Reporte de Mediciones Acústicas en Laguna San Ignacio
Programa Científico del Ecosistema Laguna San Ignacio
Temporada de Invierno, 2009

Melania Guerra
Candidata a Doctorado
Instituto Scripps de Oceanografía
San Diego, California

INTRODUCCION

Como en años pasados, la agenda del Programa Científico del Ecosistema Laguna San Ignacio (PCELSI) incluyó un proyecto enfocado hacia la acústica de ballena gris. La recolección y el análisis de los datos fueron llevados a cabo por científicos del Instituto Scripps de Oceanografía (SIO) en colaboración con investigadores de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS).

Los objetivos generales de este estudio son:

* Probar el concepto de monitoreo acústico de números relativos en una población, el cual eventualmente, en conjunto con los existentes métodos visuales, proveería un estimado más preciso del tamaño real de la población de mamíferos marinos en la costa de Baja California

* Demostrar la abilidad de realizar localización acústica tridimensional, para identificar aquéllas ballenas grises, al momento que vocalizan en las aguas de la Laguna. La localización pasiva es importante para reconocer al individuo particular que realiza la actividad vocal y relacionarlo con otros comportamientos corporales evidentes. Eventualmente se comprendería cómo distintos comportamientos conllevan tazas de producción vocal correspondientes y se podría inferir conteos absolutos de animales por medio de solamente mediciones acústicas: el primer paso en la idea de un "censo acústico".

* Determinar estadísticamente si existen correlaciones entre específicas vocalizaciones y el grupo demográfico presente (solitarios, madres con cría). Un nuevo instrumento ha sido incorporado en la toma de datos: una marca que se coloca sobre la ballena y graba sus sonidos, proveyendo información sobre su repertorio vocal y la taza de producción de dichas llamadas, al mismo tiempo que el animal marcado es seguido por los investigadores en la superficie.

* Medir la respuesta vocal y de comportamiento de la ballena gris ante la presencia de tráfico de botes, al grabar la aceleración de sus moviemientos en dos ejes, sus vocalizaciones y los niveles de ruido ambiental a su alrededor; grabaciones que permanecen en la memoria de la marca que viaja con el animal.

* Explorar novedosos métodos acústicos de estimación del tamaño del animal, mediante el análisis de la estructura de formantes en las exhalaciones/soplos grabados en la marca. Dichos formantes estarían relacionados con la longitud del tracto vocal y posiblemente con el tamaño absoluto de la ballena.

* Estudiar la contribución cuantitativa del viento y las calles aledañas al ruido ambiente submarino, para obtener una impresión completa de los factores al ambiente acústico existente, antes de que la ruta sea asfaltada y dé accesso a más visitantes.

HORARIO 2009

El Equipo de Acústica realizó dos viajes a Laguna San Ignacio durante la temporada de Invierno 2009: una visita inicial para colocar los Sistemas de Monitoreo de Largo Plazo (SMLP) y una segunda, más extendida expedición, para ampliar los instrumentos SMLP y convertirlos en Estaciones de Monitoreo Pasivo (EMP), marcar ballenas y recuperar todos los instrumentos submarinos.

Melania Guerra arribó a la Laguna el 11 de Febrero y estuvo encargada de supervisar el inventario de su equipo científico, así como de organizar la logística de alquiler de pangas con los campamentos locales. El resto del equipo del primer viaje llegó a Laguna San Ignacio el 13 de Septiembre por vía aérea. Este grupo incluyó a los estudiantes de Scripps: Delphine Mathias, Loren McClenachan y Aurélien Ponte. Ellos llevaron a cabo la construcción de arreglos acústicos horizontales y su instalación en dos ubicaciones y también colocar la estación de viento en los terrenos de Baja Discovery en Punta Piedra, campamento ubicado hacia la boca de la Laguna. El Equipo de Acústica dejó Laguna San Ignacio el 16 de Febrero tras cumplir con todas sus metas.

Una segunda visita se llevó a cabo entre el 13-26 de Marzo. La primera faceta fue recuperar la estación SMLP originalmente colocada hacia el Norte, expandirla a una EMP y re-posicionarla hacia la boca de la Laguna, cerca de PP_SMLP. Una vez que todas las estaciones acústicas submarinas estuvieron en su lugar, Aaron Thode y Melania Guerra lideraron el proyecto de marcar, mientras que otros participantes del Equipo, por ejemplo: Delphine Mathias y Anaid López, asistieron en la panga con tareas como seguir la marca mediante un radio de onda corta, navegación por GPS y tomar notas. En esta etapa del proyecto, la colaboración con el Equipo de Ballena Gris fue fundamental, pues proveyeron consejos sobre navegación en las aguas lagunares, horas de trabajo en su panga y eventualmente, los datos de sus censos visuales. Melania Guerra llevó la temporada a su fin, empacando todos los equipos y regresándolos a San Diego.

