
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA



**ESTIMACIÓN DE ABUNDANCIA DE LA VAQUITA
(*Phocoena sinus*): PRIMER PASO HACIA SU
RECUPERACIÓN**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA**

ARMANDO MARTÍN JARAMILLO LEGORRETA

ENSENADA, B.C., JUNIO DE 1999

A mi madre, la chispa que me permitió llegar hasta aquí, mi linda jefecita

A Edws, mi eterna y amada compañera, por siempre mi GusGus

A Keka e Iván, mi gordita y mi chaparrito, realmente una razón por la cual despertar

A mis queridísimos Pamino, Tía Bertha y Berthita, porque siempre, siempre están ahí

A mi Tía Lipa, mi segunda madre, la fortaleza hecha mujer

A mi Padre, ejemplo de profesionalismo

Los observadores norteamericanos y mexicanos, que laboraron durante el crucero, aportaron muchas horas de esfuerzo buscando a las enigmáticas y escurridizas vaquitas. Sin su apoyo, sobre todo de los que se la rifaron a bordo del BIP, hubiera sido difícil completar el trabajo, dados los varios “eventos” gástricos y marítimos por los que pasamos. José Luis Rivera del CRIP, nuestro “capi”, fue la clave para navegar adecuadamente a través de los transectos.

Las autoridades de Capitanía de Puerto, SEMARNAP y SEGOB en San Felipe, estuvieron siempre atentos a prestarnos apoyo, de manera que el crucero no se detuviera por cuestiones administrativas. El “Paceño” y los propietarios de buques turísticos en el mismo puerto nos brindaron una valiosa ayuda para conseguir un ancla, la cual perdimos durante alguna de las operaciones.

Los voluntarios de la Cruz Roja y Bomberos de San Felipe fueron altamente eficientes en rescatarme del barco al cual caí “accidentalmente”. El personal del ISSSTE en Mexicali fue muy amable con mi persona, desde enfermeras hasta personal directivo del hospital. El Dr. Landeros, afamado neurocirujano, reconstruyó mi tercera vértebra lumbar. Gracias a su precisión ahora ando todavía en “Dodge”.

El CONACyT me otorgó la beca 93214. Especialmente quiero agradecer a la institución por haberme extendido la beca médica con la que se cubrió parte de los gastos generados por la operación de columna.

Agradezco infinitamente a mi esposa Edwyna, junto con quien brego en esto de la ciencia. Entre los dos cuidamos a un par de “saiyayines”, lo cual a veces se torna una tarea poco menos que imposible. Pero ahí le damos y siempre juntos hemos salido adelante. Para ella mis infinitas gracias y todo mi amor.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

ESTIMACIÓN DE ABUNDANCIA DE LA VAQUITA (*Phocoena sinus*):
PRIMER PASO HACIA SU RECUPERACIÓN

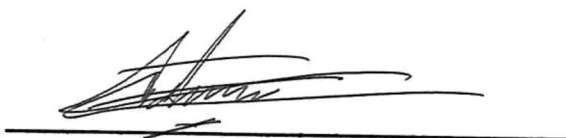
TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

Aprobada por:



Dr. Timothy Gerrodette

Director de Tesis



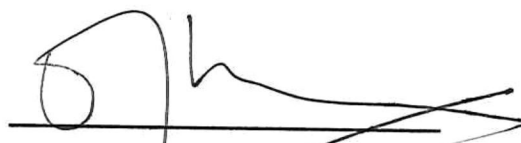
Dr. Eduardo Santamaría del Ángel

Sinodal



Dr. Jorge de la Rosa Velez

Sinodal



Dr. Lorenzo Rojas Bracho

Sinodal

RESUMEN

La vaquita (*Phocoena sinus*) es el único cetáceo endémico en aguas mexicanas. Se distribuye en la porción norte del Golfo de California (Alto Golfo). La vaquita ha sido capturada incidentalmente, durante este siglo, en redes agalleras usadas para la pesca de totoaba, tiburón, curvina, camarón, etc. Al inicio de los años 90 la comunidad científica se preocupó realmente por el estado poblacional de la vaquita. Esta especie está listada en peligro de extinción en el Red Data Book de IUCN, así como también por el CITES y por la Norma Oficial Mexicana. En 1997 el Gobierno de México, preocupado por la situación de la vaquita, conformó el Comité Internacional para la Recuperación de la Vaquita (CIRVA). En el seno de la primera reunión de este comité se analizó el estatus actual de la población de vaquita. El comité acordó que la pesca incidental es el mayor riesgo para esta especie y que era necesario iniciar las acciones adecuadas para disminuirla. El CIRVA recomendó también obtener a la brevedad posible una estimación de la abundancia, de manera que se contara con un elemento cuantitativo más preciso para establecer las acciones de recuperación. Durante agosto y septiembre de 1997 se efectuó un crucero específico para estimar la abundancia, de acuerdo a las recomendaciones dadas por el CIRVA. Estas incluían utilizar el método de transecto lineal, utilizar tres embarcaciones para cubrir toda el área potencial de distribución de esta especie, estimar todos los parámetros del modelo con datos generados específicamente para esta estimación. El crucero fue realizado en cooperación entre los gobiernos de México y Estados Unidos. El segundo aportó el buque David Starr Jordan (DSJ) y el primero el Buque de Investigación Pesquera XI (BIP) y una panga adecuada para navegar aguas muy someras. Se recorrieron 3,364 Km y se detectaron 122 grupos de vaquitas. El área fue preestratificada de acuerdo al conocimiento previo de la distribución. Todos los grupos fueron detectados en el Área Núcleo y en la porción noroeste del Área Somera. Para estimar las distancias radiales se diseñó un algoritmo que toma en cuenta la curvatura terrestre. Se analizaron algunos posibles sesgos al modelo, entre estos la homogeneidad del muestreo respecto a las condiciones del mar (Beaufort). También se analizó el movimiento de los grupos respecto al barco, para detectar si este influyó en el desplazamiento de las vaquitas. Sólo se incluyó en el análisis a los transectos navegados entre Beaufort 0 y 2. El análisis de movimientos indicó que los grupos no ven afectado su desplazamiento a una distancia radial de 913 m o superior, de tal forma que sólo se incluyeron en el análisis aquellos grupos detectados por primera ocasión a distancias radiales superiores a 913 m. A bordo del David Starr Jordan se aplicó un diseño de plataformas independientes para estimar $g(0)$. Se estimó que la probabilidad de detectar grupos en la línea de curso del barco fue de 0.571 (CV=0.33). Los componentes probabilísticos del modelo para el BIP se estimaron a partir de la densidad estimada por el DSJ en el Área Núcleo. Para el BIP fueron diseñados, *a priori*, algunos transectos en el Área Núcleo para cumplir con este cometido. En total se estima que en 1997 habitaban el Alto Golfo 567 vaquitas (CV=0.51). El intervalo de confianza al 95% se halla entre 177 y 1,073 vaquitas. Las medidas de variabilidad fueron estimadas usando un procedimiento bootstrap. Se generaron 2,000 replicas durante el proceso y el intervalo de confianza se construyó en base a los percentiles de la distribución de los 2,000 valores generados. Los percentiles fueron corregidos con el procedimiento BC_a (Bias Corrected and accelerated) para compensar por diferencias entre el valor promedio bootstrap y la estimación puntual. La población muestra una distribución restringida a un espacio relativamente pequeño, aunque esta puede variar estacionalmente. Hay indicios de que las actividades de embarcaciones camaroneras pueden agregar a la población, lo que puede resultar en un alto riesgo de mortalidad en un pequeño lapso, dada la concentración de redes operando en las mismas áreas.

ABSTRACT

The vaquita (*Phocoena sinus*) is the only endemic cetacean in Mexican waters. It is distributed in the northern most portion of the Gulf of California. The vaquita has been bycaught, along this century, in different gillnets used for several local fisheries. During the last two decades, the scientific community has been deeply worried about the vaquita population survival. The species was classified as critically endangered by IUCN and was listed in Appendix D by CITES. The Norma Oficial Mexicana consider vaquita as in danger of extinction. In 1997, the Mexican Government concerned with the status of vaquita, constituted the International Committee for the Recovery of Vaquita (CIRVA in Spanish). During its first meeting, this committee analyzed the current risk factors affecting the vaquita. CIRVA concluded that bycatch is the most important risk factor affecting the survive of vaquita and noted that actions must be taken immediately to mitigate it. CIRVA recommended obtain, as soon as possible, a new abundance estimate. This survey would allow to base future recovery procedures on more accurate quantitative basis. During August and September of 1997 a specific survey designed to estimate vaquita abundance was carried out, following recommendations agreed by CIRVA. These recommendations include: apply distance sampling methodology, cover the whole potential distribution area of vaquita using two vessels, and estimate all parameters of the model internal to the survey. The survey was performed under the cooperative efforts of the Mexico and U.S.A. governments. The vessels used were R.V. David Starr Jordan (DSJ), Buque de Investigación Pesquera XI (BIP) and a fiber glass skiff boat adequate to navigate on extremely shallow waters. During the cruise 3,364 Km were surveyed and 122 vaquita groups were detected. The study area was pre-stratified in accordance to previous knowledge of vaquita distribution. All vaquita groups were detected in the Cora Area stratum and in the northwest portion of the Shallow Area stratum. To estimate the radial distances an algorithm was designed to account for terrestrial curvature. Potential biases to the model were analyzed. One was the homogeneity of the sample in relation to the Sea State (Beaufort scale). In addition, the movement reaction of vaquita groups, as a response to the presence of the ship, was also analyzed. Because of these analyses, only transects surveyed under 0-2 Beaufort conditions were included in the analysis. The movement analysis indicated that vaquita groups were not disturbed at distances farther than 913 m. Therefore only the sightings first detected farther away from 913 m were considered. Aboard DSJ an independent team designed was carried out in order to estimate $g(0)$. The probability to detect groups in the line was 0.571 (C.V.=0.33). The probabilistic parameters of the model for BIP were estimated based on computed density in the Core Area by DSJ. In order to accomplish this, transect lines were designed for BIP, *a priori*, to be navigated in the Core Area. It was estimated that 567 vaquitas were inhabiting the Upper Gulf in 1997 (C.V.=0.51, 95% C.I. 177-1,073 vaquitas). The measures of variability were computed using bootstrap. A sample of 2,000 replicates was generated, including all the required parameters. The confidence interval for any parameter, including overall abundance, was constructed from the percentiles of the 2,000 replicates. The normal 2.5 and 97.5% percentiles of a 95% CI were corrected with the BC_a (Bias Corrected and accelerated) procedure, in order to account for difference between point estimate and bootstrap average. The distribution is likely to be restricted to a relatively small area, although it can shift seasonally. There is evidence that activities of shrimp fishing boats can provoke some aggregation of vaquita groups. This behavior can makes the population vulnerable to a single large mortality event, due to the presence of gill nets operating in the same area.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
APROBACIÓN	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
TABLA DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
INTRODUCCIÓN	0
ÁREA DE ESTUDIO	5
MÉTODOS.....	7
Transecto Lineal (Distance Sampling).....	7
Logística.....	10
<i>R/V David Starr Jordan</i>	10
<i>Buque de Investigación Pesquera XI</i>	11
<i>Bote de Inspección de SEMARNAP</i>	11
Estratificación.....	11
Área Núcleo	11
Área Sureste.....	12
Área Somera.....	12
Área del Delta	12

Registro de Datos.....	16
<i>David Starr Jordan.....</i>	<i>16</i>
<i>Buque de Investigación Pesquera XI.....</i>	<i>17</i>
<i>Bote de Inspección de SEMARNAP.....</i>	<i>17</i>
Estimación de componentes probabilísticos	18
<i>DSJ: Estimación de $g(0)$.....</i>	<i>18</i>
<i>BIP: Estimación del término de probabilidad.....</i>	<i>20</i>
Tratamiento de Sesgos.....	21
<i>Análisis de movimientos</i>	<i>22</i>
<i>Beaufort.....</i>	<i>24</i>
<i>Análisis y estimación.....</i>	<i>25</i>
<i>Estimaciones de variabilidad.....</i>	<i>28</i>
<i>Varianzas analíticas</i>	<i>29</i>
<i>Varianzas Bootstrap</i>	<i>30</i>
RESULTADOS	32
Datos	32
<i>David Starr Jordan.....</i>	<i>32</i>
<i>Buque de Investigación Pesquera XI.....</i>	<i>32</i>
<i>Bote de Inspección de SEMARNAP.....</i>	<i>32</i>
Abundancia en el Área Núcleo (DSJ).....	32
<i>Corrección por Beaufort.....</i>	<i>32</i>
<i>Análisis de movimientos</i>	<i>35</i>
<i>Estimación de $g(0)$</i>	<i>37</i>

Abundancia en el Área Somera (BIP).....	39
<i>Estimación del Término de Probabilidad.....</i>	<i>39</i>
<i>Post-estratificación</i>	<i>42</i>
<i>Densidad y Abundancia en el Substrato Somero.....</i>	<i>42</i>
Abundancia en las otras zonas	42
Abundancia Total.....	42
Medidas de Variabilidad	43
DISCUSIÓN.....	44
Aspectos sobre la estimación de abundancia	44
Proceso de Detección	45
Componentes probabilísticos	45
Agregación y distribución	46
Implicaciones de la nueva estimación de abundancia	49
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES.....	53
LITERATURA CITADA.....	54
 APÉNDICE A. FÓRMULAS PARA CONVERTIR LECTURAS RETICULARES A DISTANCIA CURVILÍNEA.	
 APÉNDICE B. FORMATOS DE ENTRADA DE DATOS DEL PROGRAMA TRANSECT.	
 APÉNDICE C. ESTIMACIONES PUNTUALES Y MEDIDAS DE VARIABILIDAD ANÁLITICAS DE LOS PARÁMETROS UTILIZADOS PARA ESTIMAR LA ABUNDANCIA.	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Análisis de homogeneidad para verificar si el muestreo fue similar bajo todas las condiciones de Beaufort que se presentaron durante el crucero	35
Tabla II. Estimaciones de $g(0)$ para el <i>flying</i> y el <i>bridge</i> del David Starr Jordan	37
Tabla III. Estimaciones puntuales y de variabilidad usando bootstrap	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.....	6
Figura 2. Bases del método de transectos lineales	8
Figura 3. Ubicación y delimitación de los estratos predefinidos	13
Figura 4. Planeación de transectos a ser cubiertos en las áreas núcleo y sureste por la embarcación David Starr Jordan.....	14
Figura 5. Planeación de transectos a ser cubiertos en las áreas somera y del delta.....	15
Figura 6. Forma en que las distancias radiales son usadas en el análisis de movimientos.....	23
Figura 7. Transectos y avistamientos realizados por el DSJ en las áreas núcleo y sureste	33
Figura 8. Transectos y avistamientos realizados por el BIP en las áreas núcleo y somera.....	34
Figura 9. Recta de regresión ajustada con un método iterativo a los datos del análisis de movimientos.....	36
Figura 10. Histogramas de frecuencias de distancias perpendiculares para ambas plataformas del DSJ.....	38
Figura 11. Función de detección ajustada a las 70 distancias perpendiculares utilizadas en el análisis de abundancia en el Área Núcleo.....	40
Figura 12. Número de avistamientos efectuados por día cuando se realizó esfuerzo en el Área Núcleo	47
Figura 13. Curva de regresión ajustada para las tres estimaciones de abundancia en Barlow <i>et al.</i> (1997) y la estimación de este trabajo.....	50

INTRODUCCIÓN

México, debido a su privilegiada situación geográfica, cuenta con una de las mayores biodiversidades del mundo. Además, cuenta con un extenso litoral el cual incluye costas en dos océanos. El Golfo de California, conectado al Océano Pacífico, es uno de los mares más ricos y productivos del planeta. La parte más norteña de este golfo, llamada Alto Golfo, es de las regiones con mayor productividad de esta cuenca (Santamaría del Ángel *et al.*, 1994; Nieto García, 1998).

El Alto Golfo de California alberga a dos importantes especies endémicas. Una es la totoaba (*Totoaba macdonaldi*), un pez de la Familia Sciaenidae, caracterizado por ser el de mayor tamaño del grupo. La otra especie es la vaquita (*Phocoena sinus*), un cetáceo de la Familia Phocoenidae, desconocido hasta la segunda mitad de este siglo cuando Norris y McFarland (1958) lo describieron con base en material óseo. No fue sino hasta los 80 que se describió su morfología externa, cuando se obtuvieron los primeros avistamientos y especímenes completos (Brownell *et al.*, 1987).

La reducida talla de la vaquita, su comportamiento elusivo, sus cortos lapsos en superficie para respirar (Silber *et al.*, 1988) y la ausencia de esfuerzo científico, causaron que se conociera poco de esta especie, aún después de su descripción. Varias ideas se tenían acerca de su distribución, pero la más aceptada decía que se restringía al Alto Golfo de California (Brownell, 1986). Algunos trabajos confirmaron esta distribución, con base en un esfuerzo específico para estudiar esta especie (Silber, 1990; Silber y Norris, 1991; Vidal, 1995; Gerrodette *et al.*, 1995). Incluso, hay evidencias que permiten hipotetizar que la distribución histórica de la vaquita ha estado restringida al Alto Golfo (Brownell, 1986). Adicionalmente, las características de la poza génica de la población de vaquita, evidencian que se trata de una población históricamente pequeña y, por tanto, de distribución restringida (Rojas Bracho, 1998).

La distribución de vaquita, coincide con la de totoaba, al menos en alguna porción del Alto Golfo. Esto se demostró por la frecuencia de vaquitas muertas incidentalmente en redes totoaberas o tiburonerías (Brownell, 1983; Vidal, 1995). Al declinar la pesca de totoaba otras pesquerías surgieron en la región, con lo que otro tipo de redes agalleras entraron en operación. Sin embargo, los individuos de vaquita siguieron siendo susceptibles a ser capturados por este tipo de artes (Vidal, 1995; D'Agrosa *et al.*, 1995, en prensa). Esfuerzos por parte de varios investigadores permitieron la colecta de un buen número de especímenes colectados en los campamentos pesqueros. Otro número de especímenes fueron colectados después de vararse en las playas. El estudio de los especímenes colectados brindó conocimientos sobre su dieta (Pérez Cortés, 1996), ciclo de vida (Hohn *et al.*, 1996), anatomía (Torre

Cosío, 1995), variabilidad génica (Rosel y Rojas Bracho, en prensa) y riesgo de endogamia (Rojas Bracho, 1998; Taylor y Rojas Bracho, en prensa).

Después de su descripción, y ante la carencia de registros frecuentes, se tuvo la percepción de que la vaquita era una especie rara, poco abundante, de distribución restringida y quizá endémica del Alto Golfo de California. El hecho de que la vaquita estuviera siendo capturada incidentalmente en redes agalleras, junto con la rareza de la especie, preocupó al gremio científico y en 1978 se le incluyó en el Libro Rojo de la IUCN-World Conservation Union clasificada como vulnerable y también fue agregada a la Lista Mexicana de Vertebrados Silvestres en Peligro de Extinción (Vidal, 1995). Posteriormente, en 1979, fue listada en el Apéndice I del CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Flora and Fauna) y, por último, se le incluyó en el Acta de Especies Amenazadas de los Estados Unidos de América (Vidal, 1995).

En 1975, debido a la intensa pesquería que sufrió, la pesca de totoaba fue puesta en veda permanente (D'Agrosa *et al.*, 1995). En 1983 el Comité Científico de la IWC (International Whaling Commission) expresó su agrado por esta decisión y su optimismo por la recuperación de la población de vaquita en ausencia de la pesquería (Donovan y Bjørge, 1995). Sin embargo, en 1990, el mismo comité fue informado de que en el Alto Golfo seguían operando pesquerías experimentales e ilegales, y que se seguían reportando capturas de vaquita. La IWC recomendó a la IUCN cambiar el estatus de la vaquita de vulnerable a amenazada y también expresó su inquietud por establecer medidas inmediatas para su recuperación (Donovan y Bjørge, 1995). Atendiendo a la preocupación internacional el Gobierno Mexicano formó, en 1992, el Comité Técnico para la Preservación de la Vaquita y la Totoaba (Rojas Bracho y Urbán Ramírez, 1995). Fleischer (1996), miembro de este comité y responsable de una evaluación técnica de la pesquería incidental de vaquita, concluyó que las capturas incidentales no eran la principal causa de riesgo para la supervivencia de la vaquita. En cambio indicó que otros factores, como la ausencia de flujo del Río Colorado, podrían estar causando una mayor merma. Las reacciones a esta idea fueron encontradas, con grupos a favor y en contra, pero en general se tuvo la percepción de que la pesquería seguía siendo el principal componente, de manera que la IUCN cambió el estatus de la vaquita a críticamente amenazada (IUCN, 1996) al igual que CITES (1998). El Gobierno Mexicano también listó a la vaquita como en peligro de extinción (DOF, 1994).

Como resultado del Comité Técnico creado, se emitió un plan para la recuperación de la vaquita, el cual incluía también a otras especies del área, y el 10 de junio de 1993 el Gobierno Mexicano decretó el establecimiento de la "Reserva de la Biósfera del Alto Golfo de California y Delta

del Río Colorado" (DOF, 1993). Sin embargo, posteriormente el comité dejó de funcionar y no se le dio seguimiento al plan de recuperación. Estudios posteriores mostrarían que el comité no había identificado, adecuadamente, los principales factores de riesgo para la supervivencia de la vaquita.

El único estudio del ciclo de vida de la vaquita indica, entre otras cosas, que la tasa de natalidad de la vaquita es menor que la de su especie hermana, la marsopa común (Hohn *et al.*, 1996). Todo indica que las hembras de vaquita no producen crías cada año. Por otro lado, los estudios de mortalidad indican que un número considerable de vaquitas, de entre 30 y 80 por año para uno de los poblados pesqueros del área, siguen siendo capturadas (D'Agrosa *et al.*, 1995, en prensa). Además, los estudios recientes de distribución muestran que quizá un 40% de la población de vaquita habita fuera del área de la Reserva de la Biósfera (Gerrodette *et al.*, 1995). Todos estos factores en conjunto parecen concluir que la Reserva por si misma no es suficiente para proteger adecuadamente a la vaquita. Por tal motivo, el Gobierno Mexicano, formó en 1996 el "Comité Internacional para la Recuperación de la Vaquita" (CIRVA, Anon., 1996; Rojas Bracho *et al.*, 1998).

El mandato del CIRVA es crear un plan de recuperación para la vaquita, que cubra los aspectos biológicos, oceanográficos, ambientales, sociales, políticos y económicos. Esta conformado por expertos de México, Estados Unidos, Inglaterra y Canadá. La primera reunión del comité se efectuó durante el mes de enero de 1997 en Ensenada, B.C., con el propósito de aglutinar toda la información disponible respecto al estatus biológico de la vaquita, así como conocer los aspectos oceanográficos de su medioambiente. Todos los trabajos ya citados fueron revisados por el comité, y además se discutió la primera estimación analítica de abundancia hecha en base a transectos lineales (Barlow *et al.*, 1997).

Los datos usados para esta estimación procedieron, por oportunidad, de un crucero para el avistamiento de mamíferos marinos en el Golfo de California (Mangels y Gerrodette, 1994). Debido a la ausencia de un experimento específico, este trabajo no contó con un diseño para la estimación de $g(0)$ [probabilidad de detección en la línea de curso del transecto], un parámetro fundamental para una adecuada estimación. Los autores utilizaron la $g(0)$ estimada para un crucero similar diseñado para estimar la abundancia de marsopa común (*Phocoena phocoena*) en el Pacífico de los Estados Unidos. Por otro lado, el período de estudio fue de sólo tres días y no cubrió todas las áreas potenciales de distribución, ya que el barco usado no es adecuado para navegar en las someras aguas del Alto Golfo. Este último hecho, y la inclusión de una $g(0)$ externa al muestreo, pueden estar sesgando la estimación. Por otro lado, los miembros del CIRVA discutieron que la precisión podría estar subestimada, pues se combinaron observaciones hechas con binoculares 25x150 y a simple vista, además de que no se

incluyó la incertidumbre generada por la elección de un modelo para el ajuste de la función de detección. Sin embargo, esta estimación indicó que la población de vaquita se halla en los cientos de animales y, posiblemente, en los pocos cientos.

