(eds). CIBNOR-CICIMAR-CONACYT.

Lowry, M. S., B. S. Stewart, C. B. Heath, P. K. Yochem y J. M. Francis. 1991. Seasonal and annual variability in the diet of California sea lions *Zalophus californianus* at San Nicolas Island, California, 1981-1986. *Fishery Bulletin*. 89: 331-336.

Marinone, S.G., A. Parés-Sierra, R. Castro y A. Mascarenhas. 2004. Correction to Temporal and Spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters* 31(L10305).

Martínez-López, A.,Cervantes-Duarte,R.,Reyes-Salinas y A.,Valdez-Hoguín,J.E., 2001. Cambio estacional de clorofila en la Bahía de la Paz, B.C.S., México. *Hidrobiológica* 11,45–52.

Martínez-López A. y G. Verdugo-Díaz. 2000. Composición y dinámica del fitoplancton en el BAC de Bahía Magdalena, B.C.S. En Libro: Centros de Actividad Biológica del

Pacífico mexicano. D. Lluch-Belda, J. Elorduy-Garay, S.E. Lluch-Cota y G. Ponce-Díaz (editores).

Mate, B. R. 1975. Annual migrations of the sea lions *Eumetopias jubatus* and *Zalophus californianus* along the Oregon coast. *Rapports et Procès Verbeaux de la Réunion du Conseil International pour l'Exploration de la Mer* 169: 455-461

Mendes, S., J. Newton, R. J. Reid, A. Frantziz y G. J. Pierce. 2007. Stable isotope profiles in sperm whale teeth: variations between areas and sexes. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 87: 621-627.

Mercuri, M. 2007. Varamiento de mamíferos marinos en isla Magdalena, B.C.S., México y su relación con factores físicos y biológicos. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, Baja California Sur. México. 125 pp.

Minagawa, M. y E. Wada. 1984. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 48: 1135-1140.

Newsome, S. D., M. A. Etnier, D. H. Monson and M. L. Fogel. 2009. Retrospective characterization of ontogenetic shifts in killer whale diets via $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis of sectioned teeth. *Marine Ecology Progress Series* 374: 229-242.

Odell, D. K. 1975. Breeding biology of the California sea lion, *Zalophus californianus*. *Rapports et Procès Verbeaux de la Réunion du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 169: 374-378.

Orr, R. T., J. Schonewald y K. W. Kenyon. 1970. The California sea lion: Skull growth and comparison of two populations. *Proceedings of the California Academy of Sciences* 37(11): 381-394.

Orr, A.J. 1998. Foraging characteristics and activity patterns of the California sea lion (*Zalophus californianus californianus*) in the Bay of La Paz, Baja California Sur,

Mexico. Tesis de Maestría. School of Natural Sciences. California State University, Fresno, California. 200 pp.

Páez-Rosas, D. y D. Aurióles-Gamboa. 2010. Alimentary niche partitioning in the Galapagos sea lion, *Zalophus wollebaeki*. *Marine Biology* DOI 10.1007/s00227-010-1535-0

Parés-Sierra, A., A. Mascarenhas, S.G. Marinone y R. Castro. 2003. Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters* 30(6):1-4.

Pardo-Rueda, M.A. 2009. Condiciones fisicoquímicas y biológicas que modulan la abundancia de cetáceos sobre Cuenca Alfonso, Golfo de California. Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN, 101pp

Peterson, R. S., y G. A. Bartholomew. 1967. The natural history and behavior of the California sea lion. *American Society of Mammalogists, Special Publication*. 1: 79.

Porras-Peters, H., D. Aurióles-Gamboa, V. H. Cruz-Escalona y P. L. Koch. 2008. Position, breadth and trophic overlap of sea lions (*Zalophus californianus*) in the Gulf of California, Mexico. *Marine Mammal Science*. 24: 554-576.

Post, D. M. 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions. En: *Ecology*. Vol. 83(3), 703-718.

Ragg, J. R. 1998. Intraspecific and seasonal differences in the diet of feral ferrets (*Mustela furo*) in a pastoral habitat, East Otago, New Zealand. *New Zealand Journal of Ecology*. 22: 113–119.

Rau G., A. Mearns, D. Young, R. Olson, H. Schafer y I. Kaplan 1983. Animal $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ correlates with trophic level in pelagic food webs. *Ecology*. 64(5):1314-1318.

Reyes-Salinas, A., R. Cervantes-Duarte, R. Morales-Pérez y J.E. Valdéz-Holguín. 2003. Seasonal variability of primary productivity and its relation to the vertical stratification in La Paz bay, B.C.S. *Hidrobiológica* 13, 103–110.