INSTRUMENTACION Y METODOLOGIA

Construir la base de datos necesaria para explorar los objetivos propuestos require de tres tecnologías:

1) Instrumentos acústicos autónomos para SMLP y EMP
2) Marca acústica Bio-Probe
3) Sensores meteorológicos: estación fija de medición de viento y sensores submarinos de temperatura

Los instrumentos y los métodos utilizados en la temporada 2009 son casi idénticos a los usados en el 2008. Sus características son detalladas a continuación:

1. Instrumentos acústicos autónomos para SMLP y EMP:

Los instrumentos acústicos autónomos (Figura 1) permiten la grabación extendida y contínua de sonidos, utilizando una frecuencia de muestreo entre 4096Hz y 6250Hz. Adicionalmente, requieren de cuidados de mantenimiento mínimos durante la temporada cubierta. A mediados de Febrero del 2009, dos estaciones/arreglo (una de 1-elemento, otra de 2-elementos) fueron desplegadas para monitorear las tendencias en la taza de producción de llamadas de la ballena gris en Laguna San Ignacio, así como para observar los cambios que ocurren en el ruido ambiente a lo largo de plazos extendidos.

Figura 1.
Instrumento acústico autónomo (con hidrófono) atado a la cuerda de la estación/arreglo

Los SMLP fueron construidos atando una serie de instrumentos acústicos autónomos a una sección de cuerda de polipropileno de 100m y extendiéndola horizontalmente en el fondo de las aguas de la Laguna (Figura 2). Para asegurar esta cuerda al suelo marino, se colocaron dos anclas tipo “Gran Pin” en los extremos. Estas anclas fueron generosamente prestadas por los pangueros y pescadores locales. La configuración mostrada no deja ninguna señal sobre la superficie, por lo que se recupera “pescando” la línea con otra ancla que se arrastra de manera perpendicular, siguiendo los puntos de GPS que se tomaron originalmente al colocarla en su lugar. En el caso que las fuertes corrientes y mareas desplacen el equipo lejos de su posición original, se cuenta con un elemento activo que responde al ser acústicamente interrogado y regresa un estimado del rango donde se ubica el SMLP.

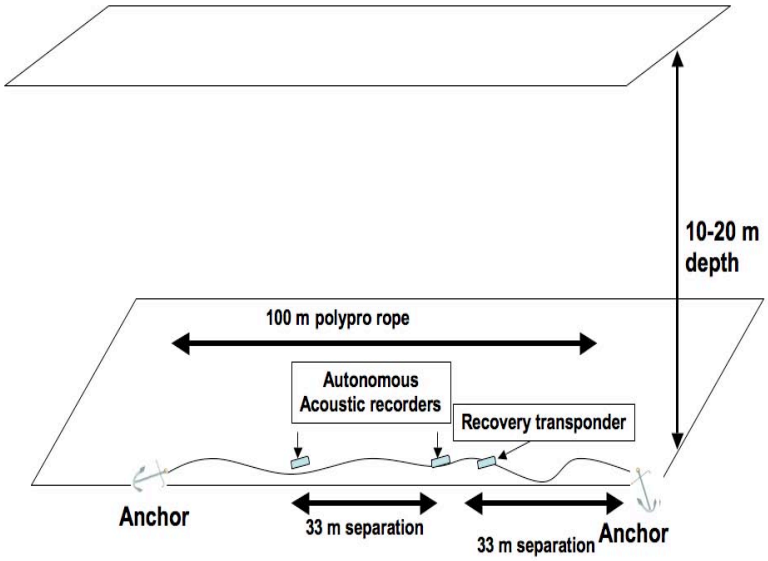

Figura 2.
Configuración horizontal de las estaciones colocadas en el fondo: Sistema de Monitoreo de Largo Plazo (SMLP) y Estación de Monitoreo Pasivo (EMP)

En el 2009 dos SMLP fueron colocados en las secciones Norte (accesible solo a investigadores) y Sur (área de turismo de observación de ballenas) de la Laguna. Las posiciones aproximadas de ambos SMLP se muestran en la Figura 3 y coordenadas de GPS más exactas se encuentran tabuladas en el Apéndice I.

El SMLP colocado hacia el Norte, en la intesección entre Isla Pelícanos y el vecindario La Base, se denominó "Laguna_Norte_SMLP" (LN_SMLP). Dicha estación contiene solamente un elemento de grabación y se situó bajo una columna de agua de 5m de profundidad, sobre un fondo de sedimento arenoso/arcilloso. El propósito de colocar este SMLP es el de recolectar vocalizaciones producidas por las ballenas que atraviesan el profundo canal central hacia las aguas someras del Extremo Norte. Así mismo, esta ubicación permite monitorear los niveles base del ruido ambiente en áreas próximas a la calle principal que viene del pueblo de San Ignacio. Dados planes futuros de asfaltar esta ruta de acceso, posiblemente aumentando el flujo de tráfico, es importante conocer cuánto ruido causado por los autos penetra a las aguas de la Laguna en la actualidad y predecir cuáles serían las consecuencias de incrementar dicha contribución.