Otro trabajo analizado en la primera reunión del CIRVA trató sobre los factores de riesgo para la supervivencia de la vaquita (Rojas Bracho y Taylor, en prensa). Los autores analizaron las alteraciones del hábitat del Alto Golfo, la incidencia de contaminantes y otras sustancias peligrosas en la cuenca, la depresión endogámica (Taylor y Rojas Bracho, en prensa), y la mortalidad incidental en pesquerías. Los autores concluyen que el único factor de riesgo importante, en el corto y quizá en el mediano plazo, es la mortalidad incidental en redes agalleras.

Después de analizar toda la información disponible de esta primera reunión, el CIRVA recomendó obtener a la brevedad una estimación de abundancia confiable, de manera que se pueda evaluar con mayor seguridad los riesgos de la mortalidad incidental. Por otro lado, los miembros del comité acordaron que para obtener financiamientos para el plan de recuperación era necesario contar con cifras precisas, que permitieran a las potenciales agencias financiadoras evaluar las prioridades de un proyecto de tal magnitud. El comité concluyó que el único método adecuado para estimar la abundancia de la vaquita es el transecto lineal (Distance Sampling). Concluyó también que se debían utilizar dos embarcaciones, una de ellas adecuada para cubrir aguas muy someras. Por último indicó que todos los parámetros del modelo debían ser estimados internos al crucero.

En 1997 los gobiernos de México y Estados Unidos unieron esfuerzos en cooperación^{*} para realizar un crucero específico para la estimación de abundancia de la vaquita. Esta tesis presenta los resultados de esa estimación, la cual siguió las recomendaciones indicadas por el CIRVA.

ÁREA DE ESTUDIO

En este trabajo la designación de Alto Golfo se refiere a la porción del Golfo de California al norte de Bahía San Luis Gonzaga en Baja California y Punta Jaguey en Sonora (Fig. 1). Sin embargo, desde el punto de vista oceanográfico, el Alto Golfo es una cuenca bien diferenciada del Norte del Golfo. En las siguientes líneas se describirán ambas zonas.

El Alto Golfo esta formado por un triángulo de aproximadamente 70 Km por lado, con vértices en el Delta del Río Colorado, San Felipe, B.C. y Punta Borrasca, Son. (Lavín *et al.*, 1997). Es un área muy somera con una profundidad aproximada de 15 a 20 m (Lavín *et al.*, 1995; Lavín *et al.*, 1997). Presenta una batimetría muy irregular y compleja que provoca importantes procesos de mezcla (Thompson, 1968; Thomson *et al.*, 1969). Un frente delimita al Alto Golfo y Golfo Norte (línea imaginaria entre San Felipe y Punta Borrasca, ver Figura 1). Al norte está la zona bien mezclada del Alto Golfo y al sur la zona bien estratificada del Golfo Norte, que incluye a la Cuenca Wagner (Lavín *et al.*, 1998).

En general el clima es predominantemente seco, extremoso y carente de lluvias, con una tasa promedio anual de precipitación de 10 a 68 mm/año, con variaciones anuales de temperatura mayores a 14°C (Roden y Groves, 1959; García, 1973; Miranda Reyes *et al.*, 1990; Soto Mardones, 1997).

Las corrientes superficiales en el Norte del Golfo presentan una magnitud de $\sim 0.3 \text{ m s}^{-1}$ (Argote *et al.*, 1995), mientras que en el Alto Golfo las corrientes alcanzan velocidades de $\sim 0.1 \text{ m s}^{-1}$ (Filloux, 1973). El intervalo máximo de variación de la altura de la marea oscila entre 9 y 10 m (Roden y Groves, 1959; Cupul Magaña, 1994). El efecto de la marea, el viento superficial durante invierno y los vientos que provienen del sur durante el verano, mantienen un régimen costero verticalmente mezclado todo el año en el Alto Golfo (Argote *et al.*, 1995).

El régimen de temperatura superficial en el Norte del Golfo varía de 8.5°C en invierno a 32.5°C en verano (Sverdrup, 1941; Roden y Groves, 1959; Farfán y Alvarez Borrego, 1992; Soto Mardones, 1997). La región Norte se caracteriza por presentar salinidades superficiales entre 35.2 y 35.5 (Roden y Groves, 1959; Torres Orosco, 1993; Bray y Robles, 1991), y ligeramente mayores a 35.5 durante verano (Sverdrup, 1941; Roden y Groves, 1959; Lavín *et al.*, 1995; Lavín *et al.*, 1997). En el Alto Golfo se llegan a presentar salinidades entre 35.3 y 41.0 alrededor de la Isla Montague (Alvarez Borrego *et al.*, 1975; Farfán y Alvarez Borrego, 1992; Cupul Magaña, 1994).

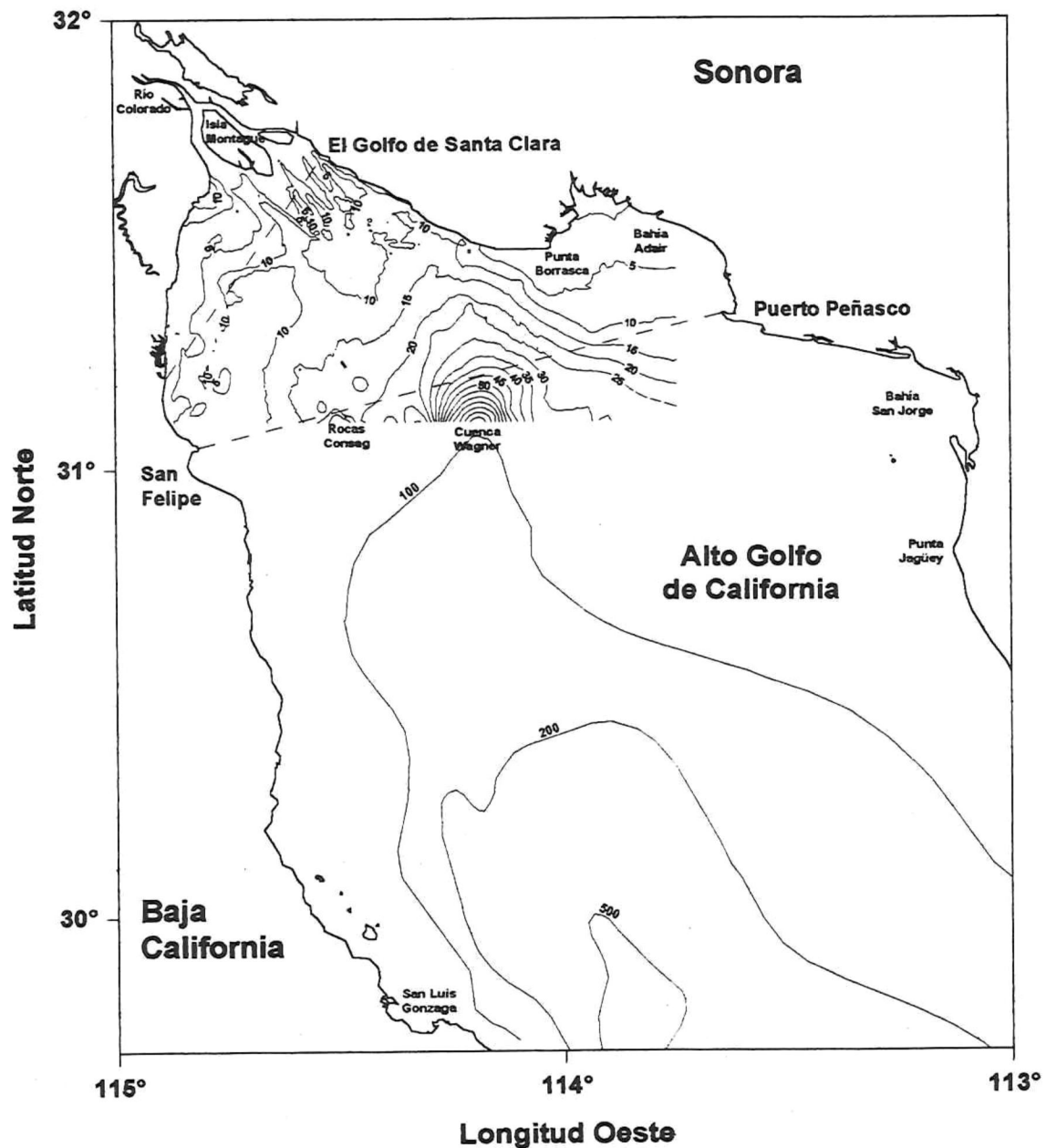


Figura 1. Área de estudio. La batimetría entre 0 y 80 m proviene del Instituto Nacional de la Pesca. El contorno costero y las isóbatas entre 100 y 500 m fueron extraídas de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans Digital Atlas. British Oceanographic Data Centre. 1994). Las líneas quebradas representan los límites acuáticos de la reserva de la Biósfera. La línea más al sur delimita la zona de amortiguamiento. La línea más al norte delimita la zona núcleo, que incluye al Delta de Río Colorado.

MÉTODOS

Transecto Lineal (Distance Sampling)

La abundancia poblacional de vaquita fue estimada mediante el método de transectos lineales o muestreo de distancias (Buckland *et al.*, 1993). Este método se basa en el registro de distancias perpendiculares, respecto a una línea o transecto seguido en un área particular, de los animales u objetos detectados (Fig. 2a). En cambio, los censos en banda consisten en contar todos los objetos detectados, suponiendo que todos los objetos presentes son efectivamente contabilizados. Este supuesto es difícil de cumplir, sobre todo en el caso de cetáceos.

En el caso de los transectos lineales no se requiere suponer lo anterior, en cambio, se supone que cada objeto tiene una cierta probabilidad de ser detectado en función de su distancia perpendicular. Teniendo un conjunto de varias distancias es posible ajustar una función de distribución que describa a las frecuencias de distancias perpendiculares (Fig. 2b). Ahora, suponiendo que todos los objetos en la línea de curso del transecto tienen una probabilidad igual a uno de ser detectados, se podrá ajustar una función de distribución de probabilidad. Esta es llamada función de detección con la nomenclatura $g(x)$, donde x es la distancia perpendicular (Fig. 2b). Es por tanto, un supuesto fundamental del método, el que $g(0)$ [probabilidad de detección en la línea de curso del transecto] sea igual a uno, o que por lo menos se conozca su valor para cualquiera de las distancias en el ancho de banda w (Fig. 2c). El ancho de banda puede estar dado por la distancia perpendicular más grande del muestreo, por una distancia que trunque los datos más lejanos *a posteriori*, o por una distancia elegida *a priori*, más allá de la cual no se incluirían los objetos detectados.

El área bajo la curva de $g(x)$, dividida entre w , representa la probabilidad de detectar objetos en todo el ancho de la banda muestreada (P), es decir, la integral de la función desde cero hasta el objeto más lejano o hasta la distancia w de truncado. En general se recomienda truncar aproximadamente el 10% de las distancias más grandes, ya que generalmente no contienen información importante y, frecuentemente, dificultan el ajuste de la función de detección (Buckland *et al.*, 1993).

La probabilidad de detección en todo el ancho de banda es utilizada en el modelo para estimar el número de objetos que no fueron detectados durante el muestreo. Teniendo un número n de objetos detectados, una distancia total ensayada L , y un ancho de banda w , se puede calcular la densidad en el área muestreada como:

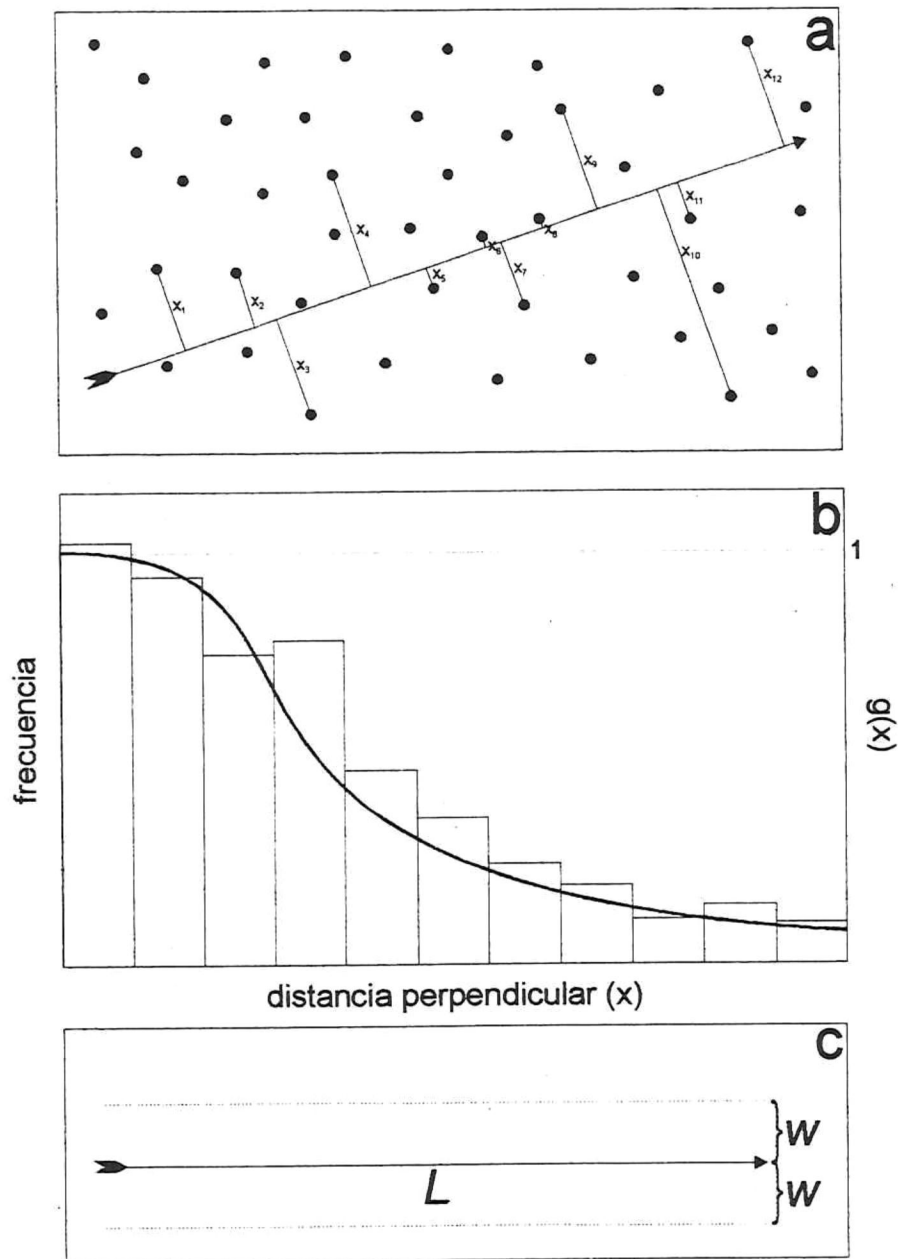


Figura 2. Bases del método de transectos lineales. a) Un transecto (flecha) se ubica al azar. En el recorrido se mide la distancia perpendicular (x) al curso del transecto de los objetos detectados. En este caso 12 objetos se detectaron de los 44 presentes en el momento de recorrer el transecto. b) El conjunto de distancias perpendiculares de un muestreo se arreglan en histograma de frecuencias (barras). Parte fundamental del método es ajustar una función de probabilidad, $g(x)$, que se ajuste adecuadamente a las distancias. c) El método estima la densidad en un área igual a $L2w$, donde w es la mitad del ancho total de la banda muestreada.

$$D = \frac{n}{2 L w}$$

El número 2 como divisor representa el hecho de que se muestrea a ambos lados del punto de observación, es decir, se cubre dos bandas paralelas (Fig. 2c). Esta fórmula representa la densidad en el caso de que todos los objetos presentes hayan sido detectados. Incluyendo en esta misma la probabilidad antes calculada, podremos corregirla a la densidad real, la cual incorpora la estimación de los objetos presentes pero no detectados:

$$D = \frac{n}{2 L w P}$$

O bien:

$$D = \frac{n w}{2 L w \int_0^w g(x) dx} = \frac{n}{2 L \int_0^w g(x) dx}$$

A partir de $g(x)$ se puede obtener la función de densidad de probabilidad $f(x)$ con sólo rescalar $g(x)$ como:

$$f(x) = \frac{g(x)}{\int_0^w g(x) dx}$$

Esta función, evaluada a cero, resulta ser el inverso de la integral de la función de detección bajo el supuesto de que $g(0)=1$, de manera que el cálculo de densidad puede quedar como:

$$D = \frac{n f(0)}{2 L}$$

Se prefiere el uso de $f(0)$ ya que existe un gran acervo en la literatura acerca de la estimación de funciones de densidad de probabilidad.

Ahora bien, los objetos detectados pueden ser grupos en vez de animales solitarios. Este es un caso muy frecuente en el caso de cetáceos. De tal forma, los cálculos estimarían la densidad de grupos y no individuos. Por tal motivo se requiere incluir en el modelo una estimación del tamaño esperado de

los grupos o manadas observadas, $E(s)$, de forma que se estime la densidad de individuos. La formula quedaría entonces como:

$$D = \frac{n f(0) E(s)}{2 L}$$

Generalmente no se puede sostener el supuesto de que $g(0)=1$, por tanto se debe estimar su valor e incluir este en el modelo. En la generalidad de los casos será muy difícil suponer esto, lo cual es cierto en el caso de cetáceos, los cuales sólo son visibles durante el escaso tiempo que salen a la superficie a respirar. La fórmula general para estimar densidad quedaría entonces como:

$$D = \frac{n f(0) E(s)}{2 L g(0)}$$

Logística

Para realizar el trabajo de campo se contó con tres embarcaciones, las cuales permitieron cubrir casi en su totalidad el área de distribución potencial de la vaquita, tal y como fue recomendado por el CIRVA durante su primera reunión en 1997. Cada una de las tres embarcaciones es de características muy distintas, ya que fueron destinadas para cubrir zonas diferenciadas por batimetría y extensión.

R/V David Starr Jordan

Este buque de investigación (DSJ) es propiedad del National Oceanic and Atmospheric Administration del Gobierno de los Estados Unidos de América. Este barco tiene una eslora de 52 m y puede albergar a la tripulación y 15 miembros de personal científico, y cuenta con un completo instrumental oceanográfico. El puente más alto (*flying*), colocado sobre el puente de mando, se halla a 10.7 m sobre el nivel del mar al nivel de vista. En este puente se encuentran fijados en pedestales especiales tres binoculares tipo "Big Eyes" (25x150). Los pedestales cuentan con gradillas para determinar el ángulo de observación respecto de la proa. Los oculares cuentan con líneas reticulares, con un ángulo de 0.078° , las cuales fueron utilizadas para estimar la distancia radial de los grupos observados de mamíferos marinos. Para convertir de lecturas reticulares a distancia se utilizó un algoritmo que toma en cuenta la curvatura terrestre (Apéndice A). Otro puente (*bridge*) colocado a una altura de 8.3 m al nivel de la vista, fue adaptado con sillas para que tres o cuatro personas hicieran observaciones utilizando binoculares 7x50. En el *flying* se instaló una computadora tipo Lap Top, en la cual se registraron datos climáticos, de navegación y de avistamientos. Un programa basado en Windows fue

diseñado especialmente para el efecto, el cual registraba automáticamente la fecha, hora y posición geográfica, vía un GPS conectado al puerto serial.

Buque de Investigación Pesquera XI

El BIP XI (BIP) es un barco tipo pesquero de arrastre, adaptado como buque de investigación. Es propiedad del Instituto Nacional de la Pesca (SEMARNAP) y tiene una eslora aproximada de 21 m. Esta embarcación puede albergar a cinco personas de tripulación y seis de personal científico. Por encima del puente de esta embarcación, que se encuentra a una altura a la vista de 6.3 m, se instalaron tres sillas giratorias y una mesa. En esta última se instaló una computadora tipo Lap Top donde se capturaron los mismos datos descritos para el DSJ, incluida la posición geográfica vía GPS. A bordo de este buque se utilizaron binoculares 7x50 para las observaciones. Estos binoculares contaron con retículas de 0.311° utilizadas para la estimación de distancia radial. Al igual que en el *bridge* del DSJ, el ángulo de observación con respecto a la proa del barco se midió utilizando un tablero transportador graduado con precisión de un grado.

Bote de Inspección de SEMARNAP

Esta embarcación (Panga) es una lancha de fibra de vidrio de 10 m de eslora con caseta de mando y motor fuera de borda de 75 HP gobernado desde una cabina. Con el fin de ubicar a los observadores lo más alto posible se instaló, en esta lancha, una plataforma de aluminio con una altura al nivel de vista de aproximadamente 3 m. Un par de asientos fueron fijados a la plataforma. Al igual que en las otras embarcaciones las observaciones fueron capturadas directamente en una computadora instalada en la cabina. Los observadores utilizaron también binoculares 7x50 reticulados.

Estratificación

El área de estudio fue estratificada con base en las características batimétricas del Alto Golfo (Fig. 1) y a la distribución conocida de la vaquita (Brownell, 1986; Silber y Norris, 1991; Vidal, 1995; Gerrodette *et al.*, 1995). Cuatro estratos fueron definidos, los cuales se diseñaron para ser cubiertos por alguna de las embarcaciones antes descritas.

Área Núcleo

Esta es la zona núcleo de distribución de la vaquita. En ésta es en donde se han reportado la mayor parte de los avistamientos de esta especie. El trazo de los bordes de esta área estuvo determinado por la

batimetría, ocupando profundidades entre los 20 y los 100 m aproximadamente (figs. 1 y 3). Lo anterior obedece al hecho de que el DSJ fue el barco asignado a esta zona y este no puede navegar en aguas más someras. Por otro lado, se sabe que la vaquita no se distribuye en aguas más profundas de 100 m (Silber, 1990; Silber y Norris, 1991; Gerrodette, 1995).

Se establecieron transectos en forma de malla separados 2 mn. Para trazar las líneas se eligió un punto inicial al azar. El diseño se presenta en la Figura 4. Preferentemente se navegó a través de las líneas orientadas norte-sur, con el fin de evitar reflejos del sol durante las mañanas y tardes. Algunos transectos este-oeste fueron navegados durante el crucero. La superficie total del Área Núcleo es de 2,659.7 Km².

Área Sureste

Esta área es la que ocupó la mayor superficie. Sin embargo, no se muestreo tan intensamente como la núcleo, ya que se sabía que no muchas vaquitas se distribuyen en esta área (Silber, 1990; Silber y Norris, 1991; Gerrodette, 1995). Este estrato está definido por los bordes este y sur de la zona núcleo; por los márgenes costeros donde la profundidad está entre 10 y 20 m aproximadamente, y por la isóbata de los 100 m (figs. 1 y 3). El límite sur de esta zona alcanza Bahía San Luis Gonzaga en la porción de Baja California y Punta Jagüey en Bahía San Jorge en el lado de Sonora. La porción excluida del estrato de profundidades mayores a 100 m incluye a la Cuenca Wagner. Este estrato también fue cubierto por el DSJ.

Área Somera

El BIP fue el barco asignado para cubrir este estrato. Comprende las porciones costeras con profundidades entre 5 y 20 m aproximadamente (figs. 1 y 3). Rodea a las zonas Núcleo y Sureste. Los transectos planeados siguieron un patrón en "zig-zag", con el fin de no seguir contornos batimétricos y así asegurar un muestreo homogéneo (Fig. 5). Se planeó el trazo de los transectos de manera que se cumplieran completos, uno o más, en un día de esfuerzo. Por otro lado, se trazaron de manera que el esfuerzo en distancia fuera proporcional a la superficie de la porción del estrato navegado en un día. De esta forma se aseguró que el muestreo fuera homogéneo en todo el estrato.

