



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**



**MOVIMIENTOS, RESIDENCIA Y PREFERENCIAS  
AMBIENTALES DEL TIBURÓN MARTILLO EN DOS  
ARCHIPIÉLAGOS: REVILLAGIGEDO Y ESPÍRITU SANTO,  
MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS**

**PRESENTA**

**ALEJANDRO ALDANA MORENO**

**LA PAZ, B.C.S. JULIO DE 2020**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 14 del mes de Julio del 2020 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS para examinar la tesis titulada:

**"MOVIMIENTOS, RESIDENCIA Y PREFERENCIAS AMBIENTALES DEL TIBURÓN MARTILLO EN DOS ARCHIPIÉLAGOS: REVILLAGIGEDO Y ESPÍRITU SANTO, MÉXICO"** del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	<b>ALDANA</b>	Apellido Materno:	<b>MORENO</b>	Nombre (s):	<b>ALEJANDRO</b>
-------------------	---------------	-------------------	---------------	-------------	------------------

Número de registro: A 1 6 1 0 1 6

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 5 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI  NO  **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

**JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:** *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*

Damos constancia de que el manuscrito de tesis titulado: MOVIMIENTOS, RESIDENCIA Y PREFERENCIAS AMBIENTALES DE TIBURÓN MARTILLO EN DOS ARCHIPIÉLAGOS: REVILLAGIGEDO Y ESPÍRITU SANTO, MÉXICO desarrollado por el tesista reúne las exigencias de originalidad requeridas. Se anexa dictamen emitido por la aplicación utilizada (Turnitin)

**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  o **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:

**"SATISFACE LOS REQUISITOS SEÑALADOS POR LAS DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS VIGENTES"**

### COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Rogelio G. A.  
DR. ROGELIO GONZÁLEZ ARMAS  
Director de Tesis  
Nombre completo y firma

[Firma]  
DR. FELIPE GALVÁN MAGAÑA  
Nombre completo y firma

[Firma]  
DR. GUILLERMO MARTÍNEZ FLORES  
Nombre completo y firma

[Firma]  
DR. JAMES THOMAS HETCHUM  
Director de Tesis  
Nombre completo y firma

Hoyos Padilla Mauricio  
DR. EDGAR MAURICIO HOYOS PADILLA  
Nombre completo y firma

[Firma]  
DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO  
Nombre completo y firma  
**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 14 del mes de Julio del año 2020

El (la) que suscribe M en C. ALEJANDRO ALDANA MORENO Alumno (a) del Programa

DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

con número de registro A161016 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. ROGELIO GONZÁLEZ ARMAS Y DR. JAMES THOMAS KETCHUM

y cede los derechos del trabajo titulado:

"MOVIMIENTOS, RESIDENCIA Y PREFERENCIAS AMBIENTALES DEL TIBURÓN MARTILLO

EN DOS ARCHIPIÉLAGOS: REVILLAGIGEDO Y ESPÍRITU SANTO, MÉXICO"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: aaldanam1600@alumno.ipn.mx - rarmas@ipn.mx -

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

M en C. ALEJANDRO ALDANA MORENO

*Nombre y firma del alumno*

## **ÍNDICE**

I. LISTA DE CUADROS	9
II. LISTA DE FIGURAS	10
III. GLOSARIO	15
IV. RESUMEN	18
V. ABSTRACT	20
1. INTRODUCCIÓN	22
2. ANTECEDENTES	27
2.1 Movimientos diarios	28
2.2 Movimientos locales e interinsulares	28
2.3 Residencia y uso de hábitat	30
2.4 Movimientos verticales y preferencias ambientales	31
3. JUSTIFICACIÓN	32
4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	34
5. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	34
6. OBJETIVOS	35
7. MATERIALES Y MÉTODOS	36
7.1 ÁREA DE ESTUDIO	36
7.1.1 Archipiélago de Revillagigedo	36
7.1.2 Golfo de California	42
7.2 TRABAJO DE CAMPO	45
7.2.1 Archipiélago de Revillagigedo	45
7.2.2 Isla Espíritu Santo y El Bajo Espíritu Santo	48
7.3 ANÁLISIS DE DATOS	50
8. RESULTADOS	55
8.1 Capturas y marcaje general	55
8.2 Detecciones ultrasónicas y estacionalidad en el AR	57
8.3 Detecciones ultrasónicas y estacionalidad en el AES	60

8.4 Movimientos diarios de <i>Sphyrna lewini</i> en el AR	61
8.5 Movimientos diurnos y nocturnos de <i>S. lewini</i> en el AES	68
8.6 Movimientos a mediana escala de <i>S. lewini</i> en el AES	71
8.7 Movimientos interinsulares de <i>S. lewini</i> en el AR	74
8.8 Movimientos interinsulares de <i>S. lewini</i> en el AES	76
8.9 Movimientos a gran escala de <i>S. lewini</i> en el AR	77
8.9.1 Movimientos verticales de <i>S. lewini</i> en el AR	79
8.10 Movimientos a gran escala de <i>S. lewini</i> en el AES	86
8.10.1 Movimientos verticales de <i>S. lewini</i> en el AES	90
8.11 Índice de residencia de <i>S. lewini</i> entre individuos y por sitios en el AR	94
8.12 Índice de residencia de <i>S. lewini</i> entre individuos y por sitios en el AES	95
8.13 Preferencias ambientales de <i>S. lewini</i> en el AR	96
8.14 Preferencias ambientales de <i>S. lewini</i> en el AES	100
9. DISCUSIÓN	103
9.1 Capturas y marcaje general	103
9.2 Detecciones y estacionalidad en el AR y AES	104
9.3 Movimientos diarios de <i>S. lewini</i> en el AR	105
9.4 Movimientos diarios de <i>S. lewini</i> en el AES	106
9.5 Movimientos a mediana escala de <i>S. lewini</i> en el AES	107
9.6 Movimientos interinsulares de <i>S. lewini</i> en el AR y AES	108
9.7 Movimientos horizontales y verticales a gran escala de <i>S. lewini</i> en el AR	110
9.8 Movimientos horizontales y verticales a gran escala de <i>S. lewini</i> en el AES	114
9.9 Índice de residencia de <i>S. lewini</i> entre individuos y por sitios en el AR	115
9.10 Índice de residencia de <i>S. lewini</i> entre individuos y por sitios en el AES	116
9.11 Preferencias ambientales de <i>S. lewini</i> en el AR y AES	117
10. CONCLUSIONES	117
11. RELEVANCIA DEL ESTUDIO Y RECOMENDACIONES	119
12. REFERENCIAS	120
13. ANEXOS	135

**DEDICATORIA:**

*A mi hijo Leonardo Atreyu, ser luminoso  
que acaricia mi alma y nunca deja ensombrecer mi corazón*

*A mi esposa Yuriko por confiar en mí y  
estar siempre a mi lado*

*...Hace algunos años –no importa cuántos, exactamente–, con poco o ningún dinero en mi billetera y  
nada de particular que me interesara en tierra, pensé darme al mar y ver la parte líquida del  
mundo...*

*Moby Dick / Herman Melville*

*...Dos caminos se bifurcaban en un bosque y yo,  
Yo tomé el menos transitado,*

*Y eso hizo toda la diferencia.  
Fragmento de Poema El camino no elegido / Robert Frost*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por otorgarme el privilegio de tener una beca.

Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional, por aceptarme en el Programa de Doctorado en Ciencias Marinas y brindarme todas las facilidades y herramientas académicas y administrativas para desarrollarme profesionalmente como científico.

A Pelagios Kakunjá, A.C., por abrirme las puertas a su organización y darme la oportunidad de ser parte de su equipo y aprender tanto de sus integrantes por brindarme siempre todo el apoyo financiero, logístico, tecnológico que permitieron desarrollar con éxito esta investigación.

A la Alianza World Wildlife Fund (WWF)/Fundación Telmex-Telcel, a la alianza WWF/Fundación Carlos Slim, The Watermen Project y National Geographic-Fischer Production, por aportar los fondos necesarios para el desarrollo de este proyecto de investigación.

A la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (DGOPA.06668.150612.1691), Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (F00.DRPBCPN-APFFCSL.REBIARRE-102/13), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Secretaría de Marina (SEMAR) por los apoyos otorgados y bajo los permisos necesarios para realizar esta investigación en el Parque Nacional de Revillagigedo.

A la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI-PIFI), por las becas otorgadas de nivel doctorado. A los programas institucionales COFAA y SAI del IPN por el apoyo económicamente para participar en congresos internacionales.

Al Dr. James Ketchum, por asesorarme, orientarme y enseñarme tanto sobre los tiburones, por ser siempre sincero conmigo, por su dedicación, compromiso y sobre todo su paciencia, le agradezco profundamente.

Al Dr. Mauricio Hoyos, por confiar en mí, asesorarme, enseñarme y hacerme ver mis errores. Por compartir su conocimiento y experiencias con tanta pasión que se contagia y por

por brindarme la oportunidad de cumplir mi sueño de estudiar a los tiburones e islas paradisíacas.

Al Dr. David A. Siqueiros, por aconsejarme y brindarme parte de sus conocimientos filosófico-científicos, por despertar en mi la semilla de la curiosidad investigativa y sobre todo por enseñarme a ser “*hereje*” en el sentido correcto de la palabra.

Al Dr. Felipe Galván y Dr. Rogelio González, por todos sus consejos, valiosas observaciones y comentarios para mejorar el documento de tesis, por siempre apoyar mis decisiones y por brindarme sus conocimientos, su valioso tiempo y experiencias, les agradezco mucho.

Al Dr. Guillermo, por enseñarme y ayudarme a construir mis mapas para la tesis, por siempre estar dispuesto a ayudarme y contribuir con valiosas observaciones y comentarios para mejorar el documento de la tesis.

A los futuros científicos de Pelagios Kakunjá y del Laboratorio de Ecología de Peces y Proyecto de Tiburones y Rayas del CICIMAR-IPN. En especial a: Abel, Edgar, Tania, Darren, Miquel, Frida, Kathy, Walter, Pete, Isis, Ángela y Blanca. Que me ayudaron de alguna manera con sus consejos, experiencias y en el trabajo de campo.

Al Dr. Peter Klimley, Dr. Cesar Peñaherrera, Dr. Alex Hearn, por sus recomendaciones, consejos y ayuda y sobre todo por ser un ejemplo para seguir y transmitirme sus entusiasmo y pasión para la conservación de tiburones.

A los pescadores Pedro Romero, Juan y Felipe Cuevas y al Capital Ismael Aguilar gracias por todo su apoyo en las captura y marcaje de tiburones y sobre todo por su visión con consciencia social para la protección y pesca sustentable.

A los liveboards Quino, El Guardián, SolmarV, Sharkwater, y a todos los miembros de la tripulación, por darnos la confianza y apoyarnos para realizar esta investigación y llevarme a navegar a ese santuario paradisiaco llamado Revillagigedo.

A Migramar por brindarme talleres y pláticas esenciales para mi investigación y a Sea Sheperd, por brindarme la oportunidad de navegar y apoyarme en mi proyecto.

A mi familia y amigos, cercanos en alma pero distante por destino

A mis padres Pedro Aldana, Lilia Moreno y a mi hermana Angélica Aldana, por siempre confiar en mí y apoyarme mis decisiones y en todo lo que he necesitado, por darme palabras de aliento consejos, enseñarme de la vida y sentirlos siempre pendiente de mí. Los quiero y extraño muchísimo.

Por último, a mi esposa Yuriko J. Martínez y mi hijo Atreyu por siempre estar a mi lado en los momentos más luminosos y sombríos, por confiar siempre en mí, y arriesgarse a emprender esta aventura sempiterna junto a mí. ¡Los amo!

## I. LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Detecciones acústicas y datos biológicos de 17 tiburones martillo común adultos marcados en el AR. LT: longitud total, reportada en centímetros. H= Hembras, M= Machos, I= Indeterminado. SB: San Benedicto y RP: Roca Partida.....	58
Cuadro 2. Detecciones acústicas y datos biológicos de 16 <i>S.lewini</i> adultos marcados en el AES. LT: longitud total, reportada en centímetros. H= Hembras, M= Machos. ....	61
Cuadro 3. TMC recapturados. Los días en libertad se calcularon con la diferencia entre fecha de marcaje y recaptura. Distancia, hace referencia al recorrido que realizaron los TMC en los sitios de captura y donde fue recapturado.....	72
Cuadro 4. Movimientos interconectados de <i>S. lewini</i> (n=11) entre sitios de la Isla San Benedicto. El porcentaje se basó en el total de movimientos del punto inicial y final de cada sitio. ....	75
Cuadro 5. Movimientos interconectados de cinco <i>S. lewini</i> altamente móviles entre sitios de la Isla San Benedicto. El porcentaje se basó en el total de movimientos del punto inicial y final de cada sitio.....	76
Cuadro 6. Prueba posteriori de Dunn, donde se comparan intervalos de profundidad por grupo. ....	83
Cuadro 7 .Prueba posteriori de Dunn, donde se comparan intervalos de profundidad por grupo. ....	83
Cuadro 8. Modelo aditivo generalizado de variables ambientales y la migración latitudinal del TMC SLew30 considerando el mejor modelo de predicción de acuerdo con el AIC. ....	100
Cuadro 9. Modelo aditivo generalizado de variables ambientales y la migración longitudinal del TMC SLew30 considerando el mejor modelo de predicción de acuerdo con el AIC. ....	100

## II. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Morfología del cuerpo y cabeza del tiburón martillo común, <i>Sphyrna lewini</i> (tomado de Ebert, 2014, ilustración de Marc Dando).....	24
Figura 2. Mapa de distribución de <i>Sphyrna lewini</i> según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2012).....	25
Figura 3. Tipos de transmisores telemétricos usados en el seguimiento de tiburones. Las flechas representan los datos de seguimiento obtenidos con cada método. a) Modelo euleriano con telemetría acústica pasiva, b-c) Modelo lagrangiano con transmisores satelitales (MiniPAT y SPOT) (Tomado de Chapman et al., 2015).....	27
Figura 4. A) Ubicación geográfica del Parque Nacional Revillagigedo. El recuadro representa el polígono de protección actual de la reserva marina; B) Amplificación del Archipiélago de Revillagigedo.....	39
Figura 5-Figura 6. Ubicación geográfica de la Isla San Benedicto y el Islote Roca Partida ...	40
Figura 7. Ubicación geográfica de Isla Socorro.....	41
Figura 8. Ubicación geográfica de Isla Clarión.....	42
Figura 9. Ubicación geográfica del Golfo de California mostrando la regionalización biogeográfica. Poner regionalización.....	43
Figura 10. A) Sureste del GC donde se muestra la ubicación del AES.....	45
Figura 11. Ubicación geográfica de receptores acústicos VR2W instalados (puntos rojos) en el AR.....	47
Figura 12. Longitud total de los tiburones martillo <i>S. lewini</i> capturados y marcados durante el 2008-2019 en el AR. La línea sólida y punteada representan las tallas de primera madurez en hembras $L_m = 225$ cm, y en machos $L_m = 180$ cm, respectivamente. En colores se representan el sexo de los TMC. Macho=Azul, hembras= rosa e indeterminados= amarillo.....	56
. Figura 13. Longitud total de los tiburones martillo <i>S. lewini</i> capturados y marcados durante el 2008-2019 en el AR. La línea sólida y punteada representan las tallas de primera madurez en hembras $L_m = 225$ cm, y en machos $L_m = 180$ cm, respectivamente. En colores se representan el sexo de los TMC. Macho=Azul y hembras= rosa.....	57

Figura 14. Número total de detecciones acústicas registradas para cada tiburón martillo marcado en el AR. El color rosa, representa a las hembras (n=14), el azul a los machos (n=2) y el amarillo sexo indeterminado (n=1). .....	59
Figura 15. Número de detecciones acústicas registradas por sitios en las islas del AR.....	60
Figura 16. Número total de detecciones acústicas registradas para cada tiburón martillo marcado en el AES. El color rosa, representa a las hembras (n=8) y el azul a los machos (n=10). .....	61
Figura 17. Número de detecciones diarias divididas por hora de 17 <i>S. lewini</i> en el AR, registradas desde 2008-2019. Los círculos indican el intervalo de detecciones por horas. En color naranja se representa la fase diurna (07-19 h) y en azul la fase nocturna (19-07 h).....	62
Figura 18. Número de detecciones diarias divididas por hora de <i>S. lewini</i> por sexo. A) Hembras y B) Machos. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes para cada sexo. En color naranja se representa la fase diurna (07-19 h) y en azul la fase nocturna (19-07 h).....	63
Figura 19. Número de detecciones diarias divididas por hora de <i>S. lewini</i> registradas por sitios. A) Cañón, B) Dedos de lava, C) Boiler, D) Cuevitas, E) Roca Partida Oeste, F) Roca Partida Este. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes a la escala de cada sitio. En color naranja se representa la fase diurna (07-19 h) y en azul la fase nocturna (19-7 h).....	65
Figura 20. Número de detecciones diarias divididas por hora de los 10 tiburones martillo <i>S. lewini</i> con más detecciones. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes a la escala de cada sitio. En color naranja se representa la fase diurna (07-19 h) y en azul la fase nocturna (19-07 h).....	68
Figura 21. Número de detecciones diarias registradas desde 2018-2019 divididas por hora de <i>S. lewini</i> por sexo A) Hembras, B) Machos. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes para cada sexo. En color naranja se representa la fase diurna (06-19 h) y en azul la fase nocturna (19-6 h).....	69
Figura 22. Número de detecciones diarias divididas por hora para EBES. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes a la escala de cada sitio. En color naranja se representa la fase diurna (06-19 h) y en azul la fase nocturna (19-06 h). .....	69
Figura 23. Número de detecciones diarias divididas por hora de ocho tiburones martillo <i>S. lewini</i> , con más detecciones. Los círculos indican el intervalo de detección por horas	

correspondientes a la escala de cada sitio. En color naranja se representa la fase diurna (06-19 h) y en azul la fase nocturna (19-06 h).....	71
Figura 24. Sitios de marcaje y recaptura de tiburón martillo (SLew 29). Se muestra la distancia recorrida (km) del punto de marcaje (azul) al punto de recaptura (rojo). La capa de batimetría está representada en metros.....	73
Figura 25. Sitios de marcaje y recaptura de tiburón martillo (SLew33). Se muestra la distancia recorrida (km) del punto de marcaje (azul) al punto de recaptura (rojo). La capa de batimetría está representada en metros.....	73
Figura 26. Sitios de marcaje y recaptura de tiburón martillo (SLew46), se muestra la distancia recorrida (km) del punto de marcaje (azul) al punto de recaptura (rojo). La capa de batimetría está representada en metros.....	74
Figura 27. Cronología diaria de detecciones acústicas registradas para cada uno de los TMC marcados con transmisores acústicos en el AR, de mayo 2009 a abril 2018. Los puntos de colores representan los diferentes sitios donde fueron detectados los tiburones en el tiempo. ....	74
Figura 28. Cronología diaria de detecciones acústicas registradas para cada uno de los tiburones martillo marcados con transmisores acústicos en el GC, de noviembre 2018 a septiembre 2019. Los puntos de colores representan los diferentes sitios donde fueron detectados los tiburones en el tiempo.....	77
Figura 29. Mapa de batimetría que muestra la trayectoria recorrida (148 km en 11 días) de un TMC macho (SLew24) marcado con transmisor satelital MiniPAT en Roca Partida. ....	78
Figura 30. Área de distribución utilizada (UD) del TMC macho SLew30 a través de la estimación de densidad Kernel en color crema a 95% y en color naranja al 50%.....	79
Figura 31. Tiempo empleado en diferentes intervalos de profundidad durante el día (06: 00-19: 00 h) y durante la noche (19: 00-06: 00 h).....	80
Figura 32. Tiempo transcurrido en diferentes intervalos de temperatura durante el día (06: 00-19: 00 h), representado en color amarillo y durante la noche (19: 00-06: 00 h) en color azul.	81
Figura 33. A. Movimientos verticales de <i>S. lewini</i> en Roca Partida. La fase nocturna se indica con las barras en color gris claro. B-C. Ciclo de 1 día de movimientos verticales, correspondiente a los días 7 y 13 de diciembre 2016, respectivamente. ....	82
Figura 34. Sección transversal de movimientos verticales de temperatura y profundidad en la longitud -112.1665 durante 6–14 de diciembre de 2016. ....	83

Figura 35. Tiempo empleado en diferentes rangos de profundidad durante el día (06:00-19:00 h) y durante la noche (19:00-06:00 h) para TMC SLew53.....	84
Figura 36. Tiempo transcurrido en diferentes rangos de temperatura durante el día (06:00-19:00 h) y durante la noche (19:00-06:00) para TMC SLew53. ....	85
Figura 37. Movimientos verticales del TMC SLew53.....	86
Figura 38. Trayectoria satelital recorrida por el TMC macho SLew30 en el AES, registrada con el transmisor satelital MiniPAT. Los meses durante los que se registró su movimiento están representados en colores.....	87
Figura 39. Área de distribución utilizada (UD) del TMC macho SLew30 a través de la estimación de densidad Kernel. En color crema se muestra el 95% y en color naranja al 50%. ....	88
Figura 40. Trayectoria satelital recorrida por el TMC macho SLew50 en el AES, registrada con el transmisor satelital MiniPAT. Los meses durante los que se registró su movimiento están representados en colores.....	89
Figura 41. Área de distribución utilizada (UD) del TMC hembra SLew 50 a través de la estimación de densidad Kernel. En color crema se muestra el 95% y en color naranja al 50%. ....	90
Figura 42. Preferencias en diferentes rangos de profundidad durante el día (06:00-19:00 h) y durante la noche (19:00-06:00 h) para el TMC SLew30. ....	91
Figura 43. A. Movimientos verticales de TMC SLew30 en el AES. La fase nocturna se indica en color gris claro. B. Ciclo de 1 día de movimientos verticales, correspondiente al 4 de marzo de 2019. ....	92
Figura 44. Tiempo empleado en diferentes rangos de profundidad durante el día (06:00-19:00 h) y durante la noche (19:00-06:00 h) para el TMC SLew50.....	93
Figura 45. A. Movimientos verticales del TMC hembra SLew50. La noche indicada por el color gris claro. B. Primer plano de 1 día de movimientos verticales durante el 9 de mayo 2019.....	93
Figura 46. Índice de residencia por individuo en el AR. En colores se representa el sexo, el rosa= hembras, el azul= machos y el amarillo= indeterminado. ....	94
Figura 47. Índice de residencia obtenido por receptores comparando cada individuo en el AR. ....	95
Figura 48. Índice de residencia por individuo en el AES. En colores se representa el sexo, el rosa= hembras y el azul= machos.....	96

Figura 49. Muestra la relación en el número de detecciones (línea azul) obtenidas de los 11 tiburones martillo y la temperatura superficial del mar (línea roja) a lo largo del periodo de estudio en San Benedicto. ....	97
Figura 50. Muestra la relación en el número de detecciones (línea azul) obtenidas de los 11 tiburones martillo y la concentración de clorofila (línea amarilla) a lo largo del periodo de estudio en San Benedicto. ....	97
Figura 51-Figura 52. Trayectoria recorrida por TMC SLew30. A. Temperatura de la superficie del mar B. Corrientes geostróficas. Los datos de temperatura y corrientes corresponden a los promedios del 6 al 14 de diciembre de 2016. ....	98
Figura 53. Trayectoria recorrida por TMC SLew30 mostrando la capa de mezcla (m) y velocidad de corriente geostrófica. Los datos de capa de mezcla y velocidad de corriente corresponden a los promedios del 6 al 14 de diciembre de 2016.....	99
Figura 54. Trayectoria recorrida por TMC SLew30 mostrando la altura del nivel del mar (m) y velocidad de corriente geostrófica. Los datos de nivel del mar y velocidad de corriente corresponden a los promedios del 6 al 14 de diciembre de 2016.....	99
Figura 55. A. Mapa de la trayectoria recorrida por el TMC hembra SLew50, donde se muestran preferencias ambientales acordes a los promedios de su recorrido mayo 7 a septiembre 28 2019. A. Capa de mezcla y dirección de corriente geostrófica, B. Salinidad del agua y dirección de corriente geostrófica. C. Corriente geostrófica, D. Altura del nivel del mar y E. Temperatura potencial del mar.....	102

### III. GLOSARIO

**AES:** Archipiélago de Espiritu Santo

**AIC:** Criterio de Información de Akaike

**AR:** Archipiélago de Revillagigedo

**Área de distribución:** Proveniente de la palabra en inglés “*home range*”, espacio en el que un animal o grupo de animales realizan sus actividades cotidianas de alimentación, agregación, reproducción y cuidado de sus crías. Puede sobreponerse con los de otros animales aledaños o grupos de la misma especie (Powell & Mitchell, 2012).

**Cardumen:** Grupo de peces de la misma especie que permanecen juntos y que nada en la misma dirección de una manera coordinada. Agruparse en cardúmenes, les provee ventajas como: orientarse, ahorro energético y reducir el riesgo de depredación (Shaw, 1978; Pitcher & Parrish, 1993).

**CITES:** Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre

**CMS:** Conservación de las Especies Migratorias de Animales Silvestres

**DOF:** Diario Oficial de la Federación

**EBES:** Montaña submarina El Bajo Espiritu Santo

**Fidelidad al sitio:** Describe el regreso de un individuo a una localidad donde previamente residió después de haberlo dejado por algún tiempo determinado. Para considerar fidelidad el periodo de ausencia debe de ser más largo que el periodo de residencia. Este término se puede derivar de un comportamiento en particular como: fidelidad al sitio de alimentación, de nacimiento, de reproducción y de agregación (Speed *et al.*, 2011, Chapman *et al.*, 2015).

**Filopatría:** Proviene de griego *philo* “amor” y *patra* “lugar de nacimiento”, es una tendencia de los individuos a regresar a los sitios donde vivieron, áreas de crianza o a otras localidades adoptadas. Esta definición incluye el comportamiento residencial, no dispersivo, así como las migraciones de retorno más complejas en las que los

individuos ocupan un sitio durante un tiempo lo dejan y luego regresan a él. (Mayr, 1963; Chapman *et al.*, 2015).

**GC:** Golfo de California

**IUCN:** Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

**Migración:** Es un tipo de movimiento de un organismo o grupo de un hábitat o lugar hacia otro. Es un movimiento periódico, generalmente la distancia estimada a un área, estrato o clima hacia otro, o cualquier movimiento que afecte el intervalo de distribución de una población o individuo (Lincoln & Boxshall, 1995).

**Migración biológica:** Es el movimiento asociado al recorrido de grandes distancias, excursiones de ida y vuelta de vertebrados, refiriéndose a un tipo de actividad locomotora que es evidentemente persistente, sin distracción y dirigida hacia fuera del área de distribución. También es aplicada a una redistribución de los animales que se presenta a gran escala e involucra movimientos de mayor duración a los que cotidianamente efectúa en sus actividades diarias y movimientos estacionales hacia regiones geográficamente favorables o recursos apropiados (Taylor, 1986; Gatehouse, 1987 en Dingle & Drake, 2007).

**Migravía:** Conjunto de corredores marinos biológicos interconectados entre áreas protegidas y otros parches de hábitats como montes submarinos y crestas marinas, que permiten la movilidad de especies migratorias y el intercambio de flujo genético poblacional a nivel local o regional para su protección y conservación (Migramar, 2017)

**Movimiento:** Es un desplazamiento en la ubicación espacial del individuo en el tiempo, impulsada por procesos que actúan a través de múltiples escalas espaciales y temporales (Nathan *et al.*, 2008, Turchin, 2015).

**NOM:** Norma Oficial Mexicana

**PET:** Pacífico Este Tropical

**Puntos Calientes de Biodiversidad:** Proviene del anglicismo “*biodiversity hotspots*” que en términos biológicos significa aquellos sitios donde prevalece una alta biodiversidad, tanto de presas como de depredadores tope (Myers, 2000).

**Residencia:** Describe a un individuo que muestra una ocupación prolongada e ininterrumpida de un área limitada (v. g., un área de distribución o área central) por un tiempo específico que depende del tamaño de la especie y la ontogenia del organismo (Chapman *et al.*, 2015).

**Selaquimorfos:** Son condrictios que pertenecen al superorden Selachimorpha, del griego *selachos*, “tiburón” y *morphé* “forma”.

***Sphyrna lewini*:** Del griego *sphyrna* “martillo”, es nombrado así debido a su particular cabeza parecida a la de un martillo.

**TMC:** Tiburón Martillo Común

**Topotaxis geomagnética:** Proviene del prefijo “topo”, como la relación de un animal en movimiento con la topografía, y el sufijo “taxis” como la atracción de un animal para seguir o rastrear cordilleras y valles del fondo marino. Es, por lo tanto, la habilidad de un animal para orientarse por medio de la intensidad de los campos geomagnéticos (Klimley, 1993).

**UNCLOS:** Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar

#### IV. RESUMEN

Las poblaciones de tiburón martillo común (TMC), *Sphyrna lewini*, han disminuido a nivel mundial debido a la sobrepesca y actualmente se le considera una especie en peligro crítico (UICN). En el Archipiélago Espíritu Santo (AES), se ha observado un descenso del 90 % desde los años 80s a la fecha, el cual fue considerado un santuario para los tiburones martillo, mientras que el Archipiélago Revillagigedo (AR), representa actualmente un hábitat importante y un refugio para estos tiburones. Este estudio describe los movimientos, la residencia y preferencias ambientales de los TMC en dos archipiélagos: Revillagigedo y Espíritu Santo. Se capturaron y marcaron con telemetría acústica a 53 individuos y a cinco con marcas satelitales MiniPAT durante el 2009-2019 y se instaló una red de 60 receptores acústicos distribuidos en ambas regiones. En el AR, los TMC presentaron un intervalo de tallas de 140-300 cm LT con una proporción por sexo sesgada hacia las hembras (H: M= 1.44: 0.40). En el AES, los TMC tuvieron un intervalo de 107-250 cm LT con una proporción por sexo balanceada (H: M= 1: 1). Se registraron 65,179 detecciones en el AR y 8,670 en el AES. En el AR, los TMC presentaron un patrón de movimientos diarios residiendo durante la fase diurna cercanos a la Isla de San Benedicto alejándose del intervalo de detección durante la noche con fines de alimentación. En cambio, en la Isla Roca Partida y el AES este patrón no fue tan evidente, posiblemente con una gran disponibilidad de presas potenciales cercanas. Se observó un movimiento interinsular en el AR, de un TMC que se movió de SB a RP. En el AES, se registró a otro TMC que se movió de EBES a Las Animas. Con el método de marcaje y recaptura, se obtuvo un porcentaje de recaptura de 9.7%, registrando movimientos migratorios hacia la Bahía La Paz, Cabo Pulmo y el área de crianza de La Reforma, Sinaloa. Evidenciando movimientos interconectados entre un sitio de agregación y un área de crianza. La residencia y uso de hábitat de los TMC en el AR fue mayor en Cañón y Dedos, SB. Mientras que, en el AES, solo fueron residentes en EBES. Presentando preferencia a sitios centrales de agregación. Los TMC marcados con dispositivos MiniPAT en el AR, mostraron evidencia de conectividad entre la Isla RP y el monte submarino Bernoulli, asociadas a las características batimétricas y a las condiciones oceanográficas como

corrientes, termoclina y profundidad. En el AES, se presentaron movimientos a gran escala de tres tiburones moviéndose entre hábitats insulares rumbo al norte del GC, hasta llegar a las islas de Loreto, y regresar eventualmente a los mismos sitios por lo que se observa una fidelidad al sitio del AES. Presentaron movimientos verticales oscilatorios más profundos y amplio durante la fase nocturna en comparación con la fase diurna, se observó que el 70 % del tiempo permanecieron en la capa de mezcla entre los intervalos de profundidad de 30-60 en el AR. En cambio, en el AES, los perfiles de movimientos verticales fueron más oscilatorios no diferenciándose de la capa de mezcla. Estos datos generan una línea de base para un monitoreo efectivo y para mejorar la conservación y el manejo del TMC *S. lewini*, considerados en peligro crítico. La actual expansión en el Parque marino AR y la reserva marina del AES probablemente permitirán la protección y preservación de esta especie alrededor de hábitats interconectados para ayudar a los tomadores de decisiones en el desarrollo de estrategias de gestión.

