



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



ORIGEN DE LA DIETA Y POSICIÓN TRÓFICA DE LA VAQUITA, *Phocoena sinus* (NORRIS Y McFARLAND, 1958), CON BASE EN EL ANÁLISIS ISOTÓPICO DE $d^{13}C$ Y $d^{15}N$ EN DIENTES: COMPARACIÓN CON UN MODELO TEÓRICO.

T E S I S

Que para obtener el grado académico de

Maestra en Ciencias

(Biología Marina)

PRESENTA

Biol. Mónica Yanira Rodríguez Pérez

Co-Dirección de Tesis: Dr. Juan Pablo Gallo Reynoso

Dra. Elva Guadalupe Escobar Briones

Comité Tutorial: Dr. Jorge Ricardo Ruelas Inzunza

Dr. Luis Medrano González

Dr. Martín Federico Soto Jiménez

Ciudad Universitaria, México D.F., 2007.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer muy sinceramente a toda la gente que hiciera posible la conclusión satisfactoria de este proyecto que con tantas ilusiones comencé y llenó de alegrías y satisfacciones estos años de mi vida.

A ti madre que en los momentos más adversos has estado a mi lado apoyándome para que pudiera concluir no sólo mi proyecto sino mi sueño ¡¡GRACIAS!!.

A mis hermanas Lidia, Pilar, Norma y Araceli que en las buenas y en las malas me brindan su apoyo incondicional.

A mis sinodales quienes con paciencia me otorgaron sus conocimientos para que yo aprendiera y enriqueciera mi vida profesional: Al Dr. Jorge Ruelas Inzunza por darme sus consejos y guiarme con paciencia. Al Dr. Martín Soto Jiménez por sus acertados comentarios y su apoyo, porque con paciencia me llevo de la mano por este complejo mundo de los isótopos estables. Al Dr. Luis Medrano a quien agradezco no sólo sus sabios consejos y su muy valioso tiempo que siempre que necesité me otorgó, sino también por el material otorgado para que pudiera enriquecer mi proyecto.

Gracias a los colegas de Laboratorio de Mamíferos Marinos de la Facultad de Ciencias por las facilidades para proporcionarnos muestras de vértebra y dientes de la Colección Osteológica de Mamíferos Marinos.

A mi querido amigo y asesor M en C. Janitzio quien me dio su tiempo y sus valiosos puntos de vista, así como la ayuda invaluable para poder realizar mi muestreo en Guaymas. Pero sobre todo gracias por darme tu amistad. A Lupita mi muy querida amiga, gracias por estar a mi lado, porque tus consejos y apoyo me ayudaron en los momentos más difíciles.

A los compañeros del Laboratorio de Macroecología y Diversidad del ICMYL muy especialmente a Lalo, Ramón, Javier y Manuel quienes no sólo me otorgaron su valiosa amistad, sino que también se dieron el tiempo para ayudarme con la preparación de las muestras, gracias Manuel porque incluso me hiciste participe de tu proyecto para que yo aprendiera más ¡¡GRACIAS!!.

Muy especialmente a quienes no sólo fueron mis Directores sino también mis amigos, quienes guiaron mi camino con su paciencia y apoyo incondicional, quienes me aceptaron dándome su confianza y amistad:

Dr. Juan Pablo Gallo Reynoso gracias por enseñarme todo lo hermoso que puede ser el trabajo de campo, por enseñarme cómo ser independiente y sobre todo gracias por confiar en mí ¡¡Gracias por darme las alas para volar!!

Dra. Elva Escobar Briones ¡¡Gracias por enseñarme a usarlas!! Gracias también por estar a mi lado siempre, por guiar mis pasos, por enseñarme todo lo indispensable y más sobre el trabajo de laboratorio, pero sobre todo por enseñarme que cuando uno ama lo que hace todo es posible.

Porque sin ustedes nada de esto habría sido posible ¡¡Mil gracias por creer en mí sin conocerme!!

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. Por permitirme utilizar la colección de vaquita para la realización de este estudio y sus instalaciones durante mi estancia en Guaymas.

Al M en C Pedro Morales, a la M en C Edith Cienfuegos, al QFB Francisco Javier Otero Trujano y colegas del Laboratorio de Espectrometría de Masas de Isótopos Estables en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México por el análisis de 5 muestras de $d^{13}C$ y $d^{15}N$, además de su invaluable asesoría y entrenamiento en el procesamiento de estas durante la realización de este proyecto.

Al Dr. Fernando Cervantes y al Instituto de Biología quienes nos otorgaron dientes para poder concluir este trabajo, así como a los colegas del mismo por su tiempo y disponibilidad para facilitarnos las muestras necesarias.

A la M en C Margarita Romero Ávila y colegas del Laboratorio de Análisis Elemental-USAI, por su apoyo en la determinación de la proporción de C y N orgánico de una muestra de diente de vaquita.

Al proyecto de investigación IN-224503 por su apoyo otorgado durante el periodo de Octubre a Diciembre del 2006 por la ayuda económica con la cual fue posible continuar y concluir la Tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante el periodo de Agosto de 2004 a Agosto de 2006, para la realización de la maestría.

A la Dirección General de Posgrado por los apoyos otorgados para estancias brindados en el transcurso del posgrado.

Muy especialmente a quienes nos otorgan su amistad y ayuda incondicional durante el transcurso del posgrado a la Dra. Gloria Vilaclara, a Diana, Chantal, Gaby, Lupita, Rocío, Nacho y Edith por su eficiencia, su disposición, pero sobre todo por toda su ayuda no sólo a nivel profesional sino también a nivel personal.

Finalmente gracias al Instituto de Ciencias del mar y Limnología así como a mi casa durante tantos años la Universidad Nacional Autónoma de México por hacer posible que mis sueños se volvieran realidad.

¡¡POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU!!

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

ANTECEDENTES

<i>Phocoena sinus</i>	4
-----------------------------	---

Isótopos Estables.....	7
------------------------	---

JUSTIFICACIÓN.....	9
--------------------	---

HIPÓTESIS.....	10
----------------	----

OBJETIVOS.....	11
----------------	----

MÉTODO

Muestreo.....	12
---------------	----

Variación de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$	13
------------------------------------------------------------------	----

Obtención del nivel trófico.....	17
----------------------------------	----

Modelo hipotético trófico.....	17
--------------------------------	----

RESULTADO

Variación de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$	23
------------------------------------------------------------------	----

Obtención del nivel trófico.....	26
----------------------------------	----

Modelo hipotético trófico.....	26
--------------------------------	----

DISCUSIÓN

Variación de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$.....	28
Obtención del nivel trófico.....	33
Modelo hipotético trófico.....	34
CONCLUSIONES.....	40
REFERENCIAS.....	41

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Presas de vaquita, <i>Phocoena sinus</i> (Tomado de Silber, 1990 y Pérez- Cortés, 1996).....	5
Tabla 2: Proporciones elementales de C y N en lobo marino marino (Aurioles-Gamboa, com. pers) y MOS del Alto Golfo de California (Aguíñiga, 1999).	14
Tabla 3: Valores isotópicos de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ para COP correspondientes al área del Golfo de California	15
Tabla 4: Valores isotópicos de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ para materia orgánica suspendida correspondientes al área de la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado....	15
Tabla 5: Valores de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ para diferentes especies de mamíferos marinos recuperadas del Pacífico Norte y Golfo de California.....	16
Tabla 6: Valores de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ para dos especies de calamares recuperadas del Pacifico Norte y Golfo de California.....	18
Tabla 7: Valores de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ para diferentes especies de peces provenientes del Pacifico Norte y Golfo de California.	18
Tabla 8: Valores isotópicos de las presas potenciales, así como valores teóricos de <i>P. sinus</i> . Todos con sus respectivos valores promedio grupales y estos a su vez corregidos mediante un fraccionamiento de 1‰ de $\delta^{13}C$ y 3.4‰ de $\delta^{15}N$	20
Tabla 9: Distancia euclidiana de los tres diferentes grupos de presas potenciales con respecto a vaquita, basados en el valor isotópico teórico promedio.....	21
Tabla 10: Porcentaje de contribución que obtuvieron peces y calamares a la dieta de <i>Phocoena sinus</i> a partir de la distancia euclidiana.....	22

Tabla 11: Valores de isótopos estables de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ en dientes de vaquita categorizados por clase de edad y sexo. Se especifica la localidad y fecha de recuperación así como la forma de preservación de cada vaquita. Las edades y sexos considerados son: Cría (C), Juvenil (J), Maduro (M), Hembra (H), Macho (Mch) y No determinado (ND). También se especifica el tejido muestreado: Vértebra (V) o diente (D).....25

Tabla 12: Valores de isótopos estables de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ en vértebras de vaquita categorizados por clase de edad y sexo. Se especifica la localidad y fecha de recuperación así como la forma de preservación de cada vaquita. Las edades y sexos considerados son: Cría (C), Juvenil (J), Maduro (M), Hembra (H), Macho (Mch) y No determinado (ND).....25

Tabla 13: Nivel trófico (NT) obtenido a partir del valor isotópico de *P. sinus* en conjunto con los valores obtenidos por Aguíñiga (1999) para la materia orgánica suspendida en el área de la Biósfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado.....26

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Área de la reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. La cual constituye parte del hábitat de la vaquita..... 6

Figura 2: Relación de los valores isotópicos de las diferentes especies tomadas de referencias y el valor teórico de *P. sinus*. Las especies que caen dentro del recuadro sólido representan las presas potenciales de vaquita de acuerdo a un fraccionamiento de 1‰ de $\delta^{13}\text{C}$ y 3.4‰ de $\delta^{15}\text{N}$ (DeNiro y Epstein, 1978; Minegawa y Wada, 1984).....19

Figura 3: A). Comportamiento de C y N elemental de vaquita con relación a lobo marino (Newsome *et al.*, 2006) y MOS (Aguíñiga, 1999); B). Relación entre las proporciones isotópicas obtenidas para vaquita con relación a las especies y localidades citadas en el método. Los rectángulos indican el intervalo de fraccionamiento considerado para vaquita, COP y MOS...24

Figura 4: A). Figura 4: A). Comportamiento de C y N elemental de vaquita con relación a lobo marino (Newsome *et al.*, 2006) y MOS (Aguíñiga, 1999); B). Relación entre las proporciones isotópicas obtenidas para vaquita con relación a las especies y localidades citadas en el método. Los rectángulos sólidos indican un enriquecimiento de $\delta^{13}\text{C}=1\text{‰}$ y $\delta^{15}\text{N}=3.4\text{‰}$ considerado para vaquita, carbono orgánico particulado (COP) y materia orgánica suspendida (MOS). Los valores de vaquita se muestran dentro del rectángulo punteado y el punto rojo representa el valor más empobrecido en las proporciones de carbono y nitrógeno isotópico de *P. sinus*.....28

Figura 5: Intervalo de valores de la materia orgánica particulada (MOP) y principales productores primarios y secundarios marinos y su relación con los valores $\delta^{13}\text{C}$ de vaquita.....31

Figura 6: A). Relación de los valores isotópicos reales de vaquita y las dos especies de calamares utilizadas para la comparación del presente estudio. Nótese el valor distintivamente menor del macho señalado con el punto rojo. B). Relación de los valores isotópicos teóricos de vaquita (círculo abierto) y las dos especies de calamares utilizadas para la comparación del presente estudio (círculo sólido). Se pueden observar las diferencias en calamares de diferentes tallas.....37

Figura 7: A). Relación de los valores isotópicos reales de vaquita y las especies de peces utilizadas para la comparación del presente estudio. Nótese que en el caso de *M. cephalus* los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son muy cercanos a los de *P. sinus*, pero en el caso de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ se alejan significativamente, lo cual nos habla de un origen similares, pero *M. cephalus* no forma parte de la dieta de vaquita. Se señala con rojo la vaquita que presenta valores distintivamente menores al resto de las muestras analizadas. B). Relación de los valores isotópicos teóricos de vaquita (círculo abierto) y las especies de peces utilizadas para la comparación del presente estudio (círculo sólido).....38

RESUMEN

En la actualidad, cada vez con más frecuencia se utilizan las técnicas de isotopía estable para comprender mejor las redes tróficas y la dinámica de los ecosistemas. Tal es el caso de los isótopos del $\delta^{15}\text{N}$ que al ser transferidos de la presa al depredador, presenta un enriquecimiento de su isótopo pesado (^{15}N) sobre el ligero (^{14}N), lo que permite utilizarlo como indicador del nivel trófico. El enriquecimiento de $\delta^{15}\text{N}$ es asumido en el rango de 2.7 a 4.3‰. Por otro lado, el $\delta^{13}\text{C}$ que es enriquecido en $\sim 1\%$, nos da información sobre la fuente de carbono, es decir, de los productores primarios, que son la base de una red trófica. Los estudios sobre hábitos alimentarios determinan la posición de los animales en la trama trófica y definen el papel que juegan en el ecosistema, basados en estos principios básicos, en el presente estudio se realizaron análisis isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en dientes de vaquita *Phocoena sinus* (Norris y McFarland, 1958) con fin de conocer el origen de su dieta y posición trófica. Los resultados fueron comparados con los obtenidos de la aplicación de un modelo teórico de mezcla de fuentes múltiples, basado en tres grupos de especies (calamares, peces carnívoros y planctófagos) referidos como parte de la dieta de la vaquita según la literatura científica. Los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ (-11.9‰) y $\delta^{15}\text{N}$ (22.88‰) en la vaquita fueron muy superiores a los obtenidos por el modelo (-15.80‰ para $\delta^{13}\text{C}$ y 17.30‰ para $\delta^{15}\text{N}$) característicos de depredadores tope de hábitos costeros con algunos aportes estuarinos. Se observó un enriquecimiento de la vaquita con respecto a los calamares de +4.96‰ y +7.56‰, para $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ respectivamente. Los peces fueron divididos en dos grupos de acuerdo a sus hábitos alimentarios, presentaron un enriquecimiento estimado para los isótopos de carbono y nitrógeno de +5.5 y +5.37 en los carnívoros y de +5.8 y +8.86 para planctófagos. Por lo tanto, basado en estos resultados podemos concluir que ninguna de estas especies forma parte de la dieta de *P. sinus*, lo cual se debe principalmente a que las especies pertenecen a la porción sur del Golfo de California, la cual funciona de manera diferente al Alto Golfo de California sobre todo por los aportes de materia orgánica suspendida, los cuales son mayores en esta área.