Área del Delta

Este estrato comprende las porciones más someras del área de estudio. Incluye una porción al norte de San Felipe enfrente de los esteros y una porción al sur de las islas Montague y Pelicano (figs. 1 y 3). La Panga fue utilizada para cubrir este estrato, pues sólo en una embarcación de este tipo es posible

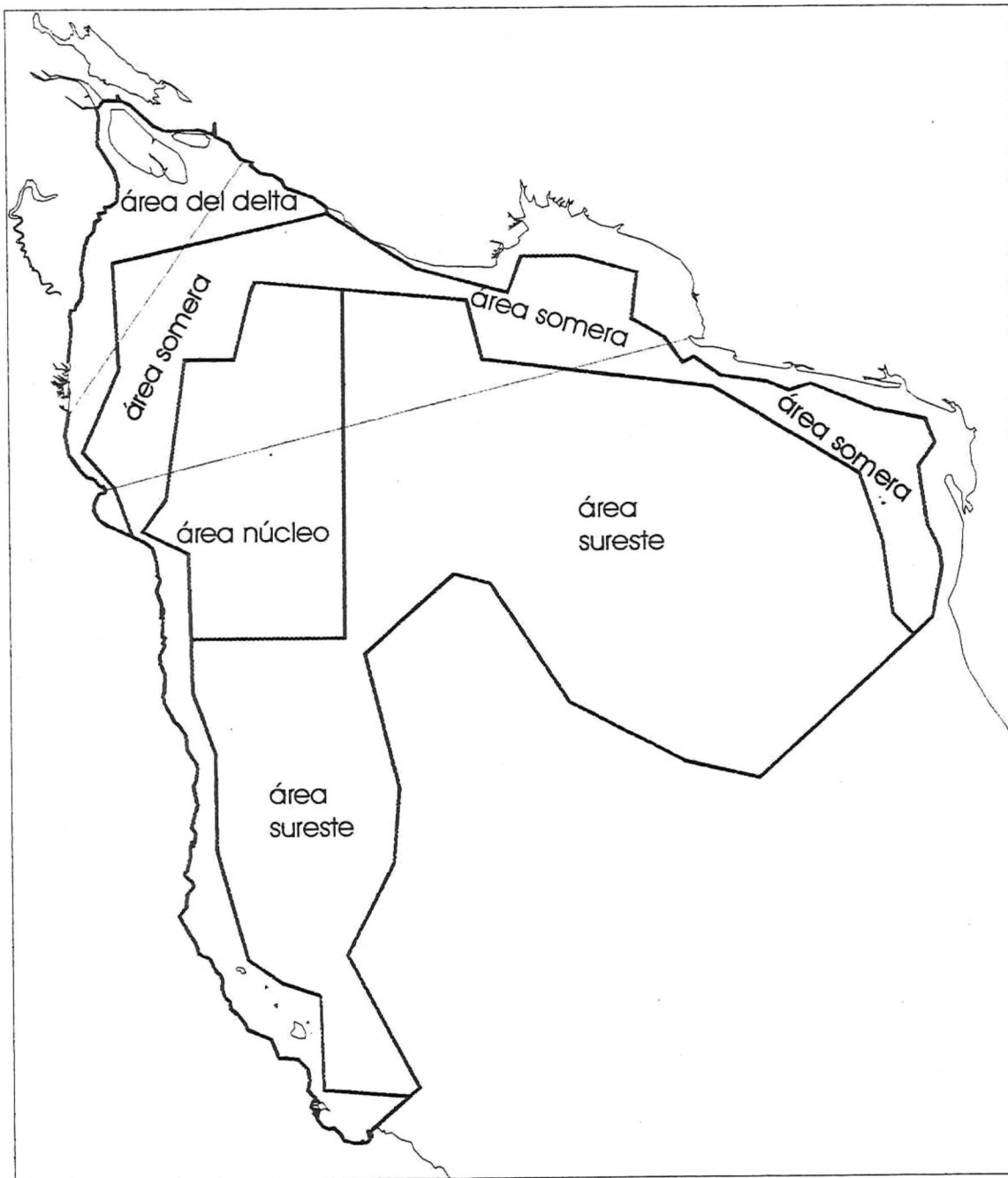


Figura 3. Ubicación y delimitación de los estratos predefinidos. El área somera bordea a las áreas núcleo y sureste. El área del delta incluye una porción de la Bahía de San Felipe y una porción al norte, así como los canales al rededor de la Isla Montague.

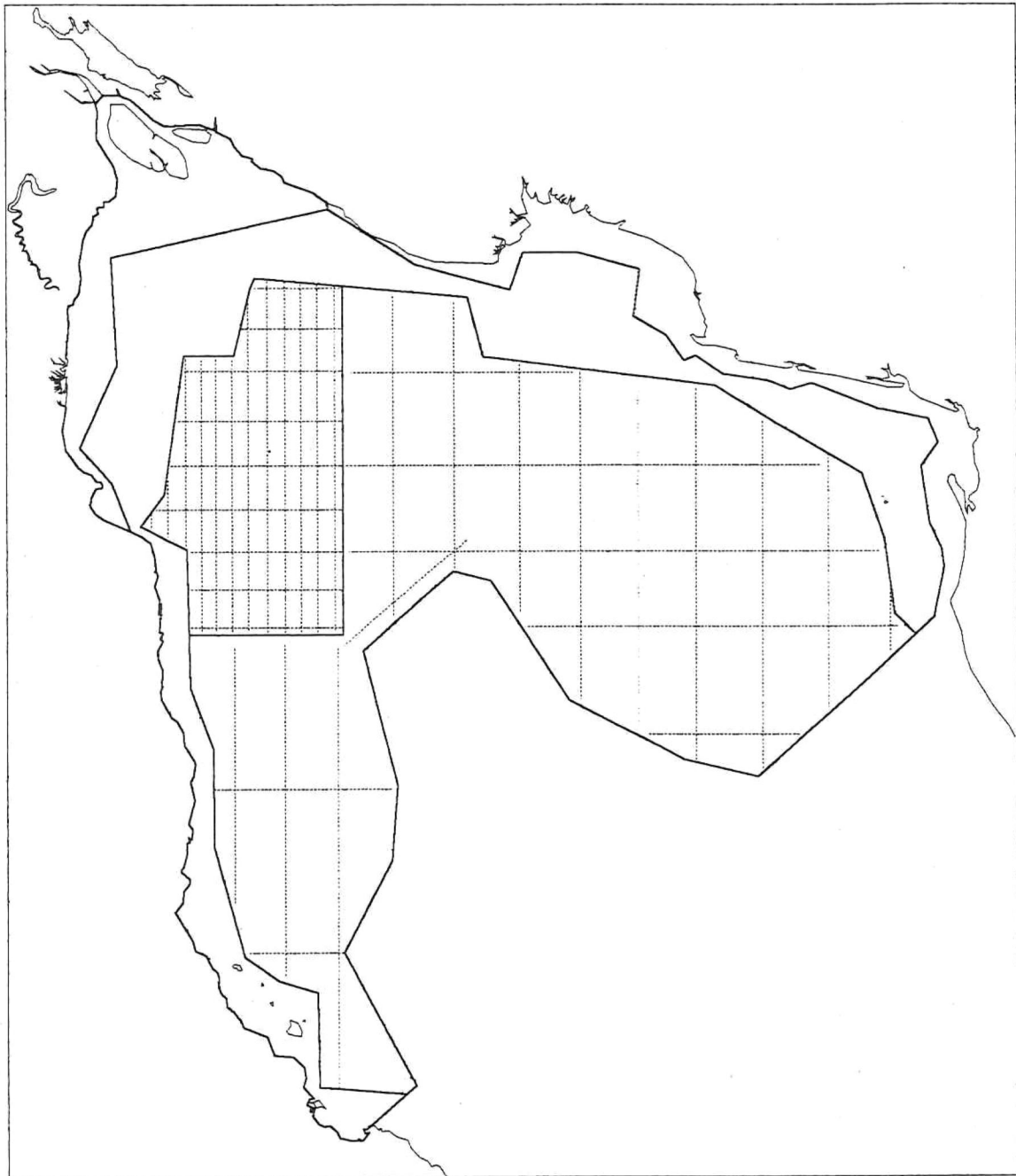


Figura 4. Planeación de transectos a ser cubiertos en las áreas núcleo y sureste por la embarcación David Starr Jordan. El Buque de Investigación Pesquera XI navegó algunos de los transectos del área núcleo.

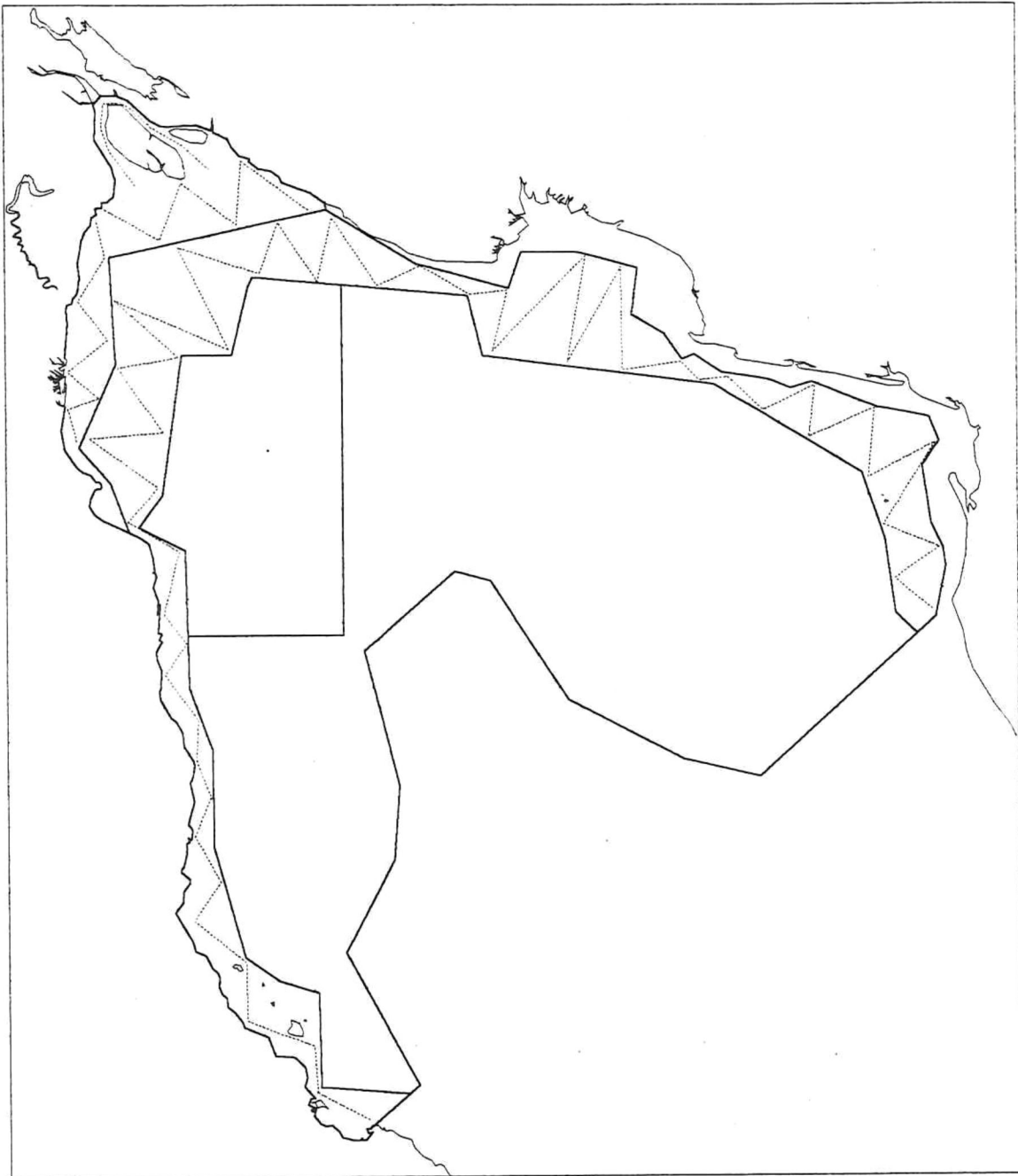


Figura 5. Planeación de transectos a ser cubiertos en las áreas somera y del delta. Los transectos en el área somera fueron planeados para el BIP XI. Los transectos en el área del delta fueron planeados para la Panga.

hacerlo. A bordo de este bote también fue posible navegar en los canales del Delta del Río Colorado hasta rodear a la Isla Montague.

En esta área se planearon también transectos en “zig-zag”. En los canales del delta no hubo otro diseño posible más que el de recorrerlos durante las horas en que la marea estuvo en pleamar (Fig. 5).

Registro de Datos

David Starr Jordan

A bordo del DSJ se utilizó el programa WINCRUZ para el registro de datos. Todo el tiempo se contó con un par de personas (anotadores) entrenadas para el uso de este paquete, las cuales se turnaban durante el tiempo de esfuerzo al frente de la computadora. El programa, desarrollado por personal del Southwest Fisheries Science Center (La Jolla, Cal.), se enlaza con un GPS vía el puerto serial y registra automáticamente la posición cada diez minutos. El programa también automáticamente registra la posición cada vez que se anota algún dato meteorológico, oceanográfico o avistamiento.

El anotador fue el responsable de capturar todos los datos referentes a la observación de vaquitas. Por un lado decidía los valores de condiciones meteorológicas y oceanográficas como son Beaufort, altura y dirección de olas, visibilidad, nubosidad, ángulos de incidencia solar verticales y horizontales respecto a la proa, dirección e intensidad del viento. También registraba el curso y dirección de navegación del barco. Además, mantenía un registro de la posición e identificación de los observadores. En el *flying* operaron a la vez dos o tres observadores y su posición se denotaba como izquierda, centro o derecha. En el *bridge* operaron tres o cuatro observadores en posiciones derecha o izquierda, interior o exterior. Todos los observadores tienen un número de código único asignado por el SWFSC.

Durante los avistamientos el anotador era el responsable de capturar datos, indicados por los observadores, como especie, ángulo respecto a la proa, número de retículas, código del observador, plataforma desde la cual se hizo el avistamiento (*flying* o *bridge*) y tipo de instrumento utilizado (big eyes o binoculares). Una labor importante del anotador durante estos lapsos fue la de decidir el momento en el que se presentaron “reavistamientos” o “avistamientos empatados”. El primero se trata de dos o más avistamientos del mismo grupo de animales por observadores de la misma plataforma. El segundo se trata del avistamiento del mismo grupo de animales por observadores en ambas

plataformas. Para ayudarse a decidir cualquiera de estos eventos el programa de captura tiene una opción para desplegar un gráfico en el que se muestra la posición del barco y las de los avistamientos.

Los observadores turnaban posiciones, ocupando 30 minutos en cada binocular. Cada día se formaban dos grupos de observadores, uno que trabajaba al nivel del *flying* y otro al nivel del *bridge*. La labor de los observadores consistía en buscar cetáceos en el campo de observación entre la proa y los 90° con respecto a ésta, a babor o estribor dependiendo de la posición. El observador al centro observaba hacia ambos lados del barco. Al avistar algún grupo de animales el observador hacía la lectura reticular. Para el efecto se coloca la retícula superior en el horizonte y se cuenta el número de retículas hacia abajo hasta la posición en que se ve al grupo (Apéndice A). También se tomaba la lectura del ángulo con respecto a proa, se identificaba la especie o especies, y se contaba el número de animales presentes en el grupo. Varios observadores podían opinar respecto a los dos últimos puntos. Al finalizar el turno en una posición particular el observador que hubiera efectuado algún avistamiento llenaba una forma, la cual incluye la mejor estimación del tamaño del grupo, así como el mínimo y el máximo estimados. La forma también tiene un espacio para dibujar un bosquejo de los animales observados, describir su comportamiento y anotar observaciones como dirección de nado y velocidad estimada.

Buque de Investigación Pesquera XI

A bordo del BIP se contó con un programa similar al WINCRUZ llamado CRUISE4, el cual corre bajo sistema operativo MS-DOS. La única función con la que no cuenta este programa es la de graficar las posiciones de los avistamientos y el barco, para determinar reavistamientos y empates. A bordo del BIP no se requirió de esta función pues sólo operó una plataforma.

Tres observadores trabajaban a la vez, turnándose la posición izquierda, centro y derecha. Cuando una persona estaba en el centro fungía como anotador, con las mismas responsabilidades descritas para el anotador a bordo del DSJ. Además fungía como observador, usando simple vista y, ocasionalmente, binoculares. En cada posición los observadores permanecían 30 minutos. Estos cumplían con la misma función y actividades descritas para el DSJ.

Bote de Inspección de SEMARNAP

En la plataforma de este bote operaron dos o tres observadores sin restar demasiada estabilidad. El anotador trabajaba en el nivel inferior. Cada observador permanecía 30 minutos en cada posición. El programa de captura utilizado fue el mismo usado en el BIP.

El personal que participó en los transectos realizados a bordo de la Panga fue el mismo que laboraba en el BIP. De tal forma, los días que la Panga estuvo en operación el BIP estuvo en descanso.

Estimación de componentes probabilísticos

Como se explicó, el método de transectos lineales requiere de ajustar la función de detección $g(x)$ o, en la práctica, $f(0)$, que es la función de densidad de probabilidad de las distancias perpendiculares evaluada a cero. El ajuste de esta función requiere el supuesto de que $g(0)=1$, es decir, que todos los objetos presentes en la línea de curso del observador y sus inmediaciones son detectados.

Ya se había mencionado la dificultad de cumplir con este supuesto en el caso de cetáceos. Tratándose de vaquita la problemática es aún peor, pues forma grupos pequeños, permanece en la superficie muy poco tiempo y es evasiva (Silber *et al.*, 1988). Además, recuérdese que se trata de uno de los cetáceos más pequeños (Brownell *et al.*, 1987).

Con el fin de obtener todos los parámetros necesarios para aplicar el modelo, a bordo del DSJ se efectuaron observaciones con equipos independientes para la estimación de $g(0)$. El BIP efectuó algunos transectos en el Área Núcleo para estimar el “término de probabilidad” [$f(0) / g(0)$] con base en la densidad estimada con los datos obtenidos por el DSJ.

DSJ: Estimación de $g(0)$

El parámetro $g(0)$ no puede ser estimado a partir de los datos de distancia, debe ser obtenido de experimentos independientes. Buckland y Turnock (1992 en Buckland *et al.*, 1993 p. 210) propusieron un método basado en dos equipos independientes, es decir dos equipos de observadores operando al mismo tiempo. A bordo del DSJ los equipos se hallaban en el *flying* y el *bridge*, los cuales no estaban en comunicación, es decir, ningún equipo sabía lo que estaba detectando el otro. Solamente el anotador estaba en contacto con el *bridge* a través de audífonos. El equipo primario (primary team) se encarga de buscar objetos bajo el procedimiento normal de transecto lineal. El equipo secundario (secondary team) se encarga de buscar animales más allá de los límites de detección de la plataforma primaria y no hacer intentos de buscarlos en los límites normales de detección de la plataforma primaria. Ambas plataformas deben rastrear a los grupos detectados con el fin de determinar si se presenta una observación empatada. Este método corrige la densidad estimada con los datos obtenidos de la plataforma primaria. Se basa en la proporción de animales detectados por la plataforma primaria que fueron muestreados por la plataforma secundaria.

Durante la primera semana de operaciones el DSJ operó bajo este esquema, sin embargo, el *bridge* (plataforma primaria) obtuvo una tasa de encuentro (n/L) muy baja, lo que impidió continuar con el experimento por dos razones. La primera es que se obtendría un muy escaso número de detecciones, lo que ocasionaría un pobre ajuste de la función de detección, independientemente del valor de $g(0)$. La segunda es causa de la primera, ya que se requiere del ajuste de tres funciones de densidad de probabilidad: la de las distancias obtenidas desde la plataforma primaria, desde la plataforma secundaria, y desde ambas para las observaciones empatadas. La primera y la tercera se obtendrían con muy pocos grados de libertad.

A partir de la segunda semana se operó bajo el esquema de "plataformas independientes en paralelo". Buckland (1987 en Buckland *et al.*, 1993 p. 208) propone este método, el cual se basa en las funciones de detección ajustadas para dos plataformas operando concomitantemente y en paralelo a una distancia d una de otra. En el caso del DSJ $d=0$, es decir, las plataformas se encontraban en el mismo barco (*flying* y *bridge*).

Teniendo una muestra de distancias para dos plataformas (1 y 2) se calculan las integrales:

$$\mu_1 = \int_0^w g_1(x) dx \quad , \quad \mu_2 = \int_0^w g_2(x) dx \quad y \quad \mu_{1,2} = \int_0^w g_1(x) \cdot g_2(x) \cdot dx$$

Se pueden calcular las proporciones:

$$v_1 = \frac{\mu_1}{g_1(0)} \quad , \quad v_2 = \frac{\mu_2}{g_2(0)} \quad y \quad v_{1,2} = \frac{\mu_{1,2}}{g_1(0) \cdot g_2(0)}$$

Si n_1 grupos son detectados desde el *flying*, n_2 desde el *bridge* y $n_{1,2}$ desde ambas plataformas (detecciones empatadas), entonces $n_{1,2}/n_2$ estima $\mu_{1,2}/\mu_2$, por lo que:

$$\hat{g}_1(0) = \frac{\hat{v}_2 \cdot n_{1,2}}{\hat{v}_{1,2} \cdot n_2} \quad y \quad \hat{g}_2(0) = \frac{\hat{v}_1 \cdot n_{1,2}}{\hat{v}_{1,2} \cdot n_1}$$

Si el ancho de banda w se trunca de manera que $g(x)$ sea más o menos constante entre 0 y w , entonces $v_1 = v_2 = v_{1,2}$. De tal forma:

$$\hat{g}_1(0) = \frac{n_{1,2}}{n_2} \quad y \quad \hat{g}_2(0) = \frac{n_{1,2}}{n_1}$$

Las dos últimas fórmulas fueron utilizadas para estimar $g(0)$, en particular la del *flying*, que fue la plataforma que aportó los datos para estimar la abundancia, dada la escasez de datos obtenidos desde el *bridge*. Para evitar ajustar la función de detección al *bridge* se utilizó un ancho de banda de 500 m, el cual supone que la probabilidad de detección es constante. En el apartado sobre resultados se explicarán los motivos por los cuales se utilizó este ancho para basar la suposición.

El error estándar de $g(0)$ se estimó por medio de un procedimiento "bootstrap" (Efron y Tibshirani, 1993). Este método se basa en generar B réplicas muestrales del mismo tamaño que la muestra original. Cada réplica se construye tomando unidades de la muestra original con reemplazo. El parámetro de interés se calcula para cada réplica y el error estándar se calcula a partir de los B valores obtenidos. En el caso de $g(0)$ se construyó una muestra original de n grupos detectados. Cada grupo fue etiquetado por sólo una de las siguientes opciones: detectado por el *flying*, detectado por el *bridge*, o por ambos equipos (empate). De tal forma, cada réplica quedó conformada por:

$$N_B = 1 \text{ grupo del flying} + 1 \text{ grupo del bridge} + n_{\text{flying}} + n_{\text{bridge}} + n_{\text{flying, bridge}}$$

Cada réplica N_B es del tamaño de la muestra original. Los dos primeros términos se incluyen para evitar la división entre cero al calcular $g(0)$. Entonces en cada réplica se muestrearon $N-2$ grupos. Se generaron 1000 réplicas mediante un programa escrito en Visual Basic 5, utilizando la función *Rnd*, la cual genera números pseudoaleatorios. Para asegurar aleatoriedad se escribió un proceso de doble muestreo, en el cual primero se eligen al azar cinco grupos de la muestra original. Después se elige al azar uno de estos cinco. Este proceso se repite $N-2$ ocasiones hasta completar la réplica.

BIP: Estimación del término de probabilidad

El BIP no contaba con la infraestructura necesaria para ejecutar un procedimiento de muestreo con plataformas independientes. Sólo una plataforma pudo ser adaptada. Por tal motivo el diseño muestral para esta embarcación incluyó el llevar a cabo algunos transectos en el Área Núcleo, la cual quedó bien muestreada por el DSJ y para la cual se contó con una adecuada estimación de densidad.