## V. ABSTRACT

The scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*, populations have declined globally due to overfishing and are now considered a critically endangered species (IUCN). In the Espiritu Santo Archipelago (AES) a 90% decrease has also been observed from the 1980s to date, which was considered a sanctuary for hammerhead sharks, while the Revillagigedo Archipelago (AR), currently represents an important habitat and a refuge for these sharks. Revillagigedo Archipelago (AR), represent an important habitat and a refuge for these marine predators. The aim of this study was describing the movements, residence, and environmental preferences of the TMC in two archipelagos: Revillagigedo and Espiritu Santo. A total of 53 individuals were captured and tagged with acoustic telemetry and five with MiniPAT satellite tags during 2009-2019 and a network of 60 acoustic receivers distributed in both regions was installed. In the RA, TMC presented a size interval of 140-300 cm LT with a sex ratio skewed towards the females (H: M = 1.44: 0.40). In the AES, TMC had an interval of 107-250 cm LT with a balanced sex ratio (H: M = 1: 1). A total of 65,179 detections were recorded in the AR and 8,670 in the AES. In AR, TMC presented a pattern of daily movements residing during the daytime phase near SB Island, moving away from the detection range during the night for feeding purposes. In contrast, on RP and the AES this pattern was not so evident, possibly with a high availability of nearby potential prey. An inter-island movement was observed in the AR, from a TMC that moved from SB to RP. In the AES, another TMC was registered that moved from EBES to Las Animas. A recapture percentage of 9.7% was obtained by tagging and recapture method, recording migratory movements towards La Paz Bay, Cabo Pulmo and the La Reforma nursery area, Sinaloa. Evidencing interconnected movements between an aggregation site and a nursery area. The residence and habitat use of the TMC in the AR was greater in Cañon y Dedos de Lava, SB. Whereas, in the AES, they were only residents in EBES. Preference to central aggregation sites was showing. The TMC tagged with MiniPAT tags in the AR showed evidence of connectivity between RP Island and the Bernoulli seamount, associated with bathymetric characteristics and oceanographic conditions such as currents, thermocline, and depth. In the AES, there were large-scale

movements of three sharks moving between island habitats heading north of the GC, until they reached the islands of Loreto, and eventually returned to the same sites, thus showing fidelity to the AES site. Vertical movements were deeper and wider oscillatory during the night phase compared to the day phase; it was observed that 70% of the time they remained in the mix layer between the depth intervals of 30-60 in the AR. In contrast, in the AES, the vertical movement profiles were more oscillatory, not differentiating from the mix layer. These data generate a baseline for effective monitoring and to improve the conservation and management of the TMC *S. lewini*, considered critically endangered. The current expansion in the Revillagigedo National Park and AES Marine Reserve will allow the protection and preservation of this species around interconnected habitats to assist decision makers in developing management strategies.

## 1. INTRODUCCIÓN

El movimiento es un comportamiento universal que caracteriza a todos los organismos vivos. Se define como un cambio en la ubicación espacial del individuo en el tiempo, es un distintivo fundamental de la vida, impulsada por procesos que actúan a través de múltiples escalas espaciales y temporales (Nathan *et al.*, 2008, Turchin, 2015). Desde una perspectiva biológica, los movimientos a grandes distancias y de mayor duración, así como las excursiones de ida y vuelta y movimientos persistentes alejados de la costa se asocian con la migración, permitiendo la redistribución poblacional de animales a gran escala a regiones geográficas favorables y recursos adecuados para desempeñar sus actividades diarias o temporales (Taylor, 1986, Dingle & Drake 2007).

En particular, los elasmobranchios se mueven debido a una gran variedad de motivos y entre los más frecuentes son la alimentación y la reproducción (Papastamatiou & Lowe, 2012). La mayoría de los movimientos ocurren en áreas de agregación donde algunas especies forman cardúmenes y pueden coexistir con otras especies en el mismo hábitat (Powell & Mitchell, 2012). Los elasmobranchios realizan movimientos con el fin de optimizar sus oportunidades para alimentarse, reproducirse, buscar refugio y seleccionar un hábitat con condiciones ambientales adecuadas para su desarrollo (Lowe & Bray, 2006).

Los movimientos pueden variar en escalas temporales cortas (diario y ciclo de marea) y de largo plazo (estacional y anual) (Speed *et al.*, 2010), así como en escalas espaciales locales (Hearn *et al.*, 2010), interinsulares (Bessudo *et al.* 2011a; Ketchum *et al.*, 2014a), regionales (Vaudo *et al.*, 2017) y transoceánicas (Bonfil *et al.*, 2005). Algunos tiburones presentan movimientos locales, ocupando un área central de distribución para luego dispersarse hacia zonas pelágicas para alimentarse (Klimley y Nelson 1984; Klimley *et al.*, 1985). Por otro lado, varias especies de tiburones presentan filopatría, donde los individuos regresan de largas migraciones a sus sitios de crianza,

apareamiento o hábitats que favorecen su desarrollo (Mayr, 1963; Morrisey & Gruber, 1993; Papastamatiou *et al.*, 2009).

Dentro del Superorden de los Selaquiformes, el tiburón martillo común o cornuda barrosa *Sphyrna lewini* (Griffith & Smith, 1834) y el tiburón martillo liso *Sphyrna zygaena* (Linnaeus, 1758) son consideradas especies altamente migratorias (Fowler, 2014; CMS; UNCLOS, 2014) que habita en mares costeros y semi-oceánicos (Compagno, 1988) y en el caso de *S. lewini* forma grandes cardúmenes en islas y montes submarinos (FAO; 2014; Klimley *et al.* 1985; Ketchum *et al.*, 2014a).

*S. lewini* pertenece al orden de los Carcharhiniformes y la familia Sphyrnidae que está conformada por nueve especies. Esta familia se caracteriza por poseer una cabeza aplanada dorsiventralmente en forma de martillo y lóbulos frontales, hendiduras craneales; así como, diferentes coloraciones y tamaños que los distingue entre especies (Compagno *et al.*, 2005). Posee un cuerpo grande, puede llegar a medir 360-430 cm de longitud total (LT) y tiene una cabeza con una hendidura central y dos lóbulos laterales pronunciados de cada lado. La primera aleta dorsal es más grande que la segunda y tiene aletas pélvicas pequeñas con un margen posterior recto. Su coloración es de gris claro a bronce y blanco en la parte ventral. El ápice de las aletas pectorales tiene puntas negras en la fase juvenil y una aleta anal con hendidura pronunciada en el margen posterior (Compagno 1984; Compagno *et al.*, 2005) (Fig. 1).

La estrategia reproductiva de *S. lewini* es por viviparidad placentada, donde el saco vitelino se convierte en una placenta. Los embriones están unidos a un cordón placentario para transferir nutrimentos de la madre (Compagno *et al.*, 1995). Se alimentan de cefalópodos, peces, rayas e invertebrados (Torres-Rojas *et al.*, 2007; Flores-Martínez *et al.*, 2017), tienen una madurez sexual tardía ( $L_m$  225 cm LT), baja fecundidad (13-31 crías) y alta mortalidad natural (Ferrari & Ferrari, 2001; Compagno *et al.*, 2005).

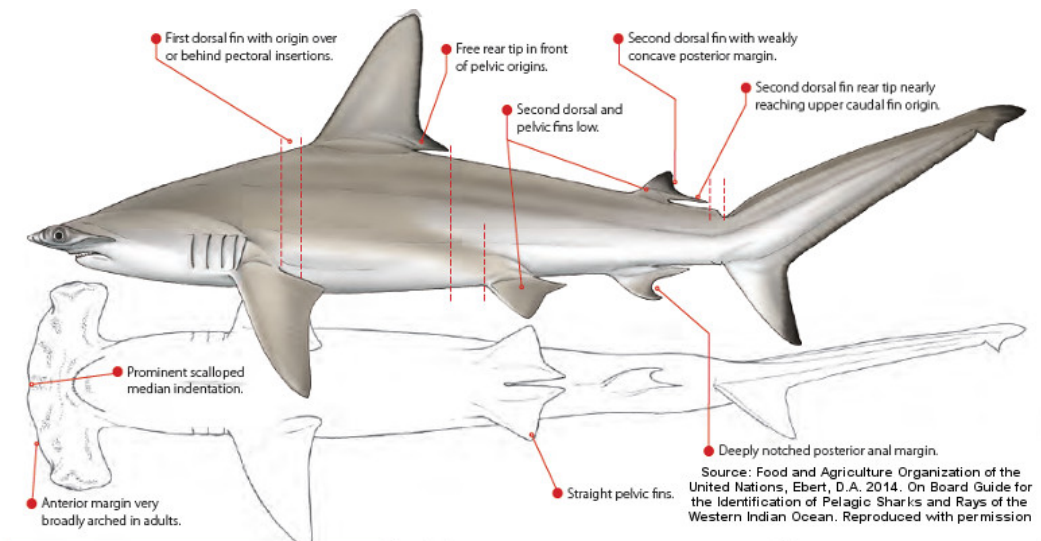


Figura 1. Morfología del cuerpo y cabeza del tiburón martillo común, *Sphyrna lewini* (tomado de Ebert, 2014, ilustración de Marc Dando).

*S. lewini* presenta una distribución circuntropical que abarca mares templados y tropicales. En particular, en el Pacífico Este Tropical (PET), reside desde el sur de California (EE. UU.) al Ecuador (Compagno, 1984; UICN, 2012) (Fig. 2). Forman cardúmenes en áreas costeras, montes submarinos e islas volcánicas. Muchas de estas son Áreas Marinas Protegidas (AMP) como Isla Espíritu Santo, Revillagigedo, Galápagos, Malpelo, Cocos (Klimley & Nelson, 1984; Klimley, 1985; Klimley *et al.*, 1993; Ketchum *et al.*, 2020; Hearn *et al.*, 2008; Bessudo *et al.*, 2011a; Ketchum *et al.*, 2014a, b; Nalesso *et al.*, 2019).

*S. lewini* o tiburón martillo común (TMC) es una especie migratoria que permanece en las islas o montañas submarinas durante la fase inactiva (diurna) de su ciclo diario y en la fase activa (nocturna) se mueve a regiones oceánicas para alimentarse (Klimley & Nelson, 1984; Hearn *et al.*, 2010; Bessudo *et al.*, 2011a; Ketchum *et al.*, 2014a). Se orientan por medio de señales geomagnéticas provenientes del flujo de lava basáltico del fondo marino que perciben a través de sus órganos sensoriales, llamados ámpulas de Lorenzini (Klimley *et al.*, 1993; Klimley *et al.*, 2005). En el PET y GC, se han registrado migraciones a zonas costeras para parir a sus crías, retornando anualmente a las mismas localidades (Torres-Huerta *et al.*, 2008; Hoyos-

Padilla *et al.*, 2014; Ketchum *et al.*, 2014a). Mientras son neonatos y juveniles habitan en aguas costeras (Klimley & Nelson, 1981) y cuando son subadultos y adultos se vuelven semi-oceánicos (Hoyos-Padilla *et al.*, 2014; Salina-de-León *et al.*, 2017).



Figura 2. Mapa de distribución de *Sphyrna lewini* según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2012).

El TMC es una de las especies más importantes en la pesca comercial, así como en actividades de ecoturismo en el Pacífico mexicano y GC (Klimley, 1995, 2003; Ketchum *et al.*, 2020; Cisneros-Montemayor *et al.*, 2020). Sin embargo, en los últimos 30 años, sus poblaciones han disminuido hasta 76-89% en algunas regiones del mundo (Baum & Blanchard, 2010; Gallagher *et al.*, 2014) debido a (1) el incremento en la presión pesquera (Baum *et al.*, 2003; Baum & Myers 2004); (2) el mercado de productos de alta calidad (Rose, 1998; Clarke, 2006; Musick & Musick, 2011); y (3) la degradación del ecosistema marino que afectan negativamente las interacciones tróficas (Myers *et al.*, 2007; Sandin *et al.*, 2008).

El TMC es vulnerable debido a que utiliza aguas costeras y oceánicas en diferentes estadios de vida (Klimley & Nelson, 1981; Hoyos-Padilla *et al.*, 2014; Salinas-de-León *et al.*, 2017), Además, su estrategia reproductiva tipo K (Odum & Barrett, 2006), implica un crecimiento lento, fecundidad baja, madurez sexual tardía (Cortés,

2000; Mollet & Cailliet, 2002; Au *et al.*, 2008) y una gestación prolongada (Musick, 1999). Todos estos factores han propiciado que se le considere una especie *en peligro crítico* a nivel mundial por la UICN (Rigby *et al.*, 2019) y esté clasificada en el apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES, 2012). Asimismo, esta especie tiene cierto nivel de protección en México bajo la NOM-029-PESC-2006, que estableció un periodo de veda del 1 de mayo a 31 de julio a partir de 2012 (DOF, 2007, 2014).

Recientemente, los avances tecnológicos en telemetría ultrasónica y satelital, así como los análisis estadísticos espaciales y las técnicas de calibración, han sido herramientas esenciales para realizar estudios sobre la ecología y comportamiento de los tiburones en su ambiente natural (Sims, 2010; Hammerschlag *et al.*, 2011; Papastamatiou & Lowe, 2012). Esto ha contribuido a entender los patrones de movimiento, uso de hábitat y sitios clave para estas especies (Simpfendorfer & Heupel, 2004; Schneider, 1994, Klimley *et al.*, 2001). Además, dichos estudios proveen de información valiosa sobre sus preferencias ambientales (Kohler & Turner, 2001).

Estas técnicas y métodos de estudio del movimiento pueden equipararse a los modelos de dispersión de partículas, es decir; como se mueve una partícula en el tiempo y el espacio. Considerando los movimientos de los tiburones, los modelos euleriano y lagrangiano pueden aplicarse desde varios niveles de organización: individual y poblacional (Okubo *et al.*, 2001; Chapman *et al.*, 2015) (Fig. 3). El modelo euleriano se puede aplicar a la telemetría pasiva, la cual está formada por uno o varios receptores acústicos fijos en un área y la dispersión de partículas (transmisores insertados en los tiburones) registrada en el tiempo y espacio. Por otro lado, el modelo lagrangiano, se puede implementar con telemetría activa y satelital Este se enfoca en el seguimiento individual de una partícula (transmisor satelital insertado en los tiburones) en el tiempo y espacio (Chapman *et al.*, 2015; Ketchum *et al.*, 2020).

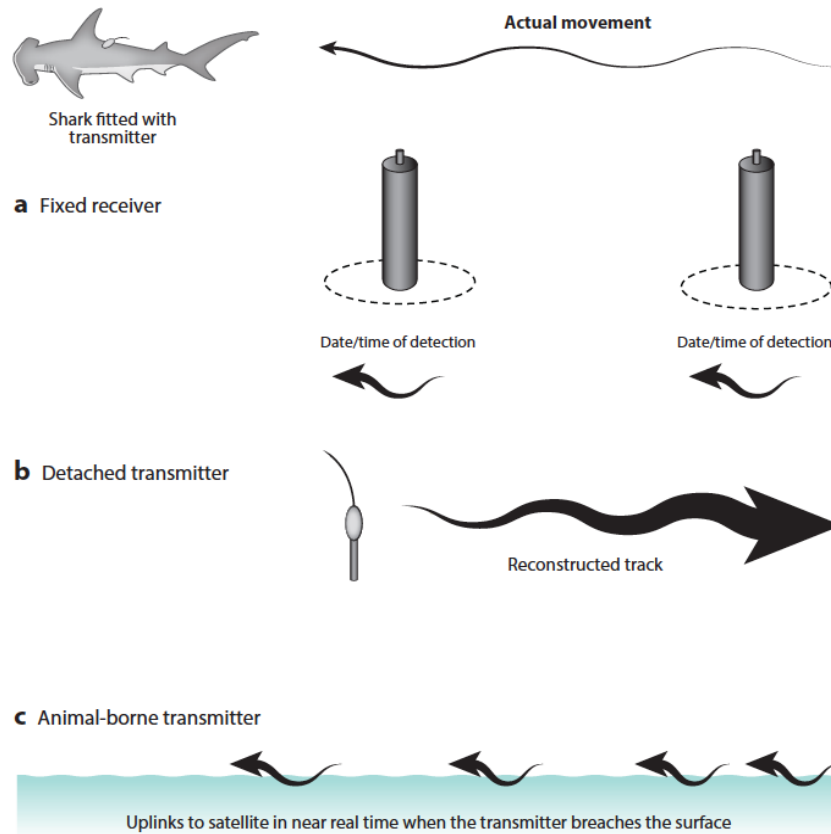


Figura 3. Tipos de transmisores telemétricos usados en el seguimiento de tiburones. Las flechas representan los datos de seguimiento obtenidos con cada método. a) Modelo euleriano con telemetría acústica pasiva, b-c) Modelo lagrangiano con transmisores satelitales (MiniPAT y SPOT) (Tomado de Chapman et al., 2015).

## 2. ANTECEDENTES

Desde los años 80s, comenzaron los primeros estudios sobre los movimientos de *S. lewini* en El Bajo Espíritu Santo (EBES) y otras islas en el GC, utilizando dispositivos telemétricos ultrasónicos pasivos y activos. Estos estudios encontraron que los martillos se refugiaban durante el día utilizando hábitats específicos alrededor de las islas y montes submarinos, mientras que en la noche realizaban movimientos hacia la zona pelágica (Klimley & Nelson, 1981, 1984; Klimley & Butler, 1988; Klimley *et al.*, 1988). Klimley *et al.*, (1993) encontró que estos movimientos eran direccionales y que los martillos eran capaces de orientarse y seguir rutas hacia las zonas de alimentación usando campos geomagnéticos a lo que denominó topotaxis geomagnética. Estas investigaciones han motivado el desarrollo de trabajos más

recientes de movimientos migratorios y ecología del comportamiento, utilizando diferentes tipos de transmisores telemétricos y satelitales.

## **2.1 Movimientos diarios**

El TMC presenta un evidente patrón diario de movimientos en relación con el ritmo circadiano, residiendo en cardúmenes durante la fase diurna en islas volcánicas y montañas submarinas. En la fase nocturna se desplazan hacia áreas alejadas y profundas de la zona pelágica con el propósito de alimentarse (Klimley & Nelson, 1984; Klimley *et al.*, 1988 y Klimley *et al.*, 1993).

Este patrón de movimiento también ha sido reportado en otras islas del PET: Malpelo, Colombia (Bessudo *et al.*, 2011a), Cocos, Costa Rica (Nalesso *et al.*, 2019) y Galápagos, Ecuador, donde los martillos realizan excursiones diarias de más de 40 km para alimentarse presuntamente de sus presas predilectas, como los cefalópodos oceánicos (Ketchum *et al.*, 2014a).

## **2.2 Movimientos locales e interinsulares**

Los TMC exhiben un alto grado de movimientos interconectados entre islas y montes submarinos. Ketchum *et al.* (2014a), clasificaron tres tipos de movimientos: 1) Distancia corta de ida y vuelta (<50 km); 2) Distancia media entre 50-300 km; 3) Distancia larga (>300 km). Basándose en el comportamiento de la especie, Ketchum, (2011), clasificó sus movimientos como: 1) Descanso, cuando nadan a baja velocidad en áreas rocosas y coralinas cercanas a la isla; 2) Direccional, cuando se mueven hacia aguas abiertas y regresan a la isla por la misma ruta y 3) Errático, con movimientos ágiles y veloces, asumiendo un comportamiento alimenticio.

Klimley *et al.* (1993) describió los movimientos horizontales y verticales mediante transmisores acústicos activos en 15 TMC marcados observando que los tiburones permanecieron en EBES durante el día y realizaron excursiones durante la noche a una distancia de 4 a 20 km del monte submarino y descubrió que estos movimientos eran paralelos y cercanos entre sí, siguiendo rutas a sitios de alimentación.

En las islas de Galápagos se observaron migraciones constantes de TMC entre las islas de norte, mientras que en islas del centro fueron casi nulas. Estos realizaban movimientos cortos de 500-700 m en la costa este de la isla Wolf, favorecido por sitios con corrientes ascendentes que proporcionan un flujo de partículas planctónicas, que atrae a peces planctívoros y de arrecife, a su vez a consumidores secundarios y a depredadores tope (Ketchum *et al.*, 2014a y Ketchum *et al.*, 2014b).

En otro estudio realizado en Islas Malpelo y Cocos, se colocaron marcas satelitales a nueve TMC sin encontrar un patrón de movimientos particular entre individuos, sugiriendo que la amplia variabilidad en la direccionalidad de movimientos se pudiera deber a los diversos hábitats como montes submarinos distribuidos en el PET, a la dinámica oceánica o debido a movimientos que los martillos efectúan al seguir a sus presas. Bessudo *et al.* (2011b).

Ketchum *et al.* (2014b) observaron que los TMC pueden nadar durante largos periodos de tiempo (~1 año) y migrar grandes distancias (>700 km), moviéndose entre hábitats insulares interconectados. Los autores encontraron que los tiburones se movieron entre islas: de Darwin a Isla del Coco y de regreso, así como de Wolf a Isla del Coco; de Darwin a Malpelo. En particular, un individuo realizó el recorrido a todas las islas en la secuencia de Malpelo, Coco, Wolf y Darwin.

Hearn *et al.* (2010), Bessudo *et al.* (2011a) y Ketchum *et al.*, (2014b) observaron movimientos interinsulares de los TMC viajando 627 km de Isla Malpelo a Isla del Coco y de Islas de Galápagos a Isla del Coco. Uno de ellos viajó 710 km hacia las Islas de Galápagos y sus alrededores (Bessudo *et al.*, 2011a) y otro tiburón se movió de Isla Darwin a Isla del Coco (Ketchum *et al.*, 2014b). Reportaron una distancia total recorrida de 1,941 km, demostrando así una conectividad interinsular en el PET, aunque señalan que estos movimientos a gran escala son poco frecuentes y relativamente bajos (<7%).

En otros estudios Nalesso *et al.* (2019), señalaron que los TMC en la Isla del Coco fueron más residentes que otros martillos que transitan provenientes de otras islas, sugiriendo que las poblaciones de tiburones de Islas de Galápagos e Isla Malpelo utilizan la isla Cocos como punto de navegación o de tránsito, demostrando que los tiburones pueden formar una red de puntos calientes en el PET.

Estos movimientos interconectan las rutas del TMC en el PET a diferentes escalas espaciales y están influenciados por factores ambientales y bióticos como son: las corrientes fuertes ( $>0.8$  m/s) ascendentes, persistentes y unidireccionales que favorecen el flujo de plancton, la temperatura superficial de la mar cálida (23-26°C) y las áreas con gran diversidad biológica (Hearn *et al.*, 2010; Bessudo *et al.*, 2011a; Ketchum *et al.*, 2014a). Además del comportamiento social con fines reproductivos (Klimley & Nelson, 1981; 1984; Ketchum *et al.*, 2014b).

### **2.3 Residencia y uso de hábitat**

Los TMC son residentes en islas oceánicas y no se distribuyen de manera homogénea alrededor de las mismas, sino que tienen predilección por zonas específicas cercanas a las islas que utilizan como refugio para optimizar energía e interactuar socialmente (Klimley & Nelson 1984). Además, existe una gran abundancia de depredadores tope (7 especies) en sitios particulares de las islas o montañas submarinas denominados puntos calientes de depredadores (Hearn *et al.*, 2010). Estos sitios denominados puntos calientes de biodiversidad pudieran funcionar como ejes de dispersión a otros hábitats predilectos que utilizan como referencia.

Por ejemplo, Ketchum *et al.* (2014a), demostraron por medio de un análisis espacial de Kernel que los TMC en Isla Wolf, Galápagos, utilizan pequeñas áreas de refugio agregándose en cardúmenes para minimizar su gasto energético cuando no se alimentan. Por otro lado, Bessudo *et al.*, (2011a), demostraron que los TMC permanecieron en la Isla Malpelo de dos semanas hasta 14 meses. Algunos de estos migraron hacia diferentes zonas y otros retornaron después de una semana o 24

meses. Por otra parte, Nalesso *et al.* (2019) señalan que los tiburones en Isla del Coco fueron más residentes en la red de receptores con un índice de  $52\% \pm 0.31$ ; en particular, en el monte submarino Alcyone.

La residencia diurna puede estar relacionada a la presencia con los sitios de limpieza que se caracterizan por una gran abundancia de peces de arrecife limpiadores. En éstos, donde el pez mariposa de nariz negra (*Johnrandallia nigrirostris*) y el pez ángel rey (*Holacanthus passer*) remueven ectoparásitos y curan heridas provocadas por cortejo y competencia entre tiburones (Ketchum, 2011, Ketchum *et al.*, 2014; Nalesso *et al.*, 2019).

Por otra parte, Rosende-Pereiro & Corgos (2018), sugieren que los TMC neonatos tienen una alta fidelidad al sitio y un evidente patrón de movimientos diarios a pequeña escala dentro del área de crianza en Rebalcito, Jalisco. Argumentan que *S. lewini* es muy activo, pero sus movimientos son más cortos que en otras especies de tiburones juveniles. Además; señalan que el gran aporte de nutrientes y materia orgánica por las descargas de ríos que propician un hábitat idóneo para alimentarse de presas potenciales (Rosende-Pereiro & Corgos 2018),

#### **2.4 Movimientos verticales y preferencias ambientales**

El TMC es una especie tropical que fisiológicamente requiere permanecer cercano de la superficie para mantener su temperatura corporal. Por lo tanto, tiene preferencias por aguas cálidas ( $23-26^{\circ}\text{C}$ ) (Ketchum *et al.*, 2014b). Klimley & Butler (1988), observaron que los TMC emigran en respuesta a masas de agua más frías sobre EBES e inmigran cuando las masas de agua son más cálidas. Sin embargo, los TMC son capaces de tolerar amplios intervalos de temperatura ( $4.8$  a  $28^{\circ}\text{C}$ ) y niveles de hipoxia (desde  $0.067 \text{ mg. L}^{-1}$  a  $0.456 \text{ mg. L}^{-1}$ ) en profundidades que alcanzan hasta los  $1000 \text{ m}$  (Jorgensen *et al.*, 2009).

Klimley (1993) y Klimley *et al.*, (1993) registraron a través de telemetría activa que al alejarse a zonas más profundas los TMC realizaban excursiones verticales en un intervalo de profundidad de 100 a 450 m y con movimientos oscilatorios tipo yo-yo.

Jorgensen *et al.* (2009), también describieron movimientos verticales siguiendo un patrón oscilatorio en forma de yo-yo. Estas inmersiones son efectuadas con el fin de optimizar sus oportunidades de caza mientras persiguen a sus presas. Los movimientos oscilatorios les permiten detectar más fácilmente los campos geomagnéticos en el sustrato.

Ketchum *et al.* (2014b) y Bessudo *et al.* (2011b) señalaron que la profundidad a la que se encuentran los TMC varía de manera importante con relación a la estacionalidad, nadando más en la superficie (0-10 m) durante la estación fría, donde hay mayor productividad e incrementa la disponibilidad de alimentos. Por el contrario, durante la estación cálida los TMC nadan a mayor profundidad. Además, notaron que la profundidad de los TMC estaba relacionada con la termoclina donde permanecía justo por debajo de ésta.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

El manejo sustentable de las poblaciones de tiburones requiere del conocimiento detallado de su ecología espacial, es decir; cómo es el movimiento a nivel espacial de los individuos, además de la dinámica temporal en relación con su ambiente físico y biótico (Sims, 2010).

Los estudios sobre residencia y patrones de movimientos de tiburones a distintas escalas espaciotemporales en áreas de agregación insulares (oceánicas y costeras) del PET, son importantes para el manejo de especies y puede ayudar a tomar acciones más eficientes para su conservación (Stevens *et al.*, 2000; Hoyos-Padilla *et al.*, 2014) En especial cuando se trata de una especie en peligro crítico (UICN, 2012) como es el caso del TMC en el Pacífico mexicano.

En México, las medidas de protección actuales y regulación propuestas por la NOM-029, que consisten en establecer una veda temporal, han sido insuficientes y poco efectivas en ambientes oceánicos, como islas oceánicas y costeras, así como, montes submarinos. Esto ha mermado la recuperación poblacional de la especie *S. lewini* la cuales es altamente migratoria (Hoyos-Padilla *et al.*, 2014). Debido a lo anterior, es necesario conocer su comportamiento migratorio, patrones de movimiento, uso de hábitat, sitios clave de agregación, así como entender la variabilidad espaciotemporal de los parámetros ambientales.

Los TMC son altamente susceptibles y vulnerables a la pesca debido a que utilizan el hábitat costero y oceánico en diferentes estadios de vida. Tienen estrategias reproductivas tipo K y un comportamiento de agregación social (Klimley & Nelson, 1981, Klimley, 1985) que los hace vulnerables a la pesca comercial y furtiva cuando se alejan fuera de la reserva marina del AR y hacia la zona costera del Pacífico mexicano. Asimismo, cuando residen en sitios centrales de agregación donde refugian en grandes cardúmenes. La explotación comercial de sus aletas y productos derivados tiene una gran demanda por ser considerados de alta calidad en el mercado asiático. Además, es una de las especies con mayor incidencia de mortandad en la pesca incidental por redes agalleras y de palangre a nivel mundial (Gallagher *et al.*, 2014).

Dada esta problemática es importante estudiar y comprender mejor los movimientos y preferencias ambientales del TMC en el GC y Pacífico mexicano, con el fin de ayudar a proponer mejores esquemas de conservación para esta especie en peligro crítico de extinción Esta información también podrá ser de utilidad para desarrollar planes de manejo específicos en hábitats críticos para esta especie. Por lo tanto, en el presente estudio se enfocó en describir los movimientos a pequeña y gran escala, residencia y las preferencias ambientales del TMC en los AR y AES, así como islas aledañas del sureste del GC.