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos químicos que presentan diferente masa atómica se denominan isótopos, del griego *isos*= igual y *topos*= lugar, para referirse a que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica (Guerrero y Berlanga, 2003). Los isótopos son estables cuando el número de neutrones presenta variaciones de uno o dos (Andrews *et al.*, 1996). Su importancia radica en que permanecen inalterables en los componentes naturales registrando información a través del tiempo en sedimentos, agua, hielos polares y en los organismos, incluso después de su muerte. La información obtenida abarca diversos factores como cambios climáticos y ecología de las especies (Ehleringer y Cerling, 2002).

En la naturaleza se encuentran dos o más especies de isótopos estables de un mismo elemento, un isótopo ligero en gran abundancia y los pesados en cantidades traza (Peterson y Fry, 1987). Los isótopos estables existen en proporciones tan pequeñas en la naturaleza que para poder registrar sus variaciones usualmente se miden en átomos. La abundancia isotópica en la naturaleza generalmente es menor al 1% por lo que se reporta como partes por mil (‰) y se reporta como la notación delta (δ) (Squeo y Ehleringer, 2004). Los términos como positivo y negativo o enriquecido y empobrecido se recomiendan para no ser tan ambiguos cuando nos referimos al valor δ (Unkovich *et al.* 2001). La muestra tendrá mayor concentración de las especies isotópicas pesadas con relación al estándar entre más positivo sea el valor δ , por el contrario entre más negativo es el valor δ , indica un contenido cada vez menor del isótopo pesado en la muestra con relación al estándar (Peterson y Fry, 1987 y Ehleringer y Cerling, 2002). Para mayor claridad una alta proporción o valor isotópico generalmente quiere decir que el material es más pesado y además más positivo en su valor δ relativo al material al cual se esta comparando (Unkovich *et al.* 2001). Los isótopos estables presentan fraccionamiento, que es el principio de la isotopía estable y se basa en la variación de la proporción del isótopo pesado sobre el ligero (Unkovich *et al.*, 2001). Se desconoce con exactitud qué origina este fenómeno, pero de acuerdo a Ehleringer y Cerling (2002), se debe a que el enlace químico es más fuerte en moléculas que presentan formas isotópicas pesadas, originando una diferencia del isótopo pesado entre sustrato y producto. El fraccionamiento también se presenta por difusión, donde el movimiento de las moléculas con isótopos más ligeros se desplazarán a mayor velocidad que el pesado, produciendo una separación de ambos (Unkovich *et al.*, 2001). Los isótopos más examinados en estudios tróficos, son el carbono y el nitrógeno, porque permiten inferir las relaciones tróficas entre especies, clases de edad, géneros,

localización geográfica y periodos (Walker y Macko, 1999). Los isótopos presentan un aumento (enriquecimiento) o disminución (empobrecimiento) en su concentración a medida que pasan de un nivel a otro en la trama trófica; por ejemplo, durante la asimilación de las plantas con relación al sustrato (Vander-Zanden y Rasmussen, 2001).

Comportamiento, fraccionamiento y distribución en la naturaleza de carbono y nitrógeno.

Los sistemas marinos, son más enriquecidos en sus proporciones isotópicas pesadas que los terrestres o los dulceacuícolas, al igual que los organismos bentónicos en comparación con los pelágicos (Hoefs, 2004). También la localidad influye en el enriquecimiento ya que la composición isotópica de la base de la red trófica tiende a estar más enriquecida en bajas que en altas latitudes (Burton y Koch, 1999), debido principalmente a los aportes de fertilizantes y aguas negras (Smith, 2001).

El carbono presenta dos isótopos estables, $\delta^{12}\text{C}$ y $\delta^{13}\text{C}$, que se utilizan para establecer el origen de la red trófica y reconocer la fuente de carbono de los productores primarios (Trimble y Macko, 1997) diferenciando entre terrestre o acuático, costero u oceánico y pelágico o bentónico (Hobson y Welch, 1992; Rau *et al.* 1992). El isótopo del carbono ($\delta^{13}\text{C}$), presenta un fraccionamiento de +2‰ de plantas a herbívoros y de +1‰ en los demás niveles (Trimble y Macko, 1997). Los productores primarios como fitoplancton, macroalgas y macrofitas, con rutas fotosintéticas variables, constituyen la base de la trama trófica en sistemas acuáticos (Richards y Hedges, 1999). En estas plantas, la proporción isotópica depende tanto de la ruta como del sustrato, ya sea CO_2 ó bicarbonato (Richards y Hedges, 1999). Este último es aproximadamente 8.5‰ más enriquecido en $\delta^{13}\text{C}$ que el CO_2 atmosférico (Schoeninger y DeNiro, 1984; Trimble y Macko, 1997). Los ecosistemas dominados por especies bentónicas, como pastos marinos y macroalgas, presentan los valores más altos en la proporción de $\delta^{13}\text{C}$ (Lesage *et al.* 2001).

El nitrógeno tiene dos isótopos estables ^{14}N y ^{15}N . En las tramas tróficas, cuando los organismos se alimentan y asimilan el nitrógeno de su dieta, se excreta preferencialmente el ^{14}N y los consumidores empiezan a enriquecerse en ^{15}N respecto a su alimento (Steele y Daniel, 1978). Esta discriminación da como resultado un enriquecimiento de 2.7‰ a 4.3‰ en el valor de $\delta^{15}\text{N}$ del depredador con respecto a su presa (Minegawa y Wada, 1984, Hobson y Welch, 1992; Abend y Smith, 1997). La principal utilidad de los isótopos de nitrógeno en estudios ecológicos, es como trazador de los niveles tróficos que ocupan los organismos. En

el caso de las crías que son amamantadas, los valores de $\delta^{15}\text{N}$ son más enriquecidos que en los de mayor edad, porque la leche deriva de sus madres (Macko *et al.*, 1999; Jenkins *et al.*, 2001).

Los estudios tróficos determinan la posición de los animales en la trama y definen su papel en el ecosistema (Pauly *et al.*, 1998). En los mamíferos marinos, las observaciones directas y los análisis de contenido estomacal, proporcionan información limitada sobre su dieta (Pérez-Cortés, 1996). Esta problemática se debe a dos aspectos principales: 1) a su habilidad para alimentarse bajo el agua (Walker y Macko, 1999) y 2) al condicionamiento del periodo de digestión (Lesage *et al.*, 2001). Por lo que puede obtenerse un panorama más amplio sobre hábitos alimentarios y relaciones tróficas de los mamíferos marinos, usando en conjunto estas dos técnicas y el análisis de los isótopos estables (Muir *et al.* 1995). Los estudios con isótopos estables ofrecen ventajas, porque registra el alimento asimilado y no sólo el que se ha ingerido recientemente (Walker y Macko, 1999; Lesage *et al.*, 2001). En el presente estudio se pretende hacer uso de los isótopos estables de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, debido a las ventajas que representan estos isótopos en el estudio de las tramas tróficas de los ecosistemas, para obtener el origen de la dieta y la posición trófica de la vaquita.

2. ANTECEDENTES.

Phocoena sinus. La vaquita, es un mamífero marino cuyas hembras alcanzan una talla máxima de 150 cm y los machos generalmente no exceden los 140 cm (Gaskin *et al.*, 1984; Hohn *et al.*, 1996). Presenta dientes pequeños y lateralmente comprimidos con coronas espatuladas formando en conjunto un borde cortante (Magatagan *et al.*, 1984; Villa-Ramírez *et al.*, 1995). Su coloración va de gris oscuro o claro en el dorso, flancos y vientre blancos, con parches oculares y labiales negros. Las aletas son grises o negras (Brownell *et al.*, 1987), proporcionalmente más largas en relación al tamaño del cuerpo (Brownell, 1983). Las aletas pectorales presentan la formación de un sexto rayo digital, el cual estuvo presente en el análisis de 43 individuos (Torre, 1995; Ortega-Ortiz *et al.*, 2000). De acuerdo a Torre (1995) y Gallo-Reynoso (1998), esta podría ser una adaptación para la termorregulación o para proporcionarle una mayor estabilidad y maniobrabilidad en un medio ambiente tan dinámico como el Alto Golfo de California. Aunque según Ortega-Ortiz *et al.* (2000) y Medrano-González (*com. pers.* 2007), esta polidactilia es el resultado de una mutación en proceso de fijación dado el pequeño tamaño poblacional de *P. sinus*. El ciclo reproductivo de la vaquita es estacional aunque no anual (Hohn y D'Agrosa, 1997) con un periodo de gestación que dura aproximadamente 10 meses, se pare una sola cría que al nacer mide entre 70-75 cm (Peralta, 1994; Hohn *et al.*, 1996). La mayor cantidad de crías se han encontrado entre Febrero y Abril con el pico de nacimientos a inicios de Marzo. El periodo de lactancia dura ocho meses aproximadamente (Hohn *et al.*, 1996) aunque de acuerdo a Pérez-Cortés (1996), después de los primeros tres meses de vida, complementan su dieta con peces. La vaquita alcanza la madurez entre los 3 y 6 años y su longevidad es de más de 20 años. (Hohn *et al.*, 1996). La presa primaria de *P. sinus* son los peces, los calamares y los crustáceos se consideran como presas secundarias (Pérez-Cortés, 1996). Actualmente se registran entre 20 a 21 especies que constituyen su dieta (Tabla 1) la mayoría de las cuales habitan en regiones someras, de consistencia blanda. Entre estas especies predominan las de hábitos demersales o asociadas al fondo, características de zonas estuarinas o costeras (Findley *et al.*, 1995; Pérez-Cortés, 1996; Gallo-Reynoso, 1998).

Tabla 1: Presas de la vaquita *Phocoena sinus* (Tomado de Silber, 1990 y Pérez-Cortés, 1996)

Especie y nombre común	Alimentación	Hábitat y Hábitos
<i>Anchoa helleri</i> (<i>Anchoa del Golfo</i>)	Zooplanctívoro.	Especie endémica. Solo se encuentra en la parte norte del Golfo. Pelágica.
<i>Anchoa ischana</i> (<i>Anchoa Chicotera</i>)	Planctívoro (fito y zooplancton).	Pelágica. Costera. Fondos blandos (Arena, grava y lodos). <10m de profundidad.
<i>Anchoa macrolepidota</i>	Planctívoro (fito y zooplancton).	Costas arenosas. Pelágica.
<i>Anchoa nasus</i> (<i>Anchoa Trompuda</i>)	Planctívora (fito y zooplancton).	Pelágica. Costera-estuarina. <10m de profundidad.
<i>Anchoa sp</i>		
<i>Bairdiella icistia</i> (<i>Roncador o corvineta</i>)	Carnívoro (peces óseos y crustáceos bentónicos).	Demersal. Estuarina o costera. Fondos suaves (lodos, arena y grava). <20 m de profundidad.
<i>Cetengraulis misticetus</i> (<i>Anchoqueta bocona</i>)	Planctónico (huevos y larvas de peces, fitoplancton y detritus)	Pelágica.
<i>Cynoscion reticulatus</i> (<i>Covineta rayada</i>)	Carnívoro (peces e invertebrados bentónicos).	Demersal. Costera-Estuarina. Zonas de alta turbidez. Fondos suaves (fango, grava, playa, manglar)
<i>Engraulis mordax</i>	Planctónico (fito y zooplancton)	Pelágica. Costera
<i>Isopisthus altipinnis</i>		Endémica
<i>Lepophidium prorates</i>	Carnívoro (peces e invertebrados bentónicos).	Costera. Demersal. Sustratos blandos (arenosos o fangosos).
<i>Micropogonias megalops</i> (<i>Chano o berrugato</i>)	Carnívoro (crustáceos, anélidos, gasterópodos bénticos, peces.	Demersal. Costera-estuarina. En fondos blandos. <30m de profundidad.
<i>Orthopristis reddingi</i> (<i>Roncacho</i>)	Carnívoro (peces e invertebrados bentónicos).	Demersal. Sustratos blandos (arenosos o fangosos). Costera-Estuarina.
<i>Porichthys mimeticus</i> (<i>Pez Sapo</i>)		Endémica. Bentónica.
<i>Porichthys myriaster</i>		Demersal. Sustrato blando. Oceánico. Se acerca a desovar.
<i>Sardinops spp</i>		
<i>Lolliguncula tydeus</i>		Pelágica. Eurihalino. Costera
<i>Lolliguncula argus</i>		
<i>Lolliguncula panamensis</i>	Carnívoro	Pelágica. Eurihalino. Aguas costeras, someras y cálidas.
<i>Loliolopsis diomedeeae</i>		Bentónica. Costera. Sustrato blando.
<i>Cancer amphioetus</i>		Costera. A veces estuarina.
<i>Motochya sp</i>		Parásitos branquiales

Distribución geográfica de *Phocoena sinus*. La distribución de la vaquita se restringe a la parte Norte del Golfo de California. Su presencia se ha corroborado únicamente hasta la línea que se observa en la Figura 1, entre Puertecitos, Baja California y Puerto Peñasco, Sonora (Barlow, 1986; Brownell, 1986; Silber y Norris, 1991), más específicamente en las cercanías de las Rocas Consag (Villa-Ramírez *et al.*, 1995).



Figura 1: Distribución de la vaquita. La línea engloba el área que constituye la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (<http://glovis.usgs.gov>).

Este sistema presenta un comportamiento de estuario inverso (Gallo-Reynoso, 1998; Álvarez y Jones, 2002) debido a la combinación de aguas someras, mínima precipitación y alta radiación solar, que origina temperaturas superficiales del agua de hasta 33°C (Silber, 1990). En conjunto con estos factores naturales, la carencia en la entrada de agua dulce al sistema por la construcción de presas a lo largo del cauce del Río Colorado así como su desvío para uso agrícola, dan como resultado un aumento de salinidad de más de 40 ups (Hernández-Ayón *et al.*, 1993). A pesar de esta reducción en la entrada de agua, el Alto Golfo se le considera como uno de los mares más productivos del mundo (Santa María del Ángel *et al.*, 1994). La productividad bacteriana excede la productividad primaria, porque tiene aportes no solo del fitoplancton sino también de otras fuentes de carbono, muy probablemente de materia orgánica sedimentada (Camacho-Ibar, 1997). La alta productividad del sistema se debe en parte a la gran amplitud de mareas de hasta 11 m (Hernández-Ayón *et al.*, 1993), además de las fuertes corrientes y vientos que ocasionan surgencias al centro del Golfo en el invierno y a lo largo de las costas en el verano. Al parecer, estas condiciones favorecen la presencia de *P. sinus* en torno a las Rocas Consag (Silber, 1990 y Villa-Ramírez *et al.*, 1995). La vaquita se ha

observado sobre todo en áreas definidas por aguas poco profundas (generalmente de 10 a 50m), a una distancia de 11-25 Km de la costa (Villa-Ramírez, 1993; Silber *et al.*, 1994; Gallo-Reynoso, 1998) y en grupos de no más de 7 individuos (Silber *et al.*, 1994 y Vidal *et al.*, 1987).