Por otro lado, a bordo del BIP se utilizaron binoculares 7x50, al igual que en el *bridge* del DSJ. El resultado fue similar, una baja tasa de encuentro (n / L). Por tal, no fue posible con los datos del BIP obtener una adecuada estimación de los parámetros probabilísticos $f(0)$ y $g(0)$.

El procedimiento para obtener una estimación de estos parámetros para el BIP contó con la estimación de densidad y tamaño de grupo hecha por el DSJ en el Área Núcleo. Recordando que la densidad se calcula como:

$$D_{DSJ} = \frac{n_{DSJ} f(0)_{DSJ} E(s)_{DSJ}}{2 L_{DSJ} g(0)_{DSJ}}$$

donde el subíndice DSJ indica que el parámetro fue estimado con datos del DSJ en el Área Núcleo. Ahora bien, si el BIP realizó transectos en el Área Núcleo es razonable suponer que al tiempo de efectuarlos la densidad y el tamaño de grupo eran cercanos a los estimados por el DSJ. Bajo este supuesto se obtuvo el “término de probabilidad” $[f(0) / g(0)]$ despejando de la fórmula anterior y substituyendo la tasa de encuentro (n / L) por la obtenida por el BIP:

$$\left(\frac{f(0)}{g(0)} \right)_{BIP} = \frac{L_{BIP} 2D_{DSJ}}{n_{BIP} E(s)_{DSJ}}$$

Suponiendo que el proceso de detección a bordo del BIP opera de manera similar en el Área Núcleo, que en el Área Somera, es posible utilizar el término de probabilidad para estimar la abundancia en la última, que es la zona dedicada al BIP:

$$D_{AS} = \frac{n_{AS} E(s)_{AS}}{2 L_{AS}} \cdot \left(\frac{f(0)}{g(0)} \right)_{BIP}$$

donde el subíndice indica que el parámetro fue estimado para el Área Somera. La estimación de la varianza, para el término de probabilidad, será explicada más adelante en el apartado sobre estimaciones de variabilidad.

Tratamiento de Sesgos

Los tres supuestos más importantes del modelo de transectos lineales son:

- Los objetos presentes en la línea de curso del transecto y sus inmediaciones son todos detectables $[g(0)=1]$.
- Las mediciones de distancia son exactas (sin sesgo).

- Los objetos son detectados en su posición original, antes de cualquier respuesta a la presencia del observador (en este caso la embarcación).

Ya se explicó el procedimiento para estimar $g(0)$ para el caso del DSJ y el término de probabilidad para el BIP. El primer supuesto no se cumple, pero al estimar el valor de los componentes de probabilidad el sesgo se corrige.

En el Apéndice A se explica el procedimiento para convertir de medidas reticulares a distancias curvilíneas, las cuales toman en cuenta a la curvatura terrestre. Por otro lado, el reticulado de los "Big Eyes" tiene varias subgraduaciones en las primeras retículas, lo que permite una medición más exacta y precisa. Con esto podemos inferir que el segundo supuesto queda superado.

El sesgo que pudiera provocar el incumplimiento del tercer supuesto fue aliviado, en cierto grado, por el análisis de "reavistamientos" o movimientos de los grupos detectados respecto a la presencia del barco. Otro posible sesgo se refiere a la homogeneidad del muestreo respecto a las condiciones meteorológicas y oceanográficas. En los siguientes párrafos se explicará la forma en la que se trató con estos dos sesgos.

Análisis de movimientos

Como parte del procedimiento normal de búsqueda de grupos de vaquita, los observadores trataban de avistar un mismo grupo en más de una ocasión, con el fin de confirmar la identificación, posición y tamaño de grupo. Varios de los grupos detectados fueron "reavistados" una o más ocasiones. En cada ocasión se pudo determinar la posición del grupo y, por supuesto, del barco.

Para evaluar el efecto de la presencia del barco (DSJ) en el patrón de desplazamiento de los grupos de vaquita, se analizaron los cambios en distancia radial, es decir, la distancia en línea recta entre el barco y el grupo detectado (Fig. 6). En dos avistamientos sucesivos la distancia radial en el primer avistamiento se nombra r_1 y r_2 durante el segundo. Si el movimiento de los grupos es independiente del barco y estos nadan a una velocidad similar al último, se espera que en promedio la diferencia $r_2 - r_1$ sea cero. Si el barco es más rápido el promedio tenderá a ser un número negativo, o positivo en el caso opuesto. Por el contrario, si el movimiento de los grupos es afectado por la presencia del barco, el valor promedio de la diferencia $r_2 - r_1$ tenderá a ser positivo si los grupos se alejan y negativo si se acercan.

Un esquema más preciso de respuesta debe ser aquel en el que a distancias grandes el movimiento es independiente, el cual se sesga hacia las distancias radiales menores. Tomando en

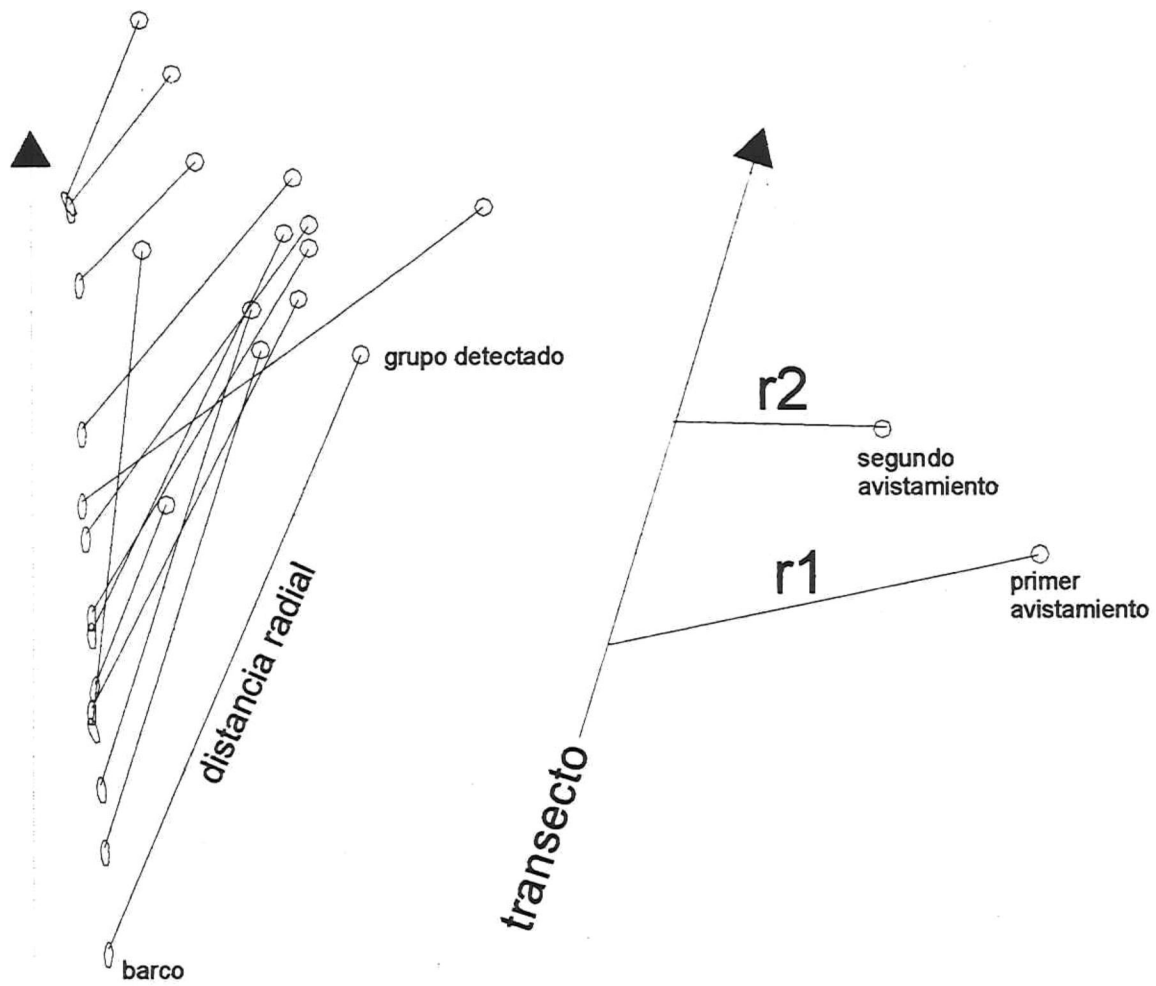


Figura 6. Forma en que las distancias radiales son usadas en el análisis de movimientos.

cuenta la conducta evasiva de la vaquita es de esperar que a las distancias radiales más pequeñas los valores de la diferencia tiendan a ser positivos. A las distancias mayores se espera que el movimiento sea independiente, con un valor promedio negativo para la diferencia, ya que se espera que el DSJ se desplace a una velocidad superior a lo conocido para vaquita de entre 3.5 a 7.5 Km/h (estimación basada en el seguimiento de dos grupos de vaquitas, sin contar con una medición precisa de la velocidad de la embarcación por Silber *et al.*, 1988).

Para hallar la distancia a la cual los grupos empiezan a reaccionar, se ajustó un modelo de regresión a los datos de movimientos. Como variable independiente se utilizó la distancia radial inicial (r_1) y como dependiente a la diferencia en distancias radiales ($r_2 - r_1$). Se infirió que el valor para r_1 , cuando $r_2 - r_1 = 0$ bajo el modelo ajustado $[(r_2 - r_1) = a + (b * r_1)]$, es la “distancia radial mínima” antes de que el grupo se vea afectado por la presencia del barco.

Con el fin de evitar los supuestos de homocedasticidad y normalidad requeridos por el método estándar de mínimos cuadrados, se utilizó un método iterativo no lineal para ajustar el modelo (Swain, 1990). Estos métodos utilizan una función de pérdida (loss function) la cual es minimizada hasta alcanzar un valor límite definido por el investigador. La función elegida fue la de mínimos cuadrados ponderados $[\sum((O_b - C_a)^2 (1 / r_1)^2)]$, la cual asume que la varianza es directamente proporcional a la variable independiente. El proceso empieza por elegir un valor inicial para los parámetros incógnitos, en este caso a y b . Después se calcula el valor de la función de pérdida y, con base en este, un algoritmo elige el siguiente valor para los parámetros. Se eligió el algoritmo quasi-Newton, el cual utiliza la primera y segunda derivada de la función de pérdida para definir la magnitud y el sentido del cambio de valor a los parámetros incógnitos. Este proceso se repite hasta que el cambio en el valor de la función de pérdida es más chico que el valor asignado por el investigador.

El valor estimado para distancia radial mínima se utilizó para filtrar los datos, de manera que sólo los avistamientos efectuados a distancias radiales mayores fueron incluidos en el análisis, incluso para el caso de la estimación de $g(0)$.

Beaufort

La escala de Beaufort es adecuada para describir y cuantificar las condiciones meteorológicas y oceanográficas prevalecientes en un momento determinado en algún punto de la superficie del mar. Esta escala combina altura de olas, comportamiento de las crestas de las olas y velocidad del viento para asignar un valor, entre 0 y 10, para describir el estado del mar. Como se recordará el Beaufort fue una de las variables capturadas por el anotador durante las operaciones de registro de datos.

Para verificar que el muestreo es homogéneo bajo todas las condiciones de Beaufort en las que se muestreó, se aplicó una Prueba de Homogeneidad (χ^2). Se comparó el número observado de grupos bajo cada condición, con respecto al número esperado, calculado este proporcional al esfuerzo aplicado bajo cada condición. El esfuerzo se midió como distancia navegada. En el caso de rechazo de la hipótesis nula de homogeneidad, se seleccionarían para el análisis de abundancia aquellas condiciones de Beaufort en las que se observaron más grupos de lo esperado. Durante el análisis de datos este fue el primer criterio de filtrado, eliminando los segmentos navegados durante las condiciones inadecuadas.

Análisis y estimación

Los programas WINCRUZ y CRUISE4 generan un archivo en formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Cada una de las líneas del archivo contiene fecha, hora, posición geográfica y un grupo de datos correspondiente a una categoría particular. Las categorías se codifican con letras y contienen la siguiente información:

Código	Variables
P	Códigos de los observadores en el <i>bridge</i> del DSJ, o en el BIP, o en la Panga
Q	Códigos de los observadores en el <i>flying</i> del DSJ
V	Beaufort, altura y dirección de olas
N	Curso y velocidad del barco
W	Nubosidad, ángulos solares vertical y horizontal, dirección del viento, visibilidad
S	Número de avistamiento, observador, aparato, ángulo, retículas
A	Número de avistamiento, Especie(s)
1-6	Observador, Tamaño de grupo (mejor, inferior, superior)
M	Igual que S pero para el caso de observaciones pareadas
s	Reavistamientos (mismo número que el avistamiento original, ángulo, retículas)

Un formato de este tipo permite crear un archivo pequeño, ya que sólo se necesita agregar poca información para cambiar el valor de una variable particular. Sin embargo, este formato dificulta la fase de análisis al no presentar un arreglo con base en segmentos, es decir, lapsos conteniendo todas las variables que los describan. Con el fin de convertir los archivos originales al formato de segmentos se escribió un programa en Visual Basic 5, bajo ambiente Windows 95, llamado TRANSECT (Apéndice B).

El archivo por segmentos contiene una línea por cada segmento. Los segmentos están delimitados por los tiempos en los cuales los observadores cambiaron de posición; hubo un avistamiento; se anotó un cambio en las condiciones meteorológicas u oceanográficas; o se interrumpió el esfuerzo. Cada línea contiene el valor para todas las variables. En el caso de

avistamientos las celdas aparecen vacías, excepto en el caso de que se hubiese realizado alguno. Con un formato así cada columna contiene una serie de datos para la misma variable, por lo que es posible calcular promedios y obtener los valores extremos en cualquier hoja de cálculo. De tal forma, es posible depurar los datos al encontrar errores más fácilmente.

Una vez teniendo un juego de datos depurado se procedió a hacer el análisis de Beaufort, movimientos y estimación de $g(0)$, en este orden. Estos puntos se explicaron en apartados anteriores. Completado este paso se pudo proceder directamente a la estimación de abundancia.

Para la estimación de $f(0)$, $E(s)$, n/L , densidad y abundancia se utilizó el programa DISTANCE 3.5 (Release 4, Thomas *et al.*, 1999). Este programa requiere un archivo de datos en formato ASCII que contenga una línea por cada grupo detectado o una línea por cada transecto (unidad muestral) sin detecciones. Cada línea debe contener el nombre del estrato, su superficie, el nombre del transecto, su longitud (esfuerzo = L), la distancia perpendicular y el tamaño de grupo. Las dos últimas columnas se dejan en blanco en el caso de transectos sin detecciones.

El programa TRANSECT extrae un archivo en el formato requerido por DISTANCE a partir del archivo en formato por segmentos (Apéndice B). Cabe indicar que TRANSECT calcula las distancias perpendiculares a partir de las lecturas reticulares y angulares (se requiere ingresar el ángulo reticular y la altura de la plataforma). Esto lo hace en el momento de crear el archivo por segmentos usando el algoritmo explicado en el Apéndice A. Con TRANSECT se puede filtrar, extrayendo sólo una porción del juego total de datos hacia el archivo para DISTANCE. Los filtros incluyen especie, Beaufort máximo (es decir desde 0 hasta el seleccionado), plataforma (sitio donde estaban ubicados los observadores), distancia radial mínima, número mínimo de observadores en operación en cada plataforma, fecha y zona. Para seleccionar los transectos de una zona particular otro algoritmo fue incorporado en TRANSECT.

TRANSECT también crea archivos para graficar en mapas los transectos, avistamientos y movimientos de los grupos. Además crea archivos para el análisis de movimientos, $g(0)$ y efectividad de los observadores. Por último crea un archivo adecuado para la estimación de varianzas con bootstrap.

La unidad muestral utilizada (transecto) está definida por el tiempo de navegación durante el cual el barco siguió un curso fijo de esfuerzo ininterrumpido. Al momento de la rotación de observadores el esfuerzo no se interrumpió. El esfuerzo se interrumpía cuando se llegaba al fin de un transecto y se tenía que cambiar de rumbo, cuando las condiciones meteorológicas eran muy pobres y

cuando se tomaban muestras oceanográficas. Típicamente los transectos tuvieron una duración de una hora.

Tres modelos “clave” fueron ensayados para ajustar $f(0)$:

$$\begin{aligned} \text{Uniforme :} & \quad \frac{1}{w} \\ \text{Seminormal :} & \quad e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)} \\ \text{Tasa de riesgo :} & \quad 1 - e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^b} \end{aligned}$$

donde w es el ancho de banda, x es la distancia perpendicular, y b y σ son parámetros que necesitan ser ajustados. Tres series de expansión fueron también ensayadas:

$$\begin{aligned} \text{Coseno :} & \quad \sum_{j=1}^m a_j \cos\left(\frac{j\pi x}{w}\right) \\ \text{Polinomial simple :} & \quad \sum_{j=1}^m a_j \left(\frac{x}{w}\right)^{2j} \\ \text{Polinomial hermite :} & \quad \sum_{j=2}^m a_j H_{2j}\left(\frac{x}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

donde a y H son parámetros a ser ajustados; m es el número de sumandos necesarios para conseguir un ajuste adecuado; y j es un contador entero. La serie de expansión sirve para lograr un mejor ajuste del modelo clave y se combinan como:

$$f(x) = \text{modelo clave}(x) [1 + \text{serie de expansión}(x)]$$

DISTANCE puede combinar cada modelo clave con cada serie de expansión para hallar la mejor combinación. Por supuesto se incluye al modelo clave sin serie de expansión. El ajuste se realiza con máxima verosimilitud y el mejor modelo se elige bajo el criterio de Akaike (Akaike's Information Criterion, AIC). Para cada modelo ajustado se calcula este criterio como:

$$-2 \cdot \ln(\mathcal{L}) + 2q$$

donde $\ln(\mathcal{L})$ es la función logarítmica de verosimilitud evaluada a las máximas verosimilitudes para los parámetros del modelo y q es el número de parámetros usados para ajustar el modelo. El modelo con el mínimo valor para AIC es el seleccionado.

El tamaño esperado de grupo $[E(s)]$ fue estimado por regresión de tamaño de grupo (s) vs. $g(x)$. Este método trata de corregir el posible sesgo provocado por la lógica consecuencia de observar grupos más grandes a distancias mayores. Es decir, los grupos pequeños pueden estar siendo sistemáticamente perdidos cuando están muy alejados del barco. Esto provoca que el tamaño de grupo sea sobrestimado, y por tanto, la densidad. El estimador por regresión consiste en ajustar el modelo:

$$\ln(s) = a + b \cdot g(x)$$

Después se calcula el valor de $\ln(s)$ cuando se supone que todos los grupos son detectados, es decir cuando $g(x)=1$. De tal forma:

$$E(s) = e^{a+b}$$

Sin embargo, si la regresión no es significativa, es decir que no hay un sesgo significativo, se prefiere calcular $E(s)$ con la media de todos los grupos incluidos en el análisis. Buckland *et al.* (1993) recomiendan utilizar $\alpha=0.15$ como criterio para decidir la significancia de la regresión.

Una vez contando con las estimaciones de densidad por estrato, la "Densidad Total" fue estimada como promedio ponderado por la superficie de cada estrato:

$$\hat{D}_{TOT} = \frac{(\hat{D}_A \cdot S_A) + (\hat{D}_B \cdot S_B) + \dots + (\hat{D}_Z \cdot S_Z)}{(S_A + S_B + \dots + S_Z)}$$

donde el subíndice *TOT* representa a todos los estratos desde el *A* hasta *Z* estratos y *S* la superficie de cada estrato. La abundancia (*N*) resulta de multiplicar la densidad por el área total de estudio, o sea, la suma de la superficie de todos los estratos analizados.

Estimaciones de variabilidad

La parte final del análisis consistió en estimar la precisión de la estimación puntual de abundancia. Esto culminó en la construcción de un intervalo de confianza al 95% para la abundancia total.

Las medidas de variabilidad e intervalos de confianza pueden ser construidos con fórmulas teóricas que supongan algún tipo de distribución o con métodos iterativos como Jackknife y Bootstrap. La ventaja de los iterativos radica en el hecho de que no es necesario someterse a los supuestos requeridos por los modelos paramétricos. Por otro lado, al ser iterativos, es posible en cada una de las réplicas muestrales que generan estos métodos, repetir todo el proceso que se siguió para la estimación

puntual. Esto permite, en el caso de la estimación de abundancia, incluir en la varianza la incertidumbre generada por la elección de un modelo de ajuste para $f(0)$. También se puede incluir la incertidumbre generada por el proceso elegido para estimar $E(s)$ (media o regresión).

En este trabajo se construyó un intervalo de confianza para la abundancia con base en un proceso bootstrap con 2,000 réplicas. Sin embargo se calcularon las varianzas analíticas o teóricas de cada parámetro, con el fin de servir como un punto de referencia para validar el proceso bootstrap.

Varianzas analíticas

La varianza de $f(0)$ se calcula a partir de los estimadores de máxima verosimilitud, los cuales son ajustados por DISTANCE. Como se mencionó anteriormente, la varianza para $g(0)$ se estimó a partir de un procedimiento bootstrap. La varianza de la tasa de encuentro (n/L) se calculó a partir de la fórmula empírica para transectos replicados dada por Buckland *et al.* (1993, p. 90). La varianza para $E(s)$ se estimó a partir de $\text{var}[E(s)]/n$, a partir de los n grupos detectados e incluidos en el análisis. Esto es porque se requiere el error estándar, porque el resto de los componentes de la densidad son parámetros. En el caso en que el tamaño de grupo esperado se calcule a partir de regresión se utiliza la fórmula dada por Buckland *et al.* (1993, p. 80).

La varianza de la densidad, y por tanto para la abundancia, se estimó con el Método Delta (Seber, 1980) como:

$$\text{var}(\hat{D}) = \hat{D}^2 \cdot \left[\frac{\text{var}(n)}{n^2} + \frac{\text{var}(\hat{E}(s))}{\hat{E}(s)^2} + \frac{\text{var}(\hat{f}(0))}{\hat{f}(0)^2} + \frac{\text{var}(\hat{g}(0))}{\hat{g}(0)^2} \right]$$

donde la varianza del parámetro de interés es el resultado de la suma de los coeficientes de variación al cuadrado de todos los componentes incluidos, multiplicada por el cuadrado de la estimación puntual del parámetro de interés. De manera similar se calculó la varianza para el término de probabilidad del BIP [$f(0)/g(0)$]. El cálculo de la varianza para la densidad en todos los estratos utiliza la ponderación por superficie de cada una de las varianzas que componen a la estimación, tal y como se ponderó la estimación puntual. Todos los intervalos de confianza analíticos se construyeron suponiendo distribución log-normal.

Varianzas Bootstrap

Se escribió un programa en Visual Basic 5 para correr un proceso bootstrap con 2,000 réplicas para estimar la varianza y construir un intervalo de confianza para la abundancia total de vaquita. El primer paso del proceso consistió en arreglar cuatro juegos de datos, los cuales fueron los usados en la estimación puntual:

- Distancias colectadas por el DSJ en el Área Núcleo.
- Avistamientos pareados por el DSJ para el cálculo de $g(0)$.
- Avistamientos por el BIP en el Área Núcleo para la estimación del término de probabilidad.
- Avistamientos por el BIP en el Área Somera.

no se incluyó el esfuerzo hecho desde la Panga pues no se obtuvieron avistamientos desde esta.

En cada réplica bootstrap se construyó una muestra de cada uno de los juegos de datos mencionados. El programa DISTANCE incluye la rutina D35engine, que es un archivo ejecutable el cual acepta un archivo ASCII para calcular los parámetros necesarios para estimar la densidad, los cuales son escritos a otro archivo ASCII de salida. Las lecturas de este último archivo fueron utilizadas por el programa escrito, el cual también automatiza el proceso de arranque del D35engine.