La estación ubicada hacia el Sur de la Laguna se llamó "Punta Piedra_SMLP" (PP_SMLP) y su colocación se mantuvo compatible con el lugar donde, en años pasados, el Equipo de Acústica del PCELSI ha hecho mediciones, así como también fue el lugar donde Marilyn Dahlheim realizó sus mediciones acústicas históricas en los años '80. PP_SMLP es un arreglo horizontal de dos-elementos.

Durante el segundo viaje del Equipo a la Laguna, en un período de dos semanas (13-26 Marzo, 2009), las estaciones acústicas LN_SMLP y PP_SMLP fueron utilizadas como EMP para demonstrar la habilidad de localizar animales pasivamente en 2 y 3 dimensiones. LN_SMLP fue recobrado del Extremo Norte el 13 de Marzo y en el laboratorio se hicieron copias de los datos grabados hasta la fecha. Este instrumento,

junto con un segundo grabador acústico autónomo se convirtieron en los dos elementos de la sección horizontal de una EMP (configurada como en la Figura 2) colocada hacia la boca de la Laguna, directamente frente a PP_SMLP (Figura 3). Simultáneamente, un arreglo vertical de ocho elementos fue configurado como extensión vertical de dicha estación. Los componentes verticales examinarán la estructura de las pérdidas acústicas por transmisión, al comparar los niveles de sonido recibidos a diferentes profundidades. Estos instrumentos grabaron a una frecuencia de muestreo de 4kHz y 6kHz.

PP_SMLP fue dejada en la posición y configuración original, pues ya poseía dos elementos y por ello, sus datos pueden ser utilizados para realizar localización acústica pasiva.

El mayor reto de este proyecto es el de encontrar mediciones independientes para sincronizar y calibrar los elementos de los arreglos y para verificar las posiciones resultantes. La primera opción es utilizar el ruido del motor de las pangas para rastrear su ubicación y comparar los resultados con los records de GPS tomados a bordo del bote. El segundo método es marcar ballenas y seguirlas sobre la superficie. Esta metodología, propuesta en detalle a continuación, incorpora el segundo tipo de tecnología: las marcas Bio-probe.

En resumen, los resultados de esta sección revelarían, entre otras cosas, qué tan lejos puede viajar una llamada de ballena gris en Laguna San Ignacio, por ende, a qué distancias se pueden comunicar y así aprenderíamos sobre las propiedades físicas de propagación que dominan este ambiente submarino.

Figura 3.
Mapa de Laguna San Ignacio y ubicación de los instrumentos

2. Marca Acústica Bio-Probe

Durante la semana del 15-21 de Marzo, una vez que todas las EMP estuvieron colocadas, el Equipo de Acústica marcó ballenas grises utilizando la marca Bio-Probe. Este aparato, diseñado y construido por Bill Burgess (www.greeneridge.com) graba datos de sonido, de profundidad y de orientación del animal, mientras viaja colocado sobre su lomo sostenido mediante chupones de succión. Las otras partes del conjunto incluyen una unidad de flotación y un transmisor de radio-frecuencia, los cuales permiten que el animal sea seguido cuando está en la superficie y eventualmente, al desprenderse, que la marca sea recuperada. Es escencial que la marca sea recobrada, pues los datos se descargan a la computadora directamente desde la memoria del instrumento.

Esta novedosa técnica de toma de datos fue probada por primera vez en ballena gris en Laguna San Ignacio en el 2008 por los investigadores del Equipo de Acústica del PCELSI. Sin embargo, otros grupos científicos, como Cascadia Research Collective han marcado exitosamente a otras especies de ballena por ejemplo: azules, jorobadas y cachalotes. Dada la naturaleza amistosa de la ballena gris en la Laguna y cómo estan ampliamente acostumbradas a la interacción con botes y humanos, aproximarse a esta especie probó ser más sencillo, directo y eficiente. Siempre y cuando las ballenas no mostraran señales de estrés o evasión por el acercamiento, la marca se colocó en el área dorsal utilizando un tubo telescópico de 5m. Una secuencia de fotografías del marcamiento de una ballena gris se puede observar en las Figuras 4,5 y 6 y una lista de las marcas colocadas exitosamente se resume en la tabla del Apéndice II.

Siguiendo la marca por medio del transmisor de radio-frecuencia y estableciendo ángulos relativos al bote, es posible determinar las posiciones aproximadas de la ballena, lo cual proveería una verificación independiente a la localización tridimensional lograda por medios únicamente acústicos (por medio de las EMP). La marca permite también la grabación de sonidos y así, un mejor entendimiento estadístico de la taza de producción de llamadas realizadas por estos animales bajo diferentes condiciones de comportamiento, medidos por la información de presión y aceleración. Es así también como se puede medir cuantitativamente la reacción de los animales ante la presencia de pangas.