Isótopos Estables. El uso del análisis de isotopía estable es cada vez mayor dada su utilidad para inferir dietas y relaciones tróficas (Peterson y Fry, 1987). En los cetáceos, este tipo de estimaciones eran prácticamente ausentes hasta que Ostrom *et al.* (1993) compararon la proporción de isótopos estables en cetáceos del Atlántico noroeste, observando un enriquecimiento promedio de 3‰ de $\delta^{15}\text{N}$ con respecto a su dieta.

¿Qué representa cada tejido sobre la dieta? A partir de los isótopos estables, se puede estudiar la dieta de los mamíferos marinos a corto o largo plazo, porque la proporción isotópica de un tejido está en función de su tasa metabólica. De tal manera que podemos obtener información de pocos días (hígado), semanas (piel), meses (músculo), años (en tejido inerte como hueso, plumas, pelo, uñas, etc.) ó de toda la historia de vida del animal (dientes) (Walker y Macko, 1999 y Unkovich *et al.*, 2001). Como lo demostraron Abend y Smith (1997) midiendo los isótopos estables de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en calderones (*Globicephala melas*) del Atlántico Norte. En esta especie encontraron valores promedio para $\delta^{13}\text{C}$ de -18.75‰ en la piel y de -17.97‰ en el músculo, así como 13.88‰ y 13.32‰ de $\delta^{15}\text{N}$ para piel y músculo respectivamente. La diferencia en los valores nos muestra que cada tejido presenta una tasa metabólica diferente. Walker *et al.* (1999) realizaron estudios de la dieta de *Tursiops truncatus* con base en análisis de dientes de colecciones de diferentes periodos, encontrando que las proporciones isotópicas permanecían después de más de un siglo de la muerte del organismo. Hobson y Sease (1998) midieron los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en las capas de crecimiento (anuli) de tres especies de pinnípedos. Los autores reportaron que el valor isotópico más alto fue para el lobo marino (18 a 20‰ para $\delta^{15}\text{N}$) en el primer año de edad, aunque al parecer los valores más empobrecidos de $\delta^{13}\text{C}$ (-12.16‰) también se presentaron en las crías amamantadas porque la leche presenta alto contenido graso, a su vez los lípidos son empobrecidos en el isótopo pesado dándole a la cría valores menos enriquecidos de carbono isotópico.

Diferencias en la distribución regional de los isótopos estables. Walker y Macko (1999) utilizaron isótopos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ para analizar la dieta de varias especies de mamíferos marinos del Atlántico y del Pacífico. El mayor enriquecimiento de $\delta^{13}\text{C}$ lo presentaron las

especies del Atlántico, sobre todo las que habitaron en regiones dominadas por macrofitas como el manatí (-9.90‰) y por macroalgas como la nutria marina (-11.10‰). Los valores menos enriquecidos de nitrógeno se encontraron en las especies herbívoras como el manatí (7.80‰), a diferencia de especies depredadoras como la orca (17.60‰).

Variación Isotópica con la Temperatura. Hironson *et al.* (2001) encontraron un empobrecimiento de $\delta^{13}\text{C}$ de 3.3 a 4.4‰ durante el periodo de 1951-1997 en tres especies de pinnípedos. De acuerdo a los autores, la mayor concentración de gases invernadero implicó un aumento en la temperatura. Al aumentar la concentración de CO_2 disuelto en el océano, los productores primarios empezaron a discriminar más ^{13}C . Este fenómeno ocasionó un cambio en la base de la trama trófica enriqueciéndola con el isótopo ligero (^{12}C) y como consecuencia en el resto de las especies, entre ellas los pinnípedos.

Evidencia de enriquecimiento Bentónico vs Costero y Pelágico vs Oceánico. Walker *et al.* (1999) encontraron un valor promedio de $\delta^{15}\text{N}$ en toninas costeras de 16.80‰ y en las oceánicas de 14.80‰. Díaz-Gamboa (2003) diferenció entre poblaciones oceánicas (-15.70‰) y costeras (-12.90‰) de toninas (*Tursiops truncatus*) en el Golfo de California. Niño-Torres *et al.* (2006) realizaron un estudio de isótopos estables en dientes de delfín común en el que incluyeron el análisis de $\delta^{34}\text{S}$ para conocer más sobre sus hábitos alimentarios. Los valores $\delta^{13}\text{C}$ (-12.43‰) y $\delta^{34}\text{S}$ (15.15‰) indicaron que la población fue predominantemente costera. En lo que se refiere al $\delta^{15}\text{N}$ los valores más altos se presentaron en crías (18.80‰), disminuyendo en juveniles (14.57‰), aumentando nuevamente en subadultos (16.98‰) y adultos (17.98‰). Estas diferencias isotópicas, se deben a los cambios en los hábitos alimentarios que presentan los organismos a diferentes categorías de edad. Newsome *et al.* (2006) realizaron un análisis en lobo marino del área del Golfo Norte de California, encontrando valores promedio de -12.60 y 22.02‰ para $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ respectivamente. De acuerdo a los autores estos valores son característicos de depredadores de un alto nivel trófico y con hábitos costeros.

3. JUSTIFICACIÓN:

Desde que se descubrió la vaquita marina ha estado enlistada como especie vulnerable. El gobierno Mexicano (NOM-059-ECOL-2001) la cataloga actualmente como una especie en peligro de extinción. El estado que guarda actualmente la vaquita, se debe principalmente al uso de redes agalleras para la sobreexplotación de recursos pesqueros como tiburón, sierra, chano norteño y otras especies (Vidal, 1995; <http://www.vaquitamarina.org/portal>). Con base en esta problemática se hace evidente la necesidad de implementar medidas inmediatas pero efectivas para su protección. Estas medidas requieren de una amplia investigación integral sobre la biología y ecología de esta marsopa (Pérez-Cortés, 1996). Al utilizar análisis de isótopos estables se pretende obtener una mejor comprensión de sus hábitos, así como del papel que juega dentro del ecosistema. Además, este método no constituye ningún peligro que atente contra la conservación de la especie debido a que se utilizaron especímenes de museo.

4. HIPÓTESIS

Si la vaquita se alimenta a lo largo de su vida de una gran variedad de presas con hábitos diversos (Pérez-Cortés, 1996), como es el caso de otros mamíferos marinos depredadores de la misma área (Díaz-Gamboa, 2003; Niño-Torres *et al.*, 2006; Newsome *et al.*, 2006), entonces se espera que sus valores isotópicos sean similares a los encontrados en los depredadores con hábitos costeros en el área del Alto Golfo de California (Mayores a -13‰ y 19‰ para $d^{13}\text{C}$ y $d^{15}\text{N}$, respectivamente).

5. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el origen de la dieta y la posición trófica de *Phocoena sinus* con base en el análisis de la proporción isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la dentina.

Objetivos específicos

- 1.- Describir la variación de las proporciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la dentina de *P. sinus*.
- 2.- Definir el nivel trófico de *P. sinus* mediante isótopos estables de $\delta^{15}\text{N}$.
- 3.- Generar un modelo de mezcla de fuentes múltiples hipotético y compararlo con los valores reales de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ obtenidos en la vaquita .

6. MÉTODO

Obtención de muestras. El valor isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ se determinó en la dentina de *P. sinus*, empleando para ello un diente y un trozo de vértebra de 10 distintos ejemplares de vaquitas. Dos de los dientes fueron donados de la Colección del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. (CIAD-Guaymas) en conjunto con el Instituto Tecnológico de Monterrey (ITESM-Campus Guaymas), tres de la Colección Nacional de Mamíferos del Instituto de Biología de la UNAM y tres dientes y cuatro trozos de vértebra de la colección del Laboratorio de mamíferos Marinos en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Las vaquitas fueron recuperadas entre 1984 y 1993, y se preservaron en seco (8) y congelación (2) desde su colecta. Los dientes se pesaron individualmente en una balanza analítica de marca Sartorius Handy H160 con una resolución de ± 0.0005 g. Los de mayor peso fueron los que se eligieron para este estudio. Se colocaron en viales de plástico etiquetados con el número de catalogo, sexo y categoría de edad. Posteriormente fueron procesados en el Laboratorio de la Dra. Elva Escobar Briones, de Biodiversidad y Macroecología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

Clasificación de la muestra. Los cráneos, provenientes de enmallamientos en redes de pesca del área de la Reserva de la Biósfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, se clasificaron de acuerdo a la institución de procedencia y al método de preservación. Las siguientes categorías poblacionales se obtuvieron con base en Hohn *et al.* (1996) y Ortega-Ortiz *et al.* (2000): 2 juveniles (J), 2 crías (C), 3 maduros (M) y 3 no determinados (ND).

Desmineralización. Las muestras se limpiaron por abrasión con ayuda de un bisturí #24. Posteriormente se enjuagaron con agua destilada, se secaron a temperatura ambiente y se colocaron en viales de vidrio etiquetados, previamente lavados con jabón neutro y agua destilada. Los frascos se pesaron sin y con el diente para determinar el peso de éste previo a la acidulación y posterior a esta. Después se colocaron en cajas Petri en un desecador para la desmineralización por vapores con ácido clorhídrico (HCl) 0.1N según el protocolo de Auriolles-Gamboa (*com. pers.*, 2007). Cada diente permaneció en esta solución por un periodo de 48 horas, después de las cuales se enjuagó cada muestra con agua destilada. Cada diente se secó a 40°C dentro de una estufa eléctrica por 12 horas aproximadamente y se trituró con ayuda de un mortero de Ágata hasta obtener un fino polvo, con el propósito de homogenizar la muestra.

Descripción de la variación de las proporciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la dentina de *Phocoena sinus*

Valores elementales de carbono y nitrógeno en dientes de *P. sinus*. Se obtuvo la proporción elemental de las muestras en el Laboratorio de Análisis Elemental y Fluorescencia del Instituto de Química de la UNAM, con el propósito de calibrar el espectrómetro de masas. Este equipo realiza la lectura de proporciones isotópicas a partir de un voltaje determinado, el cual se aplica de acuerdo a la proporción de valores elementales de carbono y nitrógeno en el tejido. El análisis elemental se basa en la combustión instantánea de la muestra, para lo cual se utilizó un analizador elemental modelo FISOONS-EA1108 con una precisión analítica de $\pm 0.3\%$. En una cápsula de estaño se colocó 0.001g de la muestra de diente de vaquita (ITESM-930502). Esta cápsula se purga mediante un flujo continuo de helio, pasando enseguida por un reactor de combustión a 1020°C . La muestra se funde cuando el flujo de helio es enriquecido con oxígeno puro y alcanza la combustión instantánea. Al pasar por el anhídrido tungstícico utilizado como catalizador, se origina una mezcla de gases a partir de la combustión. Estos gases pasan por cobre para eliminar el exceso de oxígeno y reducir los óxidos de nitrógeno hasta nitrógeno elemental. La mezcla resultante es dirigida a la columna cromatográfica donde se separan en N_2 y CO_2 . Estos compuestos son enviados a un detector de conductividad térmica (TCD) donde son leídos. El porcentaje de carbono y nitrógeno total contenido en el diente de vaquita, se expresa en unidades porcentuales (%) con relación al estándar utilizado que fue la Cistina.

La proporción elemental obtenida en el diente de *P. sinus* se comparó con la encontrada en *Zalophus Californianus* (Aurioles-Gamboa, *com. pers.* 2007). La comparación se realizó únicamente con lobo marino, debido a la escasez de información encontrada sobre valores elementales de carbono y nitrógeno en otras especies. Finalmente, los valores elementales de ambas especies se compararon también con los valores de materia orgánica suspendida (MOS) obtenida del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Aguíñiga, 1999; Tabla 2).

Tabla 2: Proporciones elementales de C y N en el lobo marino (Auriolos-Gamboa, *com. pers.* 2007) y la MOS del Alto Golfo de California (Aguíñiga, 1999).

Grupos	C (%)	N (%)	C/N
Baja California	4.00	0.59	6.80
Sonora	3.75	0.56	7.50
Delta	4.00	0.36	11.30
Golfo	4.25	0.65	6.60
<i>Zalophus californianus</i>	12.00	4.00	3.00

Descripción de las variaciones isotópicas. Las muestras se analizaron en el laboratorio de Isótopos Estables del Instituto de Geología de la UNAM. Las muestras se colocaron en cápsulas de estaño para introducirse en el Espectrómetro de Masas Delta Plus XL que tiene una precisión de 0.2‰ para el análisis isotópico de $d^{13}C$ y $d^{15}N$. Este equipo permite un análisis rápido y consecutivo de la muestra y su comparación con los estándares respectivos. Los estándares para carbono fueron NBS19 y LSVEC, referidos ambos a la calcita fósil de la formación PeeDee Belemnita ($d^{13}C_{PDB}$). Con relación al nitrógeno se utilizaron el IAEAN1, USGS25 y USGS26 referidos al nitrógeno atmosférico ($d^{15}N_{AIRE}$). Los estándares reciben un valor asignado de 0.0‰. Al introducirse la muestra se lleva al estado gaseoso por combustión a 650°C. El gas resultante pasa por pequeños capilares de aproximadamente 0.1 mm de diámetro. Los iones acelerados por la emisión de calor se dirigen hacia una cámara de ionización; al final de esta cámara se encuentra un campo magnético que los atrapa y separa de acuerdo a su proporción masa/carga. Finalmente, las proporciones de abundancia de cada una de las especies pesadas y ligeras separadas en el campo magnético se miden en los detectores de especies isotópicas al final del equipo. La composición isotópica de carbono y nitrógeno sigue la notación δ convencional con base en la fórmula (Ec. 1) para la obtención del valor isotópico de cada muestra, expresado en partes por mil (‰):

$$\delta_{\text{muestra}}^N E (\text{‰}) = [(R_{\text{muestra}} / R_{\text{estándar}}) - 1] \times 1000 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde $d_{\text{muestra}}^N E$ es la concentración de isótopos en la muestra del elemento (E). R es la relación de la abundancia entre el isótopo pesado y el ligero ($^{13}C/^{12}C$ y $^{15}N/^{14}N$) de la muestra y el estándar respectivamente.

Los valores obtenidos del análisis isotópico se graficaron contra los registrados para carbono orgánico particulado (COP) (Elva-Escobar, *com. pers.* 2007; Tabla 3) y para MOS (Aguíñiga, 1999; Tabla 4).

Tabla 3: Valores isotópicos de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ para carbono orgánico particulado correspondientes al área del Golfo de California .