Para el DSJ se calculó $g(0)$, $f(0)$, n/L , $E(s)$, D y N , los cuales constituyen la estimación de abundancia en el Área Núcleo. Para el BIP se calculó n/L y $f(0)/g(0)$ en el Área Núcleo. Posteriormente $f(0)/g(0)$ fue utilizado en el Área Somera, junto con n/L y $E(s)$, para estimar D y N en el Área Somera. Por último se ponderaron la densidad y abundancia totales para obtener D_{TOT} y N_{TOT} . También se incluyó en el análisis, como referencia, la densidad de grupos DS.

El programa escribe un archivo ASCII de salida, el cual incluye en cada línea todos los parámetros descritos y que es fácilmente importable por cualquier hoja de cálculo. En esta se pueden hacer los cálculos de medidas de variabilidad como varianza, error estándar y coeficiente de variación, los cuales se calculan con $B=2000$ (2000 datos).

El intervalo de confianza se construye con los percentiles de las 2,000 réplicas para cada parámetro estimado. Los datos se ordenan de menor a mayor y los límites inferior y superior del

intervalo al, aproximadamente, 95% de confianza, están representados por los percentiles 2.5 y 97.5% respectivamente. Los intervalos fueron construidos para cada parámetro calculado.

En el caso en el que la media bootstrap y el valor original del parámetro discrepen, es necesario hacer alguna corrección al intervalo de confianza basado en percentiles. Se usó el método BC_a (bias-corrected and accelerated) para hacer esta corrección (Efron y Tibshirani, 1993). Este método corrige el intervalo con base en dos parámetros, a y z_0 . El primero es el parámetro de aceleración y el segundo es el parámetro de sesgo. El parámetro de sesgo mide la discrepancia entre la mediana bootstrap y el parámetro original en unidades normalizadas. El parámetro de aceleración mide la tasa de cambio del error estándar del parámetro bootstrap con respecto al parámetro original, medido en una escala normalizada. Con estos dos parámetros el método obtiene los percentiles inferior y superior corregidos, en lugar de 2.5, 97.5 del intervalo al 95% original no corregido como:

$$\alpha_{\inf} = \Phi \left(\hat{z}_0 + \frac{\hat{z}_0 + z^{(\alpha)}}{1 - \hat{a}(\hat{z}_0 + z^{(\alpha)})} \right)$$

$$\alpha_{\sup} = \Phi \left(\hat{z}_0 + \frac{\hat{z}_0 + z^{(1-\alpha)}}{1 - \hat{a}(\hat{z}_0 + z^{(1-\alpha)})} \right)$$

$$\hat{z}_0 = \Phi^{-1} \left(\frac{\# \{ \hat{\theta}^*(b) < \hat{\theta} \}}{B} \right)$$

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\theta}_{(\cdot)} - \hat{\theta}_{(i)})^3}{6 \left\{ \sum_{i=1}^n (\hat{\theta}_{(\cdot)} - \hat{\theta}_{(i)})^2 \right\}^{3/2}}$$

$\hat{\theta}_{(i)}$ = es el valor de θ con el i_{avo} dato eliminado

$$\hat{\theta}_{(\cdot)} = \sum_{i=1}^n (\hat{\theta}_{(i)} / n)$$

donde $\alpha_{\inf}$ y $\alpha_{\sup}$ representan los percentiles inferior y superior después de la corrección; Φ es la función estándar de la distribución normal acumulativa; Φ^{-1} es la inversa de Φ ; $z^{(\alpha)}$ es el 100α percentil de la distribución normal; $\# \{ \}$ representa el número de réplicas bootstrap que son menores al valor del parámetro original; θ es cualquier parámetro del cual se quiere obtener en intervalo de confianza; $\theta^*(b)$ es una de las B replicas del parámetro.

RESULTADOS

Datos

David Starr Jordan

El DSJ efectuó 1,609 Km de esfuerzo en las áreas Núcleo y Sureste. El crucero se realizó en dos partes, ocupando la primera del 16 al 31 de agosto y la segunda del 6 al 19 de septiembre. Se detectaron 110 grupos de vaquitas en el Área Núcleo y ninguno en el Sureste. Desde el *flying* se detectaron 101 grupos y 19 desde el *bridge*. Los transectos seguidos y la posición de los avistamientos se muestran en la Figura 7. Los transectos se navegaron bajo condiciones de Beaufort de cero a seis. Debido a la escasez de datos del *bridge* las estimaciones se basaron sólo en los datos del *flying*. Los avistamientos desde el *bridge* fueron utilizados sólo para la estimación de $g(0)$.

Buque de Investigación Pesquera XI

El BIP navegó 1,065 Km en el Área Somera y 579 Km en el Área Núcleo. Al igual que el DSJ, el esfuerzo se repartió en dos periodos, uno del 17 al 31 de agosto y otro del 7 al 23 de septiembre. Se detectaron 12 grupos de vaquitas, 6 en el Área Núcleo y 6 en el Área Somera (Fig. 8). El BIP operó bajo condiciones de Beaufort de cero a cinco.

Bote de Inspección de SEMARNAP

La Panga efectuó una parte del esfuerzo en aguas al norte de San Felipe y en los canales del Delta del Río Colorado entre las islas Montague y Pelicano (Fig. 8). Navegó 111 Km durante septiembre 18, 19 y 21. Ningún grupo pudo ser detectado desde este bote.

Abundancia en el Área Núcleo (DSJ)

Corrección por Beaufort

Los 101 avistamientos desde el *flying* fueron utilizados para analizar la homogeneidad del muestreo respecto al Beaufort (Tabla I). El valor de χ^2 fue muy significativo ($p < 0.0001$) lo que indica la heterogeneidad de la muestra. Como se aprecia en la Tabla I entre Beaufort 0-2 se observan más grupos de los que se espera suponiendo homogeneidad. Las mismas condiciones fueron elegidas para

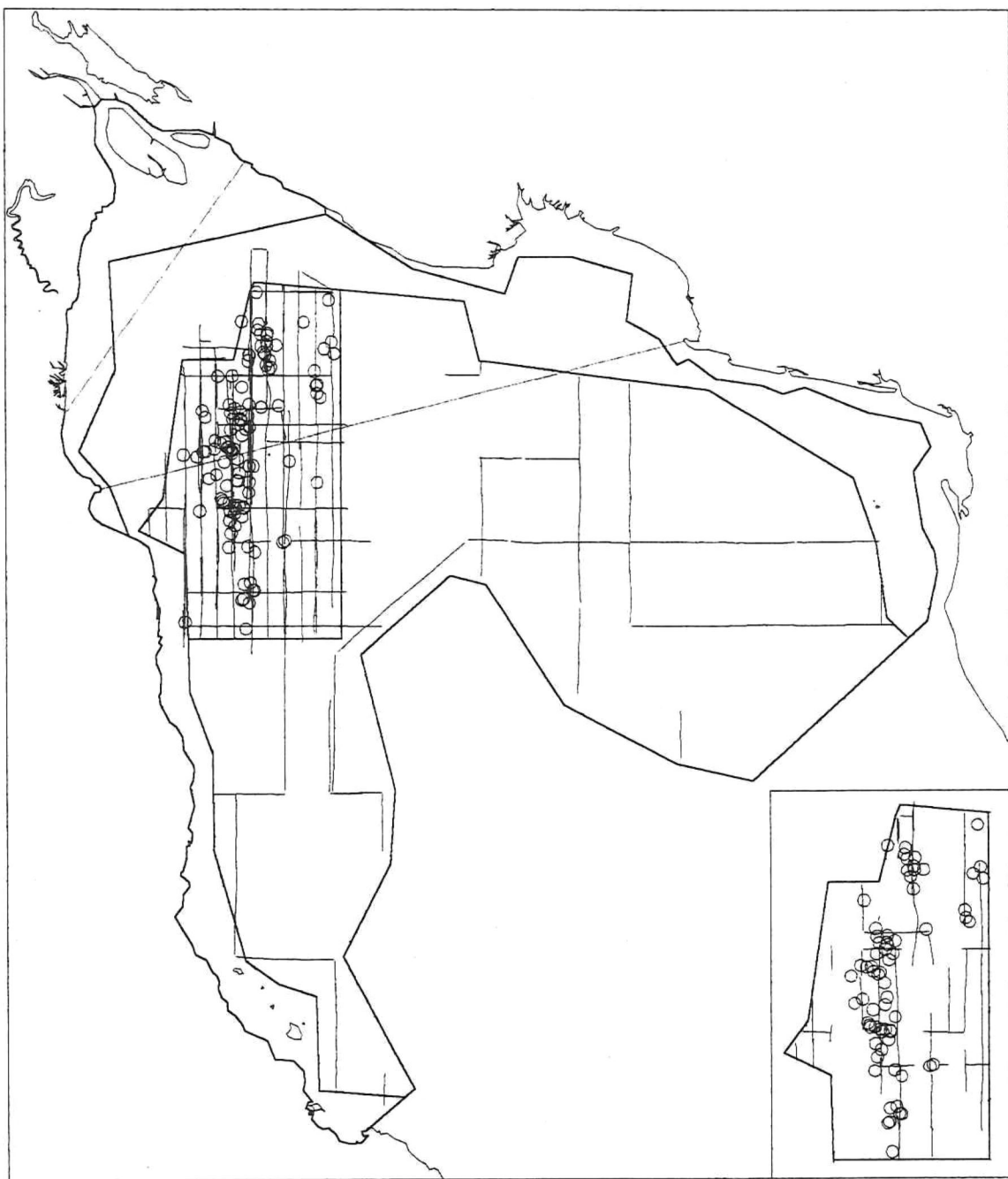


Figura 7. Transectos y avistamientos realizados por el DSJ en las áreas núcleo y sureste. En el recuadro de la esquina inferior derecha se muestran los transectos y avistamientos del área núcleo que fueron utilizados para el análisis de abundancia.

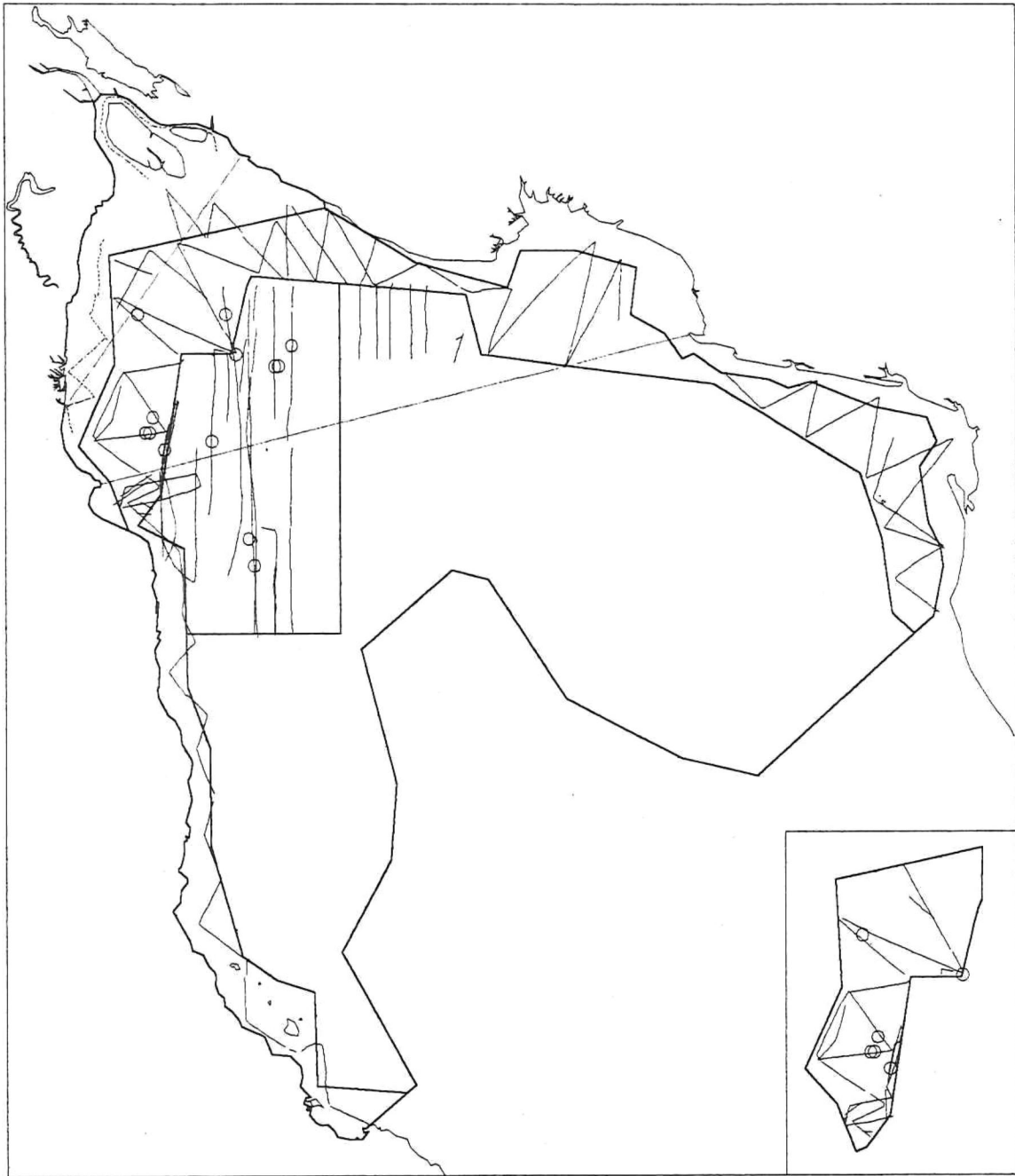


Figura 8. Transectos y avistamientos realizados por el BIP en las áreas núcleo y somera. En el recuadro de la esquina inferior derecha se muestran los transectos y avistamientos del sustrato somero que fueron utilizados para el análisis de abundancia. Los transectos (líneas quebradas) en el área del delta fueron navegados por la Panga.

Tabla I. Análisis de homogeneidad para verificar si el muestreo fue similar bajo todas las condiciones de Beaufort que se presentaron durante el crucero. No se incluye Beaufort 6 porque no se realizaron avistamientos bajo estas condiciones. El esfuerzo se da en Km.

Beaufort	Esfuerzo	Observados	Esperados	χ^2
0	49.14	14	3	34.27
1	107.58	23	7	33.94
2	342.16	39	23	10.84
3	423.24	13	29	8.54
4	359.96	5	24	15.38
5	210.44	7	14	3.68
				$\chi^2 = 106.66$
				$\chi^2 \text{ crítica (0.05, 5 g.l.)} = 11.07$
				$p < 0.00001$

la estimación de abundancia de vaquita por Barlow *et al.* (1993). La muestra de transectos navegados bajo estas condiciones de Beaufort incluye 499 Km y 76 avistamientos desde el *flying* del DSJ.

Análisis de movimientos

Para 33 de los grupos avistados se contó con reavistamientos. En total se tienen 85 observaciones adecuadas de diferencia entre distancia radial final e inicial ($r_2 - r_1$). Se eliminaron aquellas observaciones para las cuales se calculó una velocidad de nado superior a 20 Km/h, las cuales deben haber sido el resultado de mediciones inexactas. La mayoría de las observaciones eliminadas corresponden a las distancias radiales más grandes.

La mejor recta de regresión según el método iterativo utilizado fue (Fig. 9):

$$(r_2 - r_1) = 315.8 - 0.346 \cdot r_1$$

la cual estima que la distancia radial mínima antes de afectar a los grupos es de 913 m. Como una forma de evaluar la validez de esta distancia, se compararon las velocidades de nado de los grupos observados a distancias menores a 913 m (grupo interior) con las de los grupos observados a distancias mayores (grupo exterior). La velocidad promedio del grupo interior fue de 11.3 Km/h ($n=9$, d.e.=3.6) y de 8.2 Km/h ($n=71$, d.e.=6.0) para el exterior. Un análisis de diferencia de medias, suponiendo

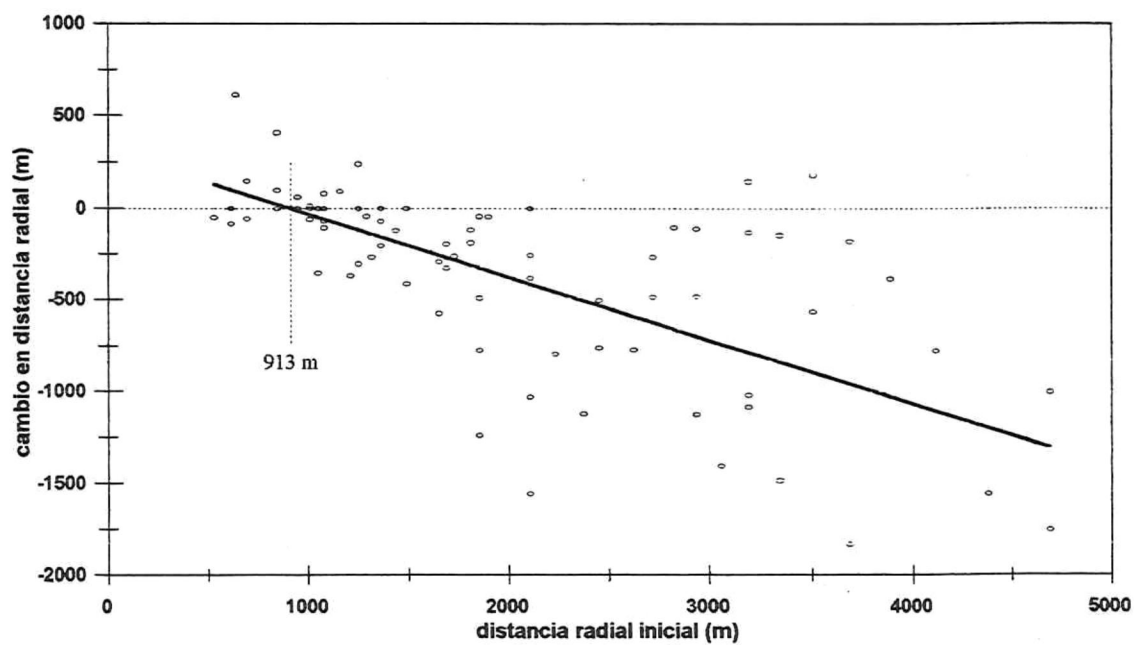


Figura 9. Recta de regresión ajustada con un método iterativo a los datos del análisis de movimientos.

varianzas desiguales, indica que la diferencia entre velocidades es ligeramente significativa ($t=2.17$, $p=0.048$).

Con el fin de disminuir el sesgo debido al movimiento de los grupos en respuesta a la presencia del barco, se eliminaron del análisis los grupos que fueron detectados en el primer avistamiento a una distancia radial menor a 913 m. Las distancias perpendiculares usadas son las que corresponden al primer avistamiento del grupo detectado.

El tamaño de muestra después de aplicar este criterio queda en 70 avistamientos desde el *flying* del DSJ, bajo condiciones de Beaufort entre 0-2. Desde el *bridge* se pudieron detectar 11 grupos bajo las mismas condiciones.

Estimación de $g(0)$

Del juego de datos disponible hasta este punto se seleccionaron los avistamientos efectuados a distancias perpendiculares entre 0 y 500 m. Estos incluyen 27 grupos detectados desde el *flying*, 7 desde el *bridge* y 4 empates. En la Figura 10 se muestran los histogramas de las distancias perpendiculares para el *flying* y para el *bridge*, junto con una función de detección ajustada para cada plataforma (con muy pocos grados de libertad para el *bridge*). Se puede apreciar cómo ambos modelos muestran un hombro aproximadamente en los primeros 500 m con formas similares para la curva. Es decir, se puede suponer que en los primeros 500 m la probabilidad de detección es más o menos constante, lo que permite eliminar del cálculo de $g(0)$ los componentes probabilísticos.

La $g(0)$ calculada para el *flying* es de 0.571 y de 0.148 para el *bridge*. Después de aplicar el proceso bootstrap los errores estándar se estiman en 0.167 y 0.071 respectivamente (Tabla II).

La estimación puntual para el *flying* y su error estándar asociado fueron los usados para estimar la densidad en el Área Núcleo con los datos generados abordo del DSJ (datos en negritas en la Tabla II).

Tabla II. Estimaciones de $g(0)$ para el *flying* y el *bridge* del David Starr Jordan

	<i>Flying</i>	<i>Bridge</i>
Estimación Puntual	0.571	0.148
Media Bootstrap	0.509	0.161
Varianza	0.028	0.005
Error Estándar	0.167	0.071
Coefficiente de Variación	0.328	0.441

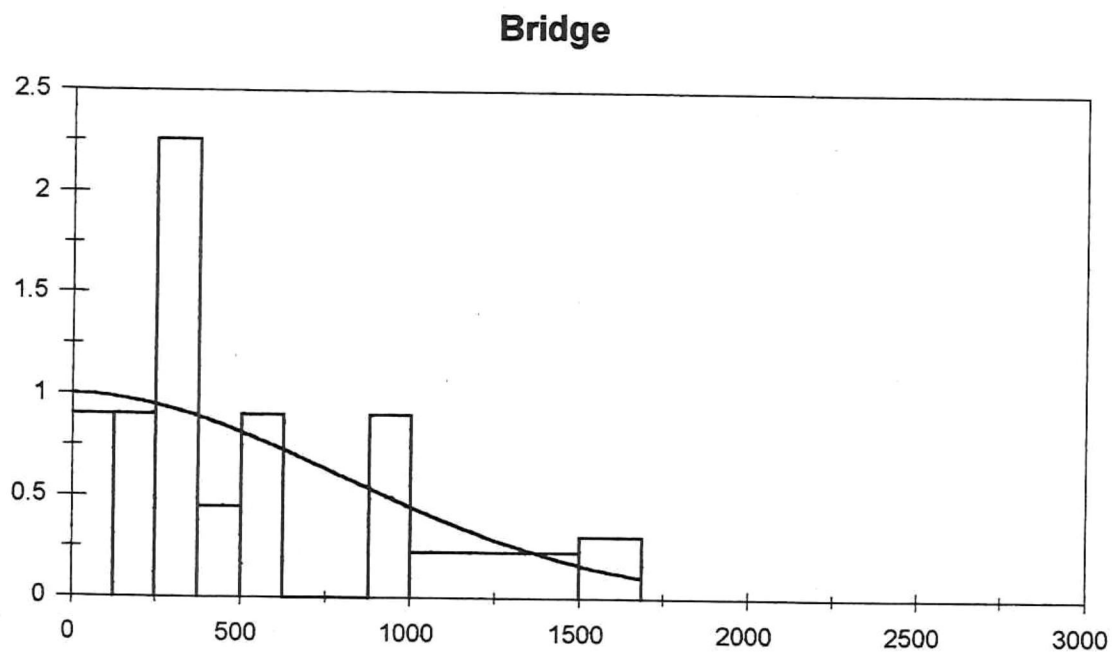
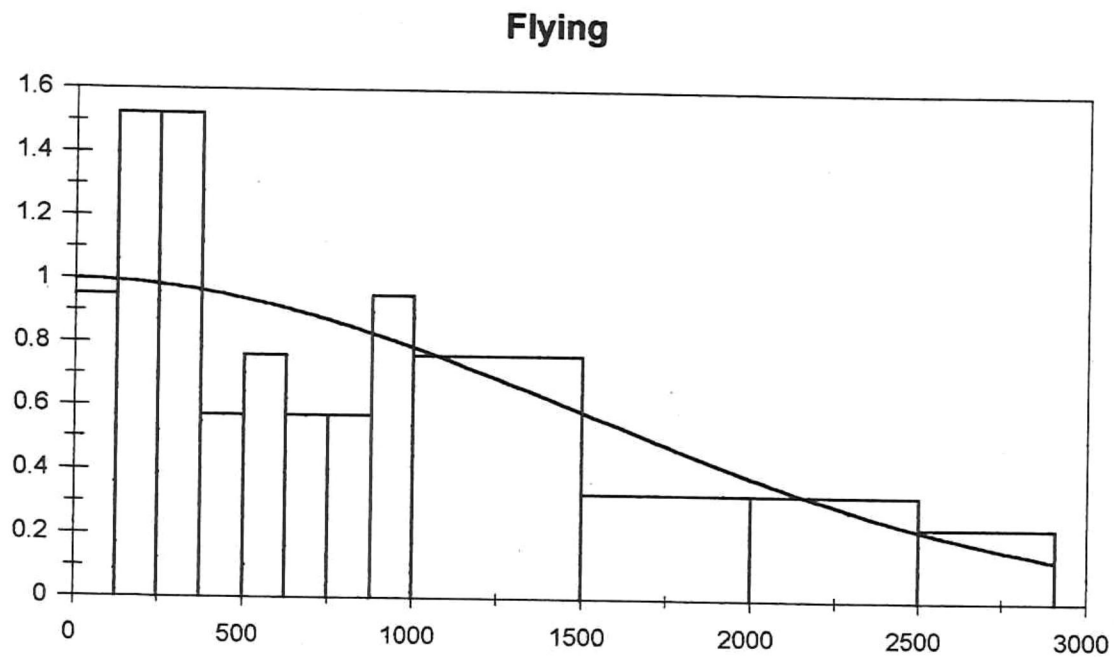


Figura 10. Histogramas de frecuencias de distancias perpendiculares para ambas plataformas del DSJ. Se muestra la función de detección ajustada como una referencia para observar que en ambos casos la probabilidad de detección es aproximadamente constante en los primeros 500 m de la banda de detección. Las distancias en el eje x dadas en metros. El eje y presenta la probabilidad de detección.