#### 4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio pretende responder a las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cómo son los movimientos diarios de los tiburones martillo *S. lewini* en el AR y AES?
2. ¿Cómo son los movimientos horizontales y verticales en diferentes escalas espaciotemporales de los tiburones martillo *S. lewini* en el AR y AES?
3. ¿Existen movimientos interinsulares de los tiburones martillo en el AR y AES?
4. ¿Cuál es el nivel de residencia de los tiburones martillo en el AR y AES?
5. ¿Presenta *S. lewini* preferencias ambientales durante sus movimientos migratorios en el AR y AES?

#### 5. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

**Hipótesis 1.** Los tiburones martillo de las islas oceánicas de PET presentan un patrón de movimientos que efectúan diariamente, alejándose de las islas de residencia con fines de alimentación durante la noche y retornando a los mismos sitios para refugiarse durante el día. Por lo tanto, se esperaría encontrar un patrón de movimientos similar en AR y AES.

**Hipótesis 2.** Los tiburones martillo son altamente migratorios, por lo que pueden realizar movimientos interinsulares interconectados a mediana y gran escala, por lo tanto, los tiburones pudieran presentar movimientos interinsulares en AR y AES.

**Hipótesis 3.** Los tiburones martillo tienen preferencia a sitios centrales de refugio, donde se agregan y residen por periodos prolongados, por lo que se esperaría un nivel de residencia alto en algunos sitios del AR y el AES.

**Hipótesis 4.** Los tiburones martillo se distribuyen en sitios particulares en torno a islas y montañas submarinas oceánicas que presentan condiciones oceanográficas particulares influenciadas por fuertes corrientes y temperaturas cálidas. Realizan movimientos verticales oscilatorios que les permiten optimizar sus oportunidades de depredación durante su migración, por lo que se espera que los tiburones martillo muestren preferencia por hábitats específicos alrededor de las islas o montañas submarinas en AR y AES.

## 6. OBJETIVOS

### **Objetivo general:**

Describir los movimientos de los tiburones martillo *Sphyrna lewini*, estimar la residencia e identificar preferencias ambientales que influyen en sus migraciones en el AR y AES.

### **Objetivos particulares:**

1. Determinar los movimientos diarios de *S. lewini*, mediante telemetría acústica pasiva en AR y AES.
2. Determinar los movimientos horizontales y verticales a mediana y gran escala de *S. lewini*, en AR y AES.
3. Describir los movimientos interconectados de *S. lewini* entre sitios (red de receptores acústicos) para el AR y AES.
4. Estimar y comparar el índice de residencia de *S. lewini* entre sitios, islas, sexo en el AR y AES.
5. Identificar preferencias ambientales que influyen en el uso de hábitat y movimientos migratorios de *S. lewini* en el AR y AES.

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 ÁREA DE ESTUDIO

#### 7.1.1 Archipiélago de Revillagigedo

El AR, es un Parque Nacional localizado entre las coordenadas geográficas 17°39'18.8 y 20°00'31.1. N y -110°04'41.1 y -115°28'17.1 W (Fig. 4a). Está conformado por un conjunto de islas de origen volcánico: Socorro, Clarión, San Benedicto y Roca Partida (Fig. 4b) que emergieron desde los 3,500 m de profundidad durante el Plioceno y Pleistoceno, y que se elevan desde la zona de fracturas de Clarión (Brattstrom, 1990; Castellanos & Ortega-Rubio, 1994). Se ubican a 661 km al oeste de Manzanillo, Colima, a 386 km y al suroeste de Cabo San Lucas en Baja California Sur (CONANP, 2004).

En 2008 fue decretado Reserva de la Biosfera y en 2016 Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, debido a la alta biodiversidad y especies endémicas. Los estudios de movimientos y conectividad de peces y elasmobranquios han permitido su expansión. Actualmente cubre un área de protección y de no pesca de 148,088 km<sup>2</sup> (Ketchum *et al.*, 2020), siendo considerada como la reserva marina más grande en Norteamérica (CONANP, 2017).

El archipiélago, se encuentra ubicado en la zona de fractura de Clarión y el Sistema Dorsal del Matemático, cercano a la placa Rivera, proveniente de la placa de Cocos (Carballido-Sánchez, 1991 y 1994). Además, es zona de transición del Pacífico Oriental Norecuatorial. En esta región convergen masas de agua superficial y subsuperficial transportadas por movimientos giratorios ciclónicos y anticiclónicos provenientes de los hemisferios norte y sur (CONANP, 2004).

El AR está influenciado por la corriente de California, en la costa occidental de California, EE. UU. aportando aguas frías. Mientras que la corriente Norecuatorial que viaja desde Asia por la zona del ecuador a través del Pacífico Central, con aguas cálidas, llega a la costa oriental donde recorre el continente hacia el norte. También

está presente la corriente costera de Costa Rica y la corriente del Pacífico Norte que se mezclan con la corriente de California, aportando aguas templadas (Fiedler & Talley, 2006; Serviere-Zaragoza *et al.* 2007; CONANP 2017). Las mareas son mixtas y semidiurnas todo el año. El AR es impactado con un promedio de tres huracanes al año (coast.noaa.gov/hurricanes).

El clima en la región es árido y desértico, con precipitación media anual de 313.8 mm (CONANP, 2004). La temperatura promedio del mar circundante a las islas fluctúa entre 28 y 29 °C durante el verano y entre 22 y 25 °C en invierno. La salinidad oscila entre 34.5 y 34.6 ups en verano y varía entre 34.1 y 34.8 ups en invierno (Fernández *et al.*, 1992).

En el AR confluyen especies de peces del Indo-Pacífico, Panamá, Golfo de California y Pacífico mexicano, registrándose un total de 403 peces, de los cuales 37 son elasmobranquios (Del Moral-Flores *et al.*, 2016, Robertson & Cramer, 2009; Fourrière *et al.*, 2016), siendo Carcharhinidae, la familia de condriictios la más representativa.

Las especies de condriictios más comunes son: el tiburón sedoso o piloto (*Carcharhinus falciformis*), el tiburón de puntas plateadas (*C. albimarginatus*), el tiburón Galápagos (*C. galapagensis*), el tiburón martillo común o cornuda barrosa (*Sphyrna lewini*), el tiburón puntas blancas de arrecife (*Triaenodon obesus*), la manta gigante (*Mobula birostris*), el tiburón tigre (*Galeocerdo cuvier*), el tiburón ballena (*Rhincodon typus*), el tiburón de puntas negras (*C. limbatus*) y el tiburón gambuso (*C. obscurus*) (Hoyos-Padilla & Ketchum *en prep.*).

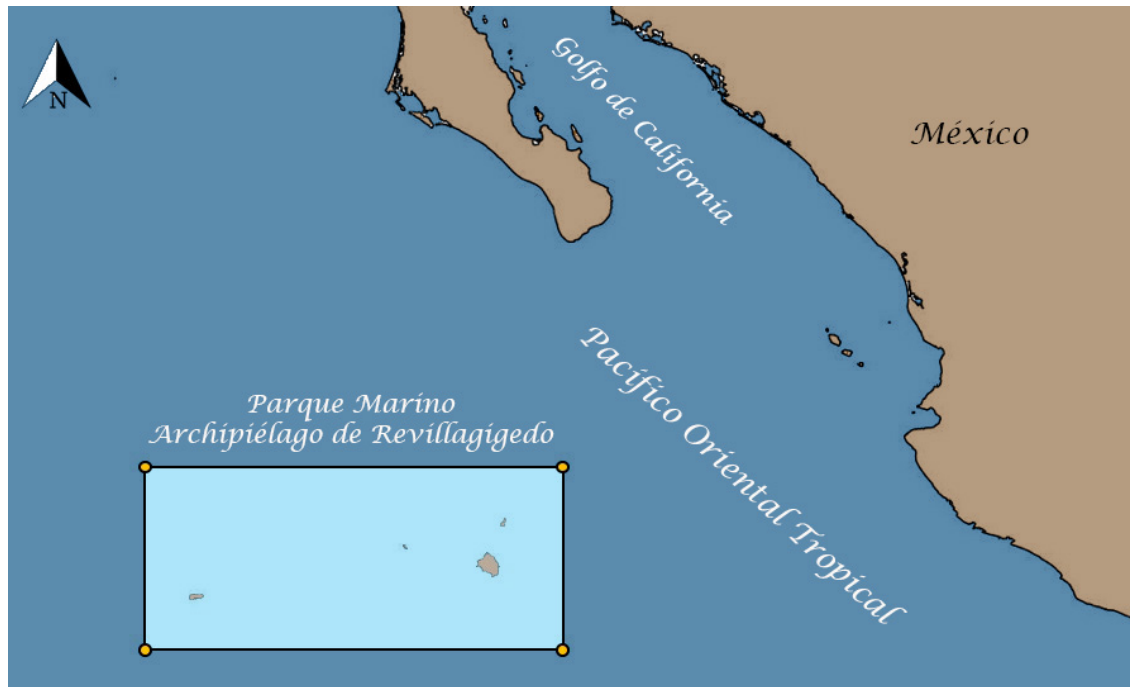
El aislamiento del AR permite el movimiento de especies pelágicas a lo largo de PET. Las islas funcionan como ejes de conectividad biológica y refugio para muchas especies vulnerables, amenazadas o en peligro crítico (Ketchum & Reyes Bonilla 2001; Carter *et al.*, 2019).

En las islas se realizan actividades turísticas de buceo recreativo y de ciencia ciudadana, donde diversos científicos y organizaciones como el caso de Pelagios Kakunjá A.C., colaboran con algunas embarcaciones para concientizar a la gente de la importancia de conservación de especies marinas y se les invita a participar de manera directa. El valor económico de las actividades de buceo recreativo con las mantas gigantes se ha estimado en \$14 millones de USD al año (Ruiz-Sakamoto, 2015).

Por otro lado, a pesar de que el AR es una reserva marina de no extracción, existe la problemática de la pesca industrial atunera ilegal que se aprovecha del escaso control de vigilancia por parte del sector naval alrededor de las islas para la extracción de recursos de manera ilegal (). Además, ingresan barcos pesqueros de mediana altura para extraer atún, tiburón y como pesca incidental, especies protegidas como tortugas marinas, delfines y mantas gigantes (Informe técnico, 2016).

Aunado a esto, embarcaciones de pesca deportiva provenientes de Estados Unidos y México, operan de manera clandestina dentro de la zona de no pesca del Parque, cuyo objetivo es la captura de atunes y wahoos.

**A)**



**B)**

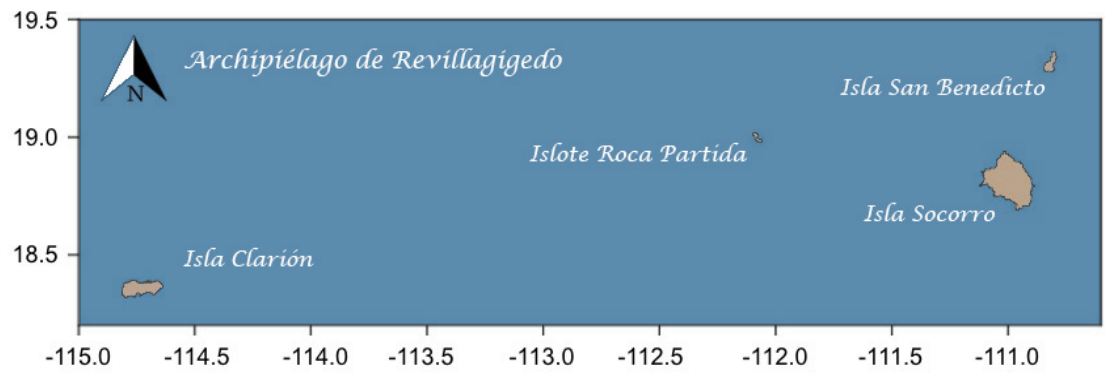


Figura 4. A) Ubicación geográfica del Parque Nacional Revillagigedo. El recuadro representa el polígono de protección actual de la reserva marina; B) Amplificación del Archipiélago de Revillagigedo.

### Isla San Benedicto

Se localiza en las coordenadas geográficas 19.340° a 19.290° de latitud norte y -110.820° a -110-780° de longitud oeste con una superficie de 5.53 km<sup>2</sup> (Fig. 5). Es la isla más cercana desde la costa Sur del Golfo de California y la más reciente de las cuatro, su última actividad volcánica fue en 1952 originando el volcán Bárcena en la zona central-sur, y otro cráter llamado Herrera en el centro (Richard, 1959), la porción insular se caracteriza por tener una costa dentada, constituida por la región tefra de materiales rocosos fragmentados de lava volcánica (Brattstrom, 1990).

### Isla Roca Partida

Roca Partida, es una porción de roca con una superficie de 0.0011 km<sup>2</sup> que emergió de un estratovolcán submarino, que ha dado lugar a traquiandesitas. Visualmente da la apariencia de dos montículos de roca divididos a la mitad. Se localiza en la parte central del AR (Fig. 6) (CONANP, 2017).

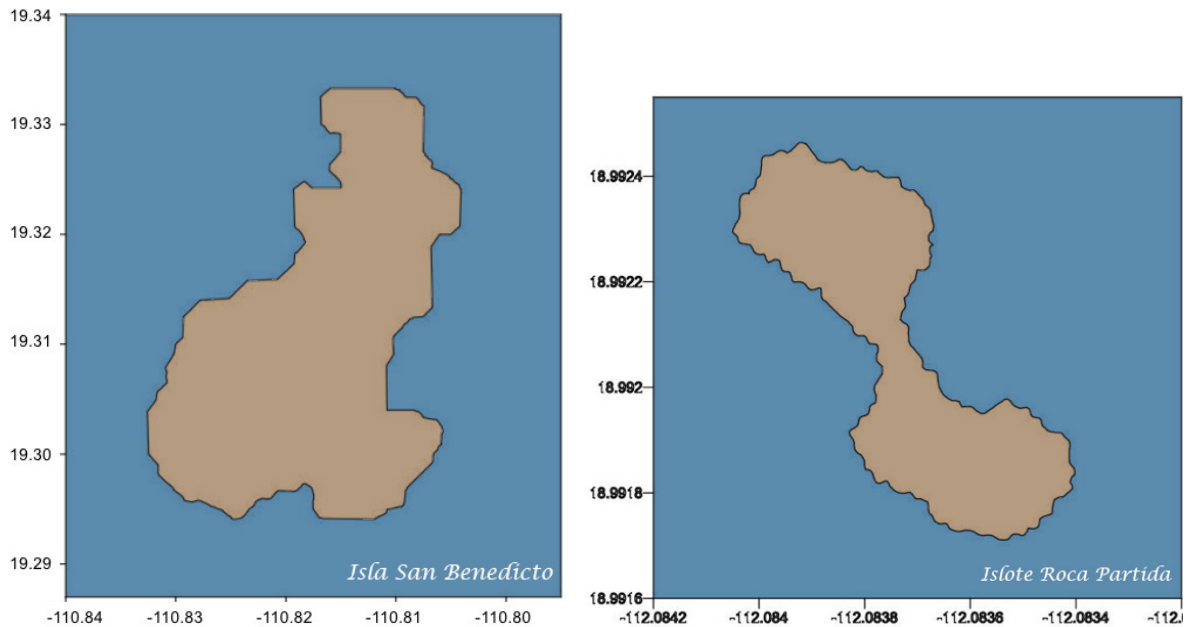


Figura 5-Figura 6. Ubicación geográfica de la Isla San Benedicto y el Islote Roca Partida.

## Isla Socorro

Es la isla más grande con una superficie de 130.39 km<sup>2</sup>, localizada entre las coordenadas 18.920° a 18.680° de latitud norte y -111.050 a -110.900 de longitud oeste (Castellanos & Ortega-Rubio, 1994) (Fig. 7). Se encuentra instalada una estación naval hacia el sureste de la isla. Es de origen volcánico sílico-peralcalina que le da una apariencia en forma de escudo, con una altura de 1,050 msnm. Tiene en su superficie el Volcán Evermann activo de una antigüedad de 400,000 años (Siebe *et al.*, 1995), alrededor del mismo hay 12 cráteres subsidiarios que forman terrazas escalonadas de piedra pómez y lapilli (Blásquez, 1960). La parte norte de la isla está conformada por flujos de lavas y rocas piroclásticas, mientras que la parte sur está formada por flujos de lava basáltica y conos de escoria (Castellanos & Ortega-Rubio, 1994).

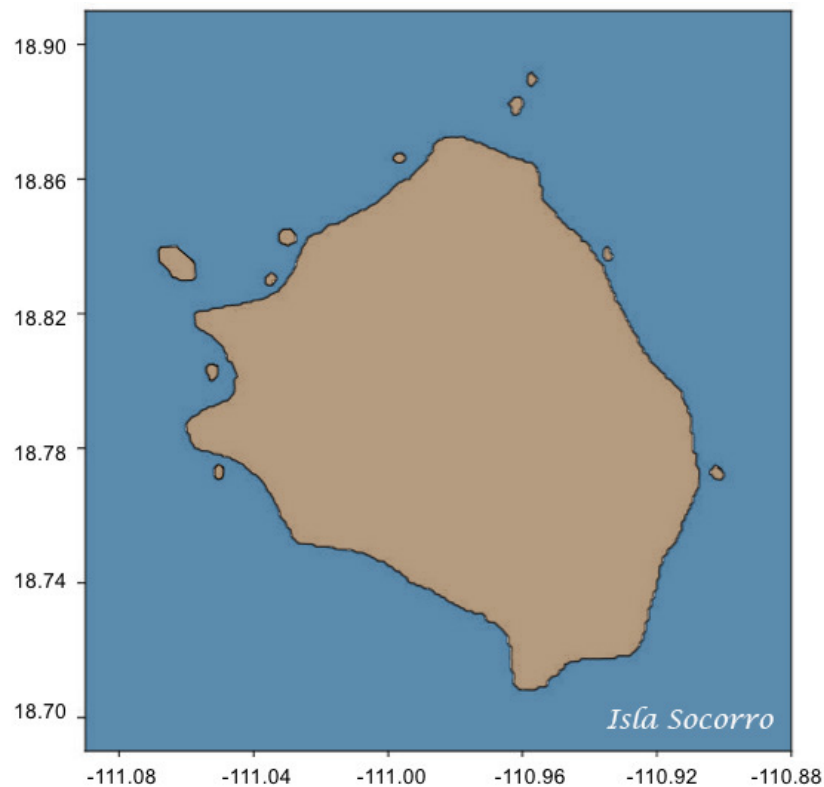


Figura 7. Ubicación geográfica de Isla Socorro

## Isla Clarión

Con una superficie de 19.25 km<sup>2</sup> es la más occidental, comprende la frontera de la zona económica exclusiva de México. Se localiza entre las coordenadas 18.390° a 18.340° de latitud norte y -114.780 y -114.680 de longitud oeste (Fig. 8). Tuvo su origen volcánico en el Mioceno y Eoceno tardío, cercano a ella se encuentra la zona de fractura de Clarión. Se caracteriza por presentar conjuntos montañosos alineados con fosas, las rocas volcánicas están formadas de basalto alcalino-traquita (Bryan, 1966).

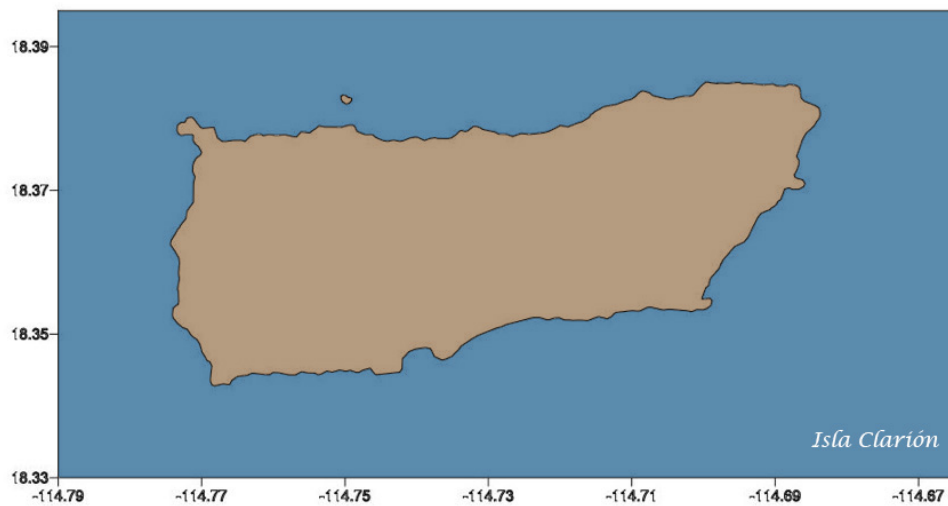


Figura 8. Ubicación geográfica de Isla Clarión.

## 7.1.2 Golfo de California

El Golfo de California (GC) es un mar largo y semicerrado que tiene una extensión de 1,100 km de longitud y 100-200 km de ancho, abarcando un área de 258,593 km<sup>2</sup> (Brusca *et al.*, 2005). De acuerdo con Walker (1960), existen tres subregiones biogeográficas en el GC: Golfo norte, Golfo central y Golfo sur), mismas que albergan más de 900 islas e islotes con una gran diversidad de hábitats (Fig. 9).

El presente estudio se enfocó en la región del centro al suroeste del GC. La subprovincia del Golfo central presenta una temperatura superficial del mar oscila entre los 16-29 °C. Presenta dos estaciones bien definidas, la cálida (de abril a noviembre) y

la fría (diciembre a mayo) (Robles & Marinonen, 1987). La geomorfología costera es variable, tipo rocoso con áreas de sedimentación y rocas ígneas, arenas finas y gruesas, grava gruesa, rocas lisas, parches de coral, macroalgas y humedales, propiciando una gran heterogeneidad en la composición del fondo (Dorsey & Umhoefer, 2000; Dorsey *et al.*, 2001).

El suroeste del Golfo de California se extiende de La Paz a Los Cabos, las mareas son mixtas semidiurnas e intervalos de temperaturas oscilan de 19-30 °C, la línea de costa es más pronunciada y el agua más clara que las regiones del alto y medio Golfo. Se caracteriza por tener una gran riqueza de peces de arrecife y corales rocosos (Thomson *et al.*, 2000). En esta región existen una mezcla de agua fría proveniente de la corriente de California con aguas cálidas de la corriente norecuatorial.



Figura 9. Ubicación geográfica del Golfo de California mostrando la regionalización biogeográfica.  
Poner regionalización

### **Isla Espiritu Santo**

La Isla Espiritu Santo se localiza en la Bahía La Paz a los 24.70 ° N y -110.7 ° W (Fig. 4). Es un área marina protegida que tiene una extensión de 486 km<sup>2</sup>. La Isla Espiritu Santo, tiene varias atracciones turísticas como es el avistamiento de lobos marinos, sitios de buceo, pesca deportiva y avistamiento de grandes cardúmenes de tiburón martillo.

### **El Bajo de Espiritu Santo**

El Bajo de Espiritu Santo (EBES) es una montaña submarina que se localiza a 18 km al noreste de la Isla Espiritu Santo (24. 71° N y -110.31 ° W), la cual se caracteriza por ser una zona altamente productiva, con una profundidad de 18 a 1000 m (Fig. 10).

EBES está rodeado por un canal profundo al oeste que alcanza los 1000 m de profundidad, mientras que las profundidades típicas en el alrededor de la montaña alcanzan los 400 m. EBES consiste en tres picos someros en direcciones noroeste-sureste entre 18 y 30 m de profundidad, ubicados a 50-100 m de distancia entre sí, con una profundidad similar de 30m entre cada pico. Su elevación desde el fondo oceánico excede los 890 m (Klimley & Nelson, 1984).

EBES es una zona productiva y de gran importancia biológica y económica debido a la gran diversidad de especies que utilizan esta zona como refugio y área de alimentación. Una evidencia de esto, entre otros aspectos es la gran cantidad de peces que se congregan en el área (Klimley & Butler, 1998; Muhlia-Melo *et al.*, 2003).



Figura 10. A) Sureste del GC donde se muestra la ubicación del AES.

## 7.2 TRABAJO DE CAMPO

### 7.2.1 Archipiélago de Revillagigedo

Se realizaron un total de 150 salidas para marcaje acústico externo y satelital de tiburones martillo e instalación, mantenimiento y recambio de receptores acústicos, las cuales fueron realizadas en las fechas programadas de los barcos ecoturísticos *Liveaboard* Quino El Guardián, Solmar V y Sharkwater durante el periodo 2009-2019 en los meses que está abierta la navegación (octubre-mayo) hacia el AR; el resto del año (junio-septiembre) fue temporada de huracanes.

#### Marcaje

En el AR, el marcaje se efectuó por buceo SCUBA y buceo libre con ayuda de buzos y apneístas profesionales. Los tiburones fueron marcados externamente con una vara hawaiana o arpón para pesca deportiva con punta modificada, en la que se coloca un filamento de plástico unido a un dardo de acero inoxidable, que es disparado junto con los transmisores, insertándolo en la base de la primera aleta dorsal (Ketchum *et al.*, 2014b). Previo al marcaje se registró información acerca de su talla, estadio de

madurez, sexo y marcas de apareamiento, condición e identificador del transmisor. Los tiburones fueron marcados en las Islas de San Benedicto y Roca Partida.

### **Telemetría acústica**

Los transmisores ultrasónicos (V16, VEMCO, 69 kHz de frecuencia, 16 mm de LT) emiten pulsos ultrasónicos con un código específico para cada individuo, los cuales son detectados por una red de receptores acústicos que almacenan la información de los tiburones marcados (Webber, 2009).

Desde el 2009, se instaló en el AR una red de 12 receptores acústicos pasivos (VR2W, VEMCO). Éstos se fijaron sobre el sustrato rocoso entre 20 a 40 m de profundidad. Se utilizó una cadena galvanizada recubierta con una manguera para evitar la corrosión, una cuerda de poliéster torcido, en donde se instaló el receptor y una boya rígida que permite su estabilidad en el mar. Los receptores fueron colocados en sitios cercanos donde la abundancia de tiburones martillo y otros peces pelágicos es evidente en los alrededores de las islas (Fig. 11).

Los receptores VR2W están diseñados para fijarse en el fondo para detectar y decodificar las señales de los transmisores acústicos por medio de un hidrófono. Pueden almacenar una gran cantidad de datos y la batería puede durar activa aproximadamente un año (Webber, 2009). Estos, registran la hora y fecha de detección, el tiburón marcado con un código individual.

El intervalo de detección fue estimado en dos sitios: 1) La Gaviota en la Bahía de La Paz y 2) Roca Partida en el AR. Los receptores fueron colocados a una profundidad de 25 m y se utilizaron dos transmisores acústicos V16, para simular el tiburón a distintas profundidades, atados a una lancha que se movió en línea rectas lejos del receptor y con ayuda de un hidrófono omnidireccional (VR100, Vemco), se pudo estimar un intervalo de detección de 450 m para la región de bahía La Paz y 600 m para el AR (Klimley, Ketchum & Lara, 2018).

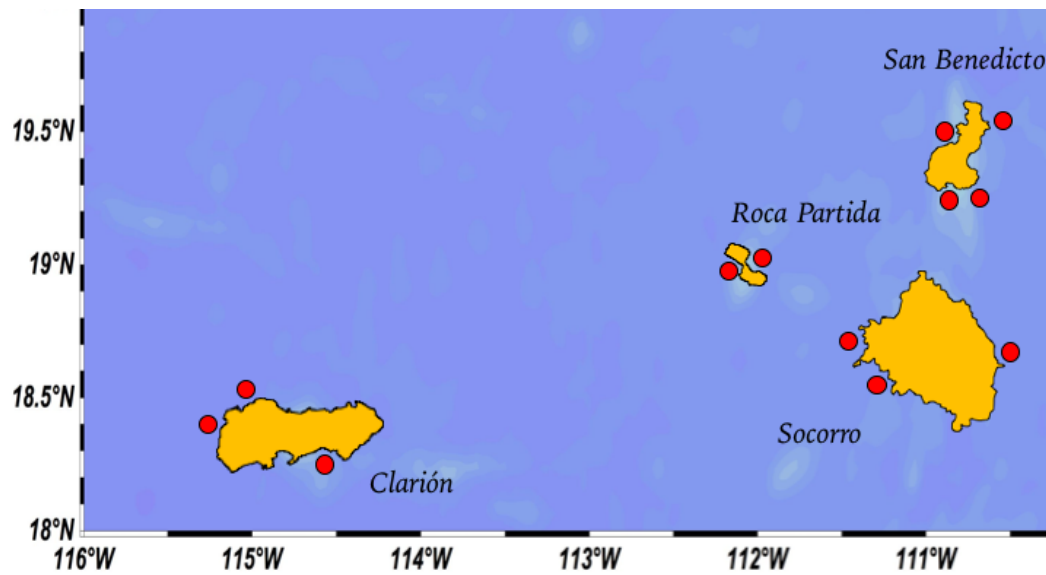


Figura 11. Ubicación geográfica de receptores acústicos VR2W instalados (puntos rojos) en el AR.

### Telemetría satelital

Se utilizaron dispositivos MiniPAT, Wildlife Computers (Fig. 12) que son marcas de archivo satelital emergentes utilizados para rastrear el comportamiento migratorio de animales marinos. Para colocar los transmisores satelitales (MiniPAT) en los tiburones martillo, se utilizó la misma técnica de marcaje externo con buceo libre mencionado para las marcas acústicas.

Los transmisores fueron programados para ser liberados después de seis meses. Estos tienen un mecanismo de corrosión en la correa que libera los transmisores en la fecha preprogramada. Las MiniPATs registran la ubicación del tiburón (latitud y longitud). Además, cuentan con sensores de presión (profundidad), temperatura del agua, niveles de luz cada cinco minutos. Con estos datos se reconstruyen las trayectorias más probables a través de geolocalización (Chapman *et al.*, 2015). El transmisor se libera en el tiempo programado, flota a la superficie del océano y transmite los datos resumidos por el sistema *Advanced Research and Global Observation Satellite* (ARGOS) (Ekstrom, 2004).

Los niveles de luz y temperatura del mar se archivan diariamente en la MiniPAT. La marca crea dos curvaturas de luz por día. Además, calcula diariamente la disminución de luz, para poder registrar la orientación vertical a través del tiempo utilizando un acelerómetro incorporado que detecta la actividad del animal (wildlifecomputers.com).

Una vez que es liberado el transmisor, entra a la fase Argos que permite rastrear la MiniPAT usando el efecto Doppler por medio del cambio en la frecuencia de ondas de sonido cada vez que pasa un satélite recogiendo los mensajes transmitidos, midiendo la frecuencia de señales recibidas. Esta información se transmite en los centros de procesamiento de Argos de estaciones terrestres y se calcula la ubicación con una precisión de ~150 m (www.argos-system.org).