Localidad	Localidad	$d^{13}C$ (‰)	$d^{15}N$ (‰)	Referencias	
E1A	Pacífico	-22.7	9.7	Escobar-Briones, com.pers 2007	
E1B		-23.7	7.2		
E2A	Golfo de California	-23.5	8.1		
E2B		-24.0	8.6		
E3A	Golfo Norte de California	-24.2	8.2		
E3B		-23.6	9.2		
E3C		-22.9	9.1		
E5	Pacífico	-24.5	9.8		Escobar-Briones (Com. pers)
E6A		-24.0	10		
E6B		-23.9	7.3		
E7A		-24.2	9.7		
E8A	Golfo Norte de California	-23.3	7.4		

Tabla 4: Valores isotópicos de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ para materia orgánica suspendida (MOS) correspondientes al área de la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Tomado de Aguíñiga, 1999).

Localidad	(MOS) $d^{13}C$ (‰)	(MOS) $d^{15}N$ (‰)	Referencia
Sonora	-19.7	10.9	Aguíñiga (1999)
Baja California	-20.8	8.5	Aguíñiga (1999)
Delta	-22.1	10.5	
Golfo	-20.3	8.2	
PROMEDIO	-20.72	9.52	

Por último, se graficaron los valores teóricos y los obtenidos del análisis isotópico contra:

- Los valores de otras especies de mamíferos marinos de la región (Tabla 5)
- Los valores de la especie hermana de *P. sinus* de la región geográfica del Pacífico norte (Tabla 5).

Mediante la comparación de estos valores se pudieron reconocer las variaciones geográficas en la región del Alto Golfo de California, para la posición trófica de los mamíferos marinos que se vincularon a la procedencia de la fuente alimenticia por comparación con los valores de MOS (Aguíñiga, 1999) y COP (Escobar-Briones, *com.pers.* 2007).

Tabla 5: Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ para diferentes especies de mamíferos marinos recuperadas del Pacífico Norte y Golfo de California.

Espece	n	Localidad	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	Referencia
<i>Zalophus californianus</i>	6	Santa Margarita	-12.90	20.2	Newsome <i>et al</i> (2006)
			-13.20	20.0	
			-13.30	18.9	
			-13.00	18.5	
		Golfo de California	-12.90	22.8	
Alto Golfo de California	-12.60	22.6			
<i>Delphinus capensis</i>	8	Baja California	-11.6	20.7	Niño-Torres <i>et al</i> (2006)
			-12.9	13.5	
			-10.9	13.9	
			-10.7	13.8	
			-11.7	14.8	
			-11.4	13.8	
			-11.2	19.5	
			-13.7	18.3	
	2	Golfo de Santa Clara	-9.6	20.2	
			-9.9	18.3	
<i>Tursiops truncatus</i>	17	Isla San Pedro Mártir	-12.90±0.35	18.80±0.50	Díaz-Gamboa (2003)
<i>Phocoena phocoena</i>	3	Pacífico Norte	-20.5	12.0	Das <i>et al</i> (2004)
			-16.5	14.1	
			-16.1	16.5	

Definición del nivel trófico de *P. sinus* mediante isótopos estables de $d^{15}N$

El nivel trófico de la vaquita se obtuvo a partir de la fórmula (Ec. 2) citada por Pinnegar *et al.* (2002):

$$NT = ((d^{15}N_i - d^{15}N_{ref}) / 3.4) + 1 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde NT es el nivel trófico que *P. sinus* ocupa en el ecosistema, $d^{15}N_i$ es el valor promedio de la proporción isotópica de vaquita, $d^{15}N_{ref}$ es la proporción de la base de la trama trófica, en este caso se refiere al valor isotópico de la materia orgánica superficial (Aguñiga, 1999), la cual de acuerdo a Sagerup *et al.* (2002) se considera junto con los productores primarios, como primer nivel trófico de la trama. El índice de fraccionamiento usado en este estudio fue de 3.4‰ con base en Minegawa y Wada (1984) y Niño-Torres *et al.* (2006). El resultado obtenido se comparó con valores publicados previamente por Pauly *et al.* (1998) y Morales-Zarate *et al.* (2004), sobre el nivel trófico de vaquita.

Generación de un modelo de mezcla hipotético de fuentes múltiples a partir de valores isotópicos de la literatura y comparación con valores analizados en *P. sinus*

Para estimar la dieta potencial de la vaquita, se utilizó el modelo de mezcla de fuentes múltiples propuesto por Ben-David *et al.* (1997). Este requiere los valores promedio de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ de cada una de las presas con diferencias significativas en el valor d . En caso de que las presas no presenten diferencias significativas es imposible diferenciar en que porcentaje contribuye cada una de ellas. Los organismos utilizados en el presente estudio como presas potenciales, se constituyen por dos especies de calamares (Tabla 6) y nueve de peces (Tabla 7). El valor teórico de isótopos estables de *Phocoena sinus*, se obtuvo corrigiendo por fraccionamiento (1‰ para $d^{13}C$ y 3.4‰ para $d^{15}N$; DeNiro y Epstein, 1978; Minegawa y Wada, 1984) el valor de *Engraulis mordax* ($d^{13}C = -16.8$ y $d^{15}N = 13.9$). Esta especie es la única de las registradas en las Tablas 5 y 6 que ha sido reportada como presa de *P. sinus* (Pérez-Cortés, 1996). El valor resultante, junto con el de las especies de peces y calamares se graficó encerrando en un rectángulo equivalente al fraccionamiento mencionado, las especies consideradas como presas potenciales (Figura 2).

Tabla 6: Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ para dos especies de calamares recuperadas del Pacífico Norte y Golfo de California.

Especie (cm)	Localidad	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	Referencia
<i>Dosidicus gigas</i> (82)	Golfo de California	-14.2	17.9	Ruiz-Cooley <i>et al.</i> (2004) Ruiz-Co Ruiz-Cooley <i>et al.</i> (2004)
<i>Dosidicus gigas</i> (66)		-14.8	16.8	
<i>Dosidicus gigas</i> (57)		-15.1	17.2	
<i>Dosidicus gigas</i> (40)		-15.6	16.1	
<i>Dosidicus gigas</i> (27)		-16.1	15.0	
<i>Dosidicus gigas</i> (22)		-16.2	14.5	
<i>Lolligo opalescens</i>	Pacífico norte	-17.1	12.3	Jarman <i>et al.</i> (1996)

Tabla 7: Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ para diferentes especies de peces provenientes del Pacífico Norte y Golfo de California.

Especie	Localidad	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	Referencia
<i>Sebastes jordani</i>	Pacífico norte	-16.8	13.7	Jarman <i>et al.</i> (1996)
<i>Engraulis mordax</i>	Pacífico Norte	-16.8	13.9	
<i>Sardinops sagax</i>	Golfo de California	-18.5	13.3	Díaz-Gamboa (2003)
<i>Myctophidae</i>		-19.4	14.9	
<i>Harengula thrissina</i>		-16.5	17.7	
<i>Hyporampus unifasciatus</i>		-16.5	17.08	
<i>Cheilopogon papilo</i>		-17.8	16.1	
<i>Tylosurus acus</i>		-17.2	15.03	
<i>Mugil cephalus</i>		-11.5	11.1	

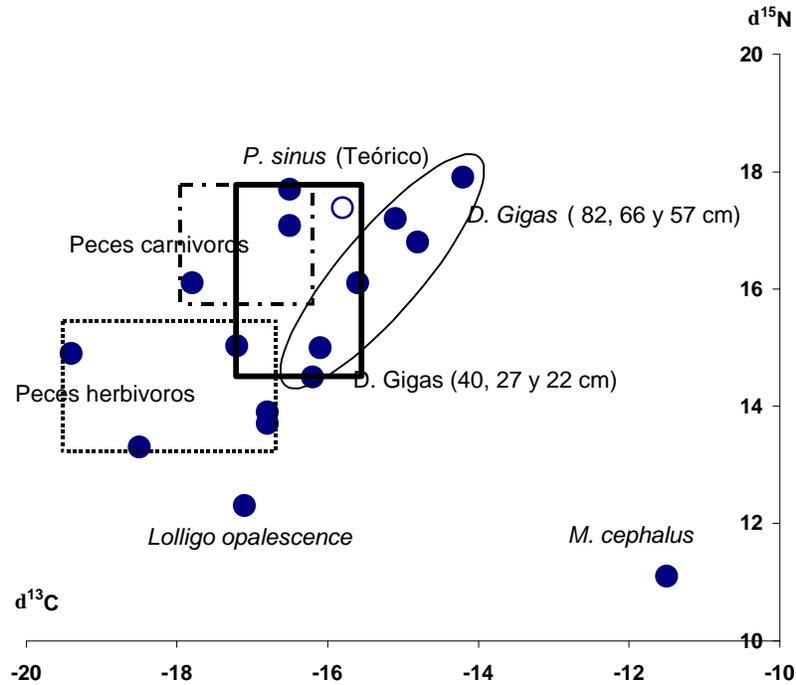


Figura 2: Relación de los valores isotópicos de las diferentes especies tomadas de referencias y la posición trófica hipotética de *P. sinus*. Las especies que caen dentro del recuadro sólido representan las presas potenciales de vaquita de acuerdo a un fraccionamiento de 1‰ de $\delta^{13}\text{C}$ y 3.4‰ de $\delta^{15}\text{N}$ (DeNiro y Epstein, 1978 y Minegawa y Wada, 1984)

A partir del promedio de los valores de las especies dentro del rectángulo (Figura 2), se obtuvo un nuevo valor isotópico para vaquita ($\delta^{13}\text{C} = -16.28$ y $\delta^{15}\text{N} = 15.71$; Tabla 8). Este nuevo valor se obtiene considerando que al alimentarse de estas seis especies, su tejido sería un registro de todas y no únicamente de *E. mordax*. Las presas potenciales se agruparon en tres grupos taxonómicos de acuerdo a sus valores isotópicos: peces carnívoros (*Harengula thrissina* y *Hyporampus unifasciatus*), peces herbívoros (*Engraulis mordax*) y calamares (*Dosidicus gigas*). Los calamares están representados por organismos de talla entre 22 a 40 cm, que fueron los únicos que cayeron dentro del intervalo de las presas potenciales. Los valores isotópicos de las especies se corrigieron mediante el factor de fraccionamiento.

Tabla 8: Valores isotópicos de las presas potenciales, así como valores teóricos de *P. sinus*. Todos con sus respectivos valores promedio grupales y estos a su vez corregidos mediante un fraccionamiento de 1‰ de $d^{13}C$ y 3.4‰ de $d^{15}N$.

Especie	Promedio por grupo (‰)		Promedio + fraccionamiento (‰)	
	$d^{13}C$	$d^{15}N$	$d^{13}C$	$d^{15}N$
<i>Peces carnívoros</i>	-16.50	17.39	-15.50	20.79
<i>Peces herbívoros</i>	-16.80	13.90	-15.80	17.30
<i>Calamares</i>	-15.96	15.20	-14.96	18.60
<i>Phocoena sinus (Teórico)</i>	-16.28	15.733333	-15.28	19.11

La distancia euclidiana se obtuvo a partir del valor d corregido tanto de la presa como del consumidor (Tabla 9) con base en la fórmula (Ec. 2):

$$Z_x = \sqrt{(d^{13}C_p - d^{13}C_D)^2 + (d^{15}N_p - d^{15}N_D)^2} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

Z_x = Es la distancia euclidiana de cada una de las presas con respecto al depredador

$d^{13}C_p$ = Proporción isotópica de carbono de la presa potencial, corregida con un factor de fraccionamiento equivalente a 1‰ (DeNiro y Epstein, 1978)

$d^{13}C_D$ = Proporción isotópica de carbono de *P. sinus*

$d^{15}N_p$ = Proporción isotópica de nitrógeno de la presa potencial corregida con un factor de fraccionamiento de 3.4‰ (Minegawa y Wada, 1984)

$d^{15}N_D$ = Proporción isotópica de nitrógeno de *P. sinus*

Tabla 9: Distancia euclidiana de los tres diferentes grupos de presas potenciales con respecto a vaquita, basados en el valor isotópico teórico promedio.

Especie	n	d¹³C	d¹⁵N	Z_x = v (d¹³C_p- d¹³C_D)² + (d¹⁵N_p- d¹⁵N_D)²
Peces Carnívoros	3	-15.5 ± s	20.79 ± s	1.69 ± s
Peces Planctívoros	9	-15.80 ± s	17.3 ± s	1.88 ± s
Calamares	8	-14.96 ± s	18.60 ± s	0.60 ± s
<i>Phocoena sinus</i> (Teórico)		-15.28± s	19.11± s	
S				4.17 ± s

Por último se estimó el porcentaje de contribución de cada una de las presas potenciales a la dieta de la vaquita con base en la siguiente formula (Ec. 4):

$$C_x(\%) = \frac{Z_x}{Z_A + Z_B + Z_C} \times 100 \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

% Presa = Contribución porcentual de la presa A, B ó C a la dieta del depredador

Z_x = La distancia euclidiana de cada una de las presas con respecto al depredador.

Z_A⁻¹ + Z_B⁻¹ + Z_C⁻¹ = Sumatoria de las distancias euclidianas obtenidas para las presas.

Finalmente, las lecturas isotópicas de *P. sinus* se compararon con los resultados obtenidos del modelo (Tabla 10).

Tabla 10: Porcentaje de contribución que obtuvieron peces y calamares a la dieta de *Phocoena sinus* a partir de la distancia euclidiana.

Grupos	$C_x(\%) = (Z_x / Z_{PC} + Z_{PH} + Z_C) \times 100$
Peces Carnívoros	40.45%
Peces Planctívoros	45.11%
Calamares	14.43%

7. RESULTADOS

Valores elementales de carbono y nitrógeno en dientes de *P. sinus*. Los valores elementales de carbono y nitrógeno orgánico en dientes de vaquita fueron de 8.64% para carbono y 2.68% para nitrógeno. La relación C/N fue de 3.22.

Descripción de las variaciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la dentina de *Phocoena sinus*

Carbono ($\delta^{13}\text{C}$). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en *P. sinus* en dentina y hueso variaron de -15.39 a -10.55‰ , con un valor medio de $-11.90 \pm 1.59\text{‰}$ ($n= 12$). La diferencia máxima encontrada entre los valores isotópicos fue de 4.84‰ . Los valores de la vértebra de la vaquita con número de catalogo FCMM-0068 fue 0.7‰ más enriquecida que los valores obtenidos del diente del mismo individuo, en la vaquita con número de catalogo FCMM-00123 el valor de la vértebra fue 0.25‰ más enriquecido que el del diente. La dentina fue $+0.83\text{‰}$ más enriquecida que las vértebras en promedio (Tabla 11 y 12). La cría con número de catalogo CNMA-0067 presenta valores 4.71‰ más empobrecidos que su madre (CNMA- 0068) cuando se comparan los valores en vértebras y por 4.01‰ cuando se compara el valor obtenido de la vértebra de la cría con respecto al obtenido del diente de la madre. En general ambas crías son 1.59‰ más empobrecidas que los juveniles y adultos (Figura 3).

Nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$). Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ obtenidos en dentina y hueso variaron de 16.57 a 24.61‰ con un valor promedio de $21.88 \pm 2.04\text{‰}$ ($n= 12$), como se observa en la Figura 3. La diferencia máxima fue de $+8.04\text{‰}$ entre los valores encontrados. Es importante mencionar que sólo en un valor se encontró una lectura menor a 20‰ . Los valores de la vértebra de la vaquita con número de catalogo FCMM-0068 fue 3.61‰ más enriquecida que los valores obtenidos del diente del mismo individuo, en la vaquita con número de catalogo FCMM-00123 el valor de la vértebra fue 2.42‰ más enriquecido que el del diente. Las vértebras presentaron valores $+1.64\text{‰}$ más enriquecidos que la dentina en promedio (Tabla 11 y 12). La cría con número de catalogo CNMA-0067 presenta valores 1.65‰ más empobrecidos que su madre (CNMA- 0068) cuando se comparan los valores en vértebras y por 1.96‰ cuando se compara el valor obtenido de la vértebra de la cría con respecto al obtenido del diente de la madre. En general ambas crías son 0.11‰ más enriquecidas que los juveniles y adultos.

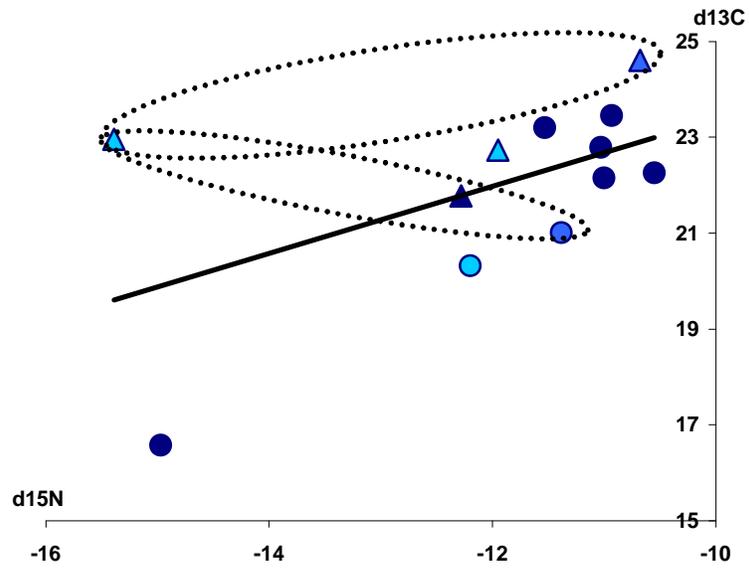


Figura 3: Proporción de isótopos estables en *P. sinus*. Los datos se dividen en: Dientes (?), vértebras (?), crías (?), hembra (♀) y machos (♂). Los óvalos punteados encierran el valor isotópico de la cría (vértebra) con las respectivas lecturas encontrados en su madre para vértebra y diente.

Tabla 11: Valores de isótopos estables de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ en dientes de vaquita categorizados por clase de edad y sexo. Se especifica la localidad y fecha de recuperación así como la forma de preservación de cada vaquita. Las edades y sexos considerados son: Cría (C), Juvenil (J), Maduro (M), Hembra (H), Macho (Mch) y No determinado (ND).

# Catálogo	Fecha		Categoría	Sexo	Localidad	Preservación	$d^{13}C$ (‰)	$d^{15}N$ (‰)
	Mes	Año						
ITESM-930502	05	93	J	Mch	El Quelele. Baja California	Congelado	-11.03	22.78
ITESM-930502	05	93	J	Mch	El Quelele. Baja California	Congelado	-10.93	23.45
CNMA-19588	06	91	ND	Mch	Puerto Peñasco, Sonora	Seco	-11.53	23.20
CNMA-37901	05	93	M	ND	ND	Seco	-10.55	22.26
CNMA-3840	05	84	ND	Mch	Golfo de Santa Clara, Sonora	Seco	-11.00	22.15
CNMA-3839	ND		M	Mch	ND	Seco	-14.97	16.57
FCMM-0068	ND		M	H	ND	Seco	-11.38	21.00
FCMM-00123	ND		C	ND	ND	Seco	-12.20	20.31
					Media±s		-11.63±1.41	21.35±2.24

Tabla 12: Valores de isótopos estables de $d^{13}C$ y $d^{15}N$ en vértebras de vaquita categorizados por clase de edad y sexo. Se especifica la localidad y fecha de recuperación así como la forma de preservación de cada vaquita. Las edades y sexos considerados son: Cría (C), Juvenil (J), Maduro (M), Hembra (H), Macho (Mch) y No determinado (ND).

# Catálogo	Fecha		Sexo	Categoría	Localidad	Preservación	$d^{13}C$ (‰)	$d^{15}N$ (‰)
	Mes	Año						
FCMM-0068	ND		H	M	ND	Seco	-10.68	24.61
FCMM-00123	ND		ND	C	ND	Seco	-11.95	22.73
FCMM-0067	ND		ND	C	ND	Seco	-15.39	22.96
FCMM-0045	ND		ND	J	ND	Seco	-12.28	21.77
					Media		-12.46	22.99

Definición del nivel trófico mediante isótopos estables de $d^{15}N$

Con base en la ecuación 2 que se presentó en la metodología, se encontró que a partir de los valores isotópicos, la vaquita ocupa un nivel trófico (NT) de 4.63 en promedio (Tabla 13). Con un intervalo de valores que va de 4.23 a 5.02 si la trama tuviera su origen en la materia orgánica del área de Sonora, Baja California, así como de la región del Delta o del Golfo.

Tabla 13: Nivel trófico (NT) obtenido a partir del valor isotópico de *P. sinus* en conjunto con los valores obtenidos por Aguíñiga (1999) para la materia orgánica suspendida en el área de la Biósfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado.

Localidad	NT _{<i>P. sinus</i>}
Sonora	4.23
Baja California	4.93
Delta	4.35
Golfo	5.02
PROMEDIO	4.63

Generación de un modelo de mezcla hipotético de fuentes múltiples a partir de valores isotópicos de la literatura y comparación con valores analizados en *P. sinus*

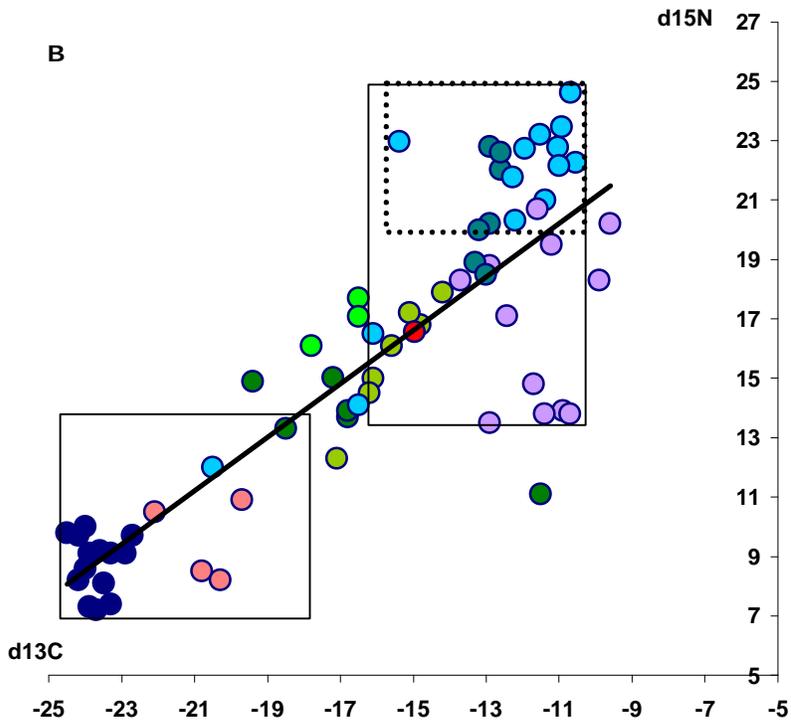
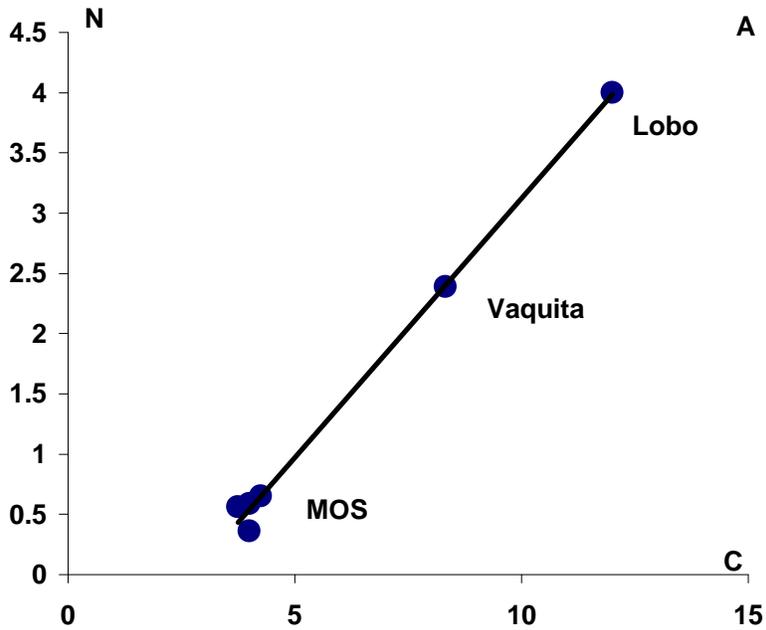
Carbono ($d^{13}C$). A partir de la ecuación de mezcla de fuentes múltiples se obtuvo un valor teórico de -15.80‰ para $d^{13}C$. El promedio de los valores obtenidos mediante isótopos estables de carbono presentó un enriquecimiento de más de 3.90‰ con respecto a los valores hipotéticos obtenidos en *P. sinus*.

Nitrógeno ($d^{15}N$). A partir del modelo de mezcla de fuentes múltiples se obtuvo un valor teórico de 17.3‰ en $d^{15}N$. Los valores reales obtenidos para *P. sinus* mediante análisis de isotopía estable presentan una diferencia de más de 4.58‰ en $d^{15}N$ con respecto a el valor hipotético.

8. DISCUSIÓN

Valores de carbono elemental en dientes de *P. sinus*. Con base en los resultados encontrados, se observa que el lobo marino (12%) presenta valores más altos que la vaquita (8.64%). Esta mayor proporción podría deberse a una tasa respiratoria más alta en la vaquita reflejándose como una mayor concentración de CO₂ liberado (Valiela, 1995). Al parecer la actividad de la vaquita es mayor que en el lobo marino. Se plantea lo anterior debido principalmente a que el lobo marino tiene la posibilidad de salir periódicamente a las loberas a descansar, a diferencia de la vaquita que debe mantenerse en una actividad de nado constante por el hecho de vivir en un área tan dinámica, como se ha reportado para el Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Hernández-Ayon *et al.*, 1993; Santa Maria del Ángel *et al.*, 1994). Se observa una relación con respecto a la comparación del carbono elemental de ambas especies con los valores de materia orgánica suspendida (MOS), sugiriendo que, probablemente porque ambas especies tienen el mismo origen (Figura 4-A).

Valores de nitrógeno elemental en dientes de *P. sinus*. Con base en Odum *et al.* (1978), entre mayor es el valor encontrado para la proporción C/N menor será la concentración de nitrógeno en la muestra. Considerando que *P. sinus* (3.2%) junto con *Z. californianus* (3.0%; Aguíñiga, 1999) son especies con una proporción C/N relativamente baja, se asume que la muestra de diente es rica en nitrógeno. El valor de nitrógeno elemental en la vaquita (2.68%) con relación al 4% encontrado en el lobo marino (Aurioles-Gamboa, *com. pers.* 2007) es menor (Figura 4-A). Esta menor proporción podría deberse a las mínimas diferencias encontradas en el metabolismo de cada una de las especies, principalmente en la asimilación de proteínas. De acuerdo a Valiela (1995) las especies carnívoras, consumen presas de alta calidad proteica y fácilmente digerible, lo que se observa en los altos valores de nitrógeno tanto en la vaquita como en el lobo marino.



Color	Grupo
	Marsopas
	Lobos
	Delfines
	Calamares
	Peces planctívoros
	Peces carnívoros
	SS (Aguíñiga)
	COP (Macko)

Figura 4: A). Comportamiento de C y N elemental de vaquita con relación a lobo marino (Newsome *et al.*, 2006) y MOS (Aguíñiga, 1999); B). Relación entre las proporciones isotópicas obtenidas para vaquita con relación a las especies y localidades citadas en el método. Los rectángulos sólidos indican un enriquecimiento de $d^{13}C=1\text{‰}$ y $d^{15}N=3.4\text{‰}$ considerado para vaquita, carbono orgánico particulado (COP) y materia orgánica suspendida (MOS). Los valores de vaquita se muestran dentro del rectángulo punteado y el punto rojo representa el valor más empobrecido en las proporciones de carbono y nitrógeno isotópico de *P. sinus*.