Densidad y Abundancia

La distancia navegada en el Área Núcleo, bajo Beaufort 0-2, fue de 439.8 Km repartidos en 32 transectos. Durante todo este esfuerzo tres observadores laboraron en el *flying* usando Big Eyes. Se detectaron 70 grupos a una distancia radial de 913 m o más (Fig. 7).

El modelo que mejor se ajustó a las distancias perpendiculares para la estimación de $f(0)$, según el criterio de Akaike, fue el uniforme con serie de expansión coseno de orden 1 ($m=1$, Fig. 11). El valor para el único parámetro de este modelo se estimó en 0.6412, con $w=2.97$ Km, la distancia perpendicular más grande. Se utilizó el juego completo de datos sin truncar, ya que al inspeccionar los histogramas del juego completo y del juego con un 10% de truncado, se observa un mejor ajuste del primero. Por otro lado el análisis de χ^2 arroja una mayor p para el juego completo (0.9217 vs. 0.8699). Por supuesto no hay evidencias para rechazar al modelo según este valor de p . La $f(0)$ estimada según el modelo seleccionado es de 0.552 Km^{-1} (Tabla III, Apéndice C).

El tamaño de grupo esperado se estimó a partir de la media, ya que la regresión arrojó una $p=0.59$. El tamaño promedio de los 70 grupos detectados fue de 2.0 (Tabla III, Apéndice C). La tasa de encuentro se calculó en 0.159 grupos/Km (Tabla III, Apéndice C).

La densidad para el Área Núcleo se estima en $0.077 \text{ grupos/Km}^2$ y $0.154 \text{ individuos/Km}^2$. La superficie de este estrato es de $2,659.7 \text{ Km}^2$, lo que resulta en una abundancia de 409 vaquitas (Tabla III, Apéndice C).

Abundancia en el Área Somera (BIP)

Estimación del Término de Probabilidad

De los seis grupos que se detectaron en el Área Núcleo por el BIP sólo uno se hizo bajo condiciones de Beaufort 0-2. El cálculo de la tasa de encuentro con base en un solo avistamiento puede estar sesgada y ser imprecisa. Los restantes cinco grupos se detectaron bajo Beaufort 5. Se decidió, entonces, calcular todos los parámetros de la densidad en el Área Núcleo bajo Beaufort 0-3 (Tabla III, Apéndice C).

Bajo estas condiciones el tamaño de grupo promedio es muy similar al dado bajo Beaufort 0-2 (1.98). La muestra para estimar $g(0)$ aumentó en 10 avistamientos para el *flying*, por lo que la estimación para esta plataforma no cambió. La $f(0)$ se estimó en 0.571 Km^{-1} , la cual también es muy similar a la anterior. El componente que varió significativamente fue la tasa de encuentro, que es 33%

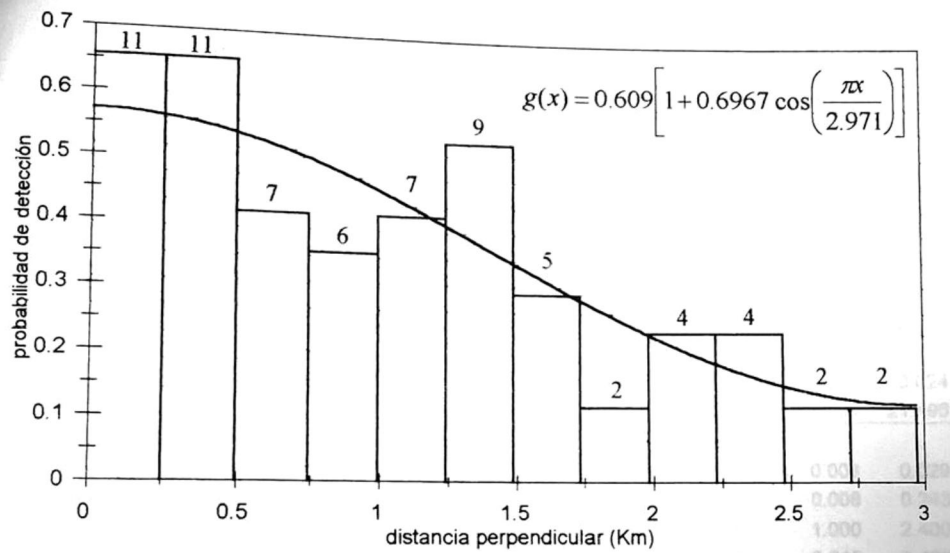


Figura 11. Función de detección ajustada a las 70 distancias perpendiculares utilizadas en el análisis de abundancia en el Área Núcleo. El número arriba de las barras es la frecuencia en cada intervalo de clase. Los valores de los parámetros de la función se encuentran en la ecuación.

Tabla III. Estimaciones puntuales y de variabilidad usando bootstrap. Promedio es la media aritmética de las B réplicas. E.E. es el error estándar de las mismas. C.V.% es el coeficiente de variación porcentual calculado con el cociente del error estándar y el promedio. I.C. es el intervalo de confianza al 95%. Este es un intervalo construido con los percentiles de las 2,000 réplicas modificados con el método BC_a .

Parámetro	Estimación puntual	Estimaciones Bootstrap				I.C. al 95%	
		Promedio	E.E.	C.V. %			
Área Núcleo, DSJ, Beaufort 0-2							
f(0)	0.552	0.583	0.097	16.58	0.469	0.839	
n/L	0.159	0.162	0.056	34.73	0.073	0.289	
DS	0.077	0.104	0.064	61.37	0.023	0.175	
E(s)	2.000	2.006	0.126	6.27	1.688	2.192	
g(0)	0.571	0.506	0.166	32.71	0.286	0.875	
D	0.154	0.208	0.127	61.13	0.040	0.343	
N	409	552	338	61.13	105	912	
Área Núcleo, DSJ, Beaufort 0-3							
f(0)	0.571	0.632	0.118	18.63	0.490	0.845	
n/L	0.107	0.108	0.034	31.59	0.051	0.183	
E(s)	1.975	1.946	0.098	5.04	1.806	2.205	
D	0.105	0.145	0.084	58.29	0.034	0.223	
Área Núcleo, BIP, Beaufort 0-3							
n/L	0.016	0.018	0.006	35.23	0.003	0.024	
f(0) / g(0)	6.777	9.845	7.902	80.27	2.134	21.496	
Área Somera, BIP, Beaufort 0-3							
n/L	0.018	0.018	0.007	42.15	0.003	0.029	
DS	0.059	0.085	0.079	92.71	0.008	0.243	
E(s)	2.000	2.004	0.327	16.31	1.000	2.400	
D	0.119	0.170	0.159	93.80	0.015	0.493	
N	158	225	211	93.80	20	655	
Estimaciones Combinadas							
D	0.142	0.195	0.099	50.72	0.044	0.270	
N	567	778	394	50.72	177	1073	

menor (0.107 grupos/Km). La densidad es también más chica en este porcentaje (0.105 individuos/Km²).

La tasa de encuentro del BIP fue de 0.0157 grupos/Km, un orden de magnitud menor que el DSJ. El término de probabilidad $[f(0)/g(0)]$, con estos datos, tiene una magnitud de 6.78 Km⁻¹ (Tabla III, Apéndice C).

Post-estratificación

Como se puede apreciar en la Figura 8, los seis grupos avistados desde el BIP en el Área Somera se detectaron en la porción noroeste de este estrato. Es lógico suponer que, en la mayor del Área Somera, la densidad fue cero, por lo que la post-estratificación es necesaria para obtener una estimación más exacta y precisa. El criterio para delimitar el sub-estrato tuvo base en el área recorrida durante los días en que se vieron vaquitas. Los transectos de otros días, que estuvieran dentro de esta zona, también fueron incluidos. El nuevo estrato (Subestrato Somero, Fig. 8) resultó tener 1,327 Km² de superficie.

Densidad y Abundancia en el Subestrato Somero

Para compatibilizar el término de probabilidad, con los datos obtenidos por el BIP en el Subestrato Somero, se utilizaron los transectos navegados por esta embarcación bajo Beaufort 0-3. Los seis grupos avistados se detectaron durante los 342 Km de esfuerzo aplicado, dividido en 25 transectos (Figura 8, Apéndice C).

La tasa de encuentro en el subestrato fue de 0.0175 grupos/Km (Tabla III, Apéndice C). El tamaño esperado de grupo fue 2.0, calculado como el promedio de los seis grupos detectados (Tabla III, Apéndice C). La densidad se calcula en 0.119 vaquitas/Km² y se estima que la abundancia en el estrato fue de 158 individuos (Tabla III, Apéndice C).

Abundancia en las otras zonas

No se detectaron grupos de vaquita en el Área Sureste, en el Área del Delta, y en la zona del Área Somera que excluye al Subestrato Somero. Se estima que la densidad en estas áreas es cero o un valor muy pequeño, por lo que no serán incluidas en la estimación de la densidad y abundancia totales.

Abundancia Total

La suma ponderada de densidades estima que la densidad total promedio fue de 0.142 vaquitas/Km². La abundancia en los 3,987.1 Km² totales (2,659.7 + 1,327.4) se calcula en 567 vaquitas (Tabla III, Apéndice C).

Medidas de Variabilidad

En el Apéndice C se han listado las medidas de variabilidad analíticas o teóricas de todos los parámetros estimados. En la Tabla III se resumen todos los parámetros estimados junto con las medidas de variabilidad a partir del método bootstrap. Todos los intervalos de confianza fueron corregidos con el Método BC_a.

En general el Coeficiente de Variación de todos los parámetros es mayor cuando se estima por bootstrap. En el caso de la tasa de encuentro y término de probabilidad del BIP en el Área Núcleo, así como la densidad y abundancia en el Subestrato Somero, esto no fue así. Los estimadores teóricos suelen ser inestables ante muestras pequeñas, que es el caso de la muestra del BIP. Por ejemplo las tasas de encuentro del BIP en las áreas Núcleo y Somera son muy parecidas. En el Área Núcleo se navegaron 381 Km en 24 transectos y se avistaron 6 grupos. En el subestrato se recorrieron 342 Km en 25 transectos con 6 detecciones. La razón por la que las varianzas son tan diferentes es que en el Núcleo dos grupos se detectaron en el mismo transecto y el resto en transectos diferentes. En el Subestrato Somero 3 grupos se detectaron en un transecto, 2 en otro y el restante en otro diferente. Además la varianza de L (esfuerzo en distancia) es muy distinto entre ambas muestras. En comparación las varianzas bootstrap son muy parecidas para ambas tasas de encuentro, lo cual indica la bondad de este método para la estimación de medidas de variabilidad.

DISCUSIÓN

Aspectos sobre la estimación de abundancia

Para intentar obtener una buena estimación de abundancia se aplicaron algunas variantes a los métodos estándar de transecto lineal. De esta forma se logró aplicar un diseño específico adecuado a las características de la vaquita y su entorno. El uso de dos embarcaciones, de Big Eyes (binoculares 25x150), de estratos preestablecidos, de un diseño para estimar $g(0)_{DSJ}$ y $[f(0)/g(0)]_{BIP}$, y de un análisis de movimientos, hacen de esta estimación la más confiable con que se cuenta. Indudablemente esta estimación será el punto de partida para otros estudios poblacionales y para los programas de recuperación que se propongan en el seno del CIRVA.

Barlow *et al.* (1997) efectuaron varias estimaciones de abundancia de vaquita, las primeras con las que se contó, a partir de datos colectados durante varias campañas de investigación en campo (Silber, 1990; Silber y Norris, 1991; Barlow *et al.*, 1993, Mangels y Gerrodette, 1994). Los datos fueron colectados desde diferentes tipos de plataformas, incluyendo avionetas y embarcaciones de diversas características. Ninguna de las campañas fue diseñada para efectuar transectos lineales, excepto la reportada por Mangels y Gerrodette (1994). Sin embargo esta última no contó con un diseño para estimar $g(0)$. De tal forma, los autores requirieron de incluir en la estimación los parámetros probabilísticos $g(0)$ y $f(0)$ de trabajos similares efectuados con una especie muy relacionada, *Phocoena phocoena*. Todas estas estimaciones no son confiablemente comparables debido a la heterogeneidad explicada, además de que cubrieron áreas de distinta superficie, sin embargo denotan, incluyendo la estimación de este trabajo, que la abundancia de vaquita se halla en los cientos de animales.

La estimación de abundancia detallada en este trabajo tiene asociada una alta variación (C.V.=50.72%). Las anteriores estimaciones de abundancia de vaquita reportan coeficientes entre 39 y 143%. Otros trabajos con especies de la Familia Phocoenidae calculan coeficientes entre 16 y 132% (*Phocoena phocoena*: Palka, 1995; Bjørge y Øien, 1995; *Phocoenoides dalli*: Turnock *et al.*, 1995; Turnock y Buckland, 1995). Sin embargo estos coeficientes fueron calculados analíticamente o por bootstrap sin elegir modelo para $f(0)$ en cada réplica. Como se ha explicado, en este trabajo se usó bootstrap con selección de modelo, lo que incluye la mayor variabilidad posible a la estimación. Comparativamente, la variación de esta estimación no está muy alejada de las mejores estimaciones para Phocoenidos. Los componentes que más influyeron en la varianza fueron los probabilísticos y las tasas de encuentro.

Proceso de Detección

La estimación de componentes probabilísticos y tasas de encuentro se efectuó a partir de muestras muy pequeñas obtenidas desde el *bridge* del DSJ y desde el BIP, comparadas con la adecuada muestra obtenida desde el *flying* del DSJ. La principal causa de esto, además de la mayor altura del *flying*, fue el uso de Big Eyes en esta última plataforma. Los estudios que han tratado de obtener inferencias cuantitativas de la población de vaquita han sufrido de este mismo problema (Wells *et al.*, 1981; Vidal *et al.*, 1987; Silber 1990; cruceros PNICMM e IBUNAM en Gerrodette *et al.*, 1995). En ellos se han utilizado embarcaciones pequeñas y binoculares 7x50 o simple vista.

Los datos indican que los Big Eyes son considerablemente más efectivos en detectar vaquitas que los binoculares. El *flying* del DSJ fue 7 veces más efectivo que el BIP en detectar vaquitas, como los indica la comparación del término de probabilidad de ambas plataformas. La razón de las tasas de encuentro de ambas plataformas en el Área Núcleo indica un valor similar ($0.107 / 0.016 = 6.8$). El BIP es de los barcos más altos utilizados para estudiar vaquitas, por lo que es de suponer que anteriores estudios han tenido aún menor efectividad, ya que fueron realizados a bordo de pangas o embarcaciones del tipo Patrullas de la Armada de México.

El análisis de movimientos indicó que las vaquitas reaccionan a la presencia del barco a un cierto umbral. Se estimó que a una distancia radial de 913m del DSJ los grupos se alejan del barco. Los binoculares 7x50 no son muy efectivos a más de 1,000 m, además de que las lecturas reticulares a esta distancia son muy imprecisas. Este es otro factor que reduce la efectividad de estudios basados en el uso de binoculares sencillos.

Componentes probabilísticos

Los factores que más contribuyeron a la varianza de la estimación fueron $g(0)$ y $f(0)$. La estimación analítica de $f(0)$ fue sólo posible para los datos del *flying* del DSJ. Por otro lado, el escaso número de detecciones desde el *bridge* ocasionó una alta incertidumbre en la estimación de $g(0)$, al igual que el término de probabilidad para el BIP. Se estima que sólo el 57% de las vaquitas presentes en las cercanías del transecto son detectadas con Big Eyes, mientras que este valor baja a 15% cuando se usa binoculares desde el DSJ. El pequeño tamaño de la vaquita, su fugaz presencia en la superficie y los pequeños grupos que forman, deben ser la causa de estas bajas probabilidades de detección. Esto, aunado a la reacción de los grupos ante la presencia del barco, son factores que se combinan para hacer poco efectivos los estudios basados en barcos pequeños y binoculares.

Para el BIP se estimó que el término de probabilidad $[f(0)/g(0)]$ tiene un valor de 6.777 Km^{-1} . Si se supone que el ancho efectivo de banda $[1/f(0)]$ para el BIP es de 500 m (similar al ancho efectivo para el *bridge* del DSJ), entonces la $g(0)$ asociada, por despeje, es de 0.28. Resulta ser mayor a la estimada para el *bridge* del DSJ que es de 0.15. Resulta extraño que el *bridge* sea menos efectivo que el BIP en detectar vaquitas, pues está más alto que este último. Ambos barcos navegaron en áreas similares durante septiembre 15 y 16. Durante esos días desde el BIP se detectaron tres grupos y sólo uno desde el *bridge* del DSJ (aunque varios grupos fueron detectados desde el *flying*). Este resultado valora las estimaciones de $g(0)$, pues las tasa de encuentro del BIP dobla la tasa del *bridge*. El BIP es una embarcación tipo rastrero, que son comunes para la pesca de camarón en el Alto Golfo de California. Las vaquitas pueden estar de alguna forma “acostumbradas” a la presencia de este tipo de embarcaciones y reaccionar de manera menos marcada en su cercanía. El DSJ es un barco de mayor calado y debe, de alguna forma, emitir sonidos diferentes.

Agregación y distribución

La tasa de encuentro fue un componente importante a la varianza no sólo para los datos del BIP y el *bridge*, sino también para el *flying* del DSJ. Esto ocurrió aún sólo considerando los transectos del Área Núcleo, donde las vaquitas se distribuyeron durante el estudio. El comportamiento de la tasa de encuentro refleja que la vaquita forma una especie de agregaciones. Durante varios días no se contó con detecciones y, durante otros, varios grupos fueron detectados (Fig. 12).

La variación en las tasas de encuentro se dio, incluso, durante días consecutivos en los que se navegó en una misma zona. Sólo el 17 de septiembre se avistó el 48% de todos los grupos incluidos en el análisis. Esto indica que las vaquitas forman agregaciones y que además parecen moverse agrupadas. Los datos provenientes del 17 de septiembre fueron muy importantes para conseguir una buena estimación, tanto en precisión como en exactitud. Si esta muestra no existiera la tasa de encuentro sería 45% más chica y el tamaño de grupo esperado decrementaría un 6%. El cálculo de abundancia total sería aproximadamente un 60% del obtenido con la muestra completa. Esta conducta denota la necesidad de aplicar grandes esfuerzos para obtener una adecuada estimación poblacional de esta especie. La estimación que efectuaron Barlow *et al.* (1997) contó con sólo tres días de crucero.

Este comportamiento de agregación parece haberse hecho muy importante durante la segunda parte del crucero, durante septiembre. Para esas fechas la temporada de pesca camaronera recién iniciaba y los barcos rastreros y pangas iniciaron operaciones, habiendo una gran cantidad de embarcaciones en el área. Durante la primera parte del crucero esto no ocurrió. De la misma forma, los

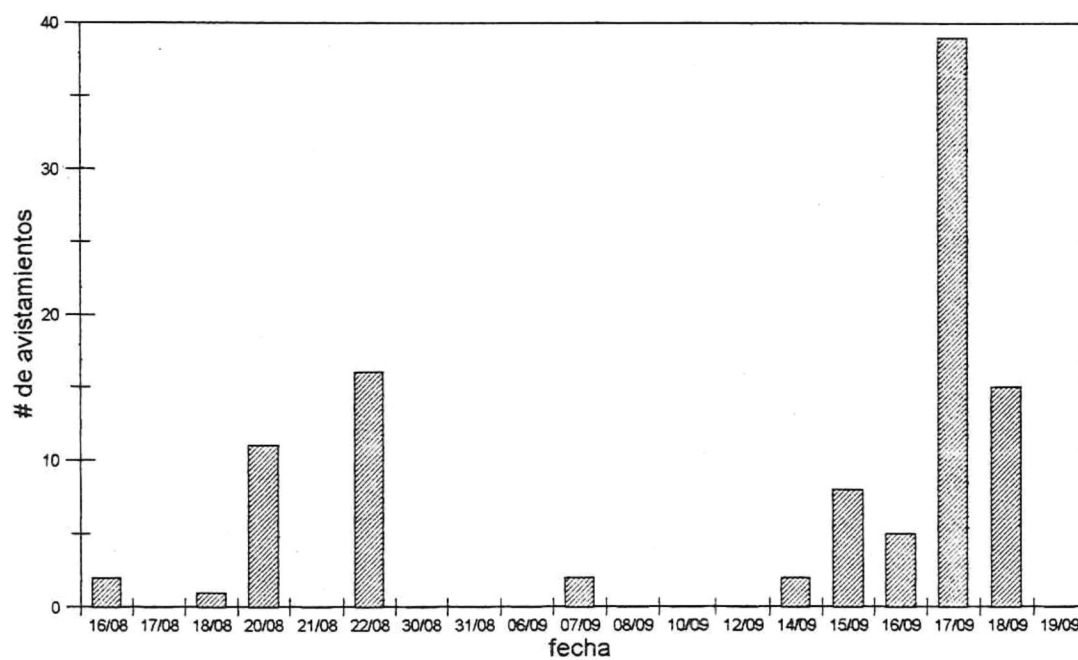


Figura 12. Número de avistamientos efectuados por día cuando se realizó esfuerzo en el Área Núcleo.

tres días de esfuerzo de la estimación de 1993 se hicieron antes de la apertura de la temporada camaronera (Barlow *et al.*, 1997). Es probable que la presencia de estas embarcaciones haya enfatizado el comportamiento gregario observado en la vaquita. Esto podría tener importantes implicaciones en la conservación de esta especie. En una zona relativamente pequeña se pueden encontrar, en un mismo lapso, barcos rastros, chinchorros y las vaquitas. Es posible, entonces, que la población sea vulnerable a un evento sencillo de alta mortalidad. Dados los niveles poblacionales de la especie un evento de este tipo podría ser irreversible.

El cúmulo de datos, hasta ahora disponible, indica que el Área Núcleo es la zona más importante de distribución para la vaquita. La densidad estimada en el Subestrato Somero es 0.77 veces la estimada en el Área Núcleo, lo que indica que la zona somera también es un sitio importante de distribución. Ya se había discutido acerca de la poca eficiencia de anteriores cruceros, los cuales cubrieron esta zona, de manera que no se habían encontrado evidencias de su importancia. Durante abril de 1997, 4 meses antes del crucero para la estimación de abundancia, se realizó un censo acústico de vaquita¹. El detector acústico, desarrollado por Chappell *et al.* (1996), está especialmente diseñado para captar los pulsos o chasquidos de alta frecuencia emitidos por la vaquita. Con esta técnica se lograron detectar vaquitas en el Área Núcleo y se pudo también detectar, frecuentemente, en las cercanías de San Felipe, en aguas del Subestrato Somero. Este estudio confirma la importancia de la zona somera como sitio de distribución de vaquitas.