- Ripa, P. 1997. Toward a Physical Explanation of the Seasonal Dynamics and Thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* 27: 597-614.
- Ripa, P. 2002. Ajuste de datos por cuadrados mínimos. *Ciencias Marinas* 28(1): 79-105.
- Rodríguez-Valenzuela, T. 2009. Contenido energético y ácidos grasos biomarcadores en dos rutas tróficas que llegan al lobo marino, *Zalophus californianus*. Tesis de Maestría, CICIMAR-IPN, 132pp
- Rubenstein, D. R. y K.A. Hobson. 2004 From birds to butterflies: animal movement patterns and stable isotopes. *Trends Ecology Evolution* 19, 256–263.
- Sánchez-Arias, M. 1992. Contribución al conocimiento de los hábitos alimentarios del lobo marino *Zalophus californianus* en las islas Ángel de la Guarda y Granito, Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México, D.F. 63 p.
- Sánchez Velasco, L., E. Beier, C. Avalos García y M. Lavin. 2006. Larval fish assemblages and geostrophic circulation in Bahía de La Paz and surrounding SW region of the Gulf of California. *Journal of Plankton Research*. 28: 1081-1098.
- Santiago, I., K. Silvera, J. Andrade y T. Dawson. 2005. El Uso de Isótopos Estables en Biología Tropical. *Interciencia*. 30(9):536-542.
- Schell, D.M., S.M. Saupe y N. Haubenstock. 1989. Bowhead whale (*Balaena mysticetus*) growth and feeding as estimated by $\delta^{13}\text{C}$ techniques. *Marine Biology*. 103:433-443.
- Schindler, D. E., Hodgson, J. R. y Kitchell, J. F. 1997. Density-dependent changes in individual foraging specialization of largemouth bass. *Oecologia* (Berlin) 110: 592–600.

Schwertl, M., K. Auerswald y H. Schnyder. 2003. Reconstruction of the isotopic history of animal diets by hair segmental analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 17(12): 1312-1318.

Santiago, I., K. Silvera, J. Andrade y T. Dawson. 2005. El Uso de Isótopos Estables en Biología Tropical. *Interciencia*. 30(9):536-542.

Seki, M.P., J.J. Polovina, R.E. Brainard, R.R. Bidigare, C.L. Leopnard y D.G. Foley. 2001. Biological enhancement at cyclonic eddies tracked with GEOS thermal imagery in Hawaiian Waters. *Geophysical Research Letters* 28(8):1583-1586.

Soto-Mardones, L. y S.G. Marinone. 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 25(1): 1–30

Szteren, D., D. Auriolles-Gamboa y L. Gerber. 2006. Population status and trends of the California sea lion (*Zalophus californianus californianus*) in the Gulf of California, Mexico. Pp. 369–384 in Sea lions of the world (A. W. Trites, et al., eds.). Alaska Sea Grant College Program, University of Alaska, Fairbanks.

Takai, N., Onaka, S., Ikeda, Y, Yatsu, A., Kidokoro, H. y Sakamoto, W. 2000. Geographical variations of Carbon and nitrógeno stable isotopes ratios in squid. *Journal of Marine Biology Association of the UK*. 80: 675-684.

Tieszen, I. L., T. W. Boutton, K. G. Tesdahl y N. A. Slade. 1983. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: Implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet. *Oecologia* 57:32-37

Unkovih, M., J. Pate, A. McNeil y D.J. Gibbs. 2001. Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems. *Kluwer Academic Publishers*. Holanda. 288p.

Vander Zanden, M., B. Shuter, N. Lester, y J. Rasmussen. 1999. Patterns of Food Chain Length in Lakes: A Stable Isotope Study. *The American Naturalist*. 154:406–416.

Villegas-Aguilera, M. M. 2009. Fitoplancton silíceo de la zona eufótica, como señal de la productividad primaria en Cuenca Alfonso, Golfo de California. Tesis de Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos. CICIMAR-IPN. 112p.

Voss M., J.W. Dippner y J. P. Montoya. 2001. Nitrogen isotope patterns in the oxygen-deficient waters of the Eastern Tropical North Pacific Ocean. *Deep-Sea Research I* 48: 1905-1921

Walker, J., y Macko, S. A. 1999. Dietary studies of marine mammals using stable carbon and nitrogen isotopic ratios of teeth. *Marine Mammal Science*. 15: 314–334.

Weise, M. J. y Costa, D. P. 2007. Total body oxygen stores and physiological diving capacity of California sea lions as a function of sex and age. *The Journal of Experimental Biology* 210: 278-289.

Yoshii, K., N. Melnik, O. Timoshkin, N. Bondarenko, P. Anoshko, T. Yoshioka y E. Wada. 1999. Stable isotope analyses of the pelagic food web in Lake Baikal. *Limnology Oceanography* 44:502-511.

Zaytsev, O., R. Cervantes-Duarte, O. Montante y A. Gallegos-García. 2003. Coastal Upwelling Activity on the Pacific Shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanography*. 59:489-502.

Zeitzchel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology*. 3: 201-207

Zhao, I. y D. Schell, 2004. Stable isotope ratios in harbor seal *Phoca vitulina* vibrissae: effects of growth patterns on ecological records. *Marine Ecology Progress Series* 281:267–273

Zeppelin, T. K. y Orr, A. J. 2010. Stable isotope and scat analyses indicate diet and habitat partitioning in northern fur seals *Callorhinus ursinus* across the eastern Pacific. *Marine Ecology Progress Series*. 409: 241-253.