### **7.2.2 Isla Espíritu Santo y El Bajo Espíritu Santo**

En la región del suroeste del AES, se realizaron un total de 55 salidas para marcaje con dispositivos telemétricos acústicos internos y satelitales y también para la instalación, mantenimiento y recambio de receptores durante 2016-2019. Las salidas fueron realizadas a bordo de embarcaciones pequeñas tipo panga de fibra de vidrio con motor fuera de borda de pescadores locales y pangas del CICIMAR y Pelagios Kakunjá.

#### **Marcaje**

Se realizaron salidas a partir de febrero a junio desde el 2016 a 2019 en diferentes sitios de la región sureste del GC 1) EBES, 2) Las Animas, 3) Bahía La Paz, 4) El Pardito, 5) Cabo Pulmo, y 6) Banco Gorda. La pesca se llevó a cabo en embarcaciones de fibra de vidrio tipo pangas con motor fuera de borda.

Los tipos de artes de pesca utilizado fueron: 1) línea de mano, utilizando azuelo tipo circular o garra de águila, con la barbilla aplanada para evitar desgarrar la mandíbula de los tiburones y facilitar su liberación; 2) Cimbra aboyada con 10-15

anzuelos tipo de garra de águila, con la barbilla aplanada y 3) Simpleras distribuidas con un solo anzuelo en cada una.

Se pescaron previamente carnadas en los sitios de captura con línea de mano y curricanes, las cuales fueron utilizadas como cebo para la captura y marcaje de los TMC. Las carnadas utilizadas fueron: el pez dorado (*Coryphaena hippurus*), el atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*), el calamar, la macarela salmón (*Elagatis bipinnulata*), el barrilete negro (*Euthynnus lineatus*), el barrilete listado (*Katsuwonus pelamis*), la cabrilla (*Epinephelus labriformis*), el bonito (*Sarda chiliensis*) y el wahoo (*Acanthocybium solandri*). Los lances de cimbra aboyada y simpleras se llevaron a cabo en el atardecer (~6:00 pm). Los anzuelos fueron revisados cada dos horas para la captura de tiburones y se repitió la técnica de 3 a 5 veces.

### **Telemetría acústica pasiva**

Una vez capturado, el tiburón, se colocó a un lado de la embarcación, volteándolo ventralmente con la ayuda del anzuelo y una soga atada a su cola. De esa manera entraban en estado de inmovilidad tónica. Se les tomaron medidas de longitud total (LT), furcal, caudal y ancho de troncho, registrando también, el estado de madurez, sexo y la condición del animal. Se le realizó una incisión entre las aletas pectorales dentro del peritoneo para colocar los transmisores acústicos V16 en la cavidad corporal. Posteriormente, se suturó la herida con tres puntos, finalmente el tiburón fue liberado.

### **Telemetría Satelital**

Para colocar los transmisores satelitales (MiniPAT), los tiburones martillo fueron capturados con el apoyo de pescadores artesanales. Se les inmovilizó para registrar las medidas previamente mencionadas. Se insertó el transmisor satelital MiniPAT de manera externa con un aplicador especial en la base de la aleta dorsal del lado izquierdo.

Para la manipulación de tiburones se siguieron los procedimientos éticos y de marcaje avalados por el Comité de Uso y Cuidado Animal Institucional (IACUC) de la Universidad de California Davis basado en el Protocolo número 16022.

### 7.3 ANÁLISIS DE DATOS

Se descargaron los datos de los receptores acústicos VR2W por medio del software VUE (VEMCO) desarrollado para recuperar, visualizar y analizar datos de detecciones acústicas de múltiples receptores. La información obtenida de las detecciones acústicas a través de tiempo permitió tener una cronología de detecciones de cada tiburón marcado. Con esto se estimó el índice de residencia por sexo para cada uno de los sitios y archipiélago (AR y AES). Para ello, se generó una matriz de datos organizada por fecha y horas de detecciones acústicas en cada sitio y para cada individuo marcado durante los años 2009-2019.

La proporción sexual (1:1) se estimó mediante un análisis de  $X^2$  considerando el número de individuos entre hembras y machos de cada especie. Si la proporción es 1:1 es una población balanceada.

$$x^2 = \sum \left( \frac{(o - e)^2}{e} \right)$$

Donde:

$o$ = Individuos observados

$e$ = Individuos esperados

#### **Movimientos diurnos y nocturnos**

Se generaron gráficos circulares para representar el patrón diario de movimientos entre el fotoperiodo y se compararon las detecciones a nivel: espacial (islas y sitios), entre sexos, por individuos para los dos archipiélagos. Para determinar los horarios de la fase diurna y nocturna, se consideraron las horas promedio de

fotoperiodo (07:00–19:00 h) y las horas promedio nictimerales (19:00- 07:00 h) en el AR según [www.seatemperature.info/revillagigedo-islands-sunrise-sunset.html](http://www.seatemperature.info/revillagigedo-islands-sunrise-sunset.html). Para el AES, se consideró la fase diurna (06:00–19:00 h) y la fase nocturna (19:00–06:00 h) con base en [www.timeanddate.com/sun/mexico/la-paz](http://www.timeanddate.com/sun/mexico/la-paz).

Posteriormente, se utilizó la prueba de espacio de Rao para determinar si la distribución de tiburones en un sitio particular fue uniforme a lo largo del día (Batschelet, 1981; Lund & Agostinelli, 2007). Se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$U = 1/2 \sum_{i=1}^n T_i - (360^\circ/n)$$

$U$ = Valor crítico calculado a partir de las longitudes de los arcos entre cada punto (T) y se comparó con una distribución azarosa (donde cada arco debe de ser de  $360^\circ/n$ ).

### **Movimientos a mediana escala**

Se utilizó la información obtenida de marcaje-recaptura, a través de las marcas de espagueti. Todas las recapturas fueron realizadas por pescadores, quienes reportaban las marcas y proporcionaban información relacionada a su captura: código individual del tiburón, fecha de recaptura, sexo, LT y ubicación geográfica. Las distancias en línea recta desde el sitio de marcaje al sitio de recaptura se calcularon midiendo la distancia en km del punto A de marcaje al punto B de recaptura con el programa QGIS Essen, ver. 2.14.3. Se calculó el tiempo en días julianos entre la fecha de liberación del tiburón marcado y la fecha de su recaptura.

### **Movimientos horizontales**

Los movimientos horizontales fueron estimados utilizando las posiciones geográficas procesadas y calculadas por ARGOS, Con estos datos fue posible reconstruir las trayectorias más probables de los tiburones martillo marcados en ambos archipiélagos. Para mejorar la precisión de la geolocalización y corregir el error

espacial, se aplicó el método de filtro de Kalman (Royer & Lutcavage, 2009) y una estimación de probabilidad de máxima verosimilitud.

Una vez que se obtuvieron las trayectorias recorridas por los tiburones, se realizaron mapas de su trayectoria diferenciada por meses y se estimó la distancia total recorrida con el programa QGIS, ver. 2.14.3.

### **Áreas de distribución utilizada**

La actividad espacial se analizó con base en las distribuciones utilizadas (UD), que consiste en una función bivalente (latitud y longitud) dada la densidad de probabilidad de que un organismo sea encontrado en cierta área con base en sus coordenadas geográficas (Benhamou & Cornélis, 2010).

Este modelo define la distribución de hábitat como el área mínima en que un animal tiene cierta probabilidad de ser localizado (Worton, 1995) y se calculó con los siguientes parámetros y se utilizando la función KernelUD del paquete adehabitatHR en el programa R Ver. 1.1.447.

$$h = \text{Sigma} * n^{(-1/6)}$$

Donde:

$$\text{Sigma}^2 = 0.5 * (\text{var}(x) + \text{var}(y))$$

Las probabilidades del rango de distribución Kernel (KHR) fueron calculadas por medio, que es un método robusto y flexible para estimar y comparar la extensión de áreas de distribución utilizadas por diferentes individuos e intervalos de frecuencia con el mínimo cuadrado de validación cruzada, LSCV y minimizar el error integrado (Silverman, 1986; Hooge *et al.*, 2001; Ketchum *et al.*, 2014a).

Además, se calculó el estimador de densidad Kernel (KDE) para evaluar el espacio utilizado por los tiburones martillo como un índice de probabilidad relativa de

50% y 95%. El KDE demuestra la probabilidad relativa de la presencia de cada tiburón en un área en particular, en este caso se aplicó en ambos archipiélagos (AR y AES).

### **Movimientos verticales**

Se realizaron gráficos de profundidad, respecto al tiempo transcurrido que el tiburón estuvo marcado, incorporando la variable de temperatura a la profundidad en la que se localizaban los organismos. Posteriormente, se realizaron conteos para estimar el porcentaje en intervalos de 30 m de profundidad cada. Se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, y posteriormente, al comprobar que los datos no fueron normales se realizó la prueba de Wilcox no paramétrica para determinar diferencias significativas en temperatura y profundidad entre los datos del fotoperíodo (día: 06:00 a 19:00; noche: 19:00 a 06:00). Para probar diferencias significativas entre los intervalos de profundidad, se aplicó un Kruskal-Wallis con Duun-test *post-hoc* ( $\alpha = 0.05$ ) utilizando el software R Ver. 1.1.447.

### **Índice de Residencia**

El índice de residencia (IR) permitió conocer la preferencia y tiempo de permanencia de los tiburones en ciertas áreas. El IR fue calculado para cada TMC marcado, dividiendo el número de días en que un tiburón fue detectado entre el número de días transcurrido desde la fecha de marcaje hasta la última detección registrada por los individuos. Un valor de 1 significa que el tiburón estuvo siempre presente, un cambio 0 nos indica periodos de ausencia desde cada sitio de estudio (Espinoza *et al.*, 2015). Se calculó usando la siguiente fórmula:

$$Res_i = \frac{Dd}{Dm}$$

$Res_i$  = Índice de residencia

$Dd$  = Número de días detectados por individuo y sitio

$Dm$  = Número de días día que transcurridos desde la fecha de la captura de individuo  $i$  hasta la última fecha de detección del periodo de estudio.

Posteriormente, se analizaron los datos para comprobar si cumplen con los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Al comprobar que los datos no se comportaron de manera normal, se procedió a aplicar la prueba de Kruskal-Wallis (K-W) de una vía para analizar diferencias significativas en la varianza de la residencia de los sitios e individuos. Se aplicó la prueba *a posteriori* de Tukey para llevar a cabo grupos aislados o que difieren de los otros. Para todas las métricas se calculó el promedio y la desviación estándar ( $\pm$ DS).

### **Variables ambientales**

Los datos (promedios mensuales) valores de las temperaturas superficiales del mar (TSM) y clorofila fueron obtenidos del sitio web de la NOAA (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html>). La TSM fue obtenida con el sensor MODIS a bordo del satélite Aqua (NPP, 0.0125°, West US, Day time 11 microns, 2002-present Monthly Composite, Lon+/-180), al igual que los datos de concentración de clorofila de Aqua MODIS (NPP, 0.025 degrees, Pacific Ocean, 2006-present, Experimental Monthly Composite, Lon+/-180).

Los datos de temperatura potencial del mar, los componentes zonal y meridional de la corriente geostrofica, profundidad de la capa de mezcla, la salinidad y la altura de la superficie del mar, fueron obtenidos del sitio web del Servicio marino de la Unión Europea Copernicus, seleccionando la opción de los productos GLOBAL de Análisis Físico y Previsión del Mar Océano (<http://marine.copernicus.eu>). Estos datos con resolución espacial de 0.083 grados fueron descargados de acuerdo con el periodo en que se registraron las trayectorias migratorias de los TMC marcados con MiniPAT para la isla de Roca Partida y San Benedicto en el AR y para el AES al sureste del GC.

### **Modelo Aditivo Generalizado (GAM)**

Se aplicó un modelo aditivo generalizado (GAM) para examinar los predictores ambientales de los datos de movimiento migratorio de tiburones marcados con las marcas satelitales tipo MiniPAT. Utilizamos las variables ambientales obtenidas de

Marine Copernicus. Este modelo se construyó aplicando una familia de distribución Gamma y Gaussiana y un enlace de identidad utilizando el paquete mgcv en el lenguaje de programación R (Wood, 2017). El modelo se ejecutó este modelo con diferentes predictores, seleccionando el mejor modelo en función de la cantidad de desviación explicada y el Criterio de Información de Akaike (AIC) más pequeño. Se probó el ajuste del modelo con el análisis de desviación (Zuur *et al.*, 2009).

## 8. RESULTADOS

### 8.1 Capturas y marcaje general

Se capturaron y marcaron a un total de 57 TMC *S. lewini* subadultos y adultos. De los cuales a 31 tiburones se les colocaron marcas convencionales todos ellos capturados en el AES. Mientras que a 53, se les colocaron transmisores acústicos tipo V13 y V16 y a cinco se les marcó con transmisores satelitales tipo MiniPAT, dos en el AR y tres en el AES (Anexo 1).

En el AR, se marcaron 25 *S. lewini*, de los cuales 18 fueron hembras, 5 machos y 2 indeterminados obteniendo una proporción por sexos sesgada hacia las hembras (H: M= 1.44: 0.40), el análisis  $\chi^2$  mostró que el número de hembras por cada macho difirió significativamente de una proporción sesgada hacia las hembras 1:1 ( $\chi^2 = 3.456$ ,  $P > 0.05$ ). Presentaron un intervalo de tallas de 140-300 cm de LT y una media de 216.8 cm LT  $\pm$  52.26 (Fig. 12, Anexo 1).

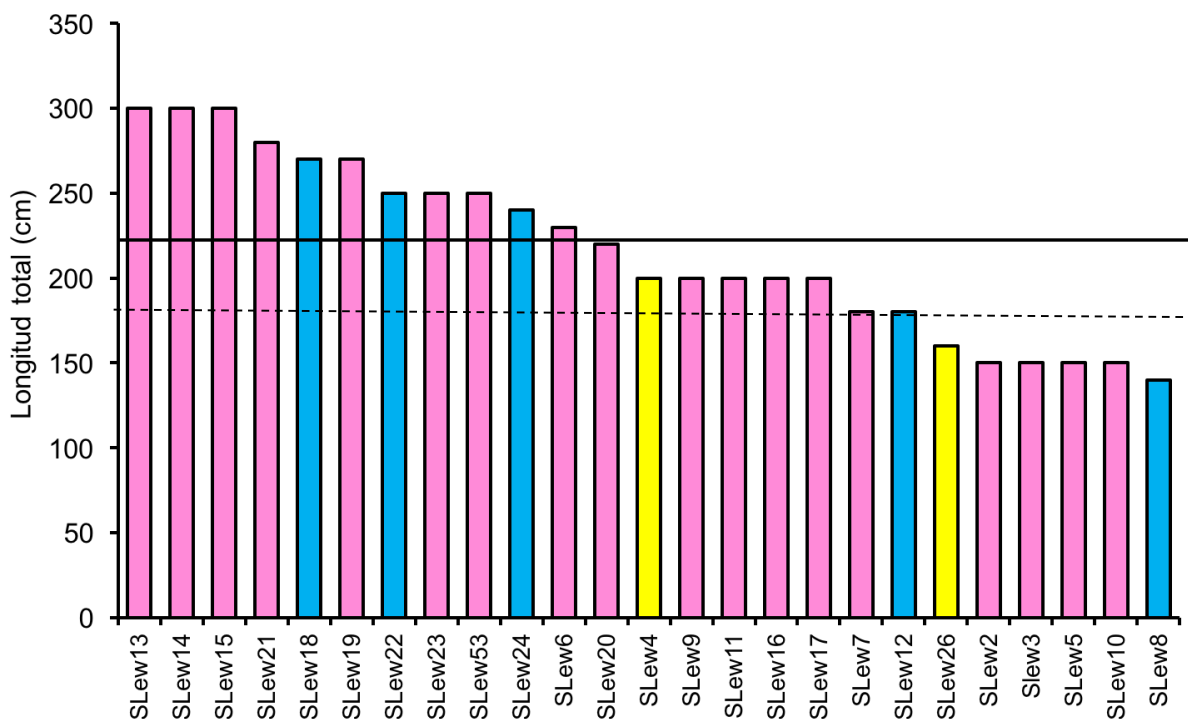


Figura 12. Longitud total de los tiburones martillo *S. lewini* capturados y marcados durante el 2008-2019 en el AR. La línea sólida y punteada representan las tallas de primera madurez en hembras  $L_m=225$  cm, y en machos  $L_m=180$  cm, respectivamente. En colores se representan el sexo de los TMC. Macho=Azul, hembras= rosa e indeterminados= amarillo.

En el AES, se marcaron 28 *S. lewini*, siendo 13 hembras y 15 machos obteniendo una proporción por sexos (H: M= 0.93: 1.07), el análisis  $\chi^2$  mostró que el número de hembras por cada macho no difirió significativamente de una proporción balanceada 1:1 ( $\chi^2 = 3.456$ ,  $P < 0.05$ ). Presentaron un intervalo de tallas de 107-250 cm de LT y una media de 150.19 cm LT  $\pm$  26.36. (Fig. 13, Anexo 1).

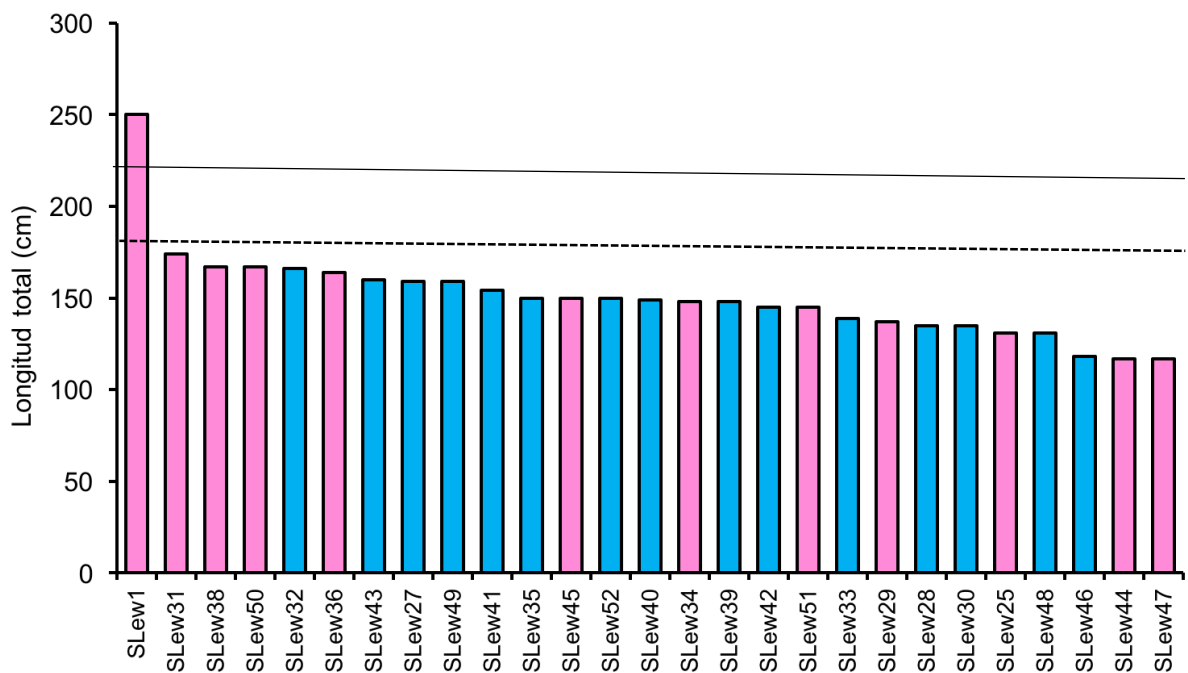


Figura 13. Longitud total de los tiburones martillo *S. lewini* capturados y marcados durante el 2008-2019 en el AR. La línea sólida y punteada representan las tallas de primera madurez en hembras  $L_m=225$  cm, y en machos  $L_m=180$  cm, respectivamente. En colores se representan el sexo de los TMC. Macho=Azul y hembras= rosa.

## 8.2 Detecciones ultrasónicas y estacionalidad en el AR

En el AR, se registraron 65,179 transmisiones ultrasónicas codificadas, provenientes de 17 tiburones martillo común adultos marcados con transmisores acústicos (14 hembras, dos machos y uno indeterminado). Las detecciones se registraron en los cuatro receptores instalado en la Isla San Benedicto: Boiler, Cañón, Dedos de Lava y Cuevitas, así como; en ambos receptores del Islote Roca Partida (Cuadro 1).

Cuadro 1. Detecciones acústicas y datos biológicos de 17 tiburones martillo común adultos marcados en el AR. LT: longitud total, reportada en centímetros. H= Hembras, M= Machos, I= Indeterminado. SB: San Benedicto y RP: Roca Partida.

Nombre	ID Acústico	Sexo	LT (cm)	Marcaje	Detecciones	Fecha inicial	Fecha final	Días detectados	Días monitoreados	Sitio de detección
SLew3	53200	H	150	03-ago-08	6	13-ago-11	07-dic-12	6	1587	RP
SLew5	53195	H	150	04-nov-08	1653	11-may-09	11-nov-09	40	1494	RP
SLew9	59069	H	200	29-nov-09	23	05-may-09	06-may-09	1	1104	SB, RP
SLew10	59070	H	150	02-dic-09	1729	02-dic-09	08-ene-10	39	1101	RP
SLew11	59072	H	200	03-dic-09	3413	02-dic-09	28-dic-09	27	1100	RP
SLew13	27633	H	300	07-ene-13	797	09-ene-13	05-feb-13	20	804	SB
SLew14	27578	H	300	08-ene-13	3690	08-ene-13	27-abr-13	68	803	SB
SLew15	27635	H	300	09-ene-13	4612	04-ene-13	25-mar-14	198	802	SB
SLew16	27634	H	200	10-ene-13	3638	09-ene-13	19-feb-13	19	801	SB
SLew17	27636	H	200	10-ene-13	797	08-ene-13	02-ene-14	178	801	SB
SLew18	27637	M	270	11-ene-13	2475	10-ene-13	25-ene-13	13	800	SB
SLew19	27638	H	270	11-ene-13	413	11-ene-13	15-may-13	86	800	SB
SLew20	27639	H	220	12-ene-13	23957	11-ene-13	22-abr-15	393	799	SB
SLew21	27640	H	280	12-ene-13	14136	12-ene-13	23-sep-14	491	800	SB
SLew22	27641	M	250	12-ene-13	368	12-ene-13	24-ene-13	12	799	SB
SLew23	5388	H	250	08-mar-13	3172	08-mar-13	03-nov-13	72	744	SB
SLew26	14663	I	160	20-feb-18	300	20-feb-18	15-abr-18	50	54	RP

El mayor número de detecciones registradas fueron las de una hembra de 220 cm LT (SLew20) con un total de 23,957 detecciones en 393 días, que representan el 36.7% de las detecciones totales, seguido de otra hembra de 280 cm LT (SLew 21) con 14,136 en 491 días equivalentes a 21.6%. El menor número de detecciones lo presentaron las hembras SLew9 y SLew3 con 23 y seis detecciones, respectivamente (Fig. 14).

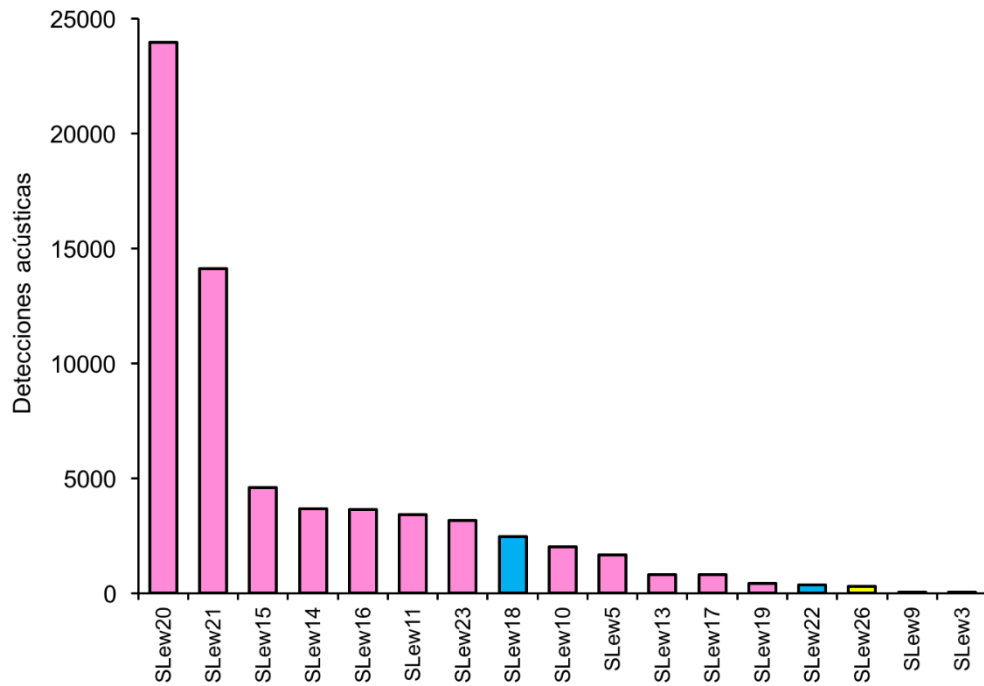


Figura 14. Número total de detecciones acústicas registradas para cada tiburón martillo marcado en el AR. El color rosa, representa a las hembras (n=14), el azul a los machos (n=2) y el amarillo sexo indeterminado (n=1).

En relación con las detecciones acústicas obtenidas por receptor en AR, se observó que los sitios con mayor número de detecciones fueron: Cañón con 42,066, provenientes de 11 TMC marcados, seguido de Dedos de Lava con 12,926 derivados de 5 TMC marcados en la Isla San Benedicto y 6,983 detecciones registradas en Roca Partida oeste de otros cinco individuos marcados (Fig. 15).

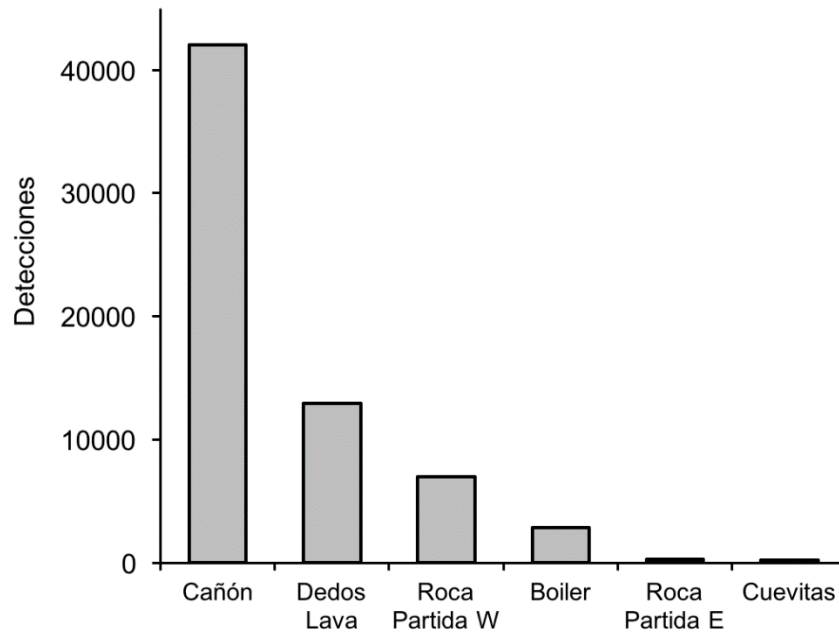


Figura 15. Número de detecciones acústicas registradas por sitios en las islas del AR.

### 8.3 Detecciones ultrasónicas y estacionalidad en el AES

En el AES se registraron 8,670 transmisiones ultrasónicas codificadas, provenientes de 16 TMC (seis hembras y diez machos). Todas ellas se registraron en el EBES (Cuadro 2). El tiburón macho subadulto SLew39, obtuvo el mayor número de detecciones con un total de 2,483 en 29 días, equivalente al 28.5% del total de detecciones en el AES, seguido de la hembra adulta SLew31 con 1,703 en 36 días, con el 19.6%. El menor número de detecciones lo presentaron los tiburones SLew 37 y SLew49 con solo una detección (Fig. 16).

Cuadro 2. Detecciones acústicas y datos biológicos de 16 *S.lewini* adultos marcados en el AES.

LT: longitud total, reportada en centímetros. H= Hembras, M= Machos.

Nombre	ID Acústico	Sexo	LT (cm)	Marcaje	Detecciones	Fecha inicial	Fecha final	Días detectados	Días monitoreados	Sitio de detección
SLew29	13141	H	137	02-mar-19	4	03-mar-19	03-mar-19	1	186	EBES
SLew30	53651	M	135	02-mar-19	69	03-mar-19	12-mar-19	9	186	EBES
SLew31	9011	H	174	04-mar-19	1703	08-mar-19	08-may-19	36	184	EBES
SLew32	9012	M	166	04-mar-19	248	05-mar-19	16-abr-19	20	184	EBES
SLew33	9015	M	139	04-mar-19	10	05-mar-19	06-mar-19	2	184	EBES
SLew34	9017	H	148	04-mar-19	74	05-mar-19	09-abr-19	16	184	EBES
SLew35	18711	M	150	05-mar-19	97	07-mar-19	20-mar-19	9	183	EBES
SLew36	18712	H	164	05-mar-19	1040	07-mar-19	21-abr-19	19	183	EBES
SLew37	53640	H	107	05-mar-19	1	06-mar-19	06-mar-19	1	183	EBES
SLew39	9010	M	148	03-mar-19	2483	06-mar-19	08-mar-19	29	185	EBES
SLewi41	14648	M	154	06-mar-19	1528	11-mar-19	08-mar-19	22	182	EBES
SLew42	53652	M	145	06-mar-19	317	10-ene-19	26-mar-19	16	182	EBES
SLew43	7426	M	160	19-mar-19	836	20-mar-19	22-abr-19	22	169	EBES
SLew44	9018	H	117	19-mar-19	82	20-mar-19	26-mar-19	6	169	EBES
SLew48	7435	M	131	20-mar-19	174	21-mar-19	05-abr-19	16	168	EBES
SLew49	7421	M	159	24-abr-19	1	25-abr-19	25-abr-19	1	133	EBES

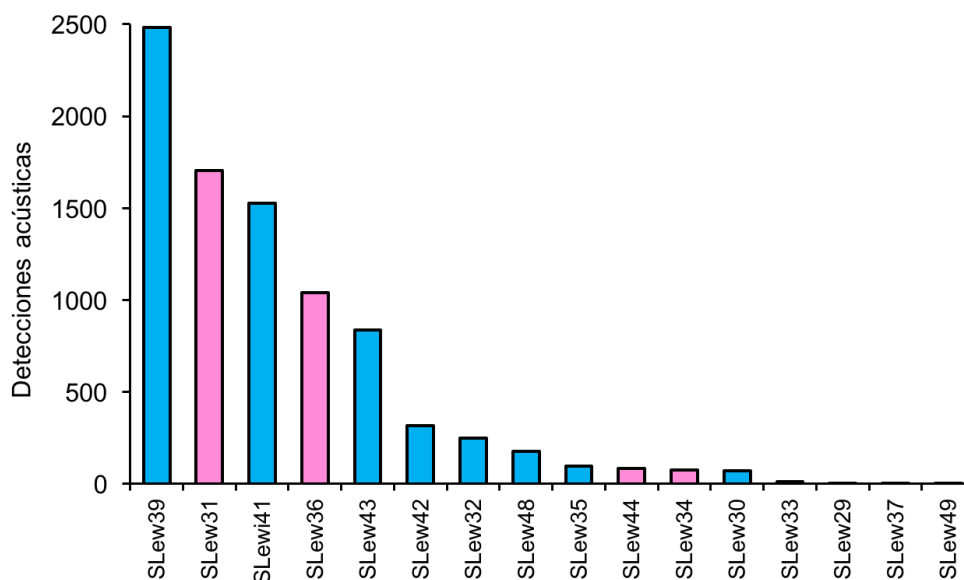


Figura 16. Número total de detecciones acústicas registradas para cada tiburón martillo marcado en el AES. El color rosa, representa a las hembras (n=8) y el azul a los machos (n=10).