Los avistamientos efectuados en el crucero que se describe en este trabajo confirman que la distribución de vaquita tiene un núcleo importante en la porción noroeste del Alto Golfo. Este parece ser el patrón distribucional al menos en alguna época del año. Sin embargo, se sabe que varios individuos son capturados cada año, incidentalmente, en redes puestas en operación en las aguas aledañas a las costas de Sonora. Parece claro que por lo menos una parte de la población se distribuye en estas aguas en alguna parte del año. Otro censo acústico², efectuado con un detector diferente al citado anteriormente, pero operando con el mismo principio, fue efectuado durante abril de 1999,

¹ Trabajo realizado en cooperación entre el Instituto Nacional de la Pesca (SEMARNAP), la Universidad de Oxford y el International Fund for Animal Welfare, ambos del Reino Unido. Coordinaron el proyecto Armando Jaramillo y Lorenzo Rojas del INP, Jonathan Gordon de Oxford e IFAW, y Oliver Chappell de IFAW.

² Trabajo realizado en cooperación entre Nick Tregenza de la Universidad de Plymouth, Reino Unido y Lorenzo Rojas y Armando Jaramillo del Instituto Nacional de la Pesca (SEMARNAP).

exactamente dos años después del primer estudio. Ninguna vaquita fue detectada, ni en el Área Núcleo, ni en la porción somera. Estamos aún lejos de describir adecuadamente los patrones distribucionales de esta población, pero las técnicas acústicas prometen ser adecuadas para resolver varias incógnitas poblacionales. El volumen de datos que se puede obtener con detectores acústicos es muy grande, pues los equipos pueden trabajar todo el día bajo condiciones climatológicas en las que los censos visuales no podrían.

A pesar de no conocer completamente la distribución de vaquita, sí se puede establecer que la Zona Núcleo de la Reserva de la Biósfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado no protege a la vaquita, ya que prácticamente ninguna vaquita se distribuye ahí. Se sabe de algunos reportes no publicados de agregaciones de 30 ó más vaquitas en los canales del delta y, aunque se confirmen, deben ser eventos aislados que no justifican la ubicación de la Zona Núcleo. Por supuesto, no se debe tomar como medida quitar esta zona, pero si, tal vez, crear una zona específica para la protección de la vaquita. Se debe indicar que el 47% de los avistamientos reportados en este trabajo están fuera de la Reserva, incluso de la zona de amortiguamiento.

Implicaciones de la nueva estimación de abundancia

La estimación de 567 vaquitas es más del doble de la presentada por Barlow *et al.* (1997) efectuada en 1993. Como se explicó antes, ambas estimaciones no son directamente comparables, de manera que las diferencias no se deben interpretar como el efecto de un crecimiento poblacional. Las cinco estimaciones de abundancia disponibles ocuparon estratos diferentes y estimaron los parámetros de distinta forma.

Una forma de hacer más comparables estas estimaciones es a partir de los cálculos de densidad. De las cuatro estimaciones reportadas en Barlow *et al.* (1997) tres presentan estimaciones de densidad en estratos que coinciden, por lo menos en alguna porción, con el Área Núcleo utilizada en este trabajo. Es posible entonces utilizar las densidades de las tres primeras estimaciones para calcular la abundancia en un área del mismo tamaño que el Área Núcleo ($N_i = D_i * 2,659.7 \text{ Km}^2$, con i representando cada una de las cuatro estimaciones). En la Figura 13 se presentan estos cálculos de abundancia graficados contra el año en que se efectuó el muestreo. La estimación de 1993 se hizo a bordo del DSJ usando dos Big Eyes. Los autores tomaron la $g(0)$ de otro estudio similar con marsopa común y le asignaron un valor de 0.78, la cual es alta comparada con la estimada en este trabajo. Se corrigió la densidad de esta estimación usando la $g(0)=0.571$. La estimación de 1987 se basa en datos colectados desde botes pequeños entre 1986 y 1988. La segunda se basa en censos aéreos efectuados

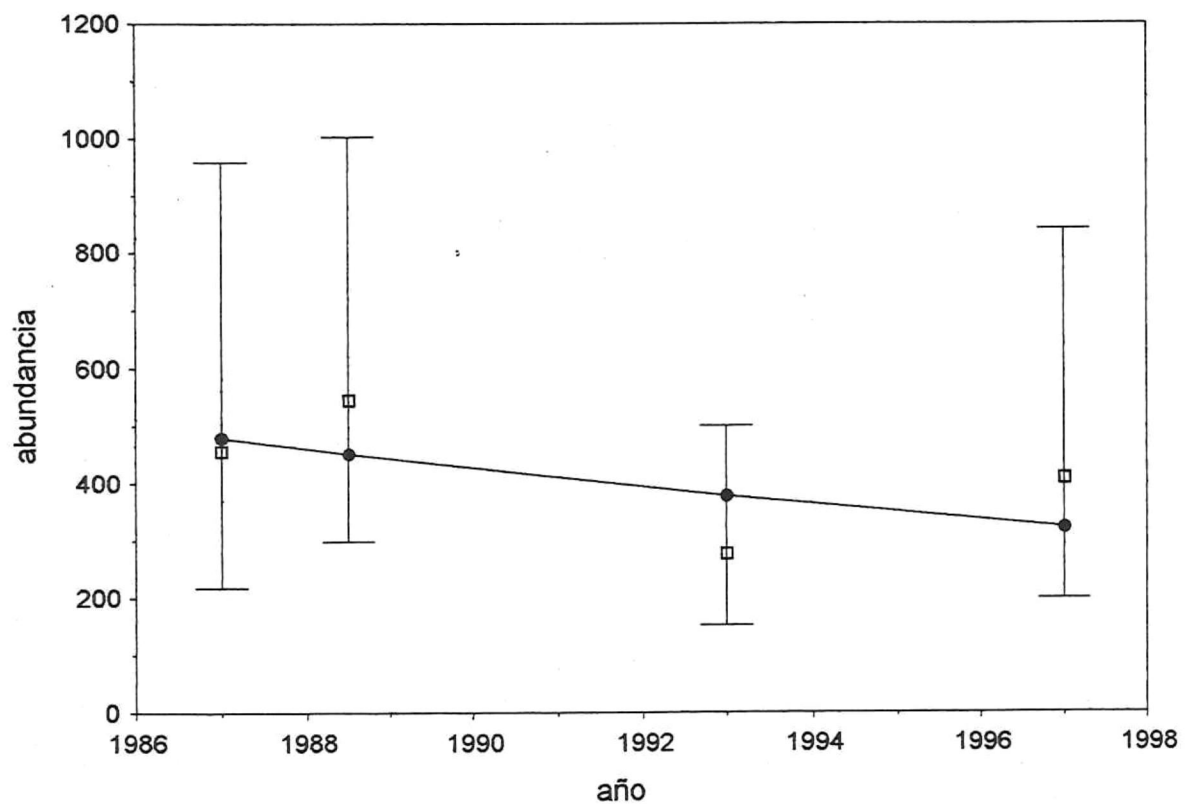


Figura 13. Curva de regresión ajustada para las tres estimaciones de abundancia en Barlow *et al.* (1997) y la estimación de este trabajo. La curva exponencial se ajustó con regresión ponderada por el inverso de la varianza de cada estimación. Los puntos marcan la estimación de abundancia según el modelo ajustado. Los cuadros son las estimaciones reales. Las barras marcan el intervalo de confianza log-normal al 80%. La abundancia de cada año se obtuvo de multiplicar la estimación de densidad en el área núcleo por la superficie de esta área.

entre 1988 y 1989. La tercera, que fue la corregida por $g(0)$, fue un crucero de tres días durante 1993. La cuarta es la estimación reportada en este trabajo.

En la Figura 13 se grafica, además del valor puntual de las estimaciones, un ajuste exponencial. La curva se ajustó utilizando regresión ponderada, para hacer la corrección necesaria por la diferencia entre las varianzas de las estimaciones. Se ponderó por el inverso de la varianza. El modelo estima que entre 1987 y 1997 la población se decrementó a una tasa aproximada de -3.88% anual. Sin embargo el Coeficiente de Variación al 95% de esta tasa está entre -9.08% y 1.33%. Es decir, la incertidumbre marca que la población pudiera estar creciendo, aunque la mayor parte del intervalo cae en tasas negativas. Aunque no se puede llegar a alguna conclusión definitiva, parece ser que la población de vaquita está decreciendo.

No existe una estimación de la mortalidad total anual por pesca de vaquita, pero si se tiene una estimación de la cantidad de vaquitas muertas por las actividades pesqueras del puerto del Golfo de Santa Clara (D'Agrosa *et al.*, 1995; D'Agrosa *et al.*, en prensa). Estos autores estiman que entre 1993 y 1994 entre 30 y 80 vaquitas murieron cada año enmalladas en redes agalleras. Esta tasa representa el 14% de la población estimada en 1997. Desconocemos las tasas de natalidad, pero si esta tasa de mortalidad es cercana a la real podría ser una causa de extinción a menos que se tomen medidas para reducirla. Debe tomarse en cuenta que a esta estimación de mortalidad falta sumarle la provocada por las actividades pesqueras de los restantes dos poblados del Alto Golfo.

Un análisis de los organismos capturados incidentalmente no refleja variantes espaciales en las capturas, sin embargo indica que frecuentemente las crías son capturadas³. Si la pesca está incidiendo con mayor fuerza en los organismos más pequeños, se estarán perdiendo reproductores potenciales que permitan el mantenimiento de la población.

En resumen, la abundancia de vaquita y los índices de mortalidad conocidos de esta población parecen irreconciliables. Al parecer, si no se mitigan los causales de mortalidad habrá latente un peligroso riesgo para la supervivencia de la vaquita. Según el Índice de Remoción Biológica Potencial, usado por el U.S. National Marine Fisheries Service (Wade, 1998), máximo se puede extraer incidentalmente una vaquita por año para asegurar la conservación de esta especie.

³ Los datos se reportan en Honh *et al.* (1996) y D'Agrosa (1995). Fueron analizados por Armando Jaramillo y Lorenzo Rojas como parte de las labores de la Segunda Reunión del CIRVA.

CONCLUSIONES

- Se estima que en 1997 habitaban 567 vaquitas en el Alto Golfo de California.
- El intervalo de confianza calculado (177,1073) indica que esta población no es más grande que unos cientos de animales.
- Esta estimación es la más confiable de que se dispone hasta ahora.
- La distribución de la vaquita estuvo restringida a la porción noroeste del Alto Golfo.
- Las zonas someras son más importantes para la distribución de vaquita de lo que se suponía con anterioridad.
- La disposición de la Reserva de la Biósfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado no es adecuada, en específico, para la protección de la vaquita.
- Hay evidencias que hacen suponer que esta distribución puede presentar otro patrón, no precisamente asociado a la época del año.
- Hay evidencias que hacen suponer que la distribución de vaquita se ve afectada por la presencia de embarcaciones pesqueras.
- Hay evidencias que suponen que la población ha estado declinando en los últimos años.
- El nivel poblacional actual y las tasas estimadas de mortalidad por pesca no parecen compatibles para evitar un daño serio a la población de la vaquita.

RECOMENDACIONES

- Sería adecuado efectuar otra estimación en algunos años con el fin de monitorear y revisar la hipótesis de decremento poblacional.
- La nueva estimación podría hacerse en el BIP, instalando otra plataforma independiente para estimar $g(0)$ y usando sólo Big Eyes.
- Es necesaria la aplicación de técnicas acústicas para hacer evaluaciones poblacionales de la vaquita. La creación de un índice de densidad acústica permitiría desarrollar una metodología de monitoreo que permita la constante revisión de las medidas de recuperación que se lleguen a implementar.
- Un estudio de uso de hábitat podría ayudar a entender la importancia relativa de las diferentes áreas de distribución de la vaquita. Esto permitiría desarrollar mejores planes de recuperación, en los que se beneficien el mayor número de componentes de la problemática general.
- Aparentemente, la pesca basada en redes agalleras acarrea grandes riesgos para la supervivencia de la vaquita. Parece necesario eliminarla, por lo menos en algún grado, para asegurar la continuidad de esta especie.

LITERATURA CITADA

- Alvarez Borrego, S., P.B. Flores y L.A. Galindo Bect. 1975. Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno, primavera y verano. *Ciencias Marinas* 2:21-36.
- Anon. 1996. Opening statement by Mexico. IWC/48/OS Mexico. Forty Eighth Meeting of the International Whaling Commission. May-June 1996.
- Argote, M.L., A. Amador and M.F. Lavín. 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 100(C8):16103-16118.
- Barlow, J., L. Fleischer, K. A. Forney, and O. Maravilla-Chavez. 1993. An experimental aerial survey for vaquita (*Phocoena sinus*) in the northern Gulf of California, Mexico. *Marine Mammal Science* 9:89-94.
- Barlow, J., T. Gerrodette and G. Silber. 1997. First estimates of vaquita abundance. *Marine Mammal Science* 13:44-58.
- Bjørge, A. and N. Øien. 1995. Distribution and abundance of Harbor Porpoise, *Phocoena phocoena*, in Norwegian waters. 89-98 In: Bjørge, A. and G.P. Donovan (eds) *Biology of the Phocoenids. Reports of the International Whaling Commission (Special Issue 16)*. Cambridge, U.K.
- Bray, N.A. and J.M. Robles. 1991. Physical oceanographic of the Gulf of California. En: J. P. Dauphin and Simoneit (eds) "The Gulf and Peninsular Province of the Californias". Amer. Assoc. of Petro. Geolo. Mem. Part V. Chapter 25, 47:511-553.
- Brownell, R.L., Jr. 1983. *Phocoena sinus*. *Mammalian Species* (198):1-3.
- Brownell, R. L., Jr. 1986. Distribution of the vaquita, *Phocoena sinus*, in Mexican waters. *Marine Mammal Science* 2(4):299-305.
- Brownell, R. L., Jr., L. T. Findley, O. Vidal, A. Robles and S. Manzanilla. N. 1987. External morphology and pigmentation of the vaquita, *Phocoena sinus* (Cetacea: Mammalia). *Marine Mammal Science* 3:22-30.
- Buckland, S.T., D.R. Anderson, K.P. Burnham and J.L. Laake. 1993. *Distance Sampling: Estimating abundance of biological populations*. Chapman and Hall. London, U.K. 446 pp.
- Chappell, O.P., R. Leaper and J. Gordon. 1996. Development and performance of an automated Harbour Porpoise click detector. *Reports of the International Whaling Commission* 46:587-594.
- CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora). 1998. Checklist of CITES Species. Compiled by World Conservation Monitoring Center, Cambridge, United Kingdom. 312 pp.
- Cupul Magaña, A.L. 1994. Flujos de sedimentos en suspensión y de nutrientes en la cuenca estuarina del Río Colorado. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas. UABC., Ensenada, México, 117 p.

- D'Agrosa, C., O. Vidal and W.C. Graham. 1995. Mortality of the vaquita (*Phocoena sinus*) in gillnet fisheries during 1993-94. 282-291 *In*: Bjørge, A. and G.P. Donovan (eds) Biology of the Phocoenids. Report of the International Whaling Commission (Special Issue 16). Cambridge, U.K.
- D'Agrosa, C., C.E. Lennert and O. Vidal. En prensa. Preventing the extinction of a small population: vaquita (*Phocoena sinus*) fishery mortality and mitigation strategies. Conservation Biology.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 1993. Decreto Presidencial, México D.F., 10 de junio de 1993.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 1994. NOM-059-ECOL-1994. Lunes 16 de mayo de 1994. México, D.F. pp. 2-53.
- Donovan, G.P. and A. Bjørge. 1995. Vaquita, *Phocoena sinus*. Introductory Remarks. 245-246 *In*: Bjørge, A. and G.P. Donovan (eds) Biology of the Phocoenids. Report of the International Whaling Commission (Special Issue 16). Cambridge, U.K.
- Efron, B. and R.J. Tibshirani. 1993. An introduction to the bootstrap. Chapman & Hall, New York.
- Farfán, C. y S. Alvarez Borrego. 1992. Biomasa del zooplancton del Alto Golfo de California. Ciencias Marinas., 18:17-36.
- Filloux, J.H. 1973. Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. Nature., 243:217-221.
- Fleisher, L. 1996. Mortalidad incidental de la vaquita, *Phocoena sinus*. Historia y actualidad (abril de 1994). INP. SEMARNAP. Ciencia Pesquera (13):78-82.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen. Edit. UNAM., México.
- Gerrodette, T., L.A. Fleischer, H. Pérez-Cortés and B. Villa-Ramírez. 1995. Distribution of the vaquita, *Phocoena sinus*, based on sightings from systematic surveys. 273-281 *In*: Bjørge, A. and G.P. Donovan (eds) Biology of the Phocoenids. Reports of the International Whaling Commission (Special Issue 16). Cambridge, U.K.
- Hohn, A.A., A.J. Read, S. Fernandez, O. Vidal and L.T. Findley. 1996. Life history of the vaquita, *Phocoena sinus* (Phocoenidae, Cetacea). Journal of Zoology, London 239:235-251.
- IUCN. 1996. Red Data Book. Vol. 1. IUCN, Gland, Switzerland.
- Lavín, M.F. and S. Organista. 1988. Surface heat flux in the northern Gulf of California. J. Geophys. Res., 93(C11):14033-14038.
- Lavín, M.F., G. Gaxiola Castro., J.M. Robles and K. Richter. 1995. Winter water masses and nutrients in the northern Gulf of California. J. Geophys. Res., 100(5):8587-8605.
- Lavín, F.M., R. Durazo., E. Palacios., M.L. Argote and L. Carrillo. 1997. Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. J. Phys. Ocean., 27:239-246 p.
- Lerczak, J.A., and R.C. Hobbs. 1998. Calculating sighting distances from angular readings during shipboard, aerial and shore-based marine mammal surveys. Marine Mammal Science 14:590-599.

- Mangels, K.F. and T. Gerrodette. 1994. Report of cetacean sightings during a marine mammal survey in the eastern Pacific Ocean and the Gulf of California aboard the NOAA ships *McArthur* and *David Starr Jordan* July 28-November 6, 1993. NOAA Technical Memorandum NOAA-TM-NMFS-SWFSC-221. 88 pp.
- Miranda Reyes, F., S. Reyes Coca y J. García López. 1990. Climatología de la región noroeste de México. Parte I: Precipitación. Rep. Téc. EBA No.3 CICESE, Ensenada, Baja California, México. 160 pp.
- Nieto García, E. 1998. Nutrientes en el Norte del Golfo de California durante condiciones estuarinas y antiestuarinas. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B.C., México. 130 pp.
- Norris, K.S., and W.N. McFarland. 1958. A new harbor porpoise of the genus *Phocoena* from the Gulf of California. *Journal of Mammalogy* 39:22-39.
- Palka, D. 1995. Abundance estimate of the Gulf of Maine Harbor Porpoise. 27-50 In: Bjørge, A. and G.P. Donovan (eds) *Biology of the Phocoenids. Reports of the International Whaling Commission (Special Issue 16)*. Cambridge, U.K.
- Pérez Cortés Moreno, H. 1996. Contribución al conocimiento de la biología de la vaquita, *Phocoena sinus*. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 68 pp.
- Roden, G.I. and G. W. Groves. 1959. Recent oceanographic observations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.*, 18:10-35.
- Rojas Bracho, L. 1998. Evaluación genética y riesgo de endogamia en una especie endémica críticamente amenazada del Golfo de California: la vaquita (*Phocoena sinus* Norris y McFarland, 1958). Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, B.C., México.
- Rojas Bracho, L. and B. Taylor. En prensa. Risk factors affecting vaquita. *Marine Mammal Science*.
- Rojas Bracho, L. and J. Urbán Ramírez. 1993. Vaquita: its environment, biology and problematic. 48-72 In: Fermán Almada, J.L., L. Gómez Morín and D.W. Fisher (eds) *Coastal Management in Mexico. The Baja California Experience*. American Society of Civil Engineers. New York, U.S.A.
- Rojas Bracho, L., A. Díaz de León, P. Arenas Fuentes, H. Pérez Cortés, P. Ulloa y A. Jaramillo. 1998. A recovery strategy for the vaquita, *Phocoena sinus*. Trabajo presentado en "The World Marine Mammal Science Conference". Monaco. 20-24 de enero de 1998.
- Rosel, P. and L. Rojas-Bracho. En prensa. Mitochondrial DNA variation in the critically endangered vaquita, *Phocoena sinus*. *Marine Mammal Science*
- Santamaría del Ángel, E., S. Alvarez Borrego and F.E. Müller Karger. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research* 99(C4):7411-7421.

- Seber, G.A.F. 1982. The estimation of animal abundance and related parameters. Macmillan, New York, U.S.A.
- Silber, G.K. 1990. Occurrence and distribution of the vaquita *Phocoena sinus* in the Northern Gulf of California. Fishery Bulletin 88:339-346.
- Silber, G.K. and K.S. Norris. 1991. Geographic and seasonal distribution of the vaquita, *Phocoena sinus*. Anales del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoológica 62(2):263-268.
- Silber, G. K., M. W. Newcomer, and G. J. Barros. 1988. Observations on the behavior and ventilation cycles of the vaquita, *Phocoena sinus*. Marine Mammal Science 4:62-67.
- Soto Mardones, L.A. 1997. Variabilidad espacio temporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. Tesis de Maestría. CICESE. B.C., México. 108 pp.
- Sverdrup, H.U. 1941. The Gulf of California. Preliminary discussion on the cruise of the E.W. Scripps in february and march 1939. 6th Pac. Sci. Congr. Proc., 3:161-166.
- Swain, J.J. 1990. Nonlinear Regression. Chapter 17 In: Wadsworth, H.M.Jr. (ed) Handbook of Statistical Methods for Engineers and Scientists. McGraw-Hill, New York, U.S.A.
- Taylor, B. and L. Rojas Bracho. En prensa. Examining the risk of inbreeding depression in a naturally rare cetacean, the vaquita (*Phocoena sinus*). Marine Mammal Science.
- Thomas, L. 1999. Distance 3.5. Bulletin of the Ecological Society of America 80: 114-115.
- Thompson, R.W. 1968. Tidal flat sedimentation on the Colorado River Delta, northwestern Gulf of California. The Geological Society of America, INC. Memoir 107:133 pp.
- Thomson A.D., A. R. Mead and J. R. Schreiber Jr. 1969. Environmental impact of brine effluents on Gulf of California. Res. And Develop. Progr. Rep., 387: 196 pp.
- Torre Cosio, J. 1995. Descripción del esqueleto, dimorfismo sexual y crecimiento alométrico en el cráneo de la vaquita, *Phocoena sinus* (Cetacea: Phocoenidae). Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Guaymas. Guaymas, Son., México. 183 pp.
- Torres Orozco, E. 1993. Análisis volumétricos de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación con Estudios Superiores de Ensenada (CICESE). Ensenada, Baja California, México., 79 pp.
- Turnock, B.J., S.T. Buckland and G.C. Boucher. 1995. Population abundance of Dall's Porpoise (*Phocoenoides dalli*) in the Western North Pacific Ocean. 381-397 In: Bjørge, A. and G.P. Donovan (eds) Biology of the Phocoenids. Reports of the International Whaling Commission (Special Issue 16). Cambridge, U.K.
- Turnock, B.J. and S.T. Buckland. 1995. Trends in abundance of Dall's Porpoise in the Western North Pacific, 1979 to 1989. 399-405 In: Bjørge, A. and G.P. Donovan (eds) Biology of the Phocoenids. Reports of the International Whaling Commission (Special Issue 16). Cambridge, U.K.