La tripulación de la panga para marcar generalmente incluyó un panguero, una segunda persona a cargo de marcar, un navegador de GPS tomando notas y una última persona siguiendo la marca con la antena o tomando fotografías, las cuales son importantes para calibrar los ejes de aceleración del instrumento. La ballena marcada fue seguida por la panga en la superficie hasta que se recuperó el instrumento (excepto en el caso de marcas que pasaron la noche todavía colocadas), por lo que solo un individuo se marcó a la vez.

Figura 4.
Marca Bio-Probe unida a la boya (color naranja) y los chupones de succión (círculos blancos) al final del tubo utilizado para colocarla sobre la ballena

Figura 5.
Marca colocada sobre el flanco dorsal izquierdo de una ballena gris adulta

Figura 6.
Marca Bio-Probe colocada sobre una ballena gris adulta en Laguna San Ignacio

3. Sensores meteorológicos: estación fija de medición de viento y sensores submarinos de temperatura

Los cambios bruscos en el clima pueden tener un gran impacto en al ruido ambiente submarino. Los fuertes vientos del desierto, prevalentes en esta área, contribuyen a crear olas sobre la superficie de las aguas lagunares y consecuentemente forman burbujas, las cuales resuenan y aumentan el ruido submarino. Por ello, se colocó una estación fija de medición (sensor: HOBO S-WCA_M003) en los terrenos de Punta Piedra. Este instrumento cual graba la dirección y la velocidad del viento (Figura 3, Figura 7 y Tabla 1). Investigando la correlación entre las características del viento y el ruido ambiental submarino (promediado en largas escalas) se puede estimar si existe tal relación de causalidad. Para cuantificar el viento se recurre al promedio de ruido ambiental medido por una métrica llamada Nivel de Exposición al Ruido (SEL, por sus siglas en Inglés). Si existiese una correlación positiva entre el viento y el ruido ambiental, se estudiaría si la dirección del viento puede ser inferida por las características del ruido.

Figura 7.
Estación HOBO de medición de viento colocada en Punta Piedra

Una segunda variable meteorológica que afecta la propagación acústica bajo el agua es la temperatura, pues ella determina la velocidad del sonido. El sensor llamado Stowaway "Tidbit" está diseñado para medir y documentar la temperatura del agua,

protegido por un plástico contra-agua que tolera altas presiones (hasta 300m). El sensor tiene además batería para darle una vida útil de 5 años y una luz LED para monitorear su apropiado funcionamiento (Figura 8). Los sensores "Tidbits" fueron colocados en las cuerdas de ambas estaciones de SMLP, grabando la temperatura del agua en el fondo a lo largo de un plazo de varias semanas consecutivas. Estos sensores se utilizaron también en las EMP para medir variaciones en temperatura en la estructura vertical de la columna de agua a diferentes profundidades.

Figura 8.
Sensor "Tidbits" de temperatura del agua

BASE DE DATOS 2009

Generosamente, los miembros del Equipo de Ballena Gris del PCELSI, dieron acceso a los datos de sus censos visuales. La Figura 9 presenta los resultados de los conteos de ballena gris adulta durante la temporada 2009, graficados para diferentes zonas de la Laguna en curvas de distintos colores. Las líneas punteadas verticales definen la duración del proyecto de acústica.

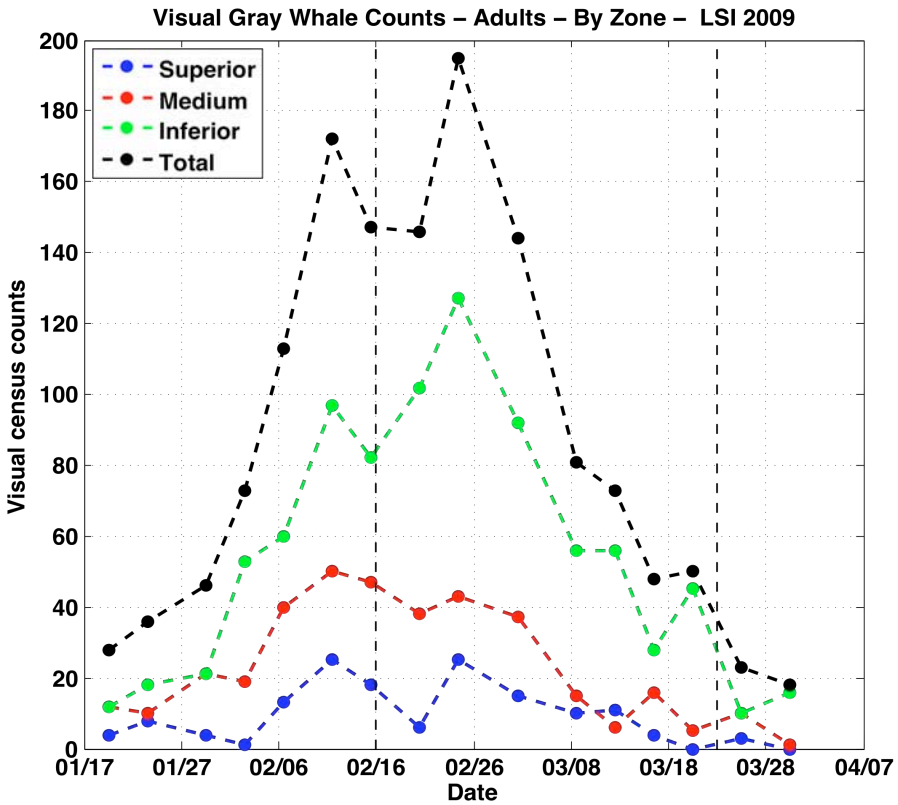

Figura 9.
Censos visuales de ballena gris en Laguna San Ignacio y duración del proyecto de acústica – Temporada invernal 2009