Descripción de la variación de la proporcione isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la dentina de *Phocoena sinus*

CARBONO ISOTÓPICO: El fraccionamiento esperado en una trama trófica de acuerdo a Schoeninger y DeNiro (1984) y Trimble y Macko (1997), es de más de 1‰ en los primeros niveles trófico y disminuye en los niveles tróficos superiores. El enriquecimiento esperado de la vaquita con respecto a los valores isotópicos del carbono orgánico particulado (COP=predominantemente fitoplancton) sería entre 5 y 6‰, tomando en cuenta su valor promedio ($\delta^{13}\text{C} = -11.9\text{‰}$) y el nivel trófico obtenido (entre 4 y 5 aproximadamente; Tabla 11). La vaquita contrario al planteamiento anterior, presenta valores 11.79‰ más enriquecidos que el COP, probablemente por la contribución de más de una fuente de producción primaria. Pérez-Cortés (1996) reporta que las especies presa de la vaquita tienen hábitos diversos (estuarinas y costeras; pelágicas y bentónicas) que se reflejan en diferentes señales isotópicas (Fry *et al.*, 1982; France, 1995). El fitoplancton presenta valores planctónicos, dejando fuera a las especies que presentan hábitos bentónicos o demersales. Los valores isotópicos son más enriquecidos en estas últimas fuentes por el aporte de más de un tipo de producción primaria (macroalgas o macrofitas; Figura 5) (Fry *et al.*, 1982). La materia orgánica suspendida (MOS), como se observa en la Figura 4-B, presenta valores 8.81‰ más empobrecidos que la vaquita. Las presas de vaquita, de acuerdo a los resultados, provienen principalmente de fuentes fitoplanctónicas y macroalgas (Figura 5), porque de acuerdo a France (1995) las especies de invertebrados y peces que presentan valores más empobrecidos a -15.0‰ tienen un origen, aunque costero, basado principalmente en fitoplancton, a diferencia de las especies que presentan valores más enriquecidos a -14.0‰ las cuales tienen un origen que parte de productores predominantemente bentónicos. La vaquita podría tener una contribución, aunque en menor proporción, de presas con un origen macrofítico (Figura 5); Fry *et al.* (1982) reportan valores de $\delta^{13}\text{C}$ en peces de dos áreas dominadas por macrofitas ($\delta^{13}\text{C} = -12.6\text{‰}$ en St. Croix y $\delta^{13}\text{C} = -14.1\text{‰}$ para Nicaragua). Lo que indica que vaquita podría tener algunos aportes de especies estuarinas aunque en menor proporción (Figura 5). La vaquita, de acuerdo a esto, se ubicaría con un origen preferentemente costero con algunos aportes estuarinos, haciendo uso de especies tanto planctónicas como bentónicas, como lo reporta Pérez-Cortés (1996). Aunque no se descarta que el enriquecimiento de vaquita con respecto al COP y a la MOS, se deba también a particularidad metabólica de la vaquita que se refleje como una mayor asimilación del isótopo pesado en sus tejidos. Las variaciones, de más de 4‰, encontradas en los diferentes

individuos de la especie (Figura 3) confirman que las presas de la vaquita provienen de diferentes regiones dominadas por productores primarios distintos. La vaquita FCMM-0067 presenta valores más empobrecidos que el resto de los individuos probablemente porque aún era amamantada y la leche de los mamíferos marinos es rica en lípidos, los que a su vez son empobrecidos en el isótopo pesado (^{13}C). Esta característica, le daría a la cría valores menos enriquecidos que en el resto de los individuos que hacen uso de otro tipo de presas más enriquecidas en ^{13}C (Hobson y Sease, 1998; Jenkins *et al.*, 2001). La vaquita con el número de catalogo CNMA-3829 presenta un valor distintivamente más empobrecido a el resto aún siendo juvenil. El empobrecimiento de $\delta^{13}\text{C}$ encontrado puede ser originado por contaminación, aunque para descartar o afirmar dicha opción hace falta un mayor número de muestra que muestre la tendencia de la población y no únicamente un caso aislado. Mediante la comparación de los valores isotópicos en la vaquita con los mamíferos marinos que se enlistan en la Tabla 5, se encontró que todos (excepto *P. phocoena*) corresponden a la misma área (Figura 4-B). Esta relación ubica sobre todo a *Delphinus capensis* ($\delta^{13}\text{C}$ -11.36‰) dentro del área del Alto Golfo. Aunque al parecer tanto *Z. californianus* (-12.48‰) como *T. truncatus* (-12.90‰) presentan hábitos más migratorios que *P. sinus*. Con respecto a los valores isotópicos de *P. phocoena* (-16.10 a -20.50‰ n= 3), su especie hermana en el Pacífico norte, se observa una diferencia en un intervalo de 4.2 a 8.6‰ aproximadamente. El empobrecimiento en la marsopa de puerto se debe principalmente a la mayor latitud en que se encuentra *P. phocoena*. Las diferencias latitudinales, de acuerdo a Rau *et al.* (1989), se presentan porque al disminuir la temperatura la solubilidad de los gases aumenta. El medio marino entonces, presenta un exceso de CO_2 , originando una mayor disponibilidad para la producción primaria permitiéndoles una mayor discriminación del $^{13}\text{CO}_2$, enriqueciéndose en el isótopo ligero. Por tal razón, al vivir vaquita en aguas que pueden llegar a más de 30°C sus valores isotópicos serían considerablemente mayores a los que se observan en especies de áreas más templadas aunque se trate de individuos con similitudes tróficas como sería el caso de *P. phocoena*.

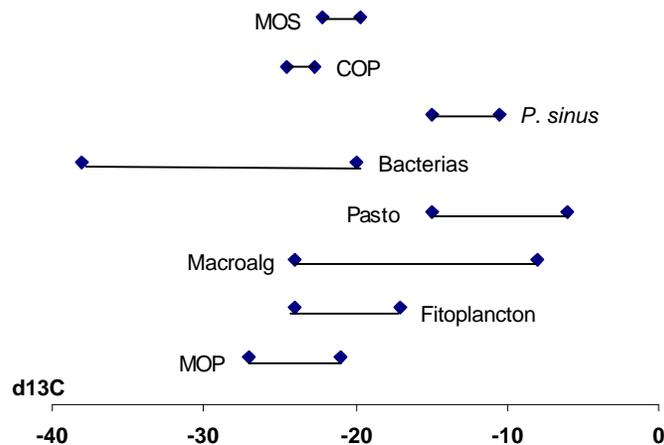


Figura 5: Intervalo de valores de la materia orgánica particulada (MOP) y principales productores primarios y secundarios marinos y su relación con los valores $d^{13}C$ de vaquita.

NITRÓGENO ISOTÓPICO: La variación en los valores isotópicos de vaquita (8.04‰ entre el valor mínimo y el máximo) corresponde a una especie generalista (Macko *et al.*, 1998). Es importante señalar que todos los datos se ubican en un intervalo de valores de 20.31‰ a 24.61‰, excepto uno presentando un valor de 16.57‰ (punto rojo en la Figura 4-B). Es necesario considerar una posible contaminación de esta muestra en particular, lo cual no se pudo afirmar ni negar debido a que únicamente se contaba con un diente. Un tamaño de muestra mayor es necesario para observar si esta es una tendencia a una mayor dispersión de los datos o únicamente fue una lectura aislada. Los valores isotópicos que se muestran en la Figura 4-B muestran una relación isotópica directa entre el carbono y el nitrógeno, es decir entre mayor es la señal del $d^{13}C$ mayor es la del $d^{15}N$. Esta relación lineal también indica que se presenta fraccionamiento a medida que el nivel trófico aumenta, donde la vaquita ocupa el más alto. Las vértebras presentan valores más enriquecidos que los dientes (Figura 3). La cría presenta valores menores con respecto a su madre (valores dentro de los rectángulos en la Figura 3), de hecho, ambas crías presentan valores $d^{15}N$ menores a los organismos de mayor edad. Las crías de acuerdo a Jenkins *et al.* (2001) presentan valores enriquecidos con respecto a su madre, la cual produce su leche a partir de la dieta, al parecer en vaquita no se presenta la misma condición, aunque es necesario un mayor número de muestra para observar la tendencia general en la población. Tampoco se descarta que la cría sea mayor de tres meses y complementa su dieta con especies pequeñas de peces (Pérez-Cortés, 1996), las cuales serían

más empobrecidas que las de mayor tamaño, esto no pudo comprobarse debido a la falta de muestra para determinar la edad de la cría. La vaquita presenta un valor promedio (21.88‰) mayor que en el resto de las especies de mamíferos marinos, aunque cercana al valor encontrado en lobo marino (20.43‰) lo cual indica la explotación de dietas con niveles tróficos similares (Figura 4-B). Los valores isotópicos en *D. capensis* significativamente más bajos (16.44‰), pueden mostrar dos cosas: 1) una diferencia de dietas, mostrando que vaquita se alimenta de especies de niveles tróficos mayores o 2) que el origen de la dieta sea diferente, lo cual a partir Pérez-Cortés (1996) es lo más probable. La vaquita, de acuerdo a los valores isotópicos, tiene un mayor aporte de presas bentónicas que el delfín común. Las variaciones isotópicas con su especie hermana *P. phocoena* (12.0 a 16.5‰), se podrían deber a que el Alto Golfo de California es un mar marginal donde el flujo ribereño fue cortado por la construcción de presas o desviado para su uso agrícola y humano. En este sistema la tasa de evaporación ha excedido las entradas de agua dulce por precipitación y afluyente (Carriquiry y Sánchez, 1999). Lo que ha originado condiciones hidrodinámicas contrarias a lo que se esperaría en un estuario normal concentrando gran cantidad de detritus en el área oeste del sistema, enriqueciéndolo isotópicamente (Shumalin *et al.*, 2002). Aunque para poder confirmar tal aseveración es necesario contar con un mayor número de muestreos, no sólo de vaquita sino del Golfo norte en su totalidad.

Establecimiento de la posición trófica de *Phocoena sinus* con base en la abundancia de isótopos estables de $d^{15}N$

NITRÓGENO ISOTÓPICO. Las bases para usar medidas isotópicas en el estudio de estructuras tróficas se apoya en documentar un patrón regular y consistente de enriquecimiento con el aumento del nivel trófico (Fry, 1988). Con esto en mente y a partir de los valores encontrados para *P. sinus* de 21.88‰, en conjunto con los valores encontrados por Aguiñiga (1999) para materia orgánica suspendida (MOS) se muestra una trama con más de 4 niveles tróficos (Tabla 11). Pauly *et al.* (1998) y Morales-Zarate *et al.* (2004) colocan a la vaquita en un nivel trófico de 4.1 a 4.2, mediante análisis del contenido estomacal. El nivel trófico promedio que se obtuvo en el presente estudio (4.63) a partir de la técnica de isótopos estables en dentina de *P. sinus* fue mayor a lo reportado por los autores. Esta mayor jerarquía obtenida puede deberse a una subestimación de las relaciones tróficas que se encuentran en ese sistema, porque de acuerdo a DeNiro y Epstein (1981) entre mayor es el número de interacciones entre los organismos de una trama determinada mayor será su enriquecimiento.

Se plantea que posiblemente el enriquecimiento utilizado en la fórmula sea de validez sólo local, por lo cual es necesaria la obtención del enriquecimiento en vaquita con respecto a sus presas para poder tener un panorama exacto de cómo son las relaciones tróficas en el Alto Golfo y la jerarquía que ocupa la vaquita en este. A partir de esta relación y de lo reportado por Lalli y Parson (1997) se asume que la vaquita parte de una trama predominantemente costera con más de cuatro niveles tróficos. Dado que según los autores el número de niveles tróficos varía de más de 6 en las tramas oceánicas, 4 en los sistemas costeros y 3 en las regiones de afloramiento o surgencia. Este número de relaciones tróficas varía con la localidad y son determinadas principalmente por el tamaño individual de los productores primarios. Dado que entre más pequeño es el tamaño de los productores primarios más larga será la trama porque se requiere de un mayor número de intermediarios como protozoarios que puedan alimentarse de organismos tan pequeños y que a su vez formen parte importante como fuente de alimentación para organismos de mayor tamaño.

Generación de un modelo de mezcla hipotético de fuentes múltiples a partir de valores isotópicos de la literatura y comparación con valores analizados en *P. sinus*

1). Datos Hipotéticos

CARBONO ISOTÓPICO: Como se aprecia en la Figura 6 y 7-B, de acuerdo a la señal de $\delta^{13}\text{C}$ obtenida para *P. sinus* (-15.80‰) mediante la ecuación de mezcla las proporciones isotópicas de todas las especies graficadas caen dentro del intervalo que correspondería a especies de la misma área. Es decir las especies presentan una diferencia isotópica con un intervalo de valores que va de +2.6 a -2.5‰ con respecto al valor teórico de la vaquita, lo cual indica que la trama parte de orígenes similares. La excepción a esta característica es *M. cephalus* el cual presenta valores representativamente más enriquecidos que el resto de las especies, originando una diferencia aproximada de 5.3‰, lo cual lo ubica en la misma región que la vaquita. Las especies restantes, por el contrario, muestran valores (-16 a -20‰), más cercanos a los presentados por especies de hábitos pelágicos o más oceánicos (Fry *et al.*, 1982 y Kelly, 2000). Se observan también, que las especies presa presentan valores que sugieren un ambiente menos cálido que el Alto Golfo de California, lo que se reflejaría en valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos enriquecidos (Rau *et al.*, 1989). Es importante recalcar que el valor teórico se obtuvo a partir de *E. mordax*, considerada una de las más de 20 especies reportadas como presas de la

vaquita (Jarman *et al.*, 1996). Los hábitos pelágicos de *E. mordax*, resultan en un valor teórico de la vaquita menos enriquecidos que el esperado para una especie que se alimenta de varias especies con hábitos diferentes (Hoefs, 2004).

NITRÓGENO ISOTÓPICO: Según los datos arrojados por el modelo de mezcla de fuentes múltiples para los datos teóricos obtenidos de $\delta^{15}\text{N}$ y como se observa en la Figura 6 y 7-B, seis de las 11 especies que se enlistan en la Tabla 6 y 7 forman parte potencial de la dieta de la vaquita. Estas especies presentan hábitos planctívoro en un espécimen, dos a especies carnívoras y 3 a calamares con una talla que varía entre los 22 a 40 cm, como se aprecia en la Figura 2. Es interesante notar que a pesar de que el valor teórico fue obtenido a partir de una especie de anchoveta con hábitos planctívoros como lo es *E. mordax*, únicamente una de las cinco especies de peces planctívoras registradas cae dentro de las presas potenciales de *P. sinus*. A pesar de esto y a partir del modelo de mezcla de fuentes múltiples, se obtiene que la presa primaria de la vaquita son los peces planctívoros (Tabla 10), seguidos de los carnívoros y finalmente como presa secundaria los calamares. En la Figura 6 y 7-B se observa con más claridad que el valor teórico de la vaquita se encuentra dentro de los considerados para un depredador tope.