- Vidal, O., A. Aguayo, L. Findley, A. Robles, L. Bourillón, I. Vomend, P. Turk, K. Gárate, L. Maronas y J. Rosas. 1987. Avistamientos de mamíferos marinos durante el crucero "Guaymas I" en la región superior del Golfo de California, primavera de 1984. 7-35 In: Memorias de la X Reunión Internacional sobre Mamíferos Marinos. Marzo 1985. Secretaría de Pesca, México, D.F.
- Vidal, O. 1995. Population biology and exploitation of the vaquita *Phocoena sinus*. 247-272 In: Bjørge, A. and G.P. Donovan (eds) Biology of the Phocoenids. Reports of the International Whaling Commission (Special Issue 16). Cambridge, U.K.
- Wade, P.R. 1998. Calculating limits to the allowable human-caused mortality of cetaceans and pinnipeds. *Marine Mammal Science* 14(1):1-37.
- Wells, R.S., B.G. Würsig and K.S. Norris. 1981. A survey of the marine mammals of the upper Gulf of California, Mexico, with an assessment of the status of *Phocoena sinus*. Volume PB81-168791. U.S. National Technical Information Service, Washington, D.C.

La Figura A.i presenta un esquema del procedimiento para la lectura reticular. El círculo representa el campo visual de los binoculares y las líneas representan, como ejemplo, 10 espacios reticulares. El observador coloca la retícula 0 en el horizonte y cuenta el número de retículas hacia abajo en las que se encuentra el grupo observado. En el caso del ejemplo de la Figura A.i el individuo tendría una lectura de 3.

El algoritmo de conversión inicia por encontrar el ángulo θ que forman los binoculares al colocar la retícula 0 en el horizonte (Figura A.ii). El círculo representa la superficie terrestre, que para el ámbito del problema se puede, adecuadamente, considerar esférica. El ángulo θ se forma con la línea imaginaria perpendicular al calado del barco y la línea t , que es tangente a la superficie terrestre. El ángulo análogo está formado por el radio terrestre rt y la línea y . Como rt se ubica en el origen (centro del círculo), y se puede encontrar con la intersección entre las líneas t y rt , las cuales son perpendiculares.

La línea t se puede definir como:

$$y = a - bx \dots\dots\dots(1)$$

donde a , la ordenada al origen, está dada por $rt + h$. La línea rt , perpendicular a t , se puede definir como:

$$y = b_n x$$

ya que inicia en el origen. Ahora bien, como ambas rectas son perpendiculares entonces:

$$b_n = -\frac{1}{b} = \frac{1}{b}$$

ya que la pendiente de t es negativa. De tal forma la recta rt queda definida como:

$$y = \frac{1}{b} x \dots\dots\dots(2)$$

Despejando b en las ecuaciones (1) y (2) e igualando obtenemos:

$$\frac{x}{y} = -\frac{y-a}{x}$$

que rearmada queda como:

$$x^2 = ay - y^2 \dots\dots\dots(3)$$

La superficie terrestre queda definida por la ecuación del círculo con centro en el origen como:

$$x^2 + y^2 = rt^2 \dots\dots\dots(4)$$

Sustituyendo (3) en esta última ecuación obtenemos:

$$ay - y^2 + y^2 = rt^2$$

Al sumar los términos similares obtenemos:

$$ay = (rt + h)y = rt^2$$

La recta y se obtiene entonces como:

$$y = \frac{rt^2}{rt + h}$$

El ángulo θ se calcula como:

$$\theta = \arccos\left(\frac{y}{rt}\right) = \arccos\left(\frac{\frac{rt^2}{rt+h}}{rt}\right) = \arccos\left(\frac{rt}{rt+h}\right)$$

La siguiente parte del algoritmo halla la intersección entre la recta p y la superficie terrestre (punto x, y) (Figura A.iii). La recta p es la que une a la visión del observador con el grupo avistado, y pasa por la retícula de lectura como en la Figura A.i. Dado que el ángulo formado entre cada espacio reticular en los binoculares es igual para todos los espacios, el ángulo formado entre las rectas p y t (λ) es el resultado de multiplicar el número de retículas medidas ret por el ángulo entre retículas adyacentes $angret$. De tal forma el ángulo de la recta p es $\theta + \lambda$. La pendiente de esta recta es:

$$b = \tan(\theta + \lambda) = \tan\left[\arccos\left(\frac{rt}{rt+h}\right) + (ret \bullet angret)\right] \dots\dots\dots(5)$$

La ecuación que define a la recta p es igual a (1) con la pendiente b calculada en (5). La superficie terrestre queda calculada como en (4). Se puede despejar y^2 de (4) e igualarla con el cuadrado de y de (1), con el fin de hallar el punto x de la intersección:

$$rt^2 - x^2 = (a - bx)^2 = a^2 - 2abx + b^2x^2$$

Se puede reorganizar la ecuación como:

$$(1 + b^2)x^2 - (2ab)x + (a^2 - rt^2) = 0$$

la cual es una ecuación de segundo grado. Si sustituimos a la ordenada a como $rt+h$ los coeficientes A , B y C , para la resolución de segundo grado quedan como:

$$\begin{aligned} A &= 1 + b^2 \\ B &= -2 * (rt + h) * b \\ C &= (rt + h)^2 - rt^2 \end{aligned}$$

El punto x de la intersección está dado por la raíz inferior de la solución de segundo grado como:

$$x_{\text{inf}} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots\dots\dots(6)$$

La distancia curvilínea dc entre el barco y el grupo avistado queda determinada por el ángulo ϕ . Dado este ángulo en radianes queda:

$$dc = \arcsen(x_{\text{inf}} / rt) * rt \dots\dots\dots(7)$$

El radio terrestre no es el mismo en todas las latitudes, ya que la Tierra es en realidad un esferoide. Sin embargo, la diferencia entre el uso de valores extremos para el radio (polar y ecuatorial) es tan pequeña que resultan insignificantes. De tal forma es adecuado usar el radio terrestre esférico que es de 6,370,000 m.

El punto x de la intersección está dado por la raíz inferior de la solución de segundo grado como:

$$x_{\text{inf}} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \dots\dots\dots(6)$$

La distancia curvilínea dc entre el barco y el grupo avistado queda determinada por el ángulo ϕ . Dado este ángulo en radianes queda:

$$dc = \arcsen(x_{\text{inf}} / rt) * rt \dots\dots\dots(7)$$

El radio terrestre no es el mismo en todas las latitudes, ya que la Tierra es en realidad un esferoide. Sin embargo, la diferencia entre el uso de valores extremos para el radio (polar y ecuatorial) es tan pequeña que resultan insignificantes. De tal forma es adecuado usar el radio terrestre esférico que es de 6,370,000 m.

Figura A.i

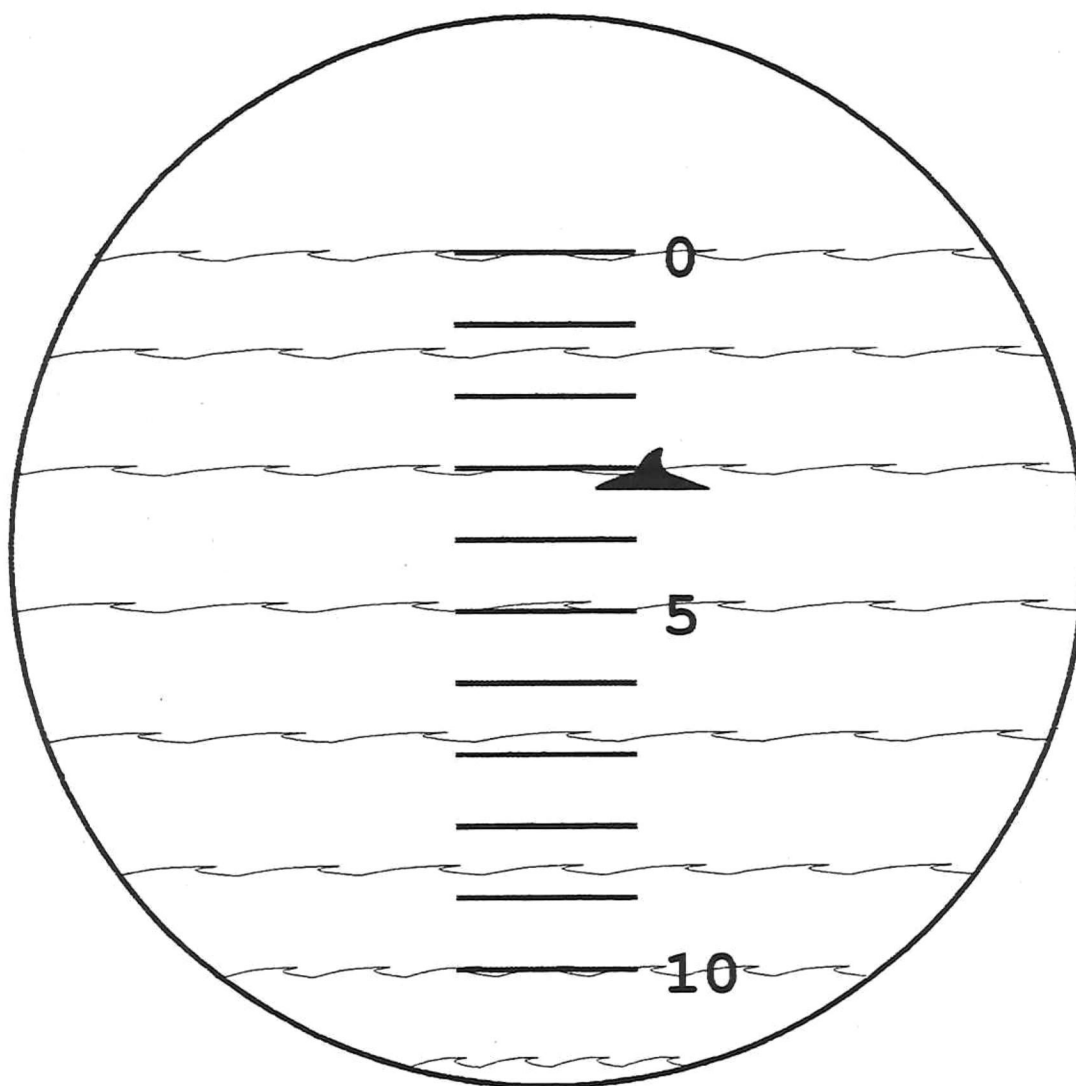


Figura A.ii

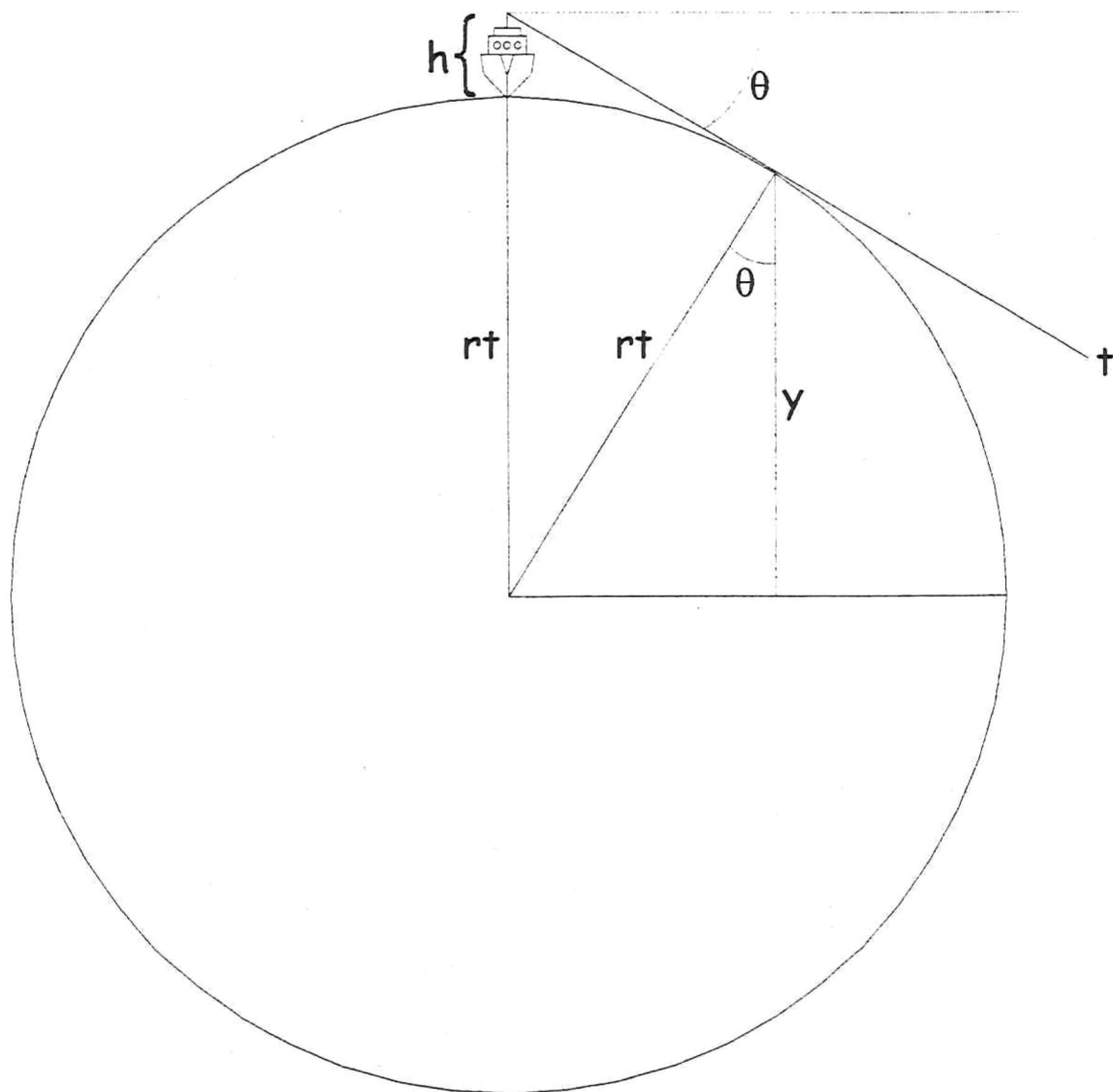
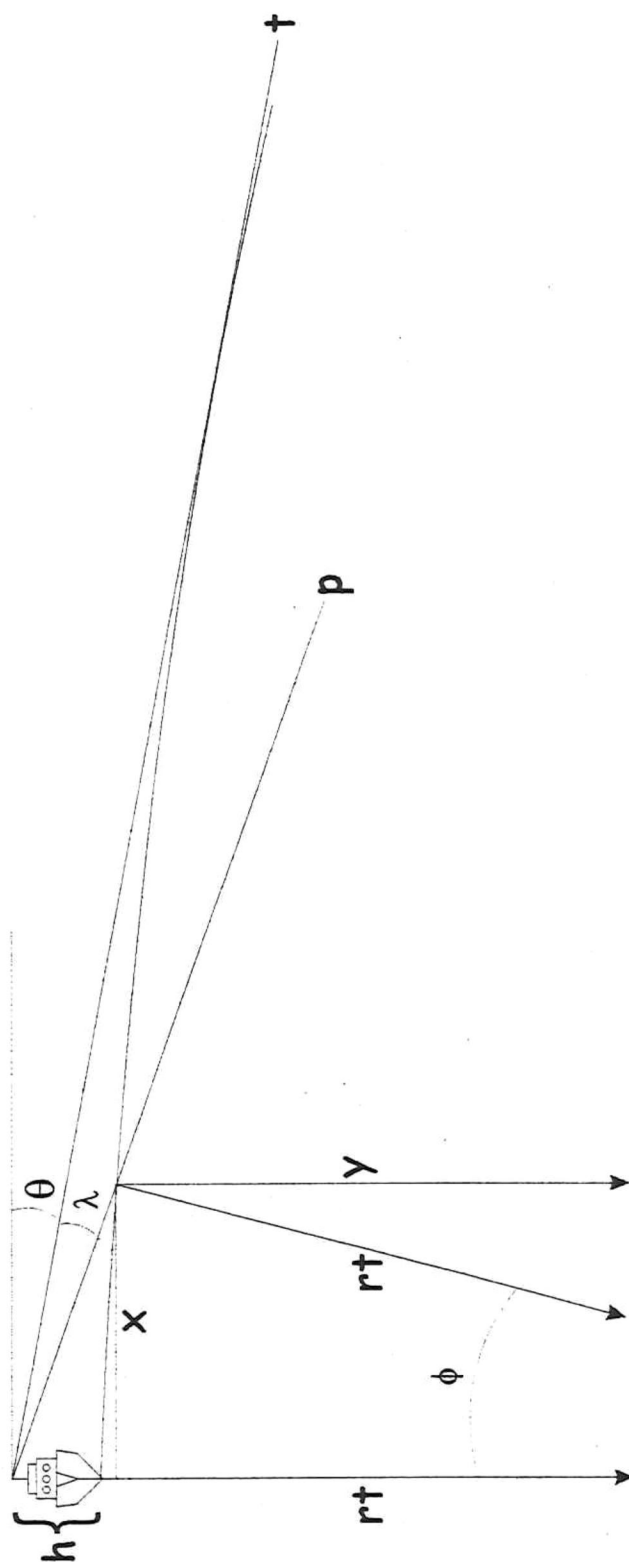


Figura A.iii



APÉNDICE B

FORMATOS DE ENTRADA DE DATOS DEL PROGRAMA TRANSECT

[illegible]

d:\

- mando
- vaquita
- abundancia 1997
- datos
- datos originales

d [MANDO-DISK2]

BIP.das
J1.das
J2.das
Jordan Alto Golfo.das
Jordan Completo.das
Panga.das

d:\

- mando
- vaquita
- abundancia 1997
- datos
- datos base
- BIP
- J

d [MANDO-DISK2]

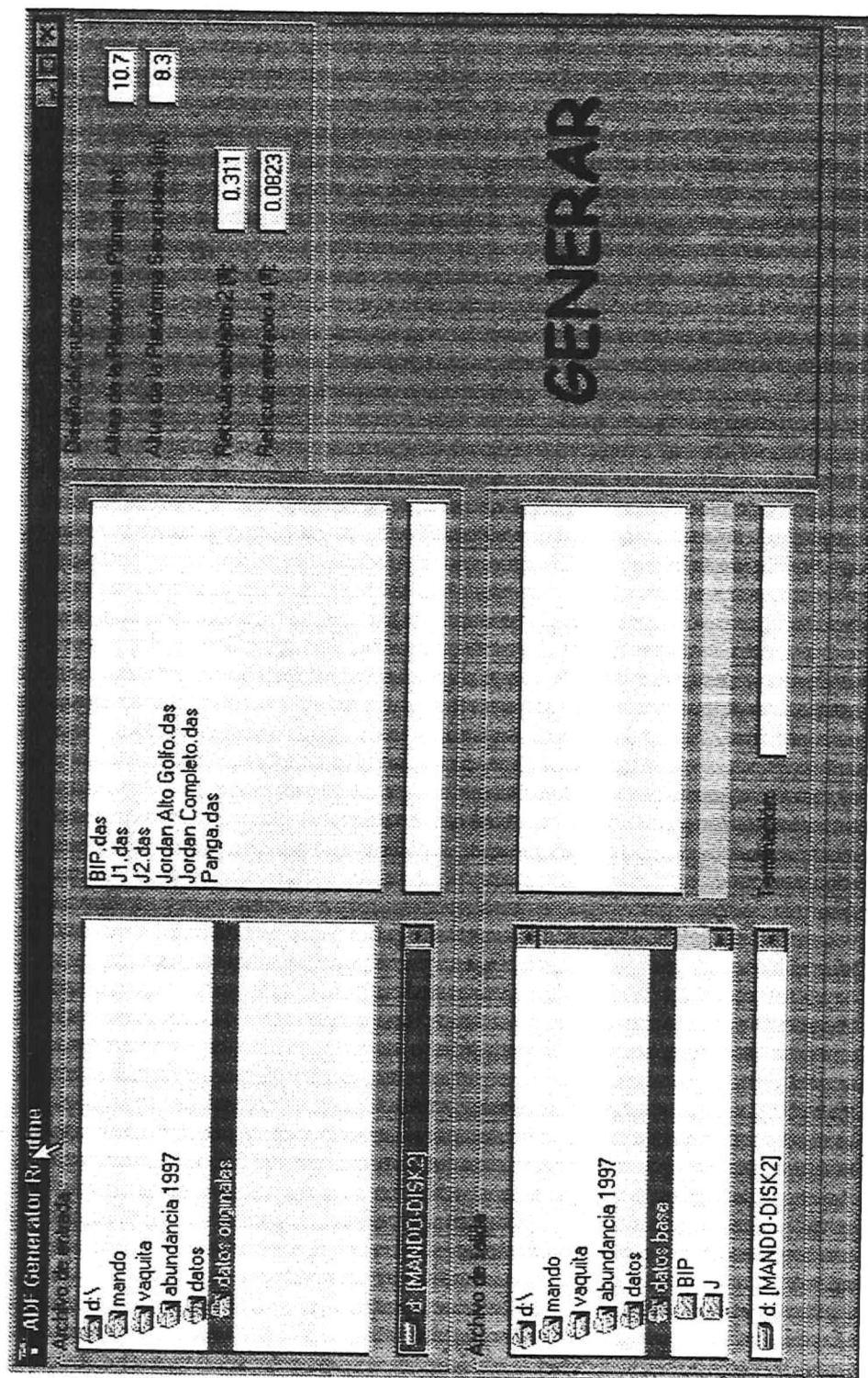
Altura de la Plataforma Principal (m) **10.7**

Altura de la Plataforma Secundaria (m) **8.3**

Período de muestreo (s) **0.311**

Período de muestreo (m) **0.0823**

GENERAR



APÉNDICE C

ESTIMACIONES PUNTUALES Y MEDIDAS DE VARIABILIDAD ANÁLITICAS DE LOS PARÁMETROS UTILIZADOS PARA ESTIMAR LA ABUNDANCIA

Área Núcleo (DSJ)

Esfuerzo	439.841
# de transectos	32
W	2.971
# de detecciones	70

Modelo

Uniforme $f(x) = 1/W$

Serie de ajuste coseno de orden 1

Parámetro	Estimación Puntual	Error Estándar	C.V. %	Intervalo de Confianza (95%)	
f(0)	0.552	0.047	8.53	0.466	0.655
p	0.609	0.052	8.53	0.514	0.722
ESW	1.811	0.154	8.53	1.528	2.146
n/L	0.159	0.040	24.90	0.097	0.262
DS	0.077	0.030	39.34	0.036	0.166
E(S)	2.000	0.104	5.19	1.804	2.218
D	0.154	0.061	39.68	0.071	0.333
N	409	162	39.68	189	886

Unidades de Medida

Densidad	Números / Kilómetro cuadrado
Distancia	Kilómetros

Componentes Porcentuales de la varianza de D

Probabilidad de detección	4.6
Tasa de encuentro	39.4
Tamaño de grupo	1.7
g(0)	54.3

Área Núcleo (DSJ) Beaufort 0-3

Esfuerzo	759.069
# de transectos	49
W	2.971
# de detecciones	81

Modelo

Uniforme $f(x) = 1/W$

Serie de ajuste coseno de orden 1

Parámetro	Estimación Puntual	Error Estándar	C.V. %	Intervalo de Confianza (95%)	
f(0)	0.571	0.042	7.28	0.494	0.660
p	0.589	0.043	7.28	0.510	0.681
ESW	1.751	0.128	7.28	1.515	2.024
n/L	0.107	0.025	23.83	0.067	0.171
DS	0.053	0.020	38.42	0.025	0.112
E(S)	1.975	0.098	4.95	1.790	2.180
D	0.105	0.041	38.74	0.050	0.223
N	280	108	38.74	133	592

Unidades de Medida

Densidad	Números / Kilómetro cuadrado
Distancia	Kilómetros

Componentes Porcentuales de la varianza de D

Probabilidad de detección	3.5
Tasa de encuentro	37.8
Tamaño de grupo	1.6
g(0)	57.0

Área Núcleo (BIP) Beaufort 0-3, término de probabilidad

Esfuerzo	381.042				
# de transectos	24				
W	0.473				
# de detecciones	6				
n/L	0.016	0.018	111.260	0.002	0.101
E(S)	1.500	0.224	14.910	1.025	2.196
Término de probabilidad para el BIP					
f(0) / g(0)	6.777	8.398	123.918	1.023	44.884
ESW	0.5 suponiendo 500m de ancho efectivo de banda				
f(0)	2				
g(0)	0.295				