#### 8.4 Movimientos diarios de *Sphyrna lewini* en el AR

En general los 17 TMC presentaron un patrón diario registrando más detecciones durante la fase diurna (07-19 h), que en la fase nocturna (19-07 h). El diagrama circular, muestra las horas del día en un ciclo de 24 horas, demostrando que durante la fase

diurna (06-19 h) el número de detecciones fue significativamente mayor respecto a la fase nocturna (18-05 h). Según la prueba de espacio de Rao ( $p < 0.01$ ) muestra que los datos no se distribuyeron de manera uniforme a lo largo del día (Fig. 17).

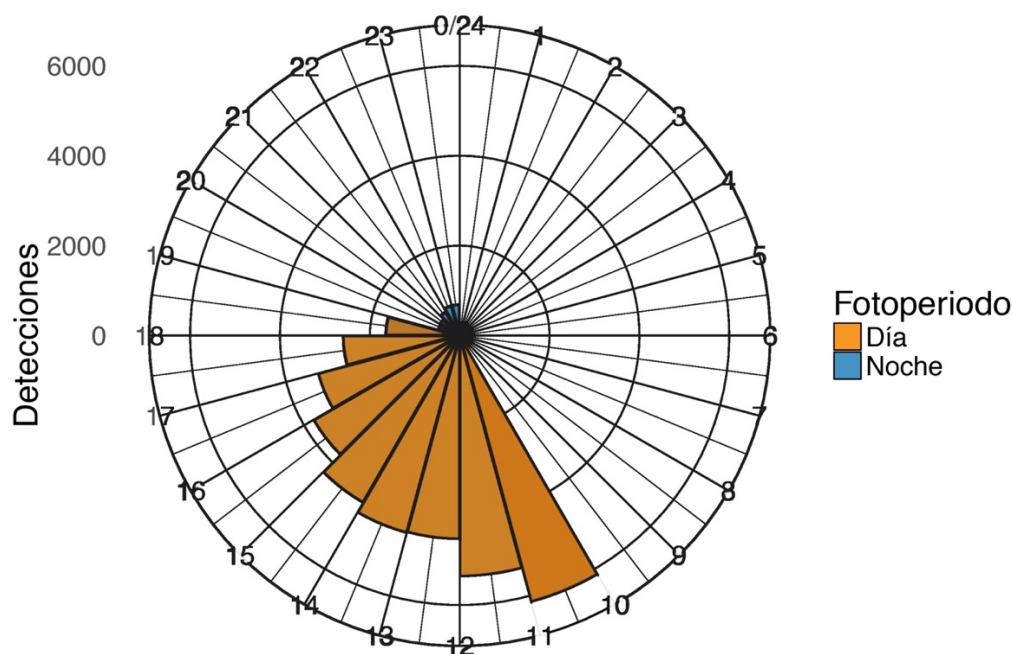


Figura 17. Número de detecciones diarias divididas por hora de 17 *S. lewini* en el AR, registradas desde 2008-2019. Los círculos indican el intervalo de detecciones por horas. En color naranja se representa la fase diurna (07-19 h) y en azul la fase nocturna (19-07 h).

El patrón de movimientos diarios de hembras y machos es muy similar, detectándose en las islas de AR, principalmente en el horario diurno de 10–18 h. En ambos casos, la uniformidad es significativa ( $p < 0.001$ ) de acuerdo con la prueba de espacio de Rao. Esto significa que las detecciones durante el día no son aleatorias y que algunas horas son más importantes que otras (Fig. 18).

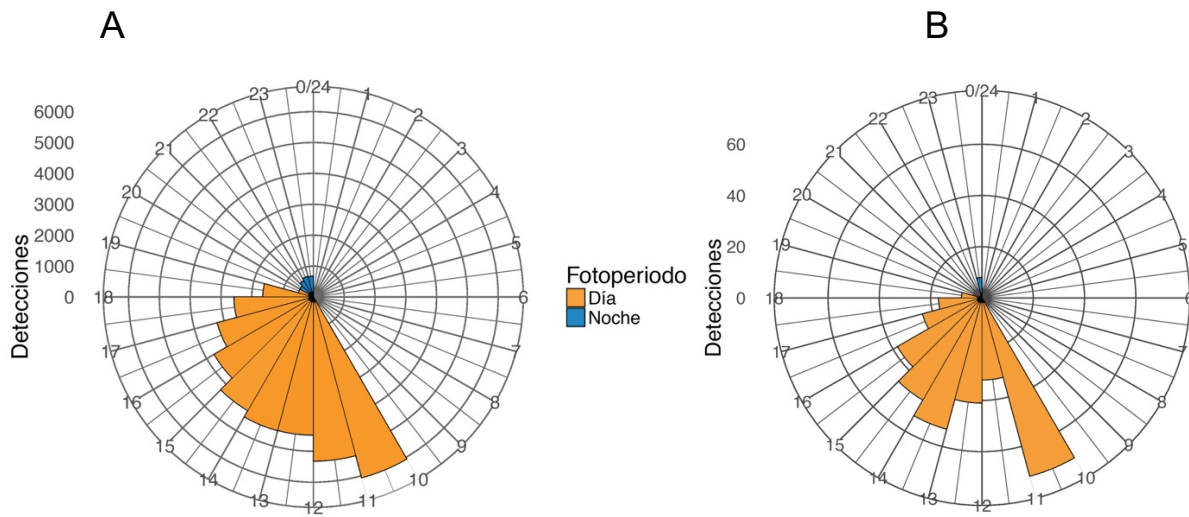
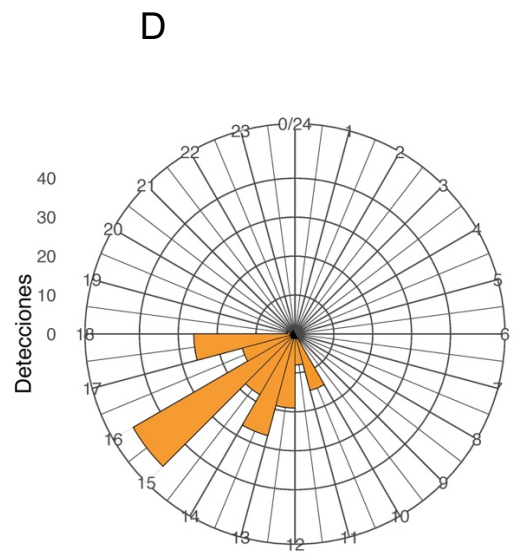
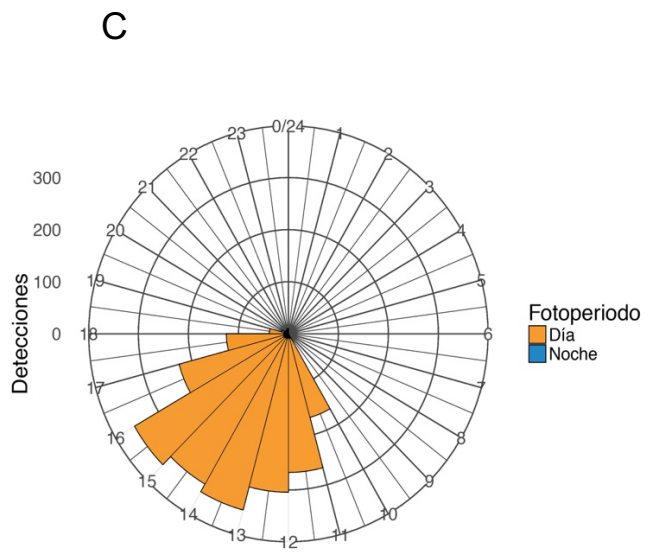
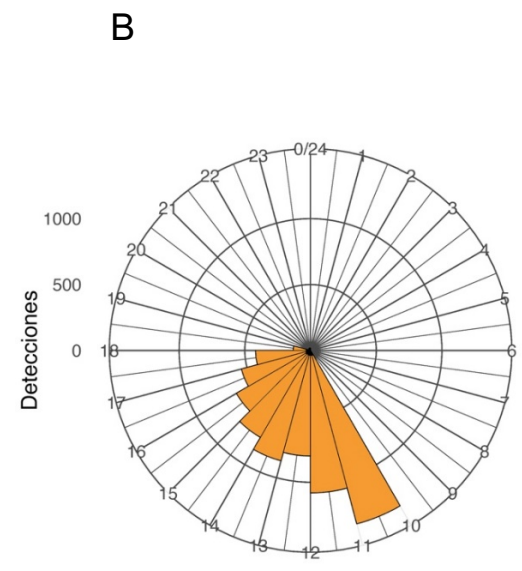
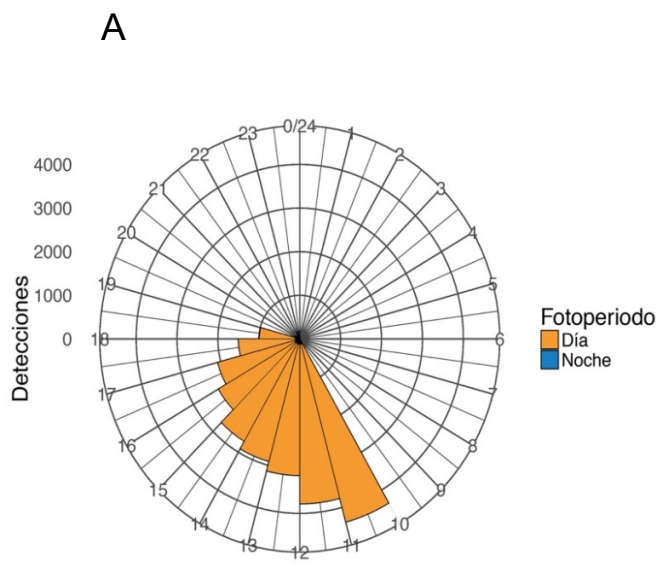


Figura 18. Número de detecciones diarias divididas por hora de *S. lewini* por sexo. A) Hembras y B) Machos. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes para cada sexo. En color naranja se representa la fase diurna (07-19 h) y en azul la fase nocturna (19-07 h).

Los tiburones martillo pasaron la mayor parte de la fase diurna dentro del intervalo de detección de los receptores. Se observó un mayor número de detecciones durante la mañana de (06–12 h), en Cañón y Dedos de lava, y durante la tarde (12–18 h), en Boiler y Cuevitas. En general, se observó una disminución significativa en el número de detecciones registradas por los cuatro receptores localizados en San Benedicto durante la fase nocturna de acuerdo con la prueba de espacio de Rao  $p < 0.01$  (Fig. 20-A-D).

En los receptores localizados en Roca Partida, el patrón de movimientos diarios no fue tan evidente como en la Isla San Benedicto. También se observó un mayor número de detecciones durante la fase diurna, en particular durante el lapso de las 13–18 h en la parte oeste de Roca Partida y de 11-14 h hacia el este de Roca Partida, pero a diferencia de San Benedicto las detecciones se registraron durante una parte de la fase nocturna (20–00 h), siendo mayores en el lapso de (21–00 h) que en la fase diurna para ambos sitios (Fig. 19 E, F).



**E**

**F**

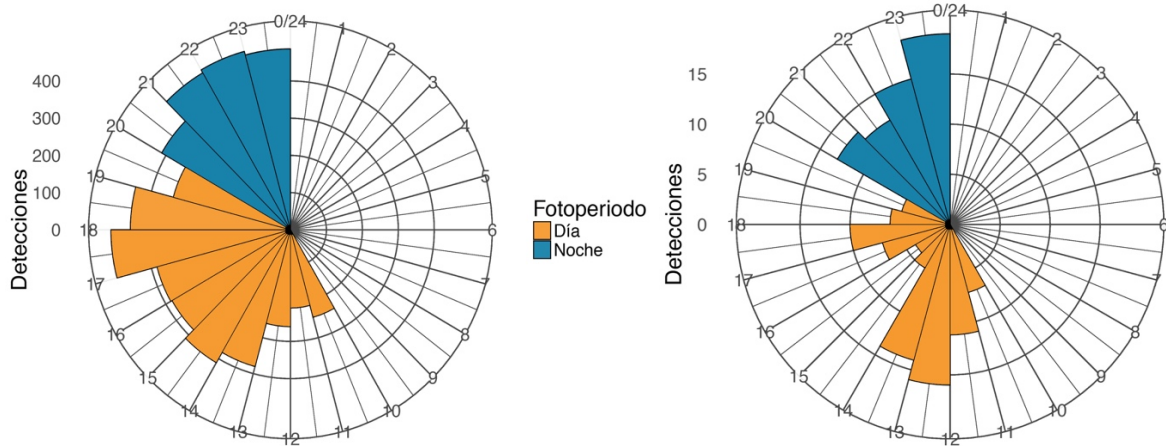
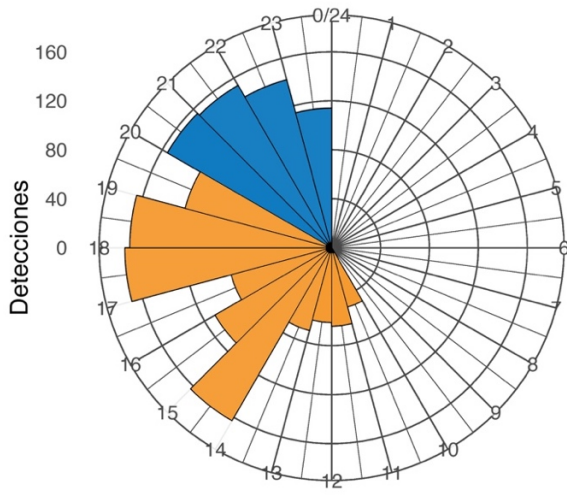


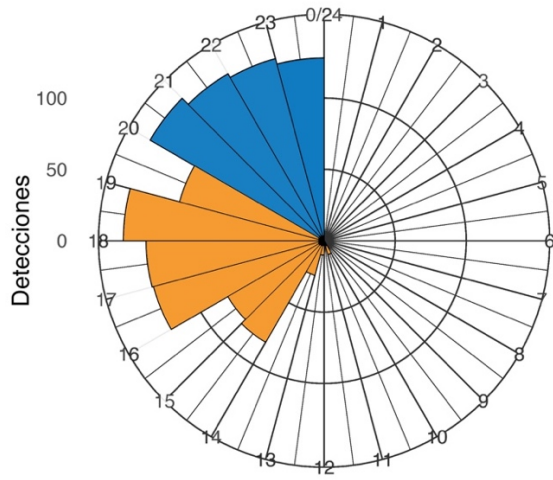
Figura 19. Número de detecciones diarias divididas por hora de *S. lewini* registradas por sitios. A) Cañón, B) Dedos de lava, C) Boiler, D) Cuevitas, E) Roca Partida Oeste, F) Roca Partida Este. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes a la escala de cada sitio. En color naranja se representa la fase diurna (07-19 h) y en azul la fase nocturna (19-7 h).

A nivel individual, los tiburones martillo en el AR, presentaron un patrón de movimientos claramente definido. En su mayoría tienden a permanecer durante la fase diurna alrededor de las islas. La mayoría de las detecciones se registraron a partir de las 10-19 h. Sin embargo, algunos individuos (SLew5, SLew10, SLew11 y SLew26) fueron detectados todos ellos en el Islote Roca Partida siguen detectándose en los receptores hasta las 00:00 h, moviéndose posteriormente se mueven fuera del intervalo de detección (Fig. 20).

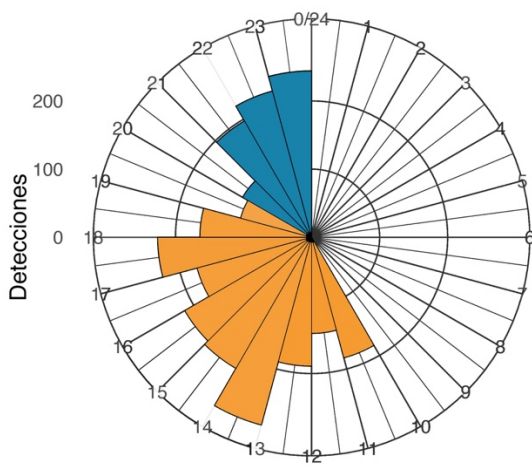
SLew5



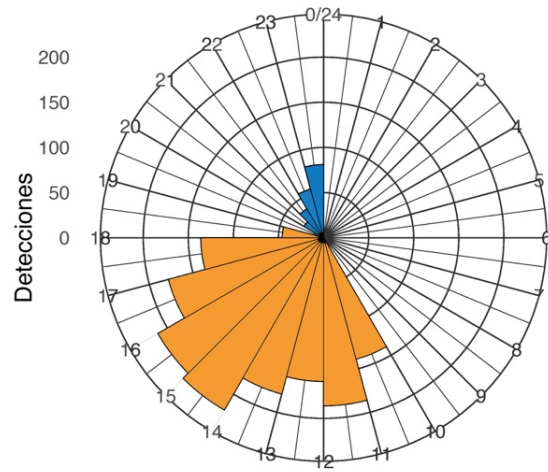
SLew10



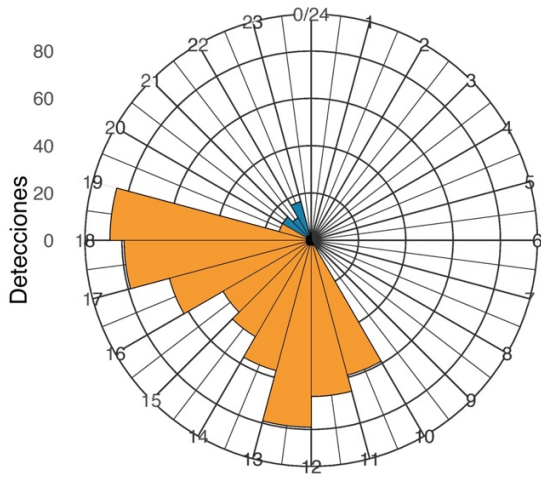
SLew11



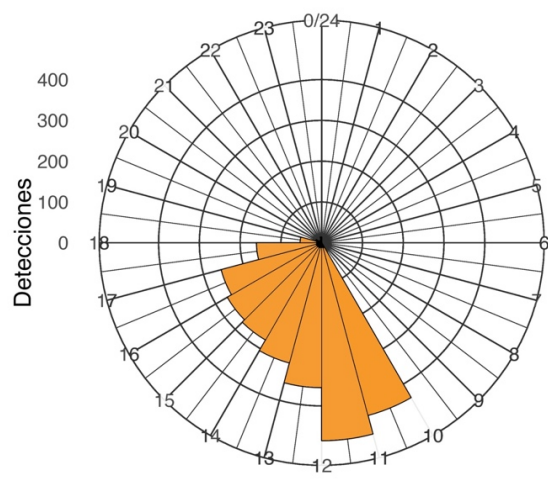
SLew14



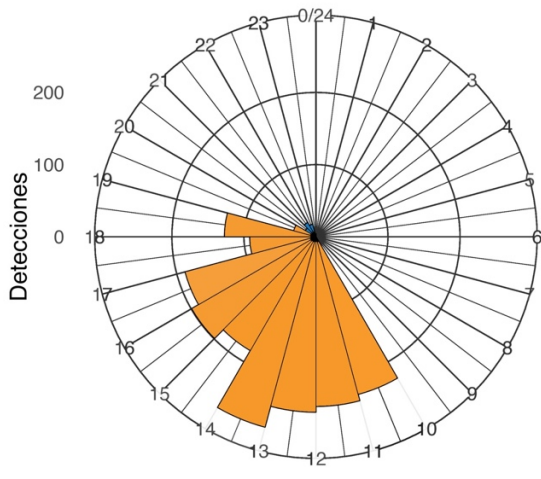
SLew16



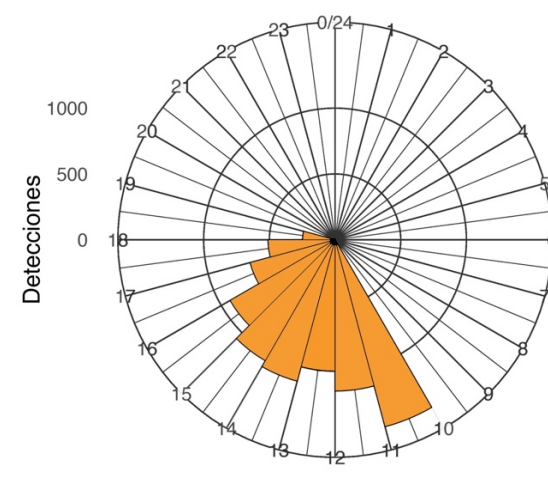
SLew17



SLew19



SLew20



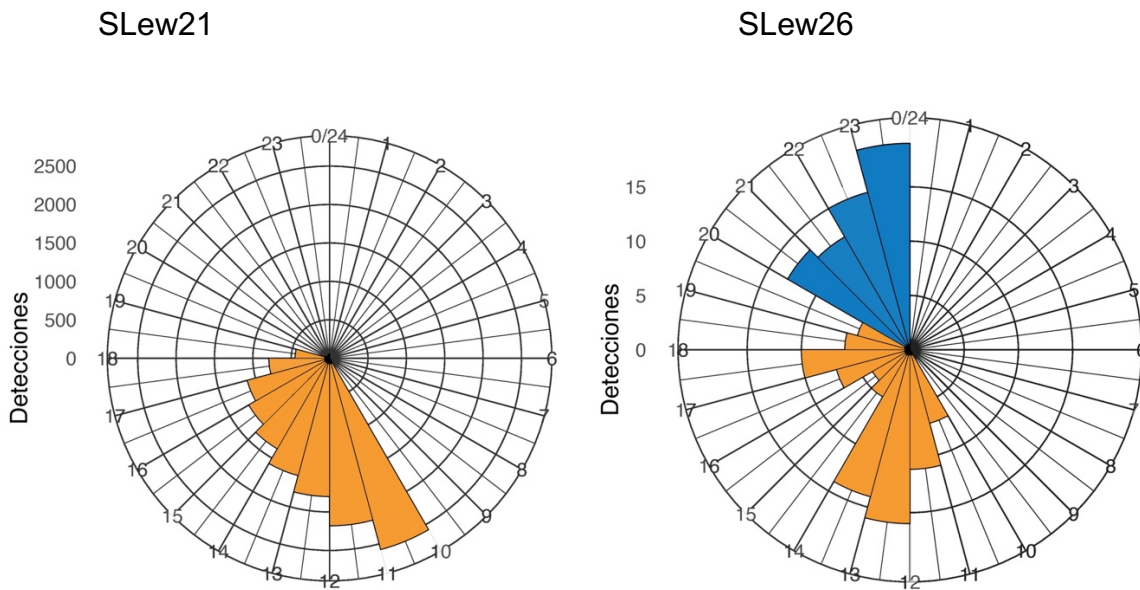


Figura 20. Número de detecciones diarias divididas por hora de los 10 tiburones martillo *S. lewini* con más detecciones. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes a la escala de cada sitio. En color naranja se representa la fase diurna (07-19 h) y en azul la fase nocturna (19-07 h).

### 8.5 Movimientos diurnos y nocturnos de *S. lewini* en el AES

De manera general, se observó que tanto los machos como las hembras de *S. lewini* presentaron el mayor número de detecciones de las 13–02 h, sin presentar un patrón de movimientos diarios tan marcado como en el AR (Fig. 21-A, B). La prueba de espacio de Rao ( $p < 0.01$ ) los datos no se distribuyeron de manera uniforme a lo largo del día. En ambos casos, la uniformidad es significativa ( $p < 0.001$ ).

A

B

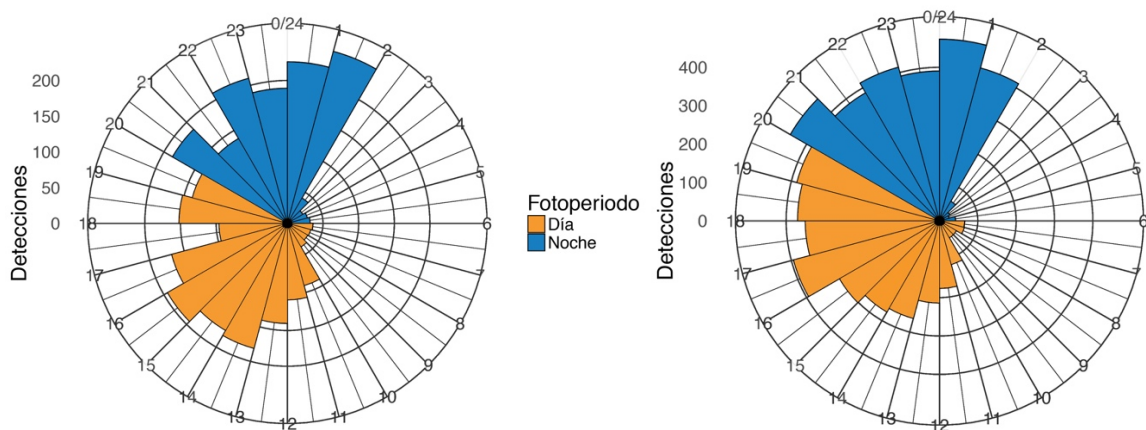


Figura 21. Número de detecciones diarias registradas desde 2018-2019 divididas por hora de *S. lewini* por sexo A) Hembras, B) Machos. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes para cada sexo. En color naranja se representa la fase diurna (06-19 h) y en azul la fase nocturna (19-6 h).

En EBES, se observó que el mayor número de detecciones se presentó a partir de las 16:00 h hasta las 02:00 h. Posteriormente disminuyeron drásticamente hasta las 12:00 h que los tiburones empiezan a detectarse nuevamente (Fig. 22).

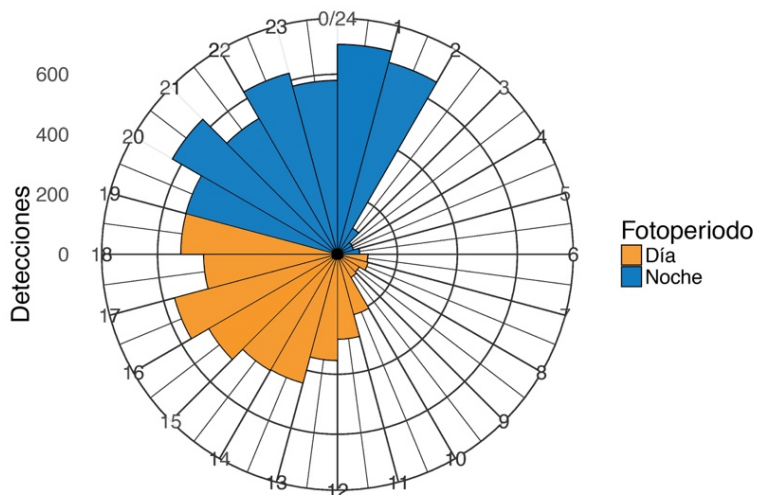
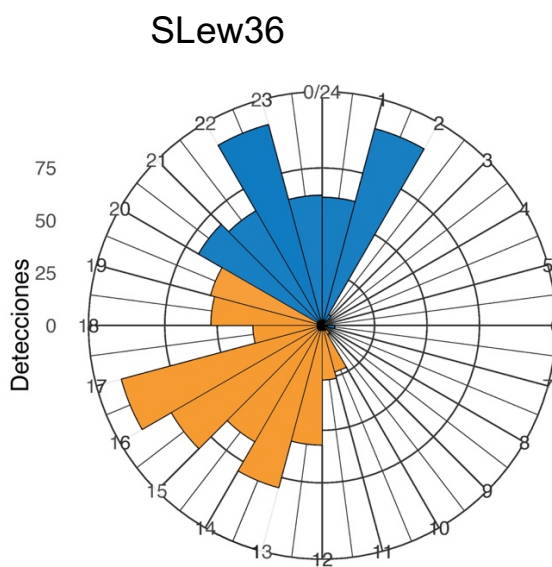
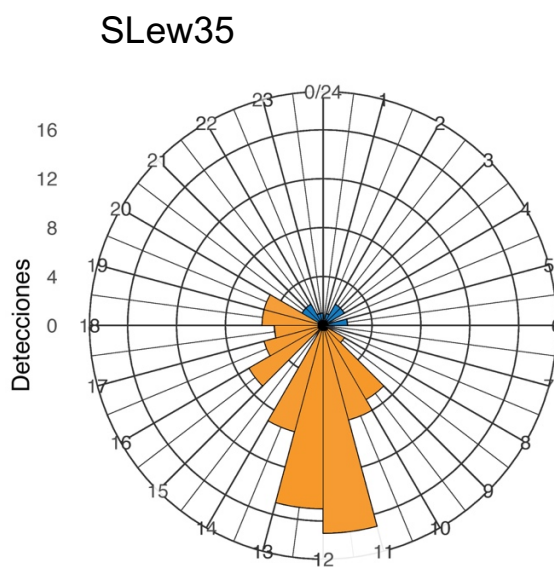
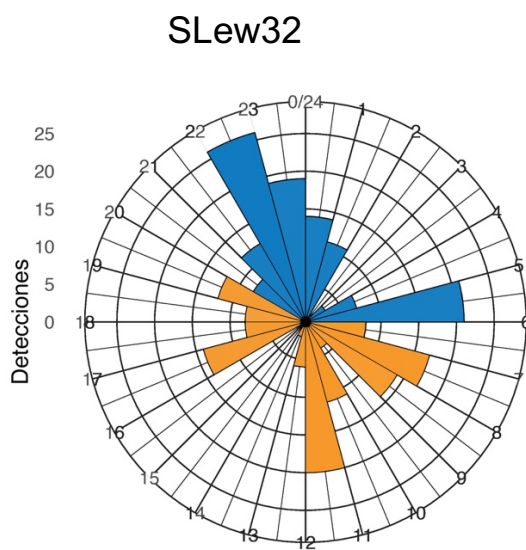
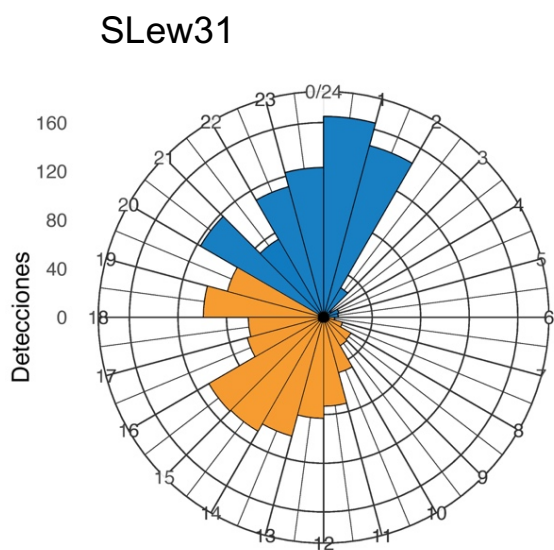


Figura 22. Número de detecciones diarias divididas por hora para EBES. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes a la escala de cada sitio. En color naranja se representa la fase diurna (06-19 h) y en azul la fase nocturna (19-06 h).