.ANEXO I

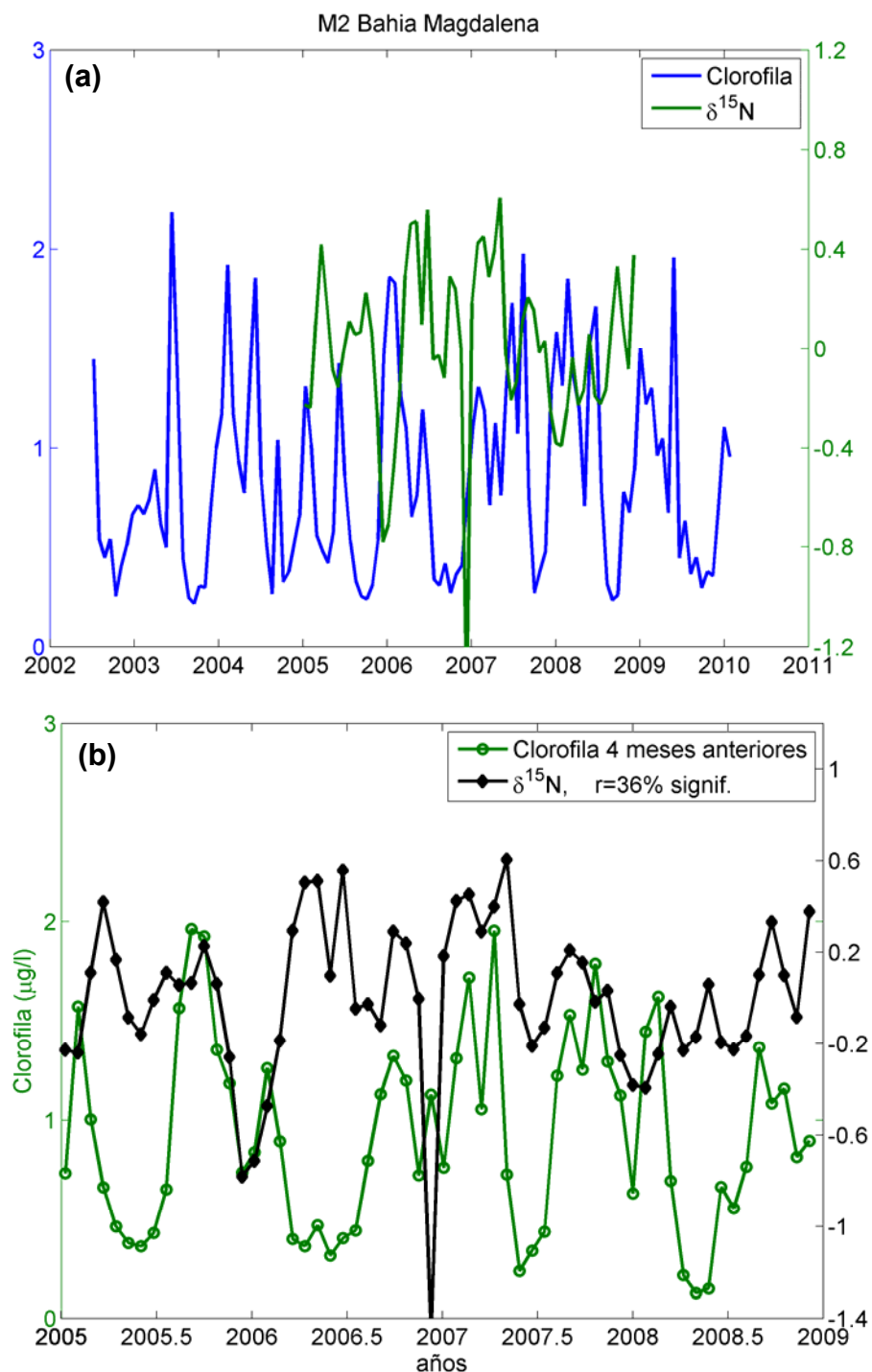


Figura 23. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (4 años) y cuyo inicio fue

alrededor de marzo de 2005 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 36%.