Los conteos visuales indican que el máximo de animales presentes se alcanzó hacia finales de Febrero y que la mayoría de éstos se concentraron en la Zona Inferior de la Laguna (curva verde). Esta región es la misma donde se encontraban desplegados los instrumentos acústicos.

La estación de viento generó 41 días de información sobre la velocidad y la dirección del viento. La Figura 10 muestra la existencia de fluctuaciones diarias en la velocidad del viento, alcanzando máximos de 15m/s, posiblemente causados por las variaciones en temperatura del terreno desértico a diferentes horas del día.

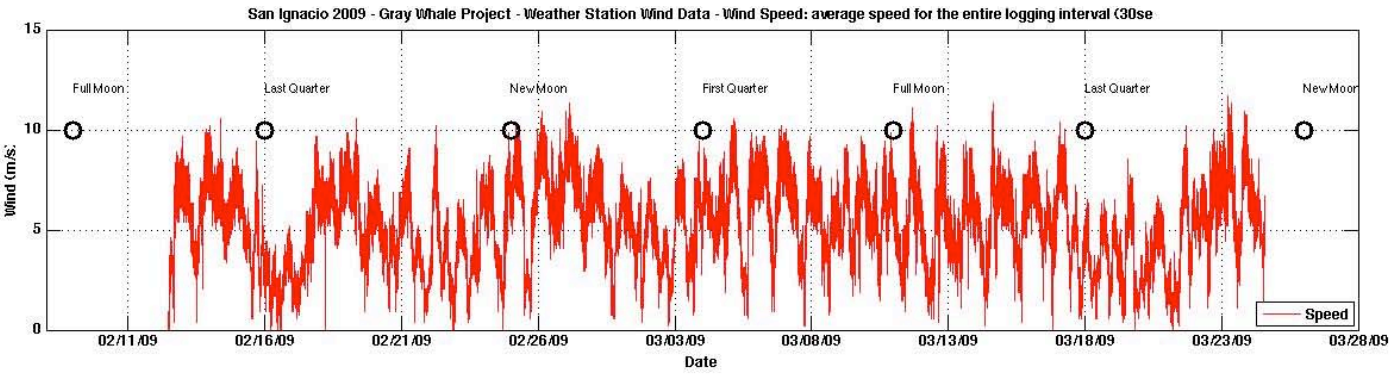

Figura 10.
Mediciones de velocidad del viento en Laguna San Ignacio (medido en Punta Piedra) y faces de la Luna – Temporada invernal 2009