A nivel individual, los tiburones martillo en el AES, no presentaron un patrón de movimientos claramente definido con los tiburones del AR, sino que se detectaron en lapsos de ambas fases. Algunos se detectaron hasta las 02:00 h, posteriormente se volvieron a detectar a partir de las 12:00-13:00 h. Se observó que los tiburones permanecen abarcando ambas fases en el AES, mayormente de 12:00 a 14:00 h, y dejan de detectarse de 02:00 a 08:00 h y algunos individuos hasta las 11:00 h (Fig. 23).



**SLew39**

**SLew41**

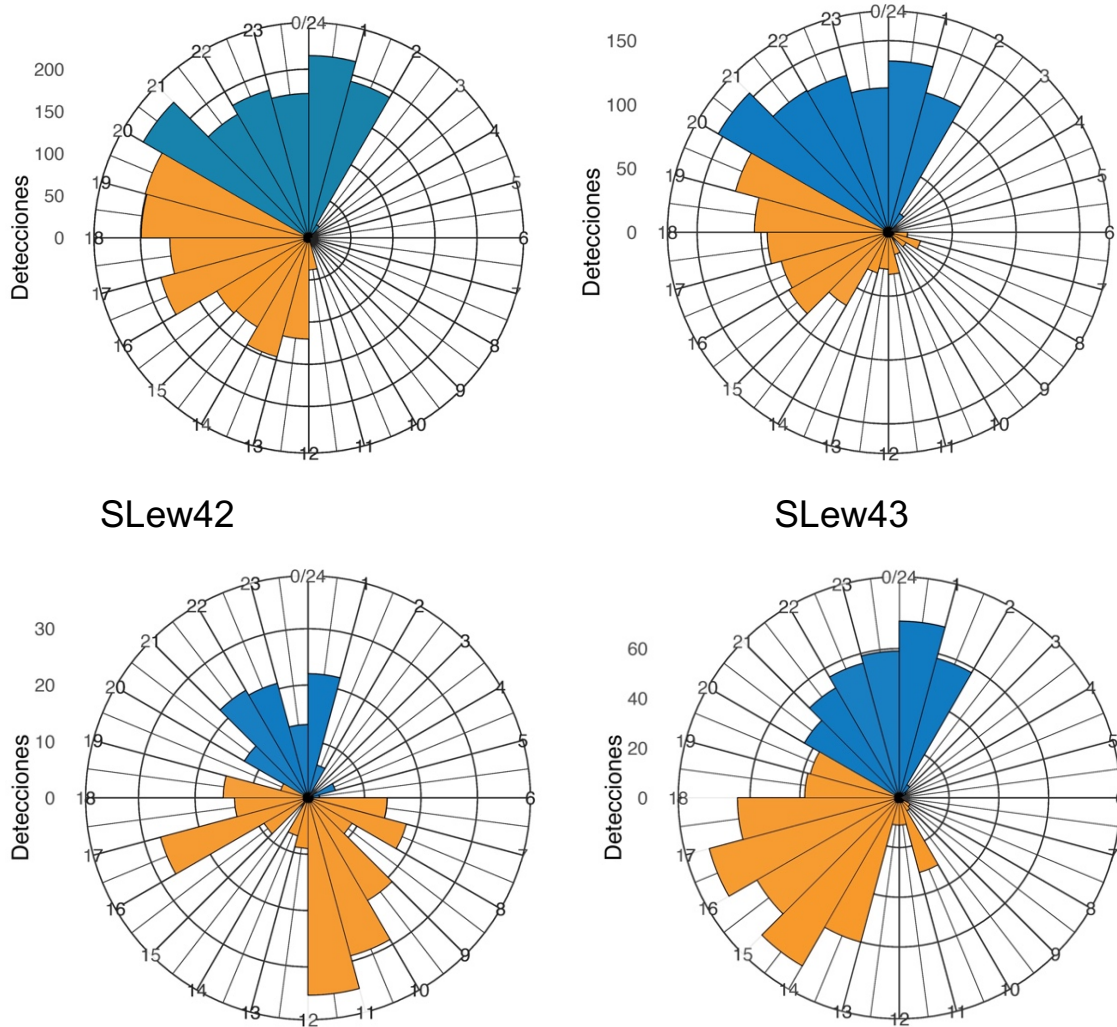


Figura 23. Número de detecciones diarias divididas por hora de ocho tiburones martillo *S. lewini*, con más detecciones. Los círculos indican el intervalo de detección por horas correspondientes a la escala de cada sitio. En color naranja se representa la fase diurna (06-19 h) y en azul la fase nocturna (19-06 h).

### 8.6 Movimientos a mediana escala de *S. lewini* en el AES

De los 31 TMC marcados con marcas convencionales en el suroeste del GC, se recapturaron tres individuos. Estos fueron originalmente capturados en EBES y recapturados en diferentes campos pesqueros (Cuadro 3). El primero (SLew29), fue una hembra subadulta de 137 cm de LT, que fue recapturada en La Bahía de La Paz, después de 20 días de libertad, a una distancia de 163 km hacia el sureste de EBES (Fig. 24). El segundo tiburón (SLew 33) fue un macho subadulto de 139 cm LT que fue

recapturado en La Ribera, Cabo Pulmo a 138 km hacia el sur del AES en la zona costera después de haber estado 86 días en libertad. Al ser capturado tenía la talla de un tiburón adulto 200 cm LT (Fig. 25). El tercer individuo (SLew 46), un macho subadulto fue localizado a 214 km hacia el sureste del GC en la zona costera de Aguamitas, Sinaloa, estuvo 41 días en libertad (Fig. 26). Las recapturas se realizaron a los pocos días de libertad (20-86 días) después del marcaje hacia el sur y sureste del GC. Las capturas fueron realizadas por pescadores locales y se obtuvo un porcentaje de recaptura del 9.68%.

Cuadro 3. TMC recapturados. Los días en libertad se calcularon con la diferencia entre fecha de marcaje y recaptura. Distancia, hace referencia al recorrido que realizaron los TMC en los sitios de captura y donde fue recapturado.

Nombre	Situación	Fecha	Sexo	LT (cm)	Latitud	Longitud	Sitio de Captura/Recaptura	Días en libertad	Distancia (Km)
SLew29	Captura	02-mar-19	H	137	24.70365	-110.30258	EBES	20	163.54
	Recaptura	22-mar-19		150	24.369789	-110.587077	Bahía La Paz		
SLew33	Captura	04-mar-19	M	139	24.69666	-110.29768	EBES	86	138.34
	Recaptura	29-may-19		200	23.624256	-109.601042	La Ribera, Cabo Pulmo		
SLew46	Captura	19-mar-19	M	118	24.69684	-110.29790	EBES	41	214.35
	Recaptura	29-abr-19		NA	24.233674	-108.247887	Aguamitas, Sinaloa		

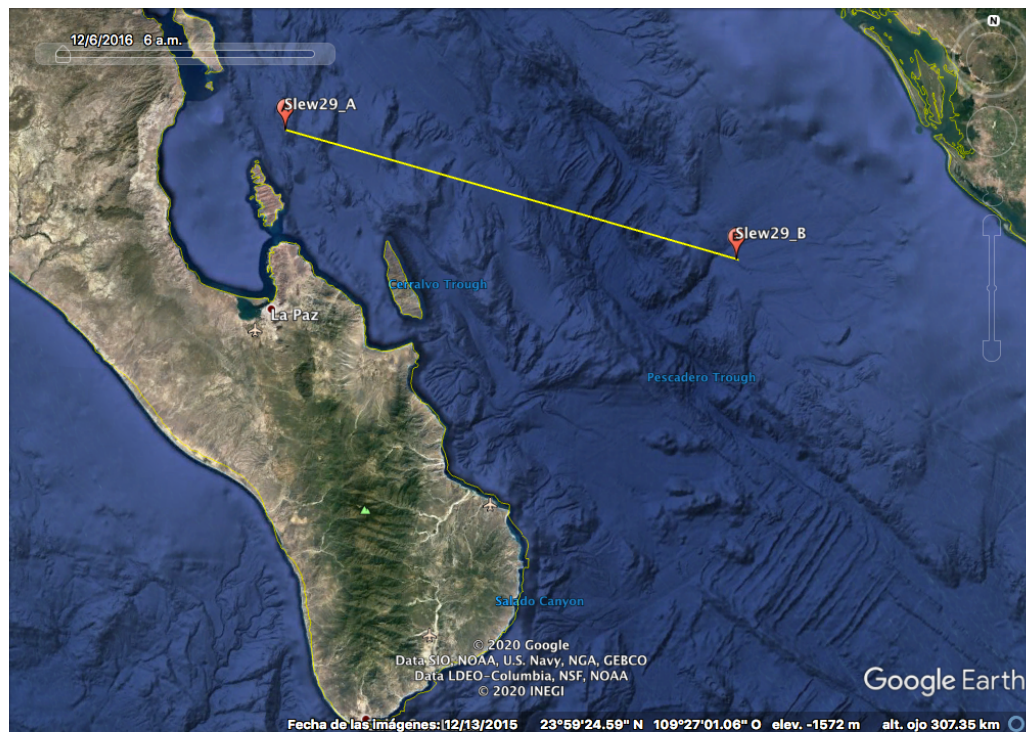


Figura 24. Sitios de marcaje y recaptura de tiburón martillo (SLew 29). Se muestra la distancia recorrida (km) del punto de marcaje (azul) al punto de recaptura (rojo). La capa de batimetría está representada en metros.

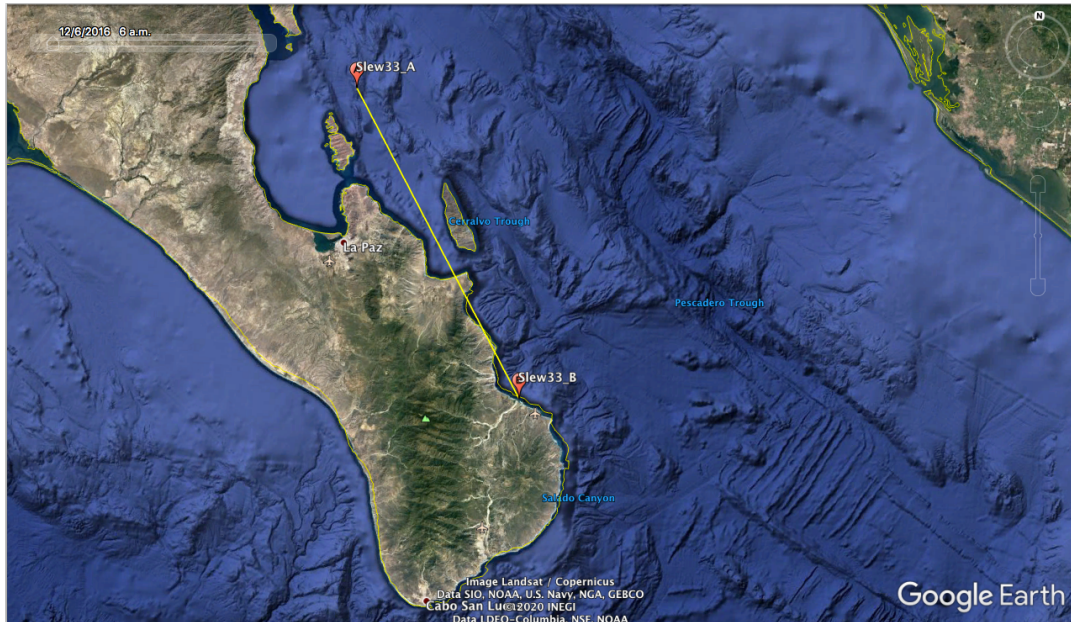


Figura 25. Sitios de marcaje y recaptura de tiburón martillo (SLew33). Se muestra la distancia recorrida (km) del punto de marcaje (azul) al punto de recaptura (rojo). La capa de batimetría está representada en metros.

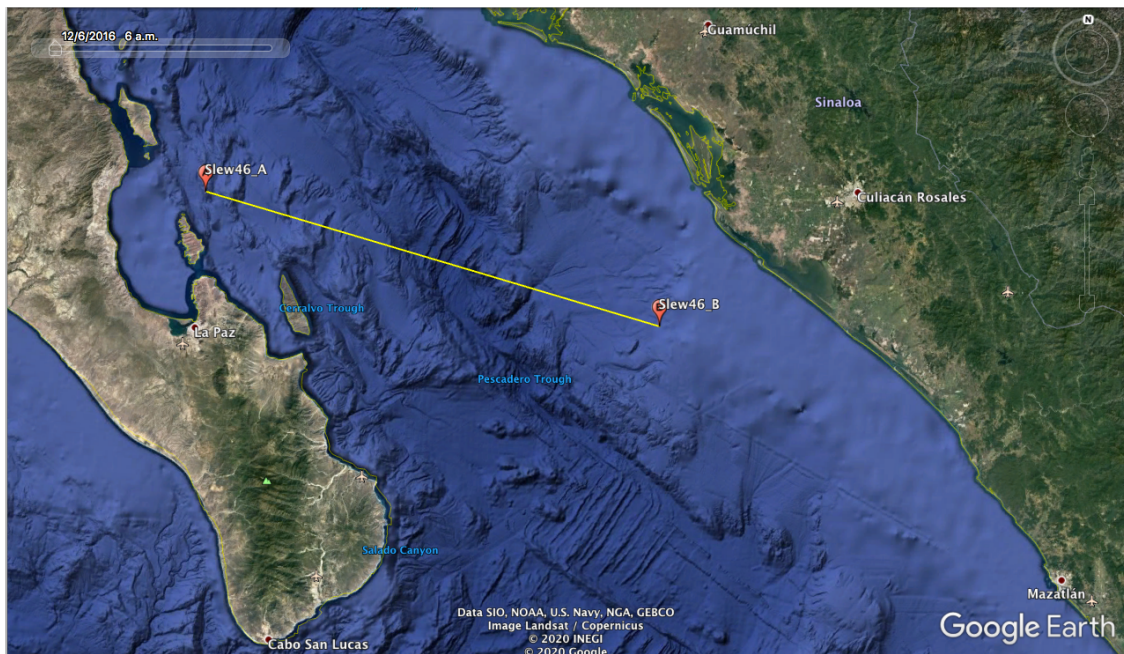


Figura 26. Sitios de marcaje y recaptura de tiburón martillo (SLeW46), se muestra la distancia recorrida (km) del punto de marcaje (azul) al punto de recaptura (rojo). La capa de batimetría está representada en metros.

### 8.7 Movimientos interinsulares de *S. lewini* en el AR

Se detectaron un total de 17 TMC marcados con transmisores acústicos en seis de los 13 receptores acústicos instalados en el AR. En la Isla San Benedicto se detectaron 11 individuos, algunos de estos fueron registrados por cuatro receptores instalados, donde el periodo de días detectados varió de un mínimo de 12 días (Slew22) a un máximo de 800 días (Slew20), equivalente a 2 años y 3 meses del 4 de enero de 2013 hasta el 22 de marzo de 2015 (Cuadro 1 y Fig. 27).

En el Islote Roca Partida se detectaron seis organismos, cinco fueron marcados y detectados durante el 2009 a 2012. El sexto individuo (Slew26), fue marcado en 2018 y se detectó solo dos meses.

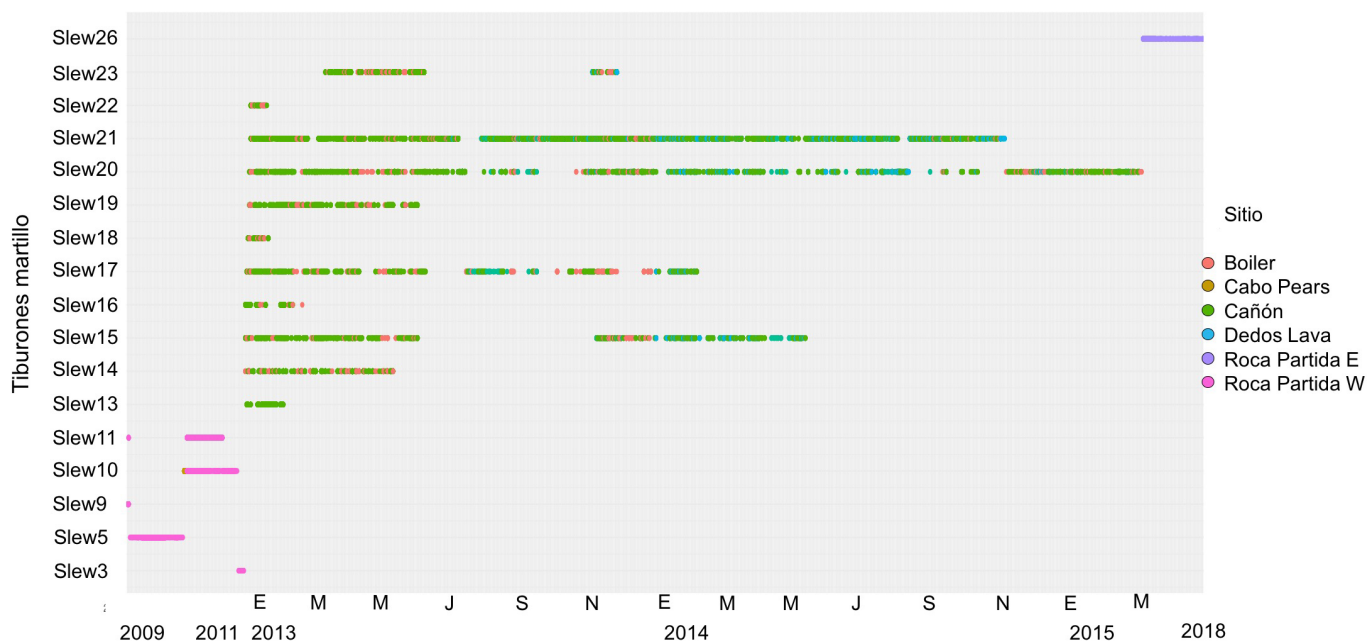


Figura 27. Cronología diaria de detecciones acústicas registradas para cada uno de los TMC marcados con transmisores acústicos en el AR, de mayo 2009 a abril 2018. Los puntos de colores representan los diferentes sitios donde fueron detectados los tiburones en el tiempo.

La mayor movilidad de tiburones se presentó alrededor de la Isla San Benedicto. Se observó que los movimientos más frecuentes se dieron en la estación de limpieza de Cañón → Dedos de Lava con 7,506 veces, seguido de Dedos de lava → Cañón con 7,220 veces, que en conjunto representaron el 96.5% de los posibles movimientos que pueden realizar. En contra parte, el movimiento menos frecuente fue de Dedos de lava → Cuevitas sólo seis veces (Cuadro 4).

Cuadro 4. Movimientos interconectados de *S. lewini* (n=11) entre sitios de la Isla San Benedicto. El porcentaje se basó en el total de movimientos del punto inicial y final de cada sitio.

<b>Isla</b>	<b>Inicio</b>	<b>Movimiento</b>	<b>Final</b>	<b>Total de movimientos</b>	<b>%</b>
San Benedicto	Canon	-->	Dedos Lava	7506	49.21
	Dedos Lava	-->	Canon	7220	47.34
	Canon	-->	Boiler	205	1.34
	Boiler	-->	Canon	155	1.02
	Boiler	-->	Dedos Lava	58	0.38
	Canon	-->	Cuevitas	44	0.29
	Cuevitas	-->	DedosLava	24	0.16
	Cuevitas	-->	Canon	18	0.12
	Cuevitas	-->	Boiler	9	0.06
	Boiler	-->	Cuevitas	7	0.05
	Dedos Lava	-->	Cuevitas	6	0.04

Los tiburones martillo que se presentan a continuación fueron los que se movieron mayormente entre los sitios de San Benedicto, realizando múltiples interacciones de un sitio a otro. Podemos observar que para todos los casos la interacción más frecuente es Cañón → Dedos de lava o viceversa, y la interacción de movimiento menos frecuente fue Dedos de lava → Cuevitas o Dedos de lava → Boiler (Cuadro 5).

Cuadro 5. Movimientos interconectados de cinco *S. lewini* altamente móviles entre sitios de la Isla San Benedicto. El porcentaje se basó en el total de movimientos del punto inicial y final de cada sitio.

Nombre	Fecha de registro	Inicio	Movimiento	Final	Fecha cambio	Total de movimientos
SLew15	08-ene-13 al 25-ene-14	Canon	-->	Boiler	09Jan2013	24
		Boiler	-->	Canon	10Jan2013	15
		Canon	-->	Dedos.Lava	19Oct2013	582
		Dedos.Lava	-->	Canon	19Oct2013	591
		Canon	-->	Cuevitas	19Oct2013	7
		Cuevitas	-->	Dedos.Lava	20Oct2013	3
		Boiler	-->	Dedos.Lava	25Oct2013	9
		Boiler	-->	Cuevitas	03Nov2013	2
		Cuevitas	-->	Boiler	04Nov2013	2
		Cuevitas	-->	Canon	08Nov2013	7
		Dedos.Lava	-->	Cuevitas	24Jan2014	3
SLew17	09-ene-13 al 02-ene-14	Canon	-->	Boiler	10Jan2013	21
		Boiler	-->	Canon	11Jan2013	17
		Boiler	-->	Dedos.Lava	30Jun2013	5
		Dedos.Lava	-->	Canon	30Jun2013	350
		Canon	-->	Dedos.Lava	02Jul2013	343
		Canon	-->	Cuevitas	03Jul2013	4
		Cuevitas	-->	Boiler	05Jul2013	3
		Boiler	-->	Cuevitas	06Jul2013	3
		Cuevitas	-->	Dedos.Lava	11Jul2013	3
		Cuevitas	-->	Canon	29Jul2013	1
		Dedos.Lava	-->	Boiler	28Nov2013	1
SLew20	11-ene-13 al 22-abr-15	Canon	-->	Boiler	12Jan2013	45
		Boiler	-->	Canon	16Jan2013	31
		Canon	-->	Dedos.Lava	05Jun2013	2266
		Dedos.Lava	-->	Canon	05Jun2013	2283
		Canon	-->	Cuevitas	21Jul2013	14
		Cuevitas	-->	Dedos.Lava	23Jul2013	4
		Boiler	-->	Dedos.Lava	07Aug2013	20
		Cuevitas	-->	Boiler	22Aug2013	4
		Dedos.Lava	-->	Boiler	28Nov2013	3
		Cuevitas	-->	Canon	21Jan2014	10
		Dedos.Lava	-->	Cuevitas	06Mar2014	4
SLew21	12-ene-13 al 23-sep-14	Canon	-->	Boiler	13Jan2013	45
		Boiler	-->	Canon	13Jan2013	26
		Canon	-->	Dedos.Lava	04Jun2013	4075
		Dedos.Lava	-->	Canon	04Jun2013	4104
		Boiler	-->	Dedos.Lava	08Jun2013	20
		Canon	-->	Cuevitas	14Jul2013	19
		Cuevitas	-->	Dedos.Lava	15Jul2013	14
		Cuevitas	-->	Boiler	11Aug2013	1
		Boiler	-->	Cuevitas	25Aug2013	2
		Cuevitas	-->	Canon	05Mar2014	8
		Dedos.Lava	-->	Cuevitas	13Mar2014	2
		Dedos.Lava	-->	Boiler	25Jul2014	2
SLew23	08/03/13 al 03/11/13	Canon	-->	Boiler	10Mar2013	22
		Boiler	-->	Canon	11Mar2013	19
		Canon	-->	Dedos.Lava	16Oct2013	240
		Dedos.Lava	-->	Canon	16Oct2013	242
		Boiler	-->	Dedos.Lava	27Oct2013	4
		Dedos.Lava	-->	Boiler	29Oct2013	1

## 8.8 Movimientos interinsulares de *S. lewini* en el AES

Los 17 TMC marcados con transmisores acústicos en AES, fueron detectados únicamente en el receptor de EBES del 2 de marzo de 2019 al 8 de mayo de 2019, sin

detectarse en otros receptores de la Bahía La Paz o de Cabo Pulmo. Solo el tiburón SLew27, un macho subadulto se movió del EBES a La Animas (Cuadro 1 y Fig. 28).

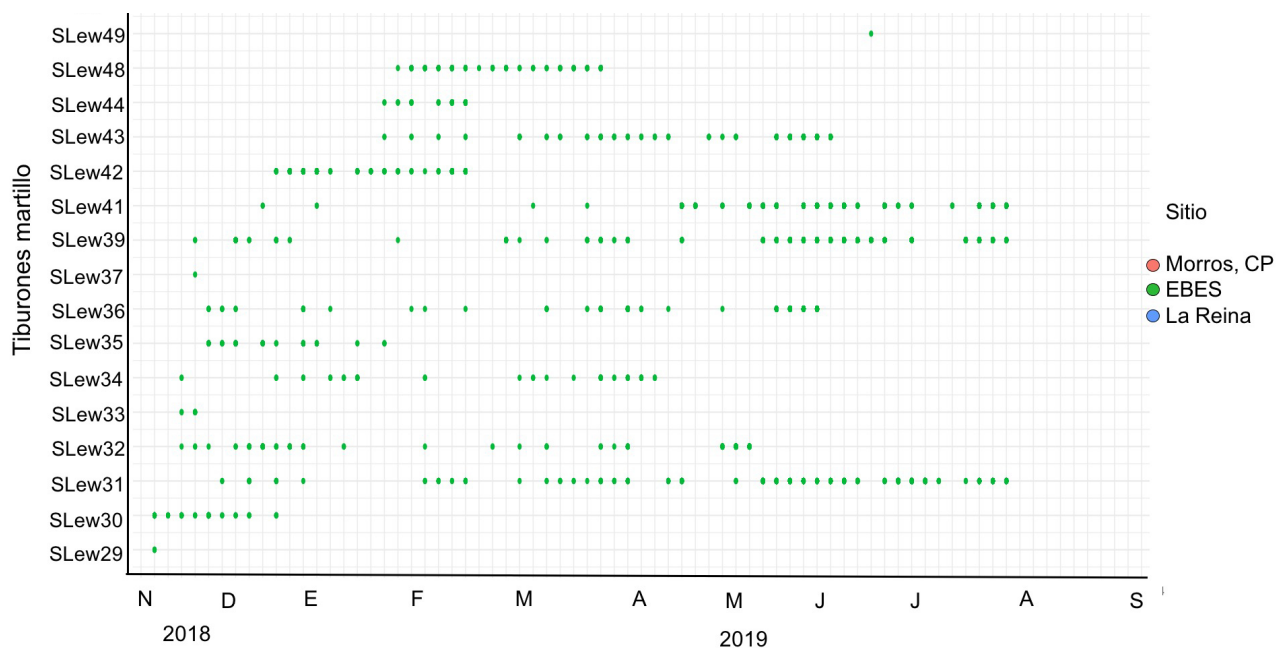


Figura 28. Cronología diaria de detecciones acústicas registradas para cada uno de los tiburones martillo marcados con transmisores acústicos en el GC, de noviembre 2018 a septiembre 2019. Los puntos de colores representan los diferentes sitios donde fueron detectados los tiburones en el tiempo.

### 8.9 Movimientos a gran escala de *S. lewini* en el AR

En Roca Partida, el tiburón martillo macho SLew24 de 240 LT marcado con MiniPAT, recorrió una distancia de 148,2 km durante un período de once días (6 al 17 de diciembre 2016) al sur de Roca Partida. La trayectoria recorrida indicó movimientos a gran escala. El tiburón realizó dos tipos de movimientos, durante los primeros días de migración fue hacia el sur de manera direccional desde el sitio donde se marcó. E entre los días 9 y 12 sus movimientos fueron erráticos, cuando el tiburón estaba en mar abierto y cerca del polígono de Monte submarino Bernoulli. Durante los siguientes días continuó en dirección al área central del monte submarino Bernoulli (~ 16 km) (Fig. 29).

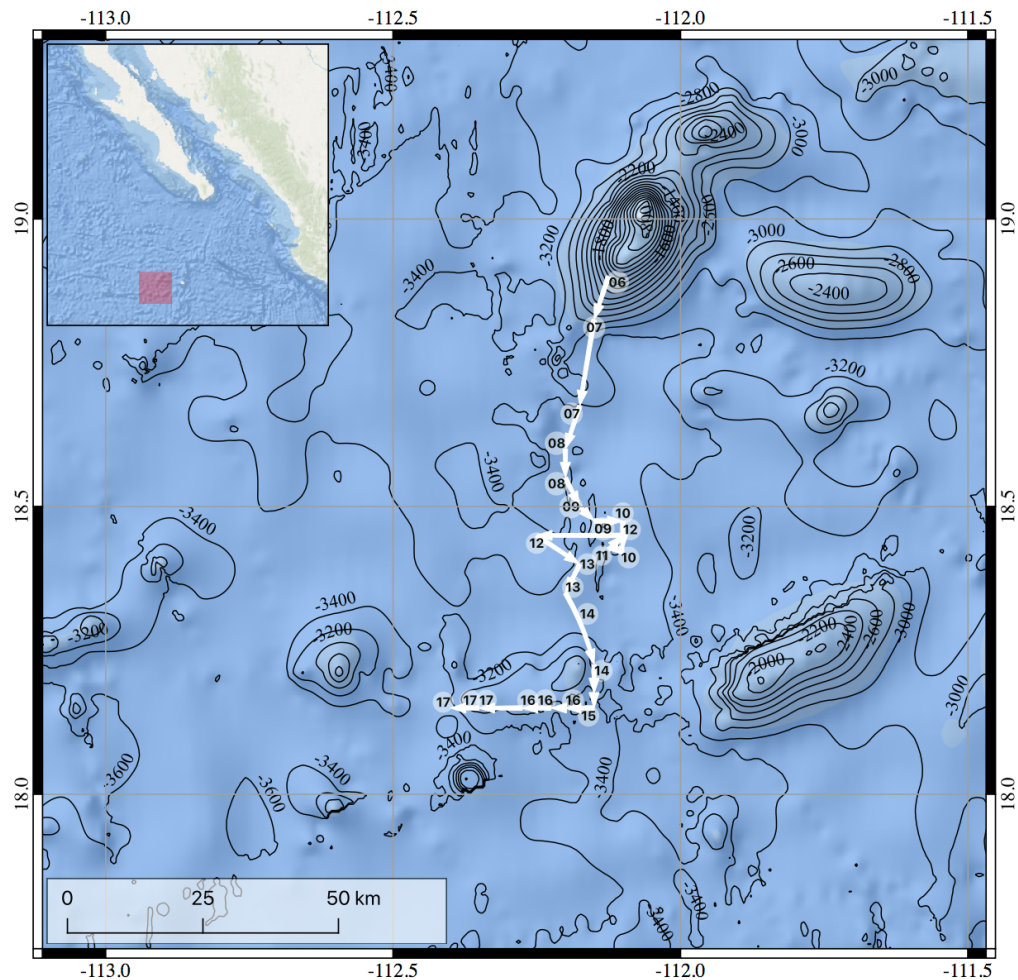


Figura 29. Mapa de batimetría que muestra la trayectoria recorrida (148 km en 11 días) de un TMC macho (SLew24) marcado con transmisor satelital MiniPAT en Roca Partida.