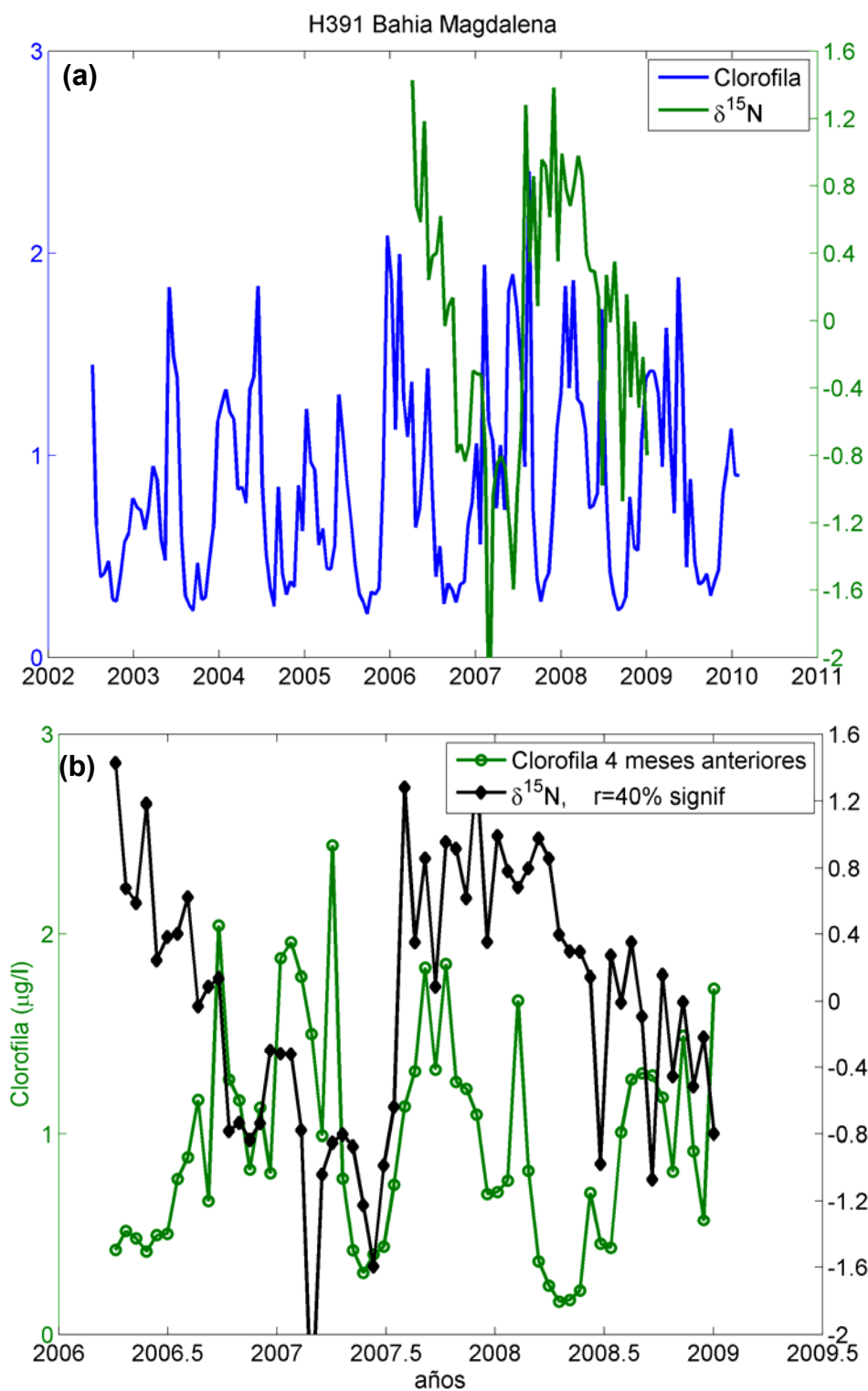
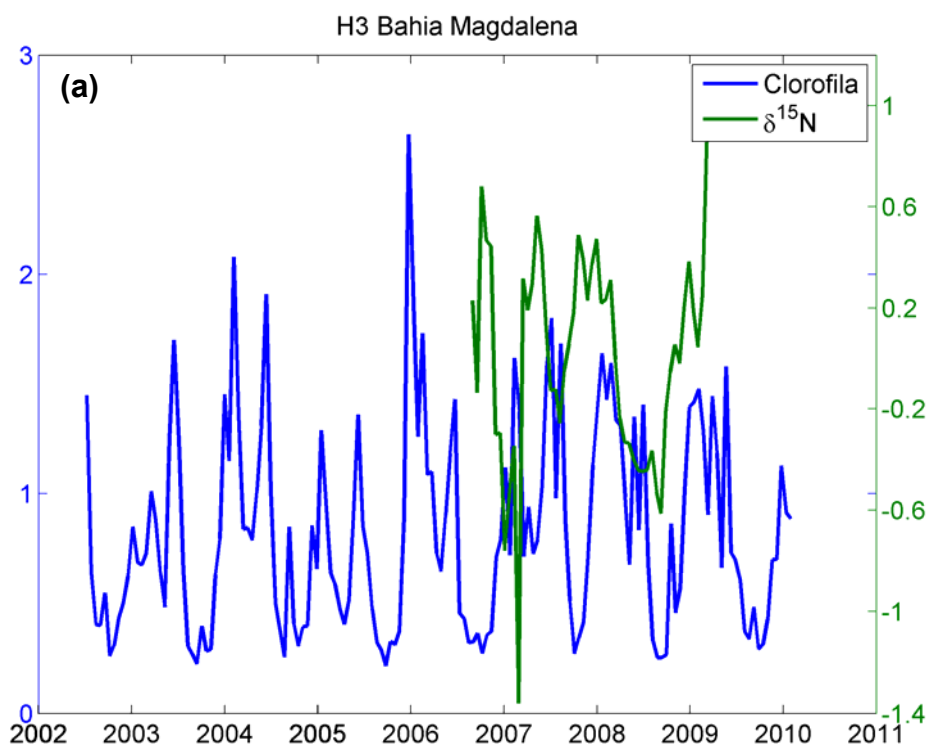


Figura 24. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (2.8 años) y cuyo inicio fue alrededor de mayo de 2006 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 40%.