2). Datos reales obtenidos del análisis isotópico de dentina en *P. sinus*

CARBONO ISOTÓPICO: Como se puede apreciar en la figura 6 y 7-A de acuerdo a la señal de $\delta^{13}\text{C}$ los valores reales de *P. sinus* se mantienen muy alejados de las otras especies de peces y calamares mencionadas, lo cual indica que posiblemente pertenecen a áreas diferentes. Esto se debe en gran parte a que las especies de peces y calamares son especies que ocupan áreas diferentes al área de la vaquita. Para poder pertenecer a esta trama trófica, la vaquita tendría que tener valores significativamente menos enriquecidos, aproximadamente 4.8‰ (Figura 6 y 7 A-B). Éste enriquecimiento en la vaquita está determinado además, por la dinámica propia del sistema que hace que los sedimentos del Gran desierto de Altar y del Delta del río Colorado se acumulen en el lado de Baja California. Los sedimentos se mantienen en una continua resuspensión por las fuertes corrientes (Shumilin *et al.*, 2002). En conjunto con un continuo reciclamiento de materia orgánica isotópicamente enriquecida, como lo menciona Aguíñiga (1999). La relación de los valores isotópicos de la vaquita con las especies de calamares, *D. gigas* la cual fue registrada por Ruiz-Coley *et al.* (2004) para la porción sur del

Golfo de California y *L. opalescens* registrada por Jarman *et al.* (1996) para el Pacífico nororiental, se observa en la figura 7-A, que ambas especies presentan diferencias marcadas con relación a *P. sinus* en la proporción de isótopos estables, a excepción de la muestra marcada con rojo que es distintivamente más empobrecida que el resto de las vaquitas. Mediante estos valores nos damos cuenta de que las especies de calamares provienen de sistemas diferentes y mas empobrecidos al hábitat que ocupa la vaquita. En lo que se refiere a la comparación hecha entre los valores de isótopos estables de $d^{13}C$ en vaquita con relación a diferentes especies de peces provenientes del sur del Golfo de California y Pacífico norte (Figura 7-A), se encontró una situación similar a los calamares con diferencias marcadas, que van de -19.4‰ en *Myctophidae* a -16.5‰ en *H. thrissina* y *H. unifasciatus*, lo cual nos habla de especies de hábitos diferentes. La excepción fue *M. cephalus* con un valor de -11.5‰ . A partir de los resultados observados para $\delta^{13}C$, podemos concluir que ninguna de estas especies a excepción de *M. cephalus* tiene el mismo origen que la vaquita.

NITRÓGENO ISOTÓPICO: Se encontró, como se aprecia en la Figura 6 y 7-A, que las proporciones isotópicas de *P. sinus*, sobre todo en lo que se refiere a los valores de nitrógeno excede por mucho a todas las especies registradas en las Tablas 6 y 7. Dada esta diferencia se considera que ninguna forma parte de su dieta a pesar de reportarse a la vaquita como una especie generalista. Las preferencias alimenticias de la vaquita sobre presas con hábitos diferentes, como lo menciona Pérez-Cortés (1996) podrían explicar en parte el planteamiento anterior. El modelo de mezcla de fuentes múltiples, probablemente nos marca el origen de una trama trófica basada principalmente en aportes heterótrofos más que fitoplanctónicos (Aguíñiga, 1999). En lo que se refiere a la relación entre las proporciones de isótopos estables de $d^{15}N$ entre la vaquita y las dos especies de calamares provenientes del sur del Golfo de California y Pacífico nororiental (Figura 6-A), lo que se pudo apreciar es que ambas especies presentan diferencias marcadas, siendo significativamente más empobrecidos de lo que se esperarían para una presa potencial de vaquita considerando un fraccionamiento de 3 a 3.4‰ (Hobson *et al.*, 1997). Mediante una diferencia aproximada de 6.5‰ a 10.5‰ entre los valores promedio de *D. gigas* y *L. opalescens* respectivamente con relación a los encontrados en los dientes de la vaquita (22.77‰), nos damos cuenta de que ninguna de las especies mencionadas forma parte de su dieta, si el enriquecimiento utilizado es valido para la vaquita. Estas diferencias podrían deberse a que el metabolismo de vaquita origine un mayor enriquecimiento en los tejidos de esta especie, como ya se menciono anteriormente. Encontramos que en las diferentes especies

de peces (Figura 7-A), se presentan valores por debajo de lo esperado para una presa de vaquita, lo que se observa en la diferencia del fraccionamiento de presa a depredador que va de 5.5 a 12.1‰ para $\delta^{15}\text{N}$.

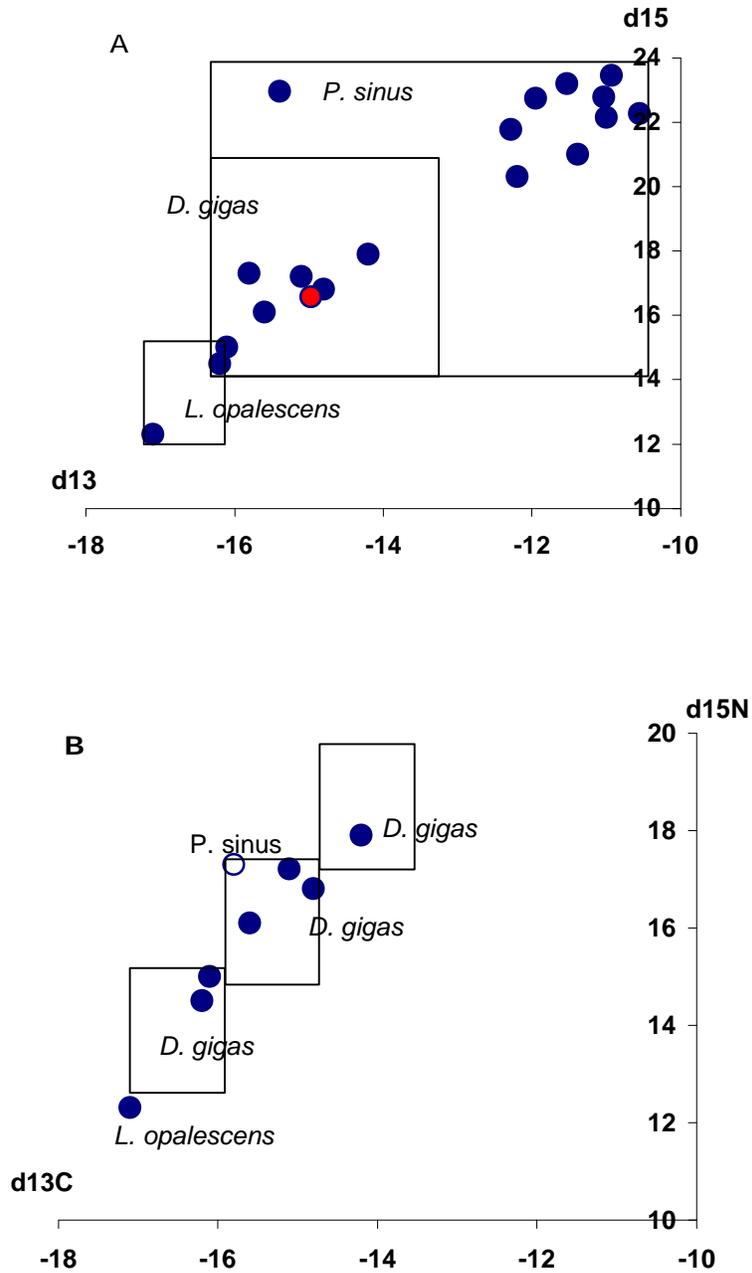


Figura 6: A). Relación de los valores isotópicos reales de vaquita y las dos especies de calamares utilizadas para la comparación del presente estudio. Nótese el valor distintivamente menor del macho señalado con el punto rojo. B). Relación de los valores isotópicos teóricos de vaquita (círculo abierto) y las dos especies de calamares utilizadas para la comparación del presente estudio (círculo sólido). Se pueden observar las diferencias en calamares de diferentes tallas.

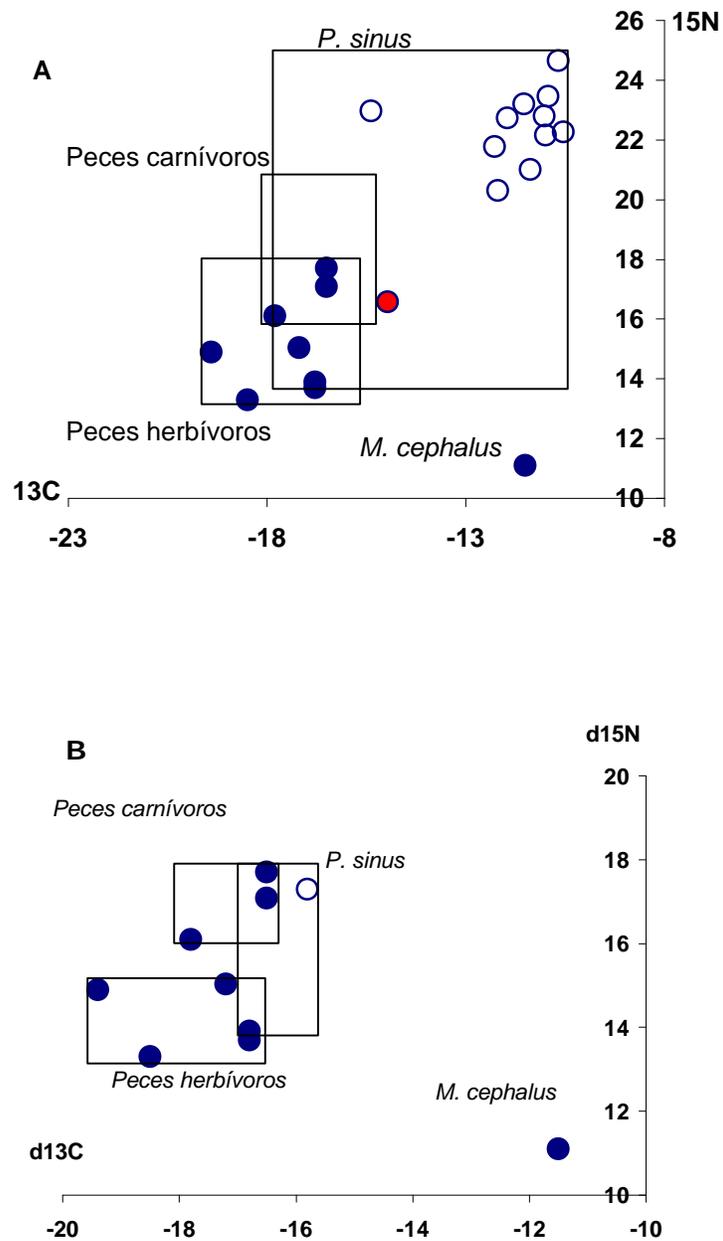


Figura 7: A). Relación de los valores isotópicos reales de vaquita y las especies de peces utilizadas para la comparación del presente estudio. Nótese que en el caso de *M. cephalus* los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son muy cercanos a los de *P. sinus*, pero en el caso de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ se alejan significativamente, lo cual nos habla de orígenes similares, pero *M. cephalus* no forma parte de la dieta de vaquita. Se señala con rojo la vaquita que presenta valores distintivamente menores al resto de las muestras analizadas. B). Relación de los valores isotópicos teóricos de vaquita (círculo abierto) y las especies de peces utilizadas para la comparación del presente estudio (círculo sólido).

Hay que tomar en cuenta que los valores de isótopos estables, sobre todo con relación al $d^{15}N$, excesivamente mayores en la vaquita en comparación con las demás especies que se han comparado en el presente estudio, se deben a un conjunto de factores en su mayoría antropogénicos. De estos factores destacan; la contaminación por fertilizantes de las áreas agrícolas (Hernández- Ayon *et al.*, 1993) y la contaminación de nitrógeno por desechos de granjas de cultivo de camarón (Paez-Osuna *et al.*, 1999), así como la debida al aporte y origen de materia orgánica en el área oeste del Alto Golfo que en conjunto originan el enriquecimiento del medio (Shumalin *et al.*, 2002). Además es importante considerar que las islas, áreas de refugio para varias especies de aves marinas, son ricas en guano proveniente de los desechos de dichas aves y al subir la marea son continuamente deslavadas. Esta acción de las mareas, devuelve este guano rico en $d^{15}N$ al medio acuático enriqueciéndolo isotópicamente (Anderson y Polis, 1999). Se considera que para una especie como la vaquita que se caracteriza por vivir en un sistema cerrado como el Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Álvarez y Jones, 2002), los estudios por realizar en el futuro se deben hacer a partir de muestras de organismos del área que ocupa la especie. Se propone el presente trabajo como una aportación inicial para estudios isotópicos futuros en el Alto Golfo, dado que el conocimiento de la variación espacial y temporal de esta especie utilizando la isotopía estable permitirá comprender mejor su ecología. Además los isótopos estables proveen información trófica básica de gran valor para muchos esfuerzos de conservación.

9. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se concluye que:

Con base en la descripción de la variación de las proporciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en la dentina de *Phocoena sinus* se encontró que la vaquita presenta una variabilidad isotópica característica de los organismos generalistas y un origen predominantemente costero con algunos aportes estuarinos. Además de no observarse un enriquecimiento de madre a cría como en otras especies de mamíferos (probablemente por la escasez de muestras y datos sobre la edad de las crías).

Al determinar la posición trófica de *Phocoena sinus* con base en la proporción isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ en dentina, se encontró que esta especie ocupa un nivel trófico de 4.63, ocupando una jerarquía de depredador tope dentro de su área.

Con base en la generación de un modelo de mezcla de fuentes múltiples hipotético y su comparación con valores reales, se observó que la vaquita presenta proporciones de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ enriquecidas en comparación con las especies provenientes de la porción sur del Golfo de California.