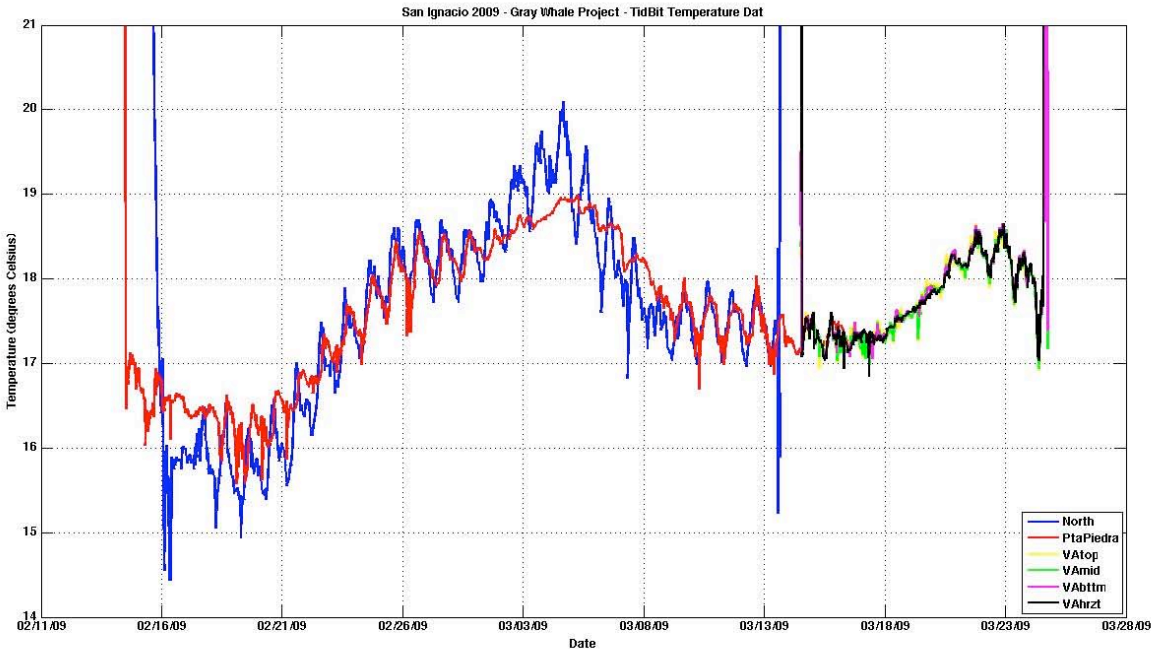

Figura 11.
Record de temperatura del agua en la Laguna (SMLP y EMP) – Temporada invernal 2009

Los sensores Tidbits recolectaron datos de temperatura exitosamente en las siguientes estaciones: PP_SMLP, LN_SMLP y EMP (Figura 11). Los datos de larga escala temporal (PP_SMLP y LN_SMLP) muestran oscilaciones diurnas sobre una tendencia principal hacia aguas más calientes, conforme avanza el tiempo. La

temperatura pico hacia el Extremo Norte de la Laguna (aguas someras) alcanzó los 20°C el 5 de Marzo, mientras que la temperatura máxima hacia la boca de la Laguna fue un grado más fría, posiblemente debido a una mayor influencia de las mareas que mezclan la columna de agua. La estructura vertical de temperatura en la estación EMP muestra pocas variaciones a diferentes profundidades como se demuestra en las cuatro curvas sobrepuestas hacia el final del mes de Marzo.

RESULTADOS PRELIMINARES 2008

Las grabaciones acústicas del 2008 se analizaron manualmente para inspeccionar muestras aleatorias de 2 horas de duración, en búsqueda de vocalizaciones tipo S1 de ballena gris. La figura 12 presenta el espectrograma de una llamada S1, illustrando el contenido de energía de la vocalización a diferentes frecuencias como función del tiempo.

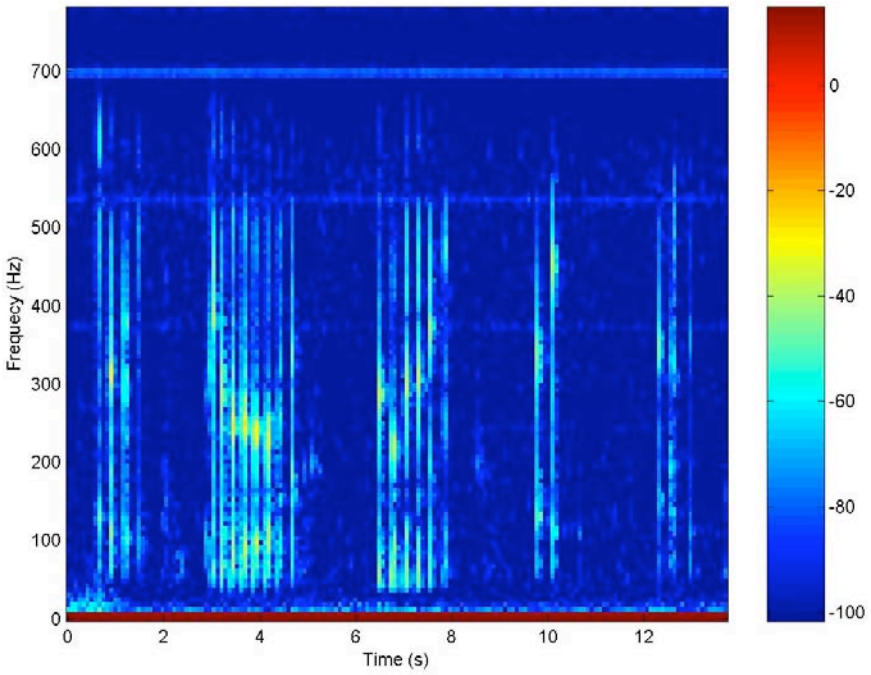

Figura 12.
Espectrograma de llamada tipo S1 de ballena gris en Laguna San Ignacio