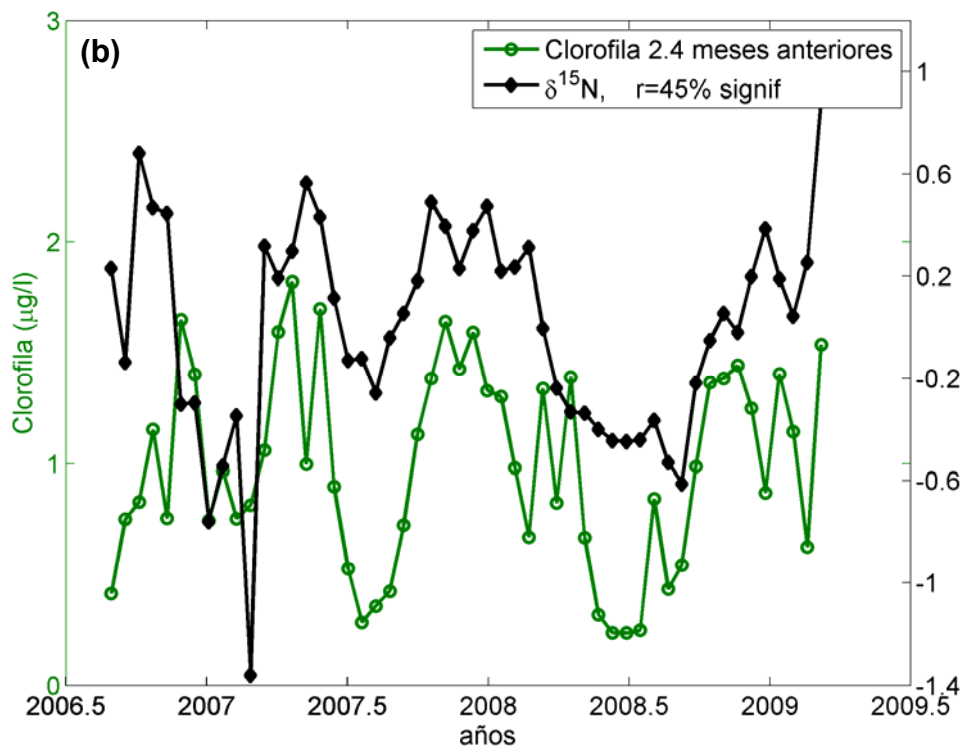


Figura 25. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limita el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (2.5 años) y cuyo inicio fue alrededor de octubre de 2006 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 45%.

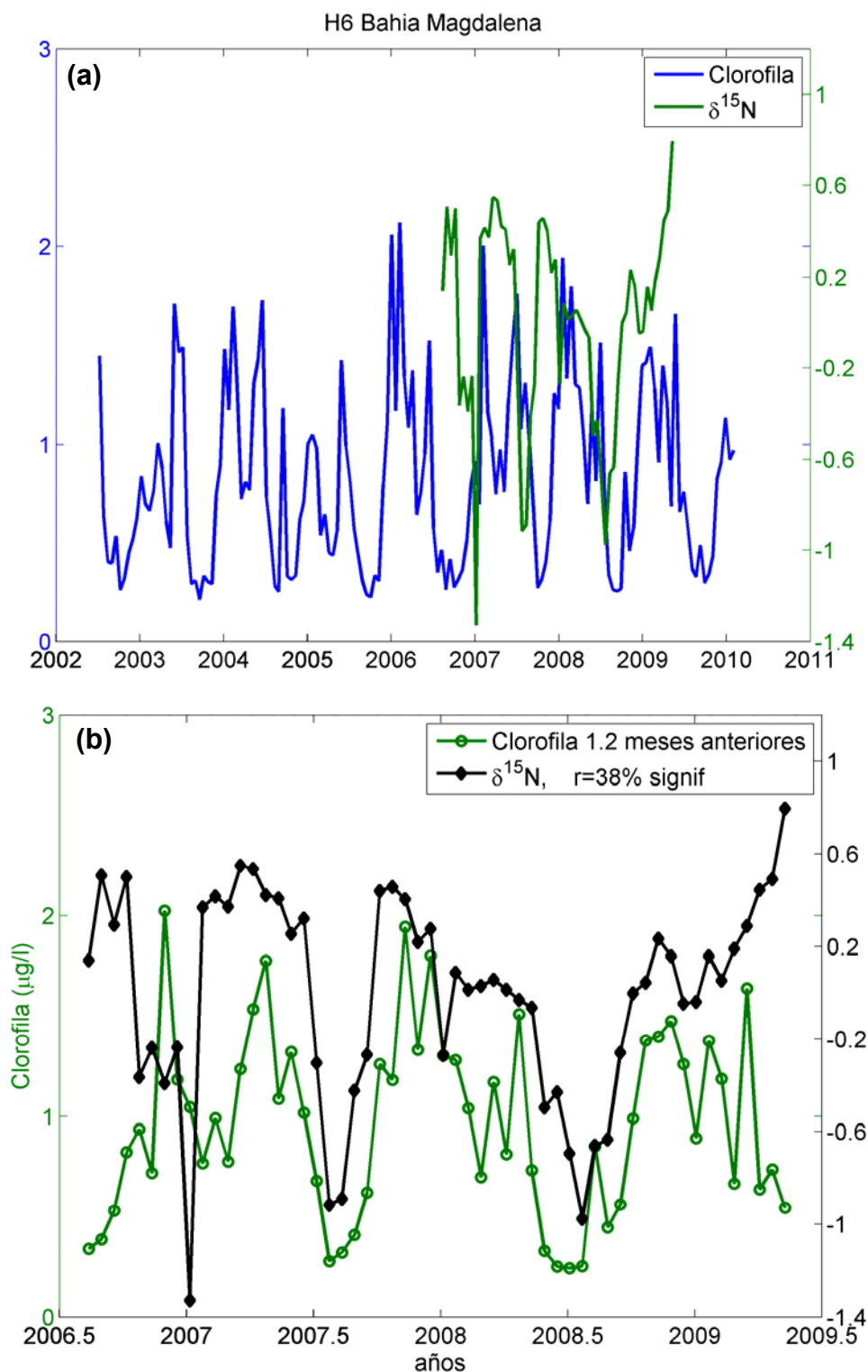


Figura 26. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (2.7 años) y cuyo inicio fue

alrededor de septiembre de 2006 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 38%.