El área de distribución del TMC macho (SLew24) marcado con transmisor satelital en Roca Partida. El área de distribución utilizada al 95%, considera la zona de amortiguamiento ubicada al sur de Roca Partida hasta los  $18.1^{\circ}$  N y  $-112.5^{\circ}$  W, abarcando el monte submarino Bernoulli, la zona central de distribución al 50% se distribuye desde la  $18.7^{\circ}$ – $18.2^{\circ}$  de latitud N y  $-112.25^{\circ}$  de longitud O (Fig. 30).

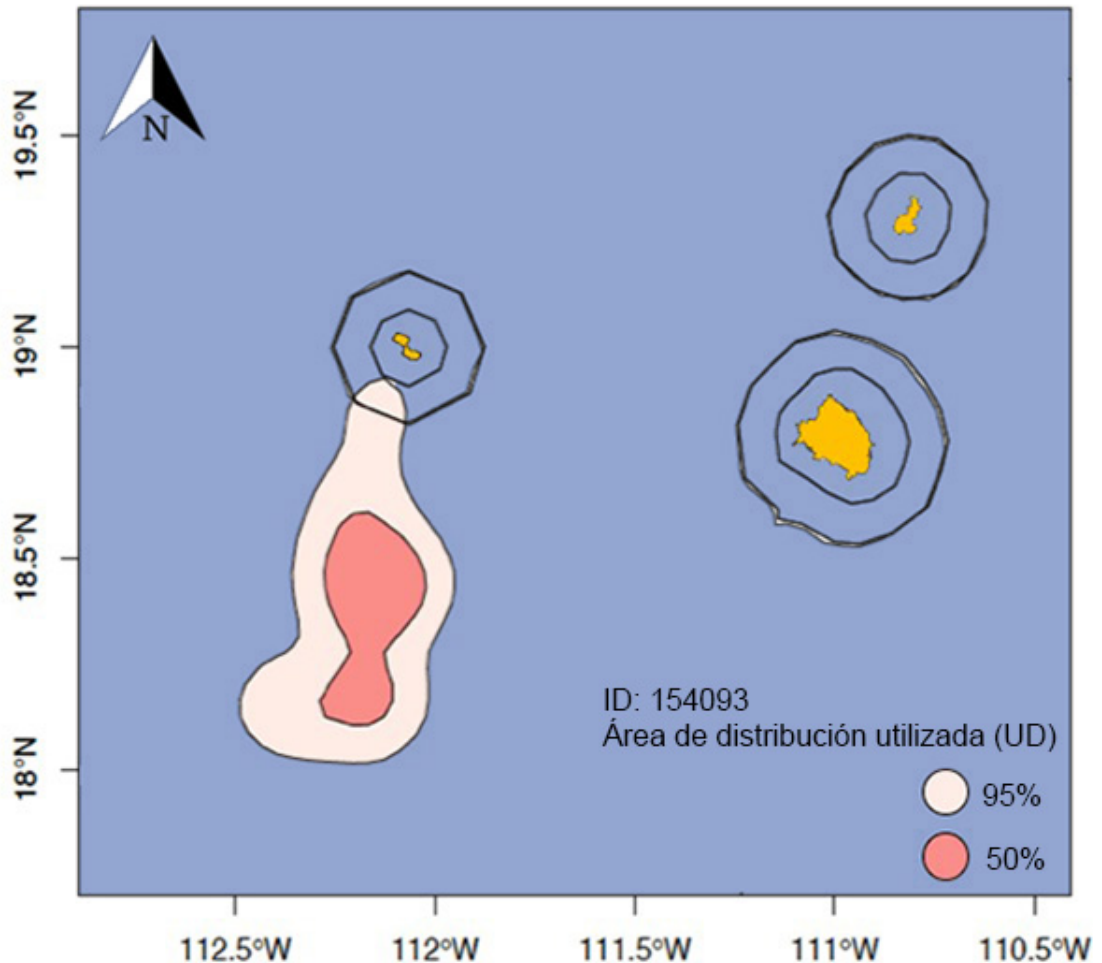


Figura 30. Área de distribución utilizada (UD) del TMC macho SLew30 a través de la estimación de densidad Kernel en color crema a 95% y en color naranja al 50%.

### 8.9.1 Movimientos verticales de *S. lewini* en el AR

El TMC SLew24 registró una máxima profundidad de 284 m. El 73% de los registros de profundidad, tanto para los períodos diurnos como nocturnos, se encontraban dentro de las aguas cálidas entre 25-27°C cerca de la capa mixta (36-41 m). Los movimientos verticales registrados variaron desde la superficie hasta una profundidad máxima de 284 m. El tiburón permaneció en un intervalo de profundidad preferido (30-60 m) en ambos fotoperíodos diurnos (80%) y nocturnos (66%). Movimientos más amplios en el perfil vertical se dieron en la fase nocturna, diferenciándose del día durante los intervalos de profundidad de 0-30 m y 60 a 90 m en

contraste con la fase diurna. Sin embargo, no se detectaron diferencias significativas entre los fotoperíodos (diurno y nocturno) ( $W = 584760$ ,  $p < 0,8601$ ; Fig. 31).

La temperatura de la mar registrada con el sensor de la marca MiniPAT osciló entre los 11–27°C. Sin embargo, más del 80% del tiempo permaneció entre el intervalo de 25–27°C durante ambos fotoperíodos (diurno y nocturno). No se encontraron diferencias significativas entre el día y la noche ( $W = 589840$ ,  $p < 0,8616$ ; Figura 32).

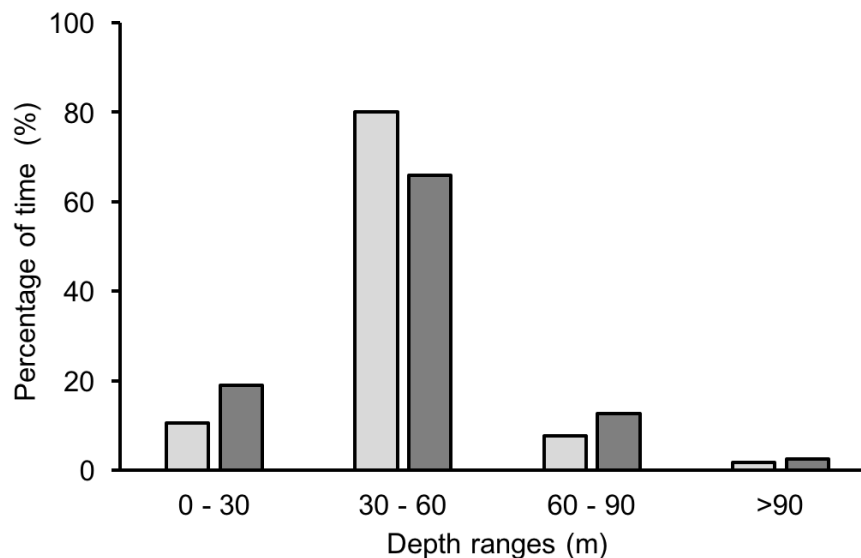


Figura 31. Tiempo empleado en diferentes intervalos de profundidad durante el día (06: 00-19: 00 h) y durante la noche (19: 00-06: 00 h).

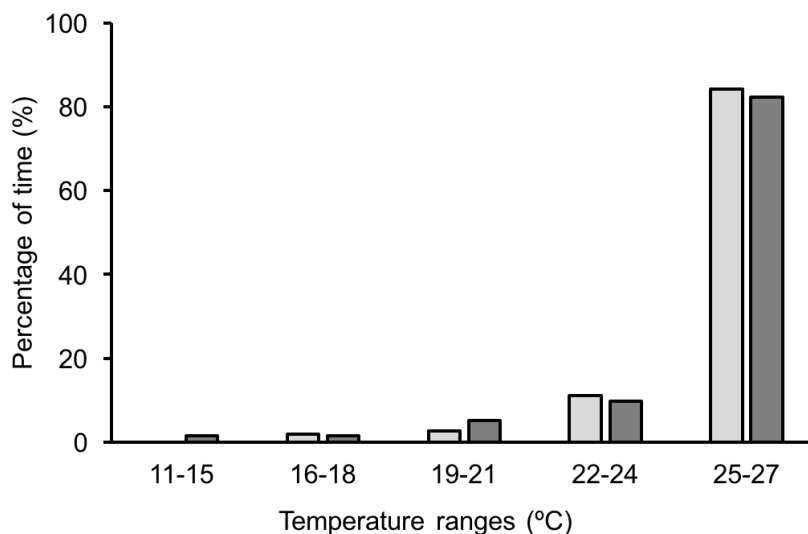


Figura 32. Tiempo transcurrido en diferentes intervalos de temperatura durante el día (06: 00-19: 00 h), representado en color amarillo y durante la noche (19: 00-06: 00 h) en color azul.

El perfil de inmersiones indicó un patrón de movimientos tipo yo-yo por debajo de la termoclina que van desde 36 a 42 m, donde permaneció el 66% durante el día y el 52% en la noche (Fig. 33-A). Se detectaron diferencias significativas entre los intervalos de profundidad cada 30 m ( $K-W = 1284.9276$ , g.l.= 3,  $p < 0.05$ , Cuadro 6), con inmersiones levemente más profundas durante la noche. Durante los primeros días de migración los movimientos verticales tuvieron un mayor intervalo de profundidad (0-180 m), en cambio en los últimos días el intervalo de profundidad fue menor (0-110 m, con una preferencia entre los 30-60 m (Fig. 33-B y C). También se observaron diferencias significativas entre intervalos de temperaturas, siendo más frecuente el intervalo entre 25-27°C, respecto a los demás ( $K-W = 933.79$ , g. l.= 4,  $p < 0.05$ , Cuadro 7).

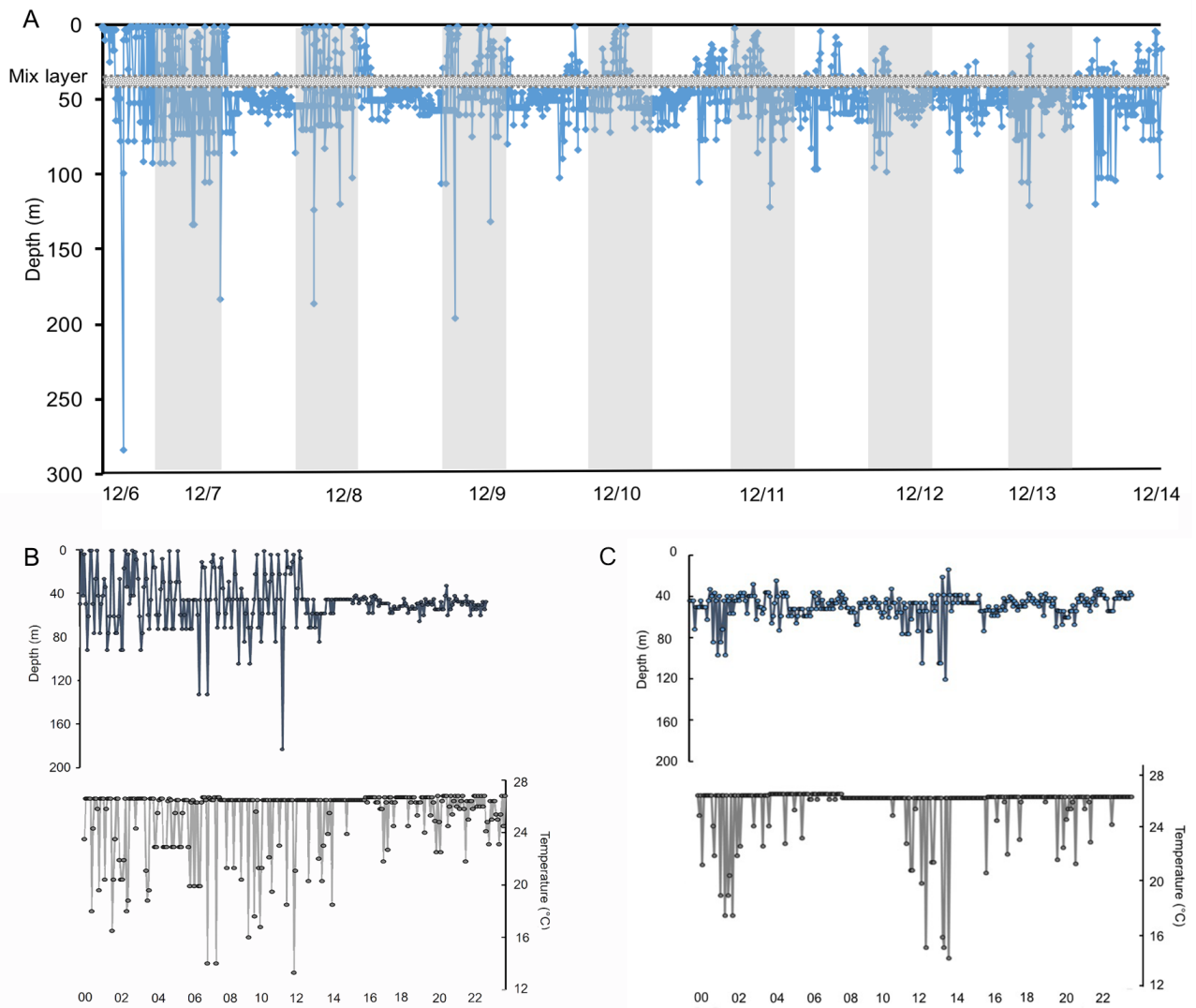


Figura 33. A. Movimientos verticales de *S. lewini* en Roca Partida. La fase nocturna se indica con las barras en color gris claro. B-C. Ciclo de 1 día de movimientos verticales, correspondiente a los días 7 y 13 de diciembre 2016, respectivamente.

El TMC toleró un intervalo de temperatura entre 11 a 27° C en la columna de agua. Sin embargo, prefirió aguas más cálidas entre 25-27°C, donde permaneció el 84% del tiempo durante el día y el 82% durante la noche. Aunque fue capaz de realizar inmersiones profundas y permanecer a bajas temperaturas (11°C), este permanece solo un mínimo de tiempo a profundidades mayores de 90 m (Fig. 34).

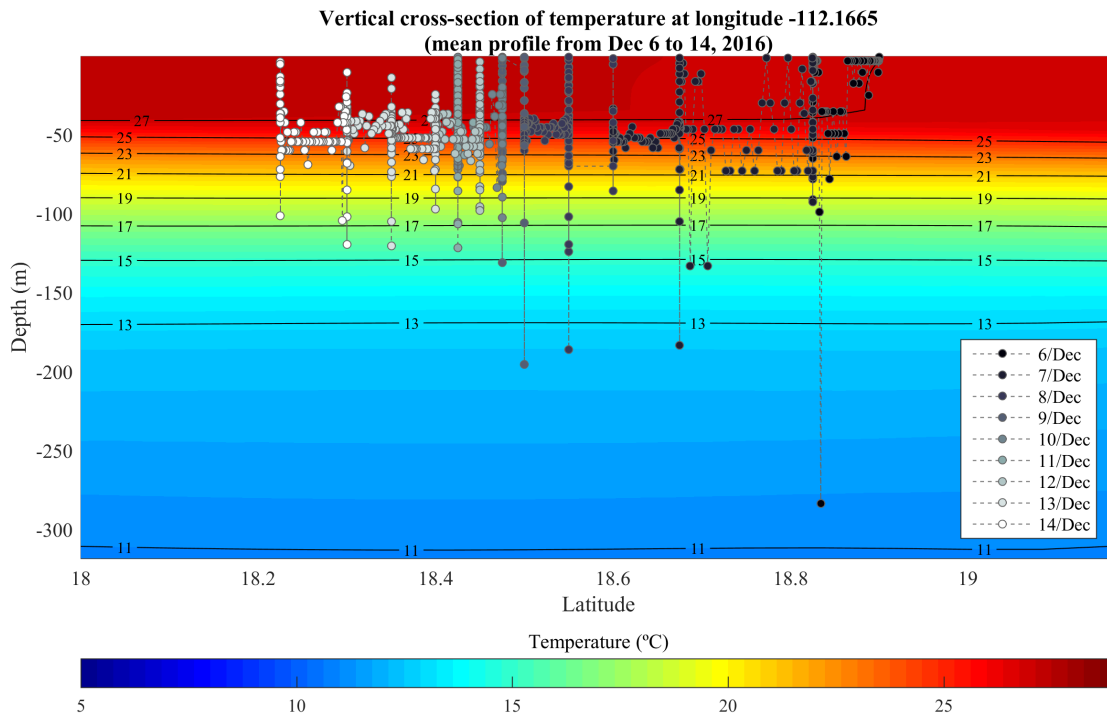


Figura 34. Sección transversal de movimientos verticales de temperatura y profundidad en la longitud -112.1665 durante 6–14 de diciembre de 2016.

Cuadro 6. Prueba *posteriori* de Dunn, donde se comparan intervalos de profundidad por grupo.

Profundidad	0-30m	30-60m	60-90m
30-60m	-24.57208 0.0000*		
60-90m	-33.42548 0.0000*	-19.88201 0.0000*	
<90m	-19.74829 0.0000*	-10.83262 0.0000*	- 1.239891 0.1075

N=2168

K-W=1284.9, g.l.= 3, p=2.20<sup>E-16\*</sup>

Cuadro 7 .Prueba *posteriori* de Dunn, donde se comparan intervalos de profundidad por grupo.

Temperatura	11-15°C	16-18°C	19-21°C	22-24°C
16-18°C	-0.158455 0.437			
19-21°C	-0.535992 0.296	-0.479439 0.3158		

22-24°C	-1.579441	-1.947644	-1.888495	
	0.0571	0.0257	0.0295	
25-27°C	-8.578489	-12.11991	-16.46072	-23.31751
	0.0000*	0.0000*	0.0000*	0.0000*

N=2168

K-W= 933.79, g.l.=4, p=2.20<sup>E-16\*</sup>

Los movimientos verticales registrados por el TMC SLew53, una hembra de 250 cm de LT marcado con transmisor satelital en San Benedicto, presentó un máximo de profundidad de 980 m. El tiburón permaneció mayormente en los intervalos de profundidad entre los 0–60 m, sin presentar diferencias significativas en entre fases del día. Movimientos más amplios se presentaron en la noche para los demás intervalos de profundidad (Figura 35).

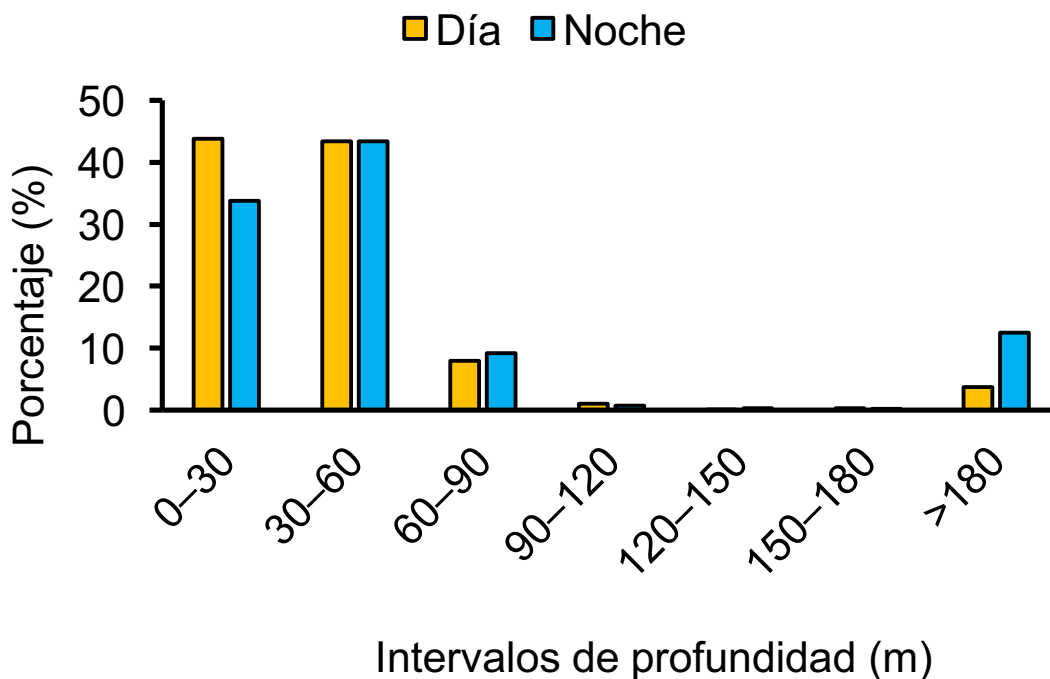


Figura 35. Tiempo empleado en diferentes rangos de profundidad durante el día (06:00-19:00 h) y durante la noche (19:00-06:00 h) para TMC SLew53.

La preferencia de temperatura registrada osciló entre 5–25°C. Sin embargo, más del 80% del tiempo permaneció en una temperatura entre 23–25°C durante ambos

fotoperíodos (diurno y nocturno). No se encontraron diferencias significativas entre el día y la noche (Fig. 36).

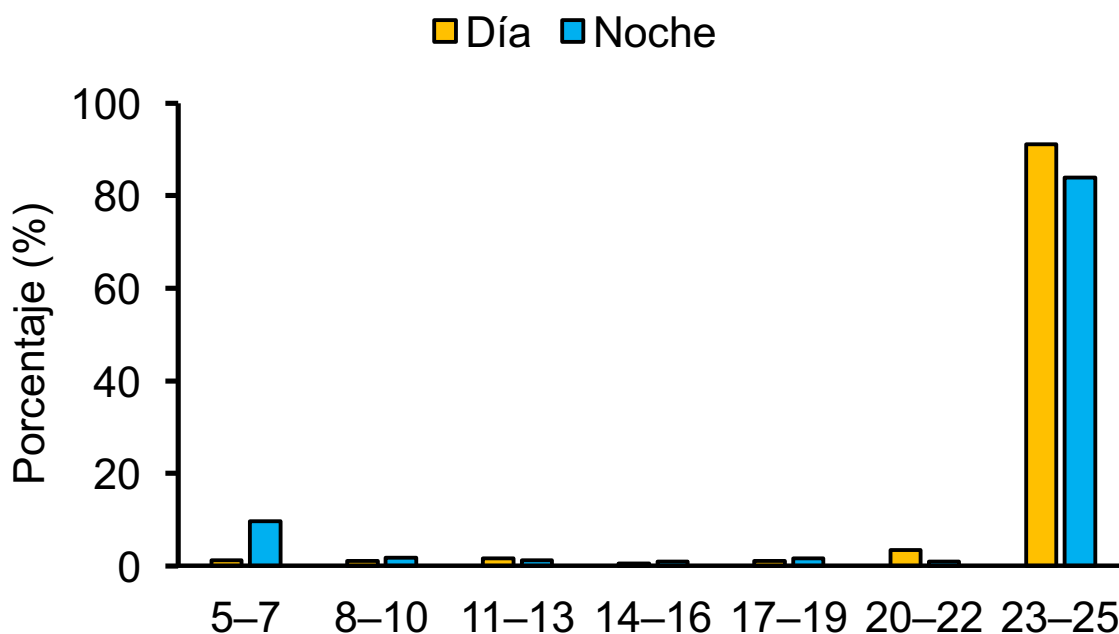


Figura 36. Tiempo transcurrido en diferentes rangos de temperatura durante el día (06:00-19:00 h) y durante la noche (19:00-06:00) para TMC SLew53.

El perfil de inmersiones indicó un patrón de movimientos tipo yo-yo por debajo de la termoclina que van desde 36 a 42 m, donde permaneció el 70% durante el día y el 55% en la noche. (Fig. 37). Con inmersiones levemente más profundas durante la noche. Durante los perfiles en forma de yoyo fueron evidente en casi todo el periodo de estudio, excepto en los días del 12 al 18 de enero, donde el tiburón realizó movimientos verticales poco profundos.

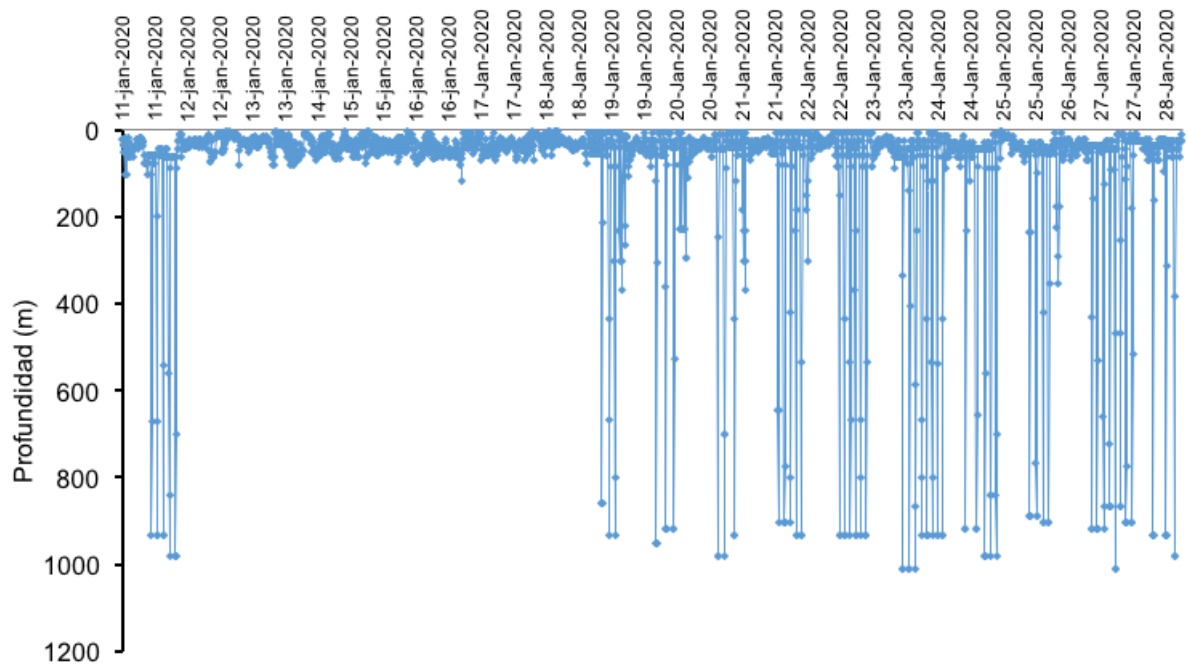


Figura 37. Movimientos verticales del TMC SLew53.

### 8.10 Movimientos a gran escala de *S. lewini* en el AES

En EBES, se marcaron dos TMC con transmisores satelitales tipo MiniPAT, un macho subadulto de 135 cm LT (SLew30) y una hembra subadulta de 167 cm LT (SLew50). SLew30, comenzó a registrarse su trayectoria desde EBES donde fue marcado y migró en dirección al norte por el sureste del GC hasta llegar a la Isla Santa Catalina, de donde se movió hacia el este al sur de Isla Monserrat. Posteriormente, regresó al sur pasando entre la Isla Santa Cruz y la costa continental del GC, llegando al este de Isla San José, rodeándola por el sur. Llegó a San Francisquito, siguiendo su migración al suroeste cercano a San Juan de la Costa, después se movió al este por la parte sur de la Isla ES, donde permaneció aproximadamente dos meses. Finalmente, en agosto se movió hacia el noroeste rodeando la Isla ES (Fig. 38).

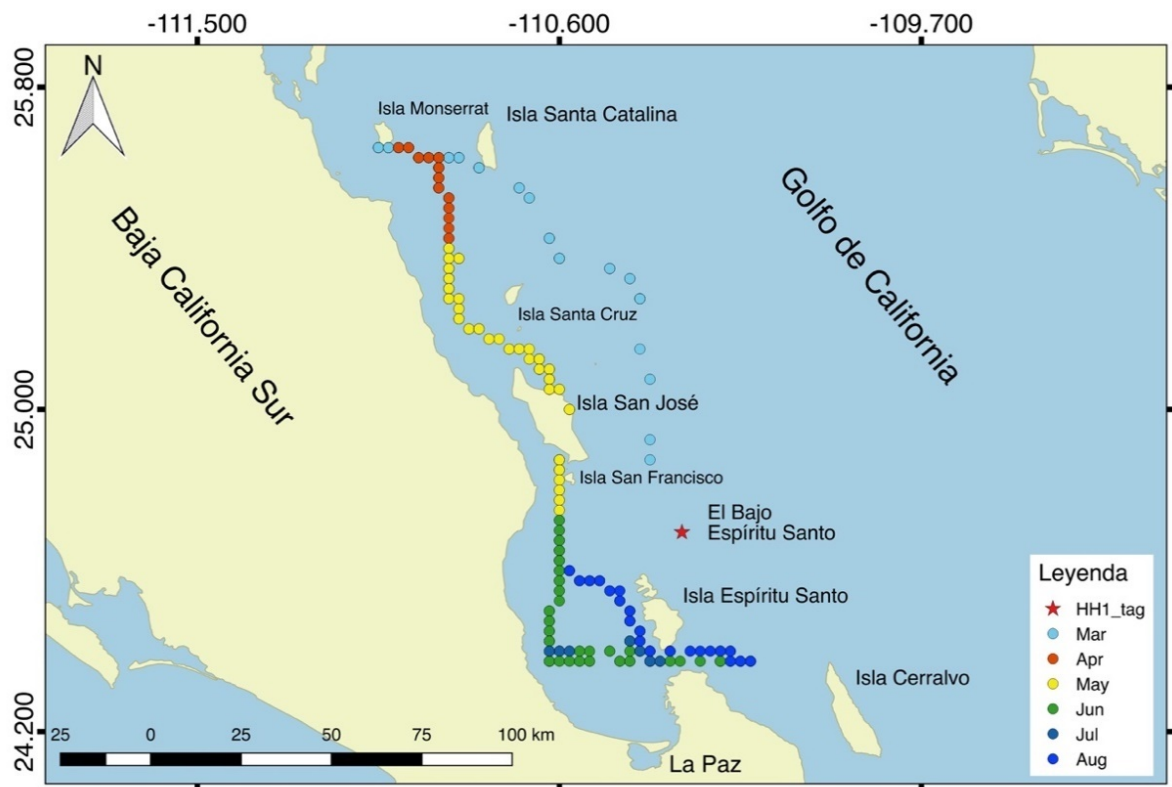


Figura 38. Trayectoria satelital recorrida por el TMC macho SLew30 en el AES, registrada con el transmisor satelital MiniPAT. Los meses durante los que se registró su movimiento están representados en colores.