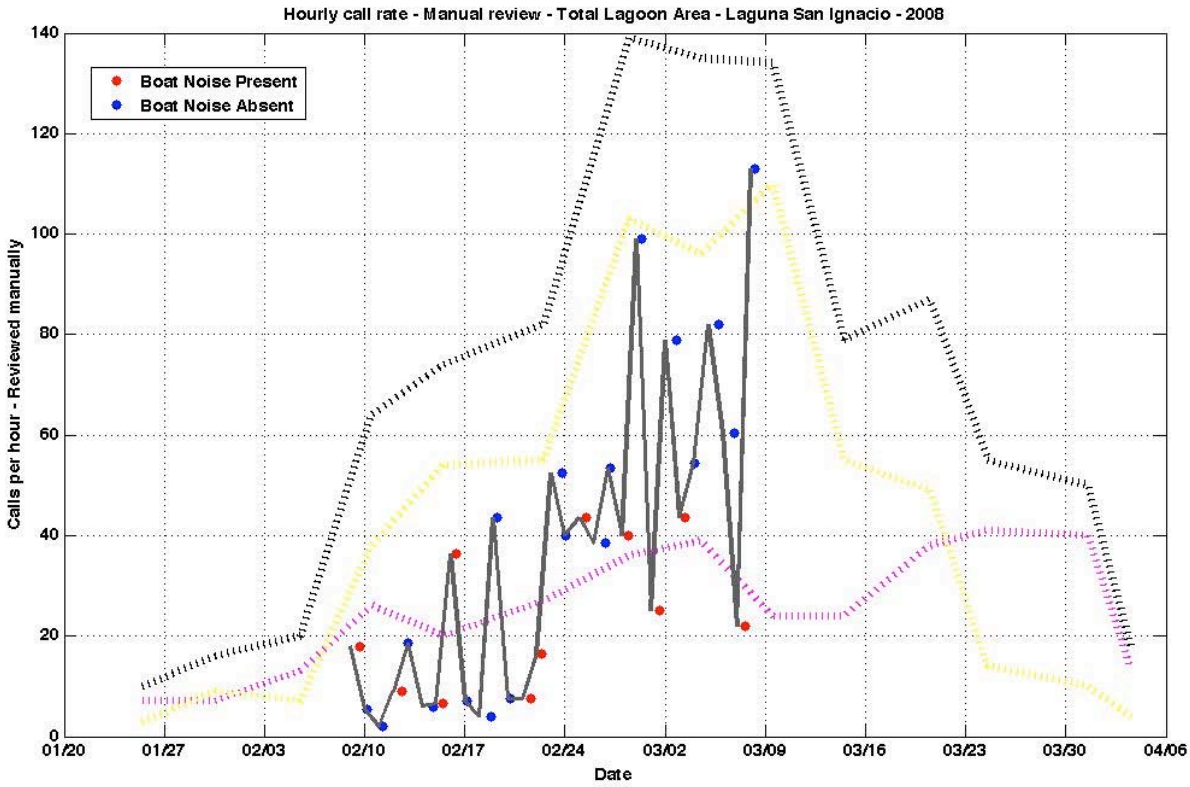

Figura 13.
Tazas de vocacalización de ballena gris por hora y censos visuales – Temporada invernal 2008

Con los datos acústicos del 2008 analizados, se calcularon las tazas de llamadas por hora y éstas fueron comparadas con los datos de censos visuales (Figure 13). La conclusión preliminar es que las tazas de llamadas por hora muestran concordancia con la tendencia observada en los conteos visuales. La taza de llamadas incrementa conforme el mes de Febrero progresa y el máximo coincide con las fechas en que se midieron más animales en la Laguna, lo cual fue a principios de Marzo. De particular interés es la observación demográfica que el pico de llamados corresponde al máximo en presencia de ballenas solitarias (curva amarilla en la Figura 13), sugiriendo que esta llamada específica (S1) serviría una función reproductiva. Se investigó también si el período de 2 horas analizado, de donde se extrajeron las llamadas, contenía ruido producido por botes. Como era esperado, es aparente que los estimados más bajos en tazas de producción vocal son capturados cuando hay presencia de botes, pues están potencialmente "enmascarando" las vocalizaciones.

La Figura 14 presenta las mediciones de viento tomadas desde Punta Piedra en el 2008, graficadas en conjunto con los niveles de ruido ambiente promediado en largas escalas (SEL) calculado mediante la integración a diferentes rangos de frecuencia. El ruido ambiente a bajas frecuencias (50-300Hz) parece exhibir los niveles más altos y la mayor variabilidad, pero también presenta la mejor correspondencia con los ciclos del

viento. Esta concordancia podría ser potencialmente traducida en métodos de predicción del ruido ambiente submarino y en una nueva métrica que cuantifique el nivel de "enmascaramiento" que sufren los sonidos biológicos al propagarse por estas aguas.