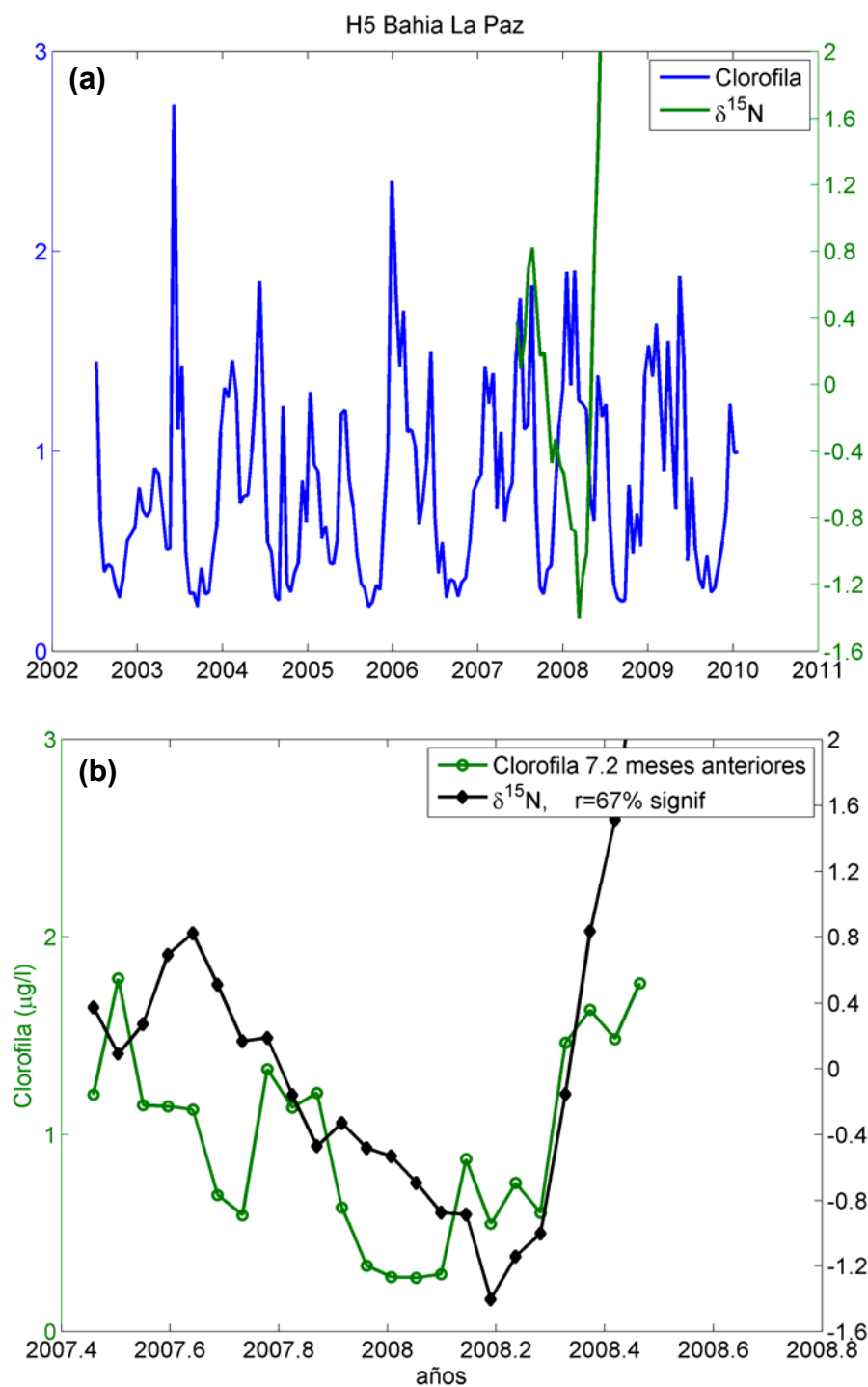


Figura 27. Correlación entre el perfil isotópico y la clorofila a lo largo del tiempo. (a) Se observa el ajuste estacional hecho a los datos de clorofila con base en el tiempo que limito el número de ciclos obtenido a partir de los valores del $\delta^{15}\text{N}$ (1 año) y cuyo inicio fue alrededor

de junio de 2007 aproximadamente. (b) en esta figura se puede observar que la correlación existente entre las dos series de tiempo fue de 67%.