El análisis de estimación de la densidad Kernel para conocer el área de distribución utilizada. SLew30 se distribuyó utilizando en un 95% desde las Islas de Loreto cercano a la Isla Carmen hasta la parte Norte de Isla Cerralvo, abarcando la Bahía La Paz y la zona costera de San Juan de la Costa. Su distribución en un 50% se centró en dos regiones principalmente el complejo insular de Loreto y la región del AES (Fig. 39).

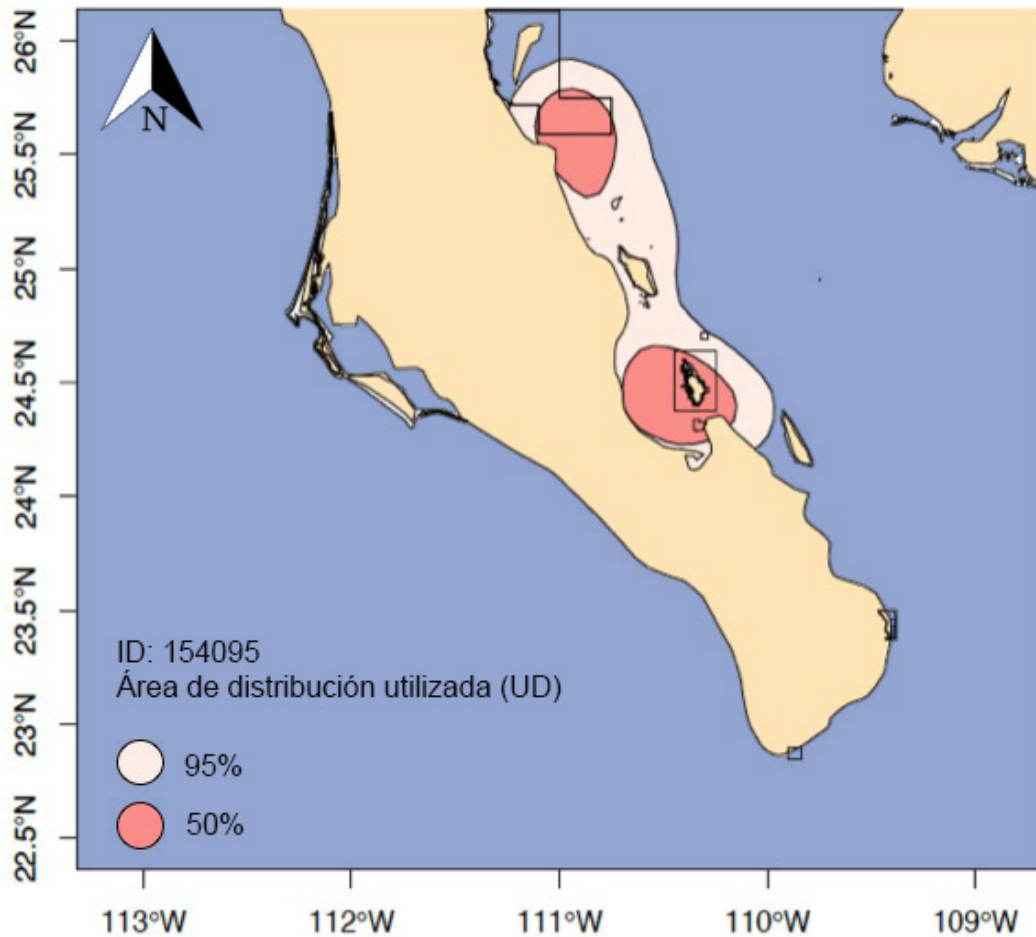


Figura 39. Área de distribución utilizada (UD) del TMC macho SLew30 a través de la estimación de densidad Kernel. En color crema se muestra el 95% y en color naranja al 50%.

El tiburón hembra SLew50, comenzó su recorrido en mayo desde EBES migrando hacia el noreste de la Isla San José. Después se movió por el oeste hacia la Isla San José donde permaneció el resto de mayo y junio. Posteriormente hizo un recorrido hacia el sur pasando por la Isla San Francisquito y llegando a San Juan de la Costa. En agosto regresó nuevamente al EBES. Se movió en dirección norte rodeando la Isla San José y llegando a la costa oeste del GC. En septiembre se movió al norte pasando cercano a la costa continental al oeste de la Isla Santa Cruz (Fig. 40).

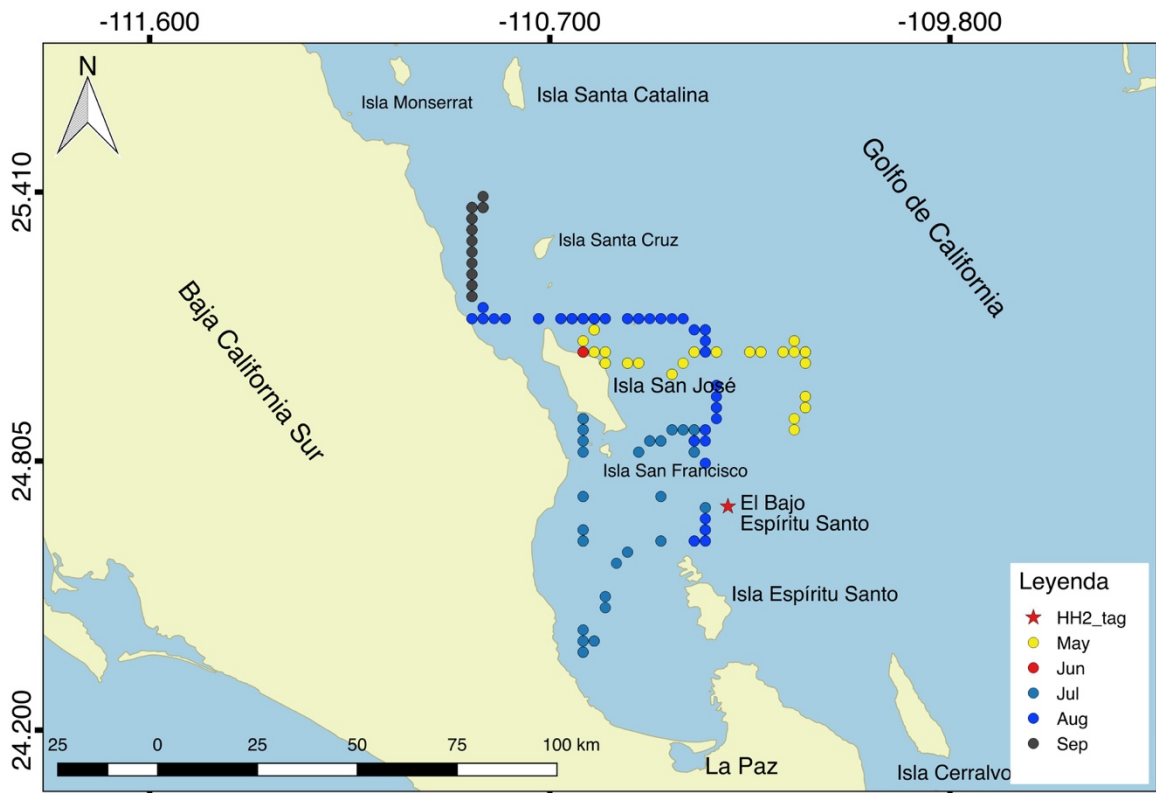


Figura 40. Trayectoria satelital recorrida por el TMC macho SLeW50 en el AES, registrada con el transmisor satelital MiniPAT. Los meses durante los que se registró su movimiento están representados en colores.

En el área de distribución utilizada basada en análisis de estimación de la densidad Kernel del TMC hembra SLeW50 se puede observar que se distribuyó en un 95% desde la parte sur de las Isla Monserrat y Santa Catalina hasta la parte Norte de EBES, abarcando una pequeña porción de San Juan de la Costa en Bahía La Paz, en comparación con el TMC macho SLeW30, la hembra utiliza un área de distribución menor. La distribución a un 50% se centra en la región costera al oeste de Isla Santa Cruz y la parte norte y noreste de Isla San José, abarcando parte de la zona costera en San Juan de la Costa (Fig. 41).

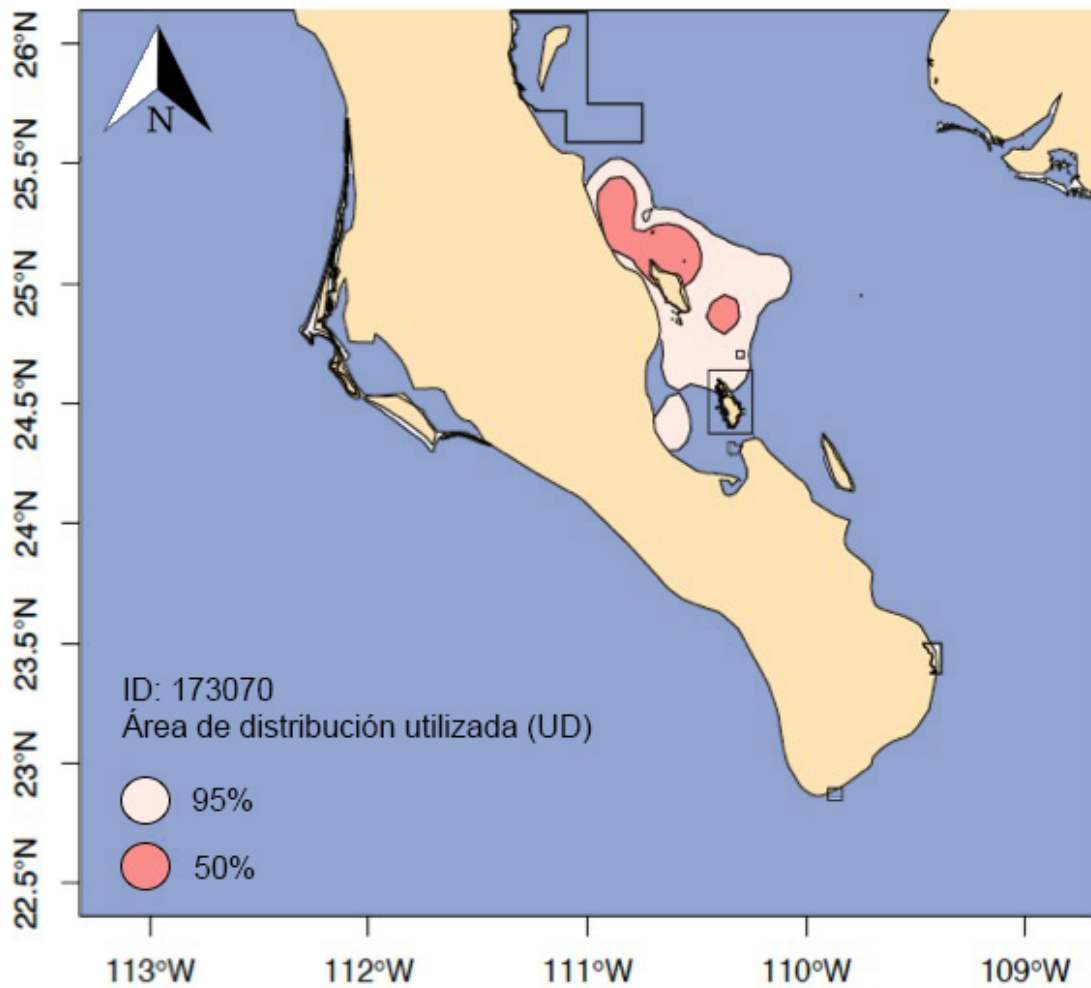


Figura 41. Área de distribución utilizada (UD) del TMC hembra SLew 50 a través de la estimación de densidad Kernel. En color crema se muestra el 95% y en color naranja al 50%.

### 8.10.1 Movimientos verticales de *S. lewini* en el AES

El TMC SLew30 registró una máxima profundidad de 253.5 m. En la fase diurna presentó una preferencia a permanecer entre los intervalos de 30–60 m de profundidad (60% del tiempo). Durante la fase nocturna tuvo una preferencia a los intervalos de 0–30 m de profundidad y entre los intervalos. En el intervalo de 60–90 m permaneció el 20% del tiempo, mientras que en la fase diurna solo se encontró el 12% (Fig. 42).

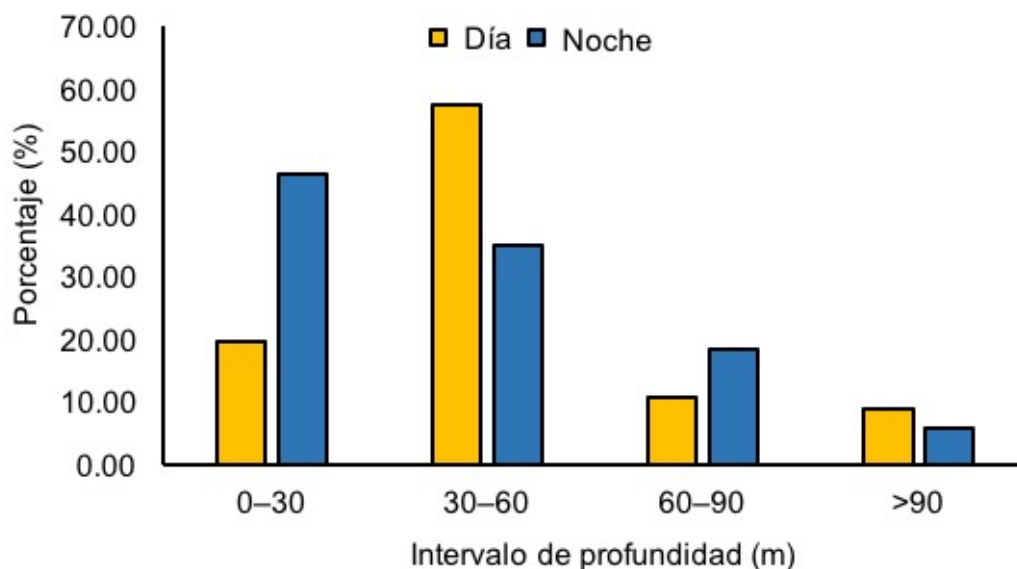
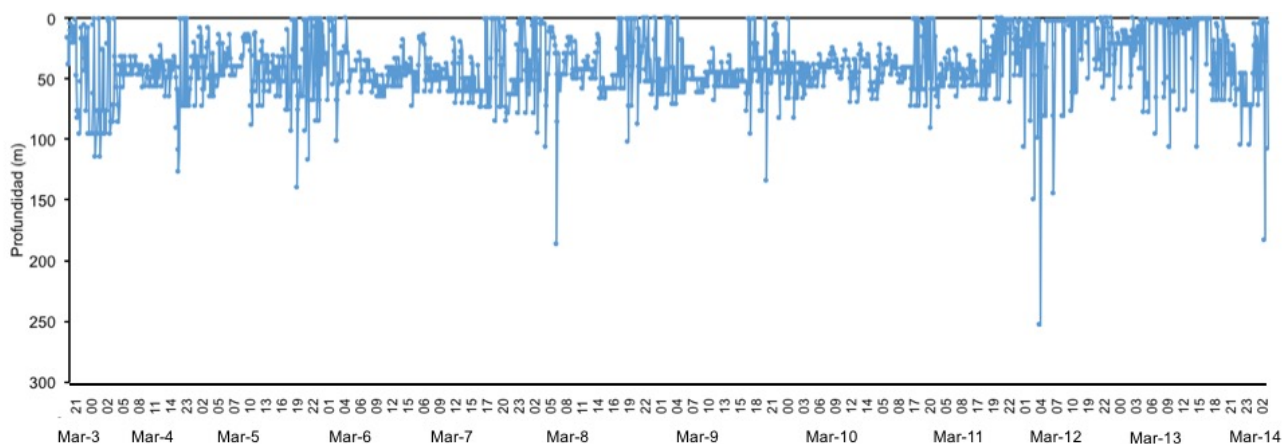


Figura 42. Preferencias en diferentes rangos de profundidad durante el día (06:00-19:00 h) y durante la noche (19:00-06:00 h) para el TMC SLew30.

El perfil de inmersiones indicó un patrón de movimientos tipo yo-yo por debajo de la termoclina que van desde 10 a 18 m. Los movimientos verticales son muy constantes con algunas inmersiones más profundas que van desde los 120–250 m. Se observó que del 11 al 14 de marzo 2019 los movimientos fueron más superficiales y también más amplio (Fig. 43-A-B).



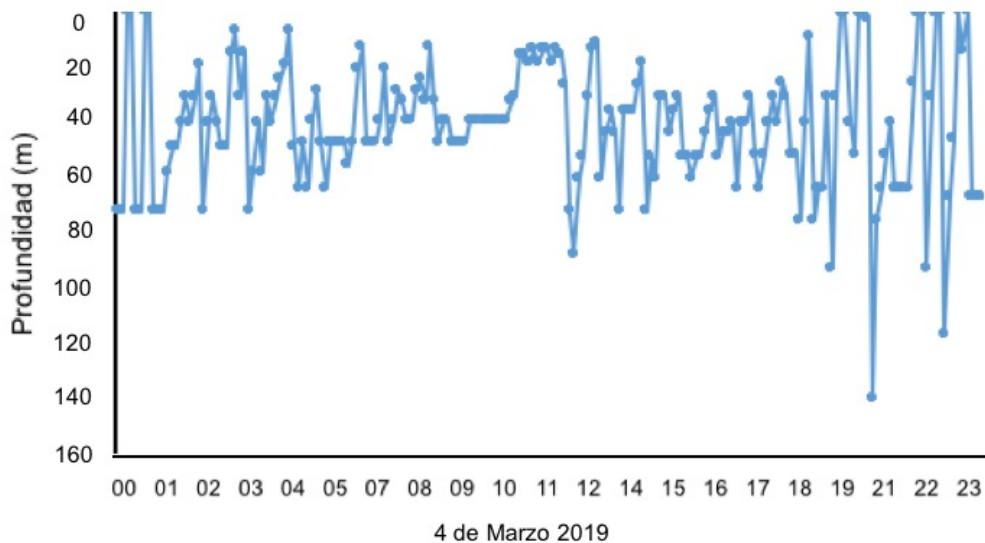


Figura 43. A. Movimientos verticales de TMC SLew30 en el AES. La fase nocturna se indica en color gris claro. B. Ciclo de 1 día de movimientos verticales, correspondiente al 4 de marzo de 2019.

El TMC hembra SLew50 registró una máxima profundidad de 253.5 m. Presentó una preferencia significativa entre los intervalos de 0–30 m de profundidad para ambas fases, permaneciendo el 78% en la fase diurna y el 75% en la fase nocturna, le sigue los intervalos de 30–60 m, donde permanece más tiempo durante el día que en la noche, sin embargo, para los demás intervalos las inmersiones fueron más amplias (0-250 m durante la fase nocturna. (Fig. 44).

El perfil de inmersiones indicó un patrón de movimientos tipo yo-yo muy cercano a la superficie (0-15 m), pero con buceos prolongados y profundos, alcanzando en algunos días hasta los 800 m de profundidad. En el ciclo de un 1 día se observó un marcado contraste entre la fase diurna y nocturna, con inmersiones más profundas durante las horas nictimerales (Fig. 45-A-B).

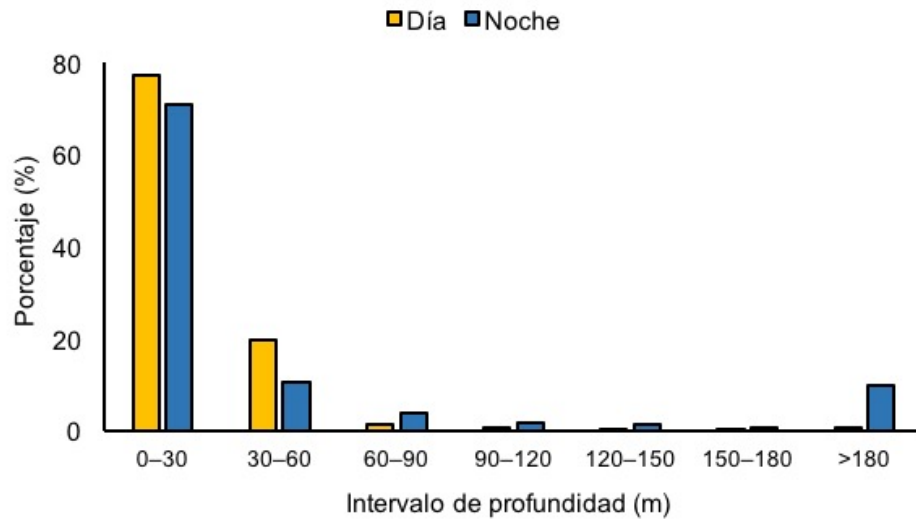


Figura 44. Tiempo empleado en diferentes rangos de profundidad durante el día (06:00-19:00 h) y durante la noche (19:00-06:00 h) para el TMC SLew50.

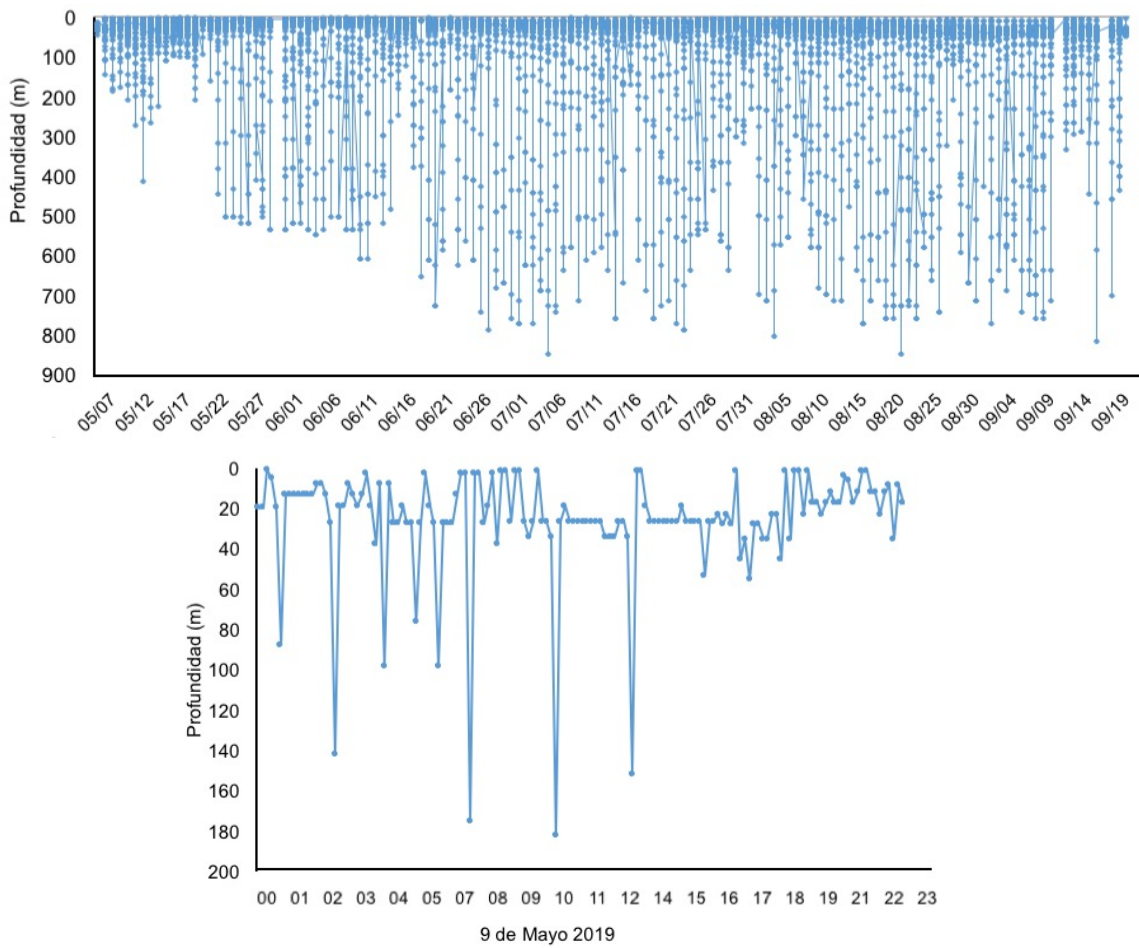


Figura 45. A. Movimientos verticales del TMC hembra SLew50. La noche indicada por el color gris claro. B. Primer plano de 1 día de movimientos verticales durante el 9 de mayo 2019.

### 8.11 Índice de residencia de *S. lewini* entre individuos y por sitios en el AR

Los TMC permanecieron en San Benedicto de 1-27 meses. En Roca Partida de 1-24. A nivel individual, el tiburón más residente fue SLew26, con un IR de 0.833 en Roca Partida E. Le siguen SLew20 y SLew21, con un IR de 0.614 y 0.492, respectivamente (Fig. 46).

El índice de residencia fue significativamente más alto en el sitio Cañón con un intervalo entre individuos de 0.009–0.575, seguido de Dedos de lava con 0.056–0.384. El menor IR, se presentó en Roca Partida W con un intervalo de 0.025–0.034. El TMC SLew26 presentó el mayor IR con 0.833 en Roca Partida E. Solamente cuatro TMC en San Benedicto residieron en múltiples receptores durante el estudio, los demás fueron detectados en uno o dos receptores solamente. (Fig. 46).

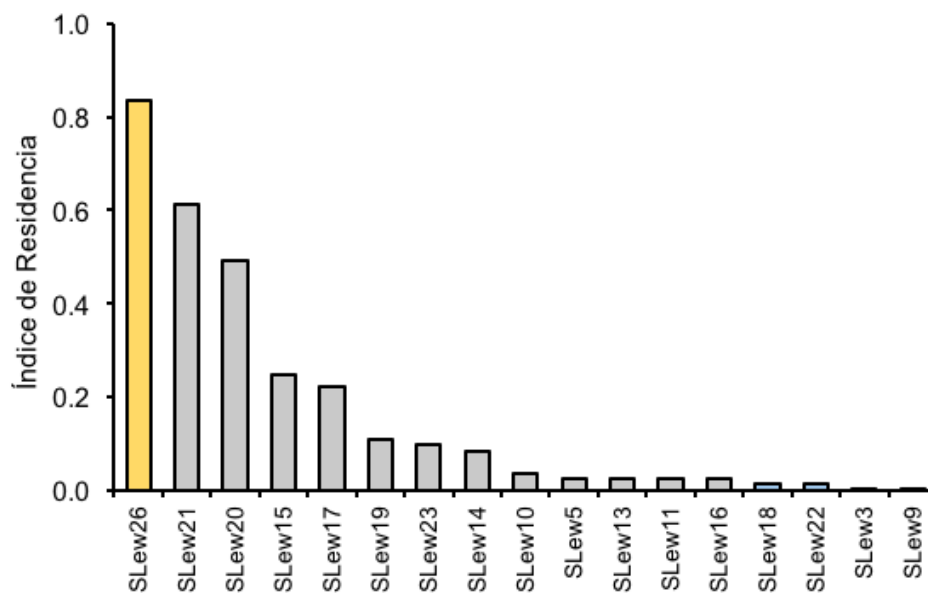


Figura 46. Índice de residencia por individuo en el AR. En colores se representa el sexo, el rosa= hembras, el azul= machos y el amarillo= indeterminado.

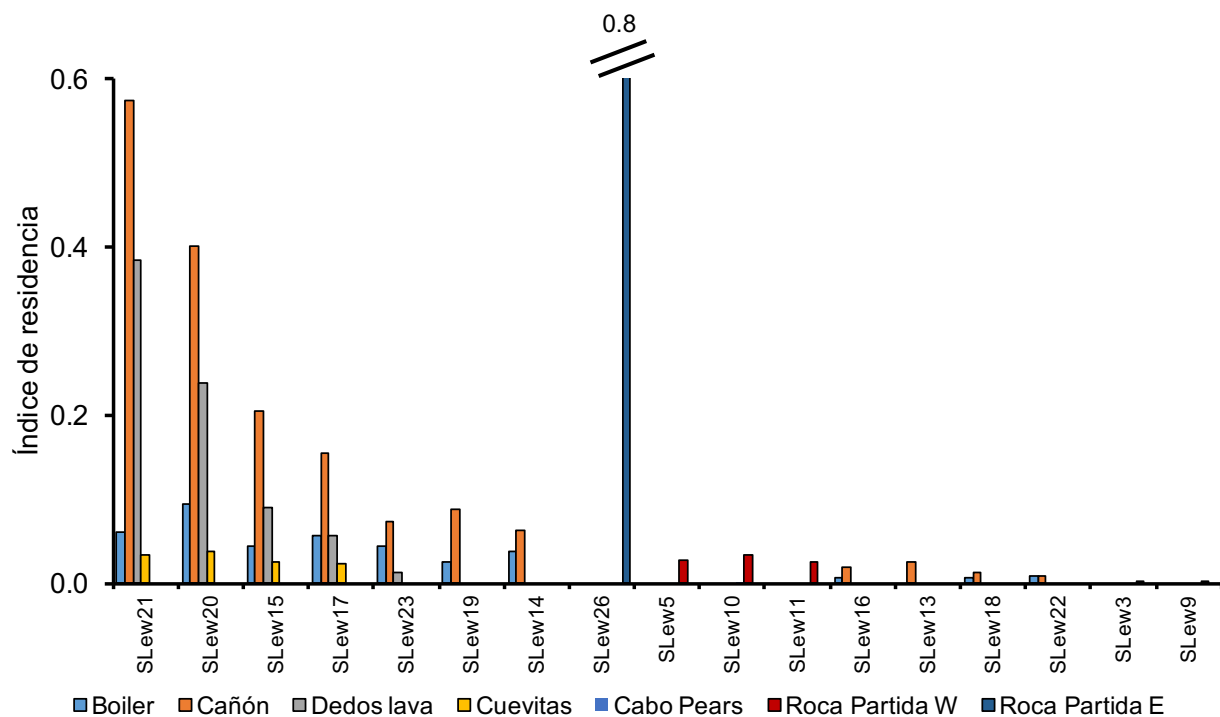


Figura 47. Índice de residencia obtenido por receptores comparando cada individuo en el AR.

### 8.12 Índice de residencia de *S. lewini* entre individuos y por sitios en el AES

Todos los TMC permanecieron en EBES, detectándose de 1-6 meses, sin residir en otros sitios de la región del GC. Los tiburones más residentes fueron SLew31 y SLew39 con un IR de 0.196 y 0.157, respectivamente y el individuo con menor IR fue SLew29 con 0.005 (Fig. 48).