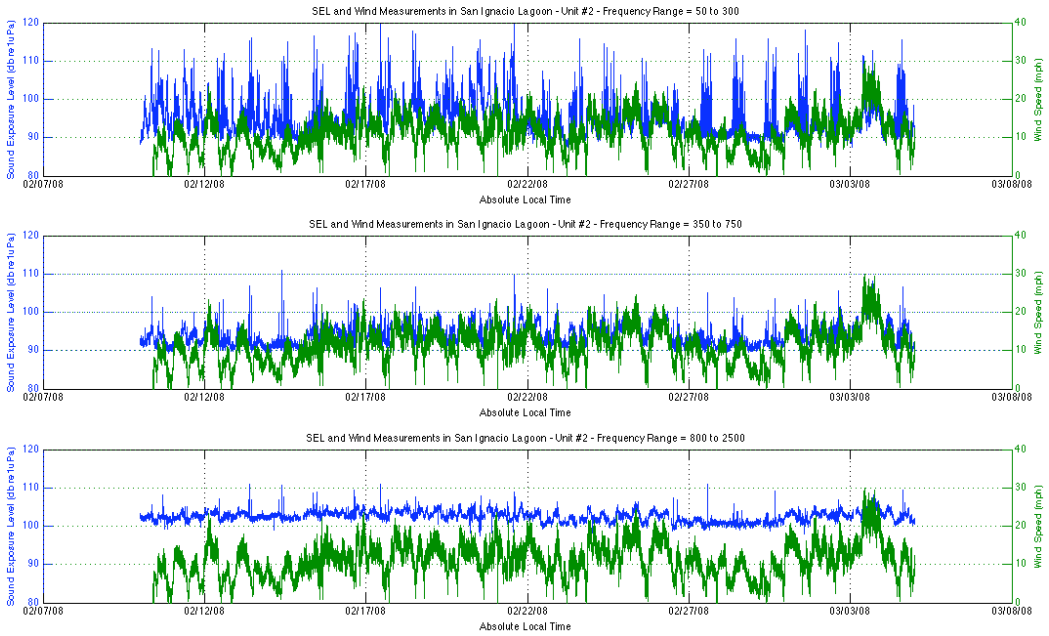

Figura 14.
Niveles de ruido ambiente promediados a larga escala (SEL), integrados en tres rangos de frecuencia versus mediciones de velocidad del viento – Temporada invernal 2008
a) 50-300Hz; b) 350-750Hz; c) 800-2500Hz.

AGRADECIMIENTOS

El Equipo de Acústica del PCELSI quisiera agradecer a sus directores Steven Swartz y Jorge Urbán por incluir nuestro estudio bajo el permiso de trabajo #09398 de la temporada 2009 emitido el 16 de Diciembre, 2008 por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Este trabajo fue financiado por las fundaciones Ocean Foundation y Pacific Life Foundation. Agradecemos a todos los participantes y voluntarios: Delphine Mathias, Aurélien Ponte, Loren McClenachan, Héctor Pérez, Anaid López, Mauricio Nájera, Sergio Martínez y demós colaboradores de la UABCS. Este proyecto no podría haber sido posible sin la asistencia generosa de Celia y Art Condit, quienes transportaron una gran fracción de nuestros equipos científicos a bordo del bote F/V Searcher. Similarmente, muchas gracias a los pilotos Eddie Kisfaludy y Natasha Stenbock por permitirnos usar sus servicios de vuelo para viajar entre San Diego y San Ignacio. Un gran agradecimiento a todo el personal de Ecoturismo Kuyimá por proveernos de acomodaciones, comidas y servicios de botes. En particular, reconocemos la ayuda de los siguientes pangueros por prestar sus servicios de navegación y proveer sus anclas a nuestro experimento: Ramiro, Jonás, Luis, Domingo, Chavalo, Chícharo, Gaby, Max y Ramón. Gracias a Karen Ivey y Jose Luis Zúñiga de Baja Discovery por permitirnos colocar la estación de viento en su terreno. Finalmente, gracias a Eric Terrill (Scripps), por proveernos temporalmente de un instrumento OAR.

APENDICE I

Tabla 1: Datos recopilados por el Equipo de Acústica en el 2009

	Monitoreo de Largo Plazo (SMLP)		Monitoreo Acústico Pasivo EMP		Condiciones meteorológicas	
	Estación LN_SMLP	**Estación PP_SMLP**	**Estación EMP**	**Marcas Bprobe**	**Sensores TidBits**	**Estación Viento**
Ubicación	26°53.665’ 113°10.948’	26°47.658’ 113°14.645’	26°46.844’ 113°15.395’	Area de turismo de observación	NL_LTM PP_LTM PAT	26°47.249’ 113°14.636’
Profundidad (m) *	4.8	11.3	18.9	N/A	@NL = 4.8 @PP = 11.3 @PAT = 7 / 8.2 / 9.4 / 18.9	N/A
Colocación	16/02/09	14/02/09	14/03/09	Inicio 01/03/08	16/02/09 14/02/09 14/03/09	12/02/09
Recuperación	13/03/09	23/03/09	23/03/09	Fin 08/03/08	03/13/09 03/13/09 ** 03/23/09	25/03/09
Frecuencia Muestr. (Hz)	6250	6250	4096 6250	4096	1 muestra/30seg	0.1
Días muestreados	29	35	10	Ver Tabla 2	29 31 10	41

* A la hora de la colocación, sujeto a cambios mareales.
** Memoria llena

APENDICE II

Tabla 2: Datos recolectados por la marca Bio-Probe en el 2009

Fecha	Grupo Demográfico	Duración
15/03/2009	(apareo) solitario	1hr
15/03/2009	(amigable) cría	30min
16/03/2009	cría	6hrs
17/03/2009	madre	5hrs
18/03/2009	madre	5hrs
20/03/2009	cría	1hr
21/03/2009	madre	2hrs