ANEXO II

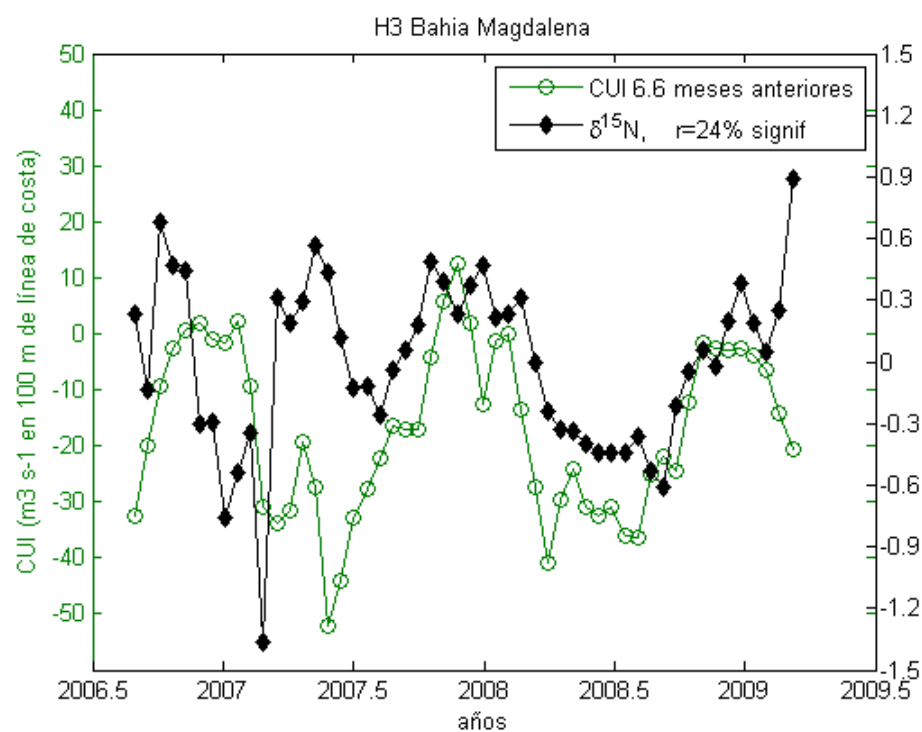


Figura 28. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa de la Hembra 3 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 6.6 meses.

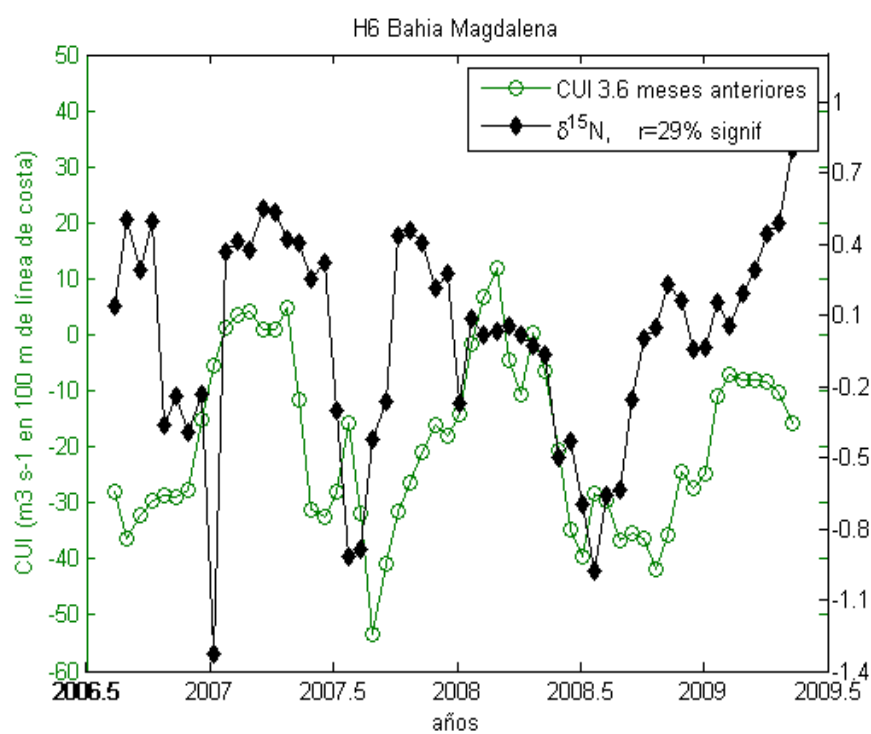


Figura 29. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa de la Hembra 6 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 3.6 meses.

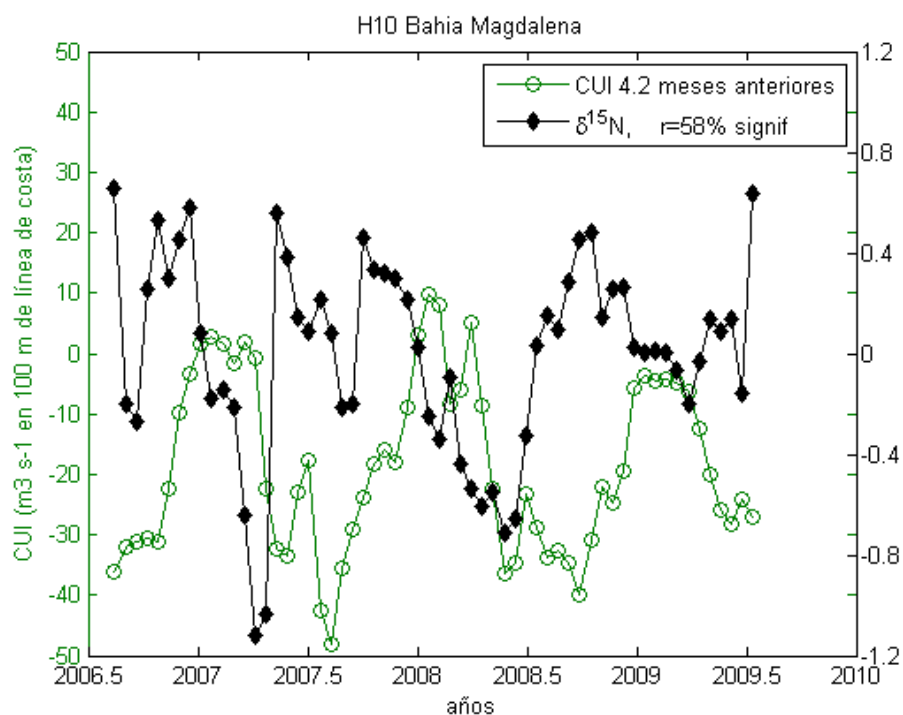


Figura 30. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa de la Hembra 10 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 4.2 meses.