10. REFERENCIAS

Formato de la revista *Marine Mammal Science*

- Abend, A. y Smith, T. 1997. Differences in stable isotope ratios of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ between long-finned pilot whales (*Globicephala melas*) and their primary prey in the western north Atlantic. *Journal of Marine Science*, 54: 500-503.
- Aguíñiga, S. 1999. Geoquímica de la Cuenca Estuarina del Río Colorado: $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y biomarcadores lipídicos en sedimentos superficiales. Tesis de Doctorado. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B. C.
- Álvarez, L. y Jones, S. 2002. Factors influencing suspended sediment flux in the upper Gulf of California, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (2002), 54, 747-759.
- Anderson, W y Polis, G. 1999. Nutrient fluyes from water to land seabirds affect plant nutrient status on Gulf of California Island. *Oecologia*, 118: 324-332.
- Andrews, J., Brimblecombe, P., Jickells, T y Liss, P. 1996. An introductions to environmental Chemistry. Blackwell Science, USA. 1-209 p.
- Barlow, J. 1986. Factors affecting the recovery of *Phocoena sinus*, the vaquita or Gulf of California harbor porpoise. Administrative Report. E.U. National Marine Fisheries Service. La Jolla, California. 19 p.
- Ben-David, M., Flynn, R. W. y Schell, D. M. 1997. Annual and Seasonal Changes in Diet of Martens: Evidence from Stable Isotope Analysis. *Oecologia*, 111: 280-291.
- Brownell, R. 1986. Distribution of the vaquita *Phocoena sinus* in Mexican waters. *Marine Mammal Science*, 2(4): 299-305.
- Burton, R. y Koch, P. 1999. Isotoping tracking of foraging and long- distance migration in northeastern Pacific pinnipeds. *Oecología*, 119: 578-585.
- Camacho-Ibar, V. 1997. Oceanographic and environmental of the Colorado river delta, the vaquita's habitat. División de Geoquímica Ambiental. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California, México. 1-3 p.
- Carriquiry, J y Sánchez, A. 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gula of California alter nearly a century of discharge loss. *Marine Geology*, 158: 125-145.
- Das, K., Holsbeek, J., Browning, U., Siebert, A y Bouquegneau, J. 2004. Trace metal and stable isotope measurements ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) in the harbour porpoise *Phocoena phocoena*

- relicta* from the Black Sea. Environmental Pollution, 131(2):197-204.
- DeNiro, M. y Epstein, S. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42: 495- 506.
- DeNiro, M. y Epstein, S. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animal. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42: 495-506.
- Diario Oficial de la Federación (6 de marzo de 2002). NOM-059-ECOL-2001. Protección ambiental-Especies nativas de México de Flora y fauna silvestres-categoría de riesgo y Especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio- lista de Especies en Riesgo. SEMARNAT. Estados Unidos Mexicanos. <http://www.ine.gob.mx/ueajei/norma59a.html>.
- Díaz-Gamboa, R. 2003. Diferenciación entre tursiones, *Tursiops truncatus*, costeros y oceánicos en el Golfo de California por medio de isótopos estables de carbono y nitrógeno. Tesis de Maestría CICIMAR-IPN. 62 p.
- Ehleringer, J. y Cerling, T. 2002. Stable isotope. The earth system: Biological and ecological dimensions of global environmental change. Encyclopedia of Global Environmental Change, 2: 544-550.
- Findley, L., Nava, J. y Torre, J. 1995. Food habits of *Phocoena sinus* (Cetacea: Phocoenidae). Resúmenes XI Conferencia Bienal Sobre Biología de Los Mamíferos Marinos. E.U. 37 p.
- France, R. L. 1995. Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae : foodweb implication. Marine Ecology Progress Series. 124: 307-312.
- Fry, B. 1988. Food web structure on Georges Bank from stable C, N and S isotopic composition. Limnology Oceanography, 33: 1182-1190.
- Fry, B., Lutes, R. Northam, M., Parker, P y Ogden, J. 1982. A $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Comparison of Food Webs in Caribbean Seagrass Meadows and Coral Reefs. Aquatic Botany, 14: 389-398.
- Gallo-Reynoso, J. P. 1998. La vaquita y su hábitat crítico en el Alto Golfo de California. Gaceta Ecológica 47-29-44. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. 44 p.
- Gaskin, D., Arnold, W. y Blair, B. 1984. *Phocoena phocoena*. Mammalian Species, 42: 1-8.
- Guerrero, E. y Berlanga, M. 2004. Isótopos Estables Fundamento y Aplicaciones. Actualidad. SEM. 30: 17-23.
- Hernández-Ayon, M., Galindo-Bect, S., Flores-Báez, B. y Álvarez-Borrego, S. 1993. Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado river delta. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 37: 593- 602.
- Hirons, A., Schell, D y Finney, B. 2001. Temporal records of d^{13}C and d^{15}N in north Pacific pinnipeds: Inferences regarding environmental change and diet. Oecologia, 129: 591-601.

- Hobson, K. y Welch, H. 1992. Determination of trophic relationship within a high Arctic marine food web using ^{13}C and ^{15}N analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 84: 9-18.
- Hobson, K., Sease, J. y Piatt, J. 1997. Investigating trophic relationship of pinnipeds in Alaska and Washington using stable isotope ratios of nitrogen and carbon. *Marine Mammal Science*, 13: 114-132.
- Hobson, K. y Sease, J. 1998. Stable isotope analyses of thoot annuli reveal temporal dietary records: An example using Steller sea lions. *Marine Mammal Science*, 14 (1): 116-129.
- Hoefs, J. 2004. *Stable Isotope Geochemistry*. 5^a. Ed. Springer. Alemania. 1-28 p.
- Hohn, A., Read, A., Fernández, S., Vidal, O. y Findley, L. 1996. Life history of the vaquita, *Phocoena sinus* (Phocoenidae, Cetacea). *Journal Zoological London*, 239: 235-251.
- Hohn, A. y D'Agrosa, C. 1997. Vaquita conservation. *Current Science and Management*. IBI. Reports 7: 45-56.
- Jarman, W., Hobson, K., Sydeman, W., Bacon, C y McLaren, E. 1996. Influence of trophic position and feeding location on contaminant leves in the Gulf of the Farallones food web related by stable isotope analysis. *Environmental Sciences Technology*, 30(2) : 654-660.
- Jenkins, S., Partridge, S. T., Stephenson, T. R., Farley, S. D y Robbins, C. T. 2001. Nitrogen and carbon isotope fractionation between mothers, neonates and nursing offspring. *Oecologia*, 129: 336-341.
- Kelly, J. 2000. Stable Isotopes of carbon and nitrogen in the study of avian and mammalian trophic ecology. *Canadian Journal of Zoology*, 78: 1-27.
- Lally C y Parsons T. 1993. *Biological oceanography: an introduction*. Pergamon(Ed). Nueva York. 301 p.
- Lesage, V., Hammill, M. y Kovacs, K. 2001. Marine mammals and the comunity structure of the estuary and Gulf of St Lawrence, Canada: Evidence from stable isotope analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 210:203-221.
- Macko, S., Engel, M y Freeman, K. 1998. Variability of ifotope composition in modern and fossil organic matter. *Chemical Geology*. 152: 1.
- Macko, S., Engel, M., Andrusevich, V., Lubec, G., O'Connell, T y Hedges, R. 1999. Documenting the diet in ancient human population through stable isotope analysis of hair. *The Royal Society*. 354: 65-76.
- Magatagan, M., Boyer, E. y Villa-Ramirez, B. 1984. Revisión del estado que guardo *Phocoena sinus* (Norris y McFarland, 1958) y descripción de tres nuevos ejemplares. UNAM. Instituto de Biología. Serie Zoología, 55(1): 271-294.
- Minegawa, M y Wada, E. 1984. Stepwise enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ along food chains: further evidence

- and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 1135- 1140.
- Morales-Zarate, M., Arreguin-Sánchez, F., López-Martínez, J y Lluch-Cota, S. 2004. Ecosystem trophic structure and energy flux in the Northern Gulf of California, México. *Ecological Modelling*, 174: 331-345.
- Muir, D., Segestro, M., Hobson, K., Ford, C., Stewart, R y Olpinski, S. 1995. Can seal eating explain elevated levels of PCBs and organochlorine pesticides in walrus blubber from eastern Hudson Bay (Canada). *Environmental Pollution*, 96: 335-348.
- Newsome, S., Koch, P., Etnier, M y Aurióles-Gamboa, D. 2006. Using carbon and nitrogen isotope values to investigate maternal strategies in northeast Pacific Otariids. *Marine Mammal Science*, 22(3): 556-572.
- Niño-Torres C., Gallo-Reynoso, J. P., Galván-Magaña, F., Escobar-Briones, E. y Macko, S. 2006. Isotopic analysis of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{34}\text{S}$ “a feeding tale” in teeth of the longbeaked common dolphin, *Delphinus capensis*. *Marine Mammal Science*, 22(4): 831-846.
- Norris, K. y Macfarland, G. 1958. A new harbor porpoise of the genus *Phocoena* from the Gulf of California and the Mexican waters. *Journal of Mammalogy*, 39(1): 22-39.
- Odum, E. 1978. *Energy Analysis Energy Quality and Environment*. 295p.
- Ortega-Ortiz, J., Villa-Ramírez, B y Gersenowies, J. 2000. Polydactyly and other features of the manus of the vaquita, *Phocoena sinus*. *Marine Mammal Science*, 16 (2): 277–286.
- Ostrom, P., Lien, J. y Macko, S. 1993. Evaluation of the diet of Sowerby's beaked whale, *Mesoplodon bidens*, based on isotopic comparisons among northwestern Atlantic cetaceans. *Canadian Journal Zoology*, 71: 858-861.
- Páez-Osuna F., Guerrero-Galván S., Ruiz-Fernández A. 1999. Discharge of Nutrients from Shrimp Farming to Coastal Waters of the Gulf of California. *Marine Pollution*, 38 (7): 585-592.
- Pauly, A., Trites, W., Capuli, E y Christensen, V. 1998. Diet composition and trophic levels of marine mammals. *Journal of Marine Science*, 55: 467- 481.
- Peralta, M. 1994. Variación morfométrica con respecto a la edad y al sexo en el cráneo de *Phocoena sinus* (Norris y McFarland, 1958). Tesis de Licenciatura. ENEP Iztacala. UNAM. 63 p.
- Pérez-Cortés, H. 1996. Contribución al conocimiento de la biología de la vaquita *Phocoena sinus*. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. 69 p.
- Peterson, B. y Fry, B. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18: 293-320.

- Pinnegar, J., Jennings, S., O'Brien, C y Polunin, V. 2002. Long-term changes in the trophic level of the Celtic Sea fish community and fish market price distribution. *Journal of Applied Ecology* 39:377–390.
- Rau, G. H., Takahashi, T. y Marais, D. 1989. Latitudinal variations in plankton $\delta^{13}\text{C}$: Implications for CO₂ and productivity in past oceans. *Nature*, 341: 516- 518.
- Rau, G., Ainley, D., Bengtson, J., Torres, J. y Hopkins, T. 1992. $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in Weddell seabirds, seals and fish: implications for diet and trophic structure. *Marine Ecology Progress Series*, 84: 1-8.
- Richards, M. y Hedges, M. 1999. Stable isotope evidence for similarities in the types of marine foods used by late Mesolithic humans at sites along the Atlantic coast of Europe. *Journal of Archeological Science*, 26: 717-722.
- Ruiz-Cooley, R., Gendron, D., Aguíñiga, S., Mesnick, S. y Carriquiry, J. 2004. Trophic relationship between sperm whales and jumbo squid using stable isotopes of C and N. *Marine Ecology Progress Series*, 277: 275-283.
- Sagerup, K., Henriksen, E., Skaare, J y Gabrielsen, G. 2002. Intraspecific variation in trophic feeding levels and organochlorine concentration in Glaucous Gulls (*Larus hyperboreus*) from Bjornoya, the Barents Sea. *Ecotoxicology* 11:119–125.
- Santamaría del Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. y Müller-Krager, E. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*, 99: 7411-7421.
- Schoeninger, M. y DeNiro, M. 1984. Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 625- 639.
- Shumilin, J., Carriquiry, V y Camacho-Ibar, D. 2002. Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California. *Marine Chemistry*, 79 (3): 113-131
- Silber, G. 1990. Occurrence and distribution of the vaquita, *Phocoena sinus*, in the northern Gulf of California. *Fishery Bulletin*, 88: 339-346.
- Silber, G y Norris, K. 1991. Geographic and seasonal distribution of vaquita *Phocoena sinus*. *Anales del Instituto de Biología. UNAM. Serie Zoología*, 62(2): 263-268.
- Silber, G., Newcomer, P., Silber, P., Pérez-Cortes, H. y Ellis, G. 1994. Cetacean of the northern Gulf of California distributions, occurrence and relative abundance. *Marine Mammal Science*, 10(3): 283-298.
- Smith, A. 2001. Source identification in marine ecosystems. Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems. Kluwer Academic

Publishers. Holanda. 219-245 p.

- Squeo, F y Ehleringer, J. 2004. Isótopos estables: Una herramienta común para la ecofisiología animal y vegetal. *Fisiología Ecológica en Plantas. Mecanismos y Respuestas al Estrés en los Ecosistemas*. Eds. Hernán Marino Cabrera. EUV. Valparaiso (Chile). [pp. 59 - 80]
- Steele, K. y Daniel, R. 1978. Stable isotope analysis of human remains: a further complication to the use of variation in the natural abundance of $d^{15}N$ for tracer studies. *Journal of Agricultural Sciences*, 90: 7-9.
- Torre, J. 1995. Descripción del esqueleto dimorfismo sexual y crecimiento alométrico en el cráneo de la vaquita, *Phocoena sinus* (Cetacea: Phocoenidae). Tesis de Maestría. ITESM- Guaymas. México. 181 p.
- Trimble, C. y Macko, S. 1997. Stable isotope analysis of human remains: a tool for cave archaeology. *Journal of Caves and Karst Studies*, 59(3): 137-142.
- Unkovich, M., Pate, J., Mc Neill, A. y Gibbs, D. 2001. Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems. Kluwer Academic Publishers. 1-18 p.
- Vander-Zanden, M. y Rasmussen, J. 2001. Variation in $d^{15}N$ and $d^{13}C$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies. *Limnology and Oceanography*, 46 (8): 2061-2066.
- Valiela, I. 1995. *Marine Ecological processes*. New York. 203-245p.
- Vidal, O., Aguayo, A., Findley, L., Robles, A., Bourillon, L., Vomend, I., Turk, P., Gárate, K., Maronas, L y Rosas, J. 1987. Avistamientos de mamíferos marinos durante el crucero "Guaymas I" en la región superior del Golfo de California, Primavera de 1984. En *Memorias de la X Reunión Internacional sobre Mamíferos Marinos*. Secretaria de Pesca, México, D.F. 7-35 p.
- Vidal, O. 1995. Population biology and incidental mortality of the vaquita, *Phocoena sinus*. *Report International Whaling Commission. Special Issue 16: 247-271.*
- Villa-Ramírez, B. 1993. Concentración de metales pesados en el tejido cardíaco, hepático y renal de la vaquita *Phocoena sinus* (Mammalia: Phocoenidae). *Anales del Instituto de Biología. UNAM. Serie Zoología*, 64(1):61-72.
- Villa-Ramírez, B., Delgado-Estrella, A. y Peralta-Pérez, M. 1995. Aportaciones recientes al conocimiento de la biología y distribución de *Phocoena sinus* (Cetacea: Phocoenidae). *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 46: 163-172.
- Walker, J. y Macko, S. 1999. Dietary studies of marine mammals using stable C y N isotopic ratios of teeth. *Marine Mammal Science*, 15(2):314-334.
- Walker, J., Potter CH. y Macko, S. 1999. The diets of modern and historic bottlenose dolphin

populations reflected through stable isotopes. *Marine Mammal Science*, 15(2): 314-334.