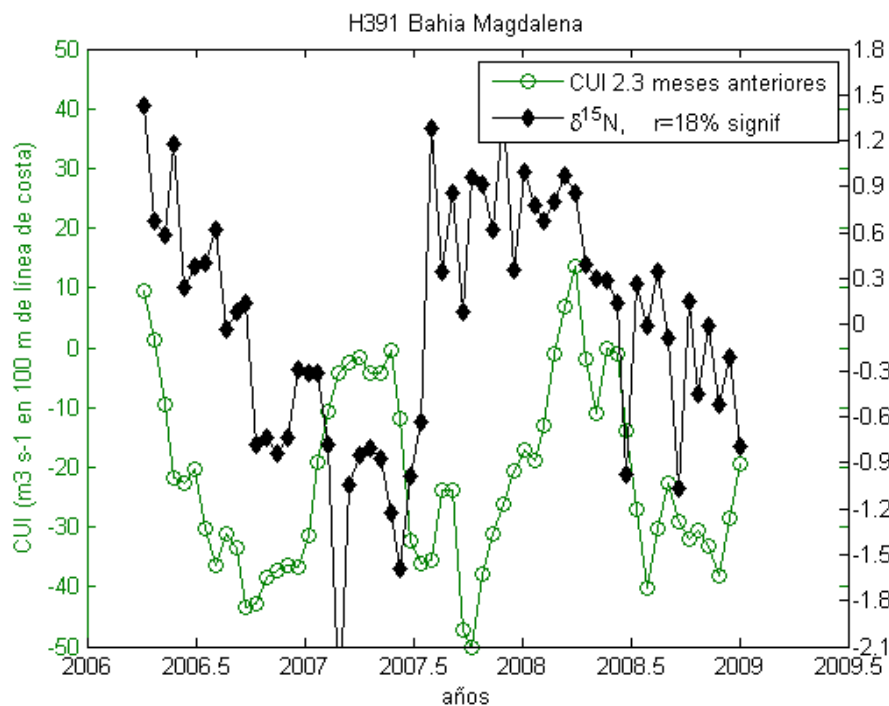


Figura 31. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa de la Hembra 391 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 2.3 meses.

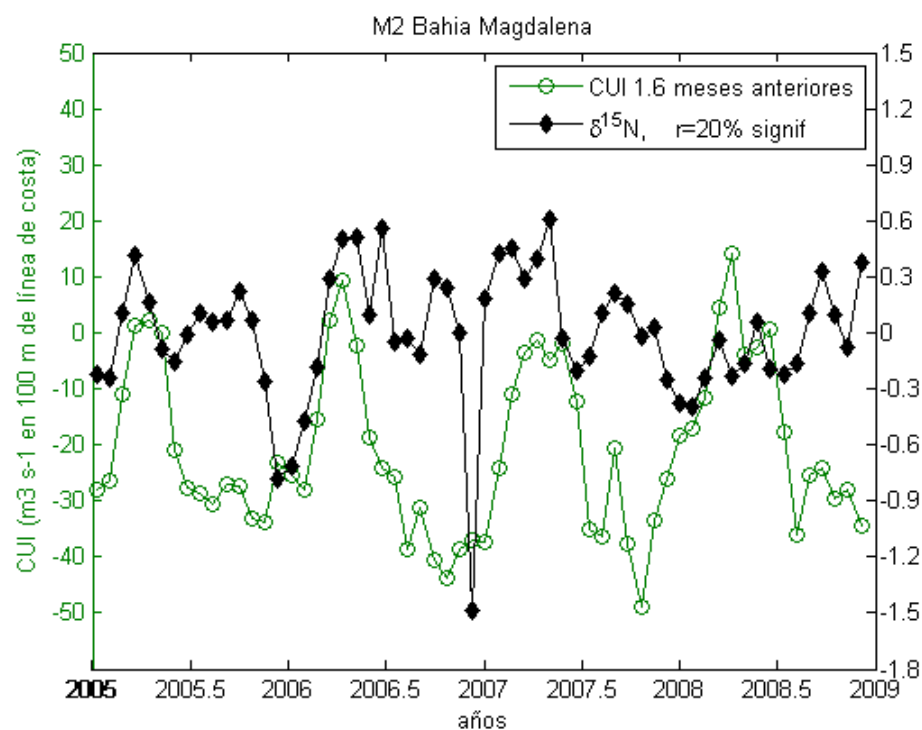


Figura 32. Correlación presente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de la vibrisa del Macho 2 y el Índice de Surgencia en Bahía Magdalena, mostrando un tiempo de desfase de 1.6 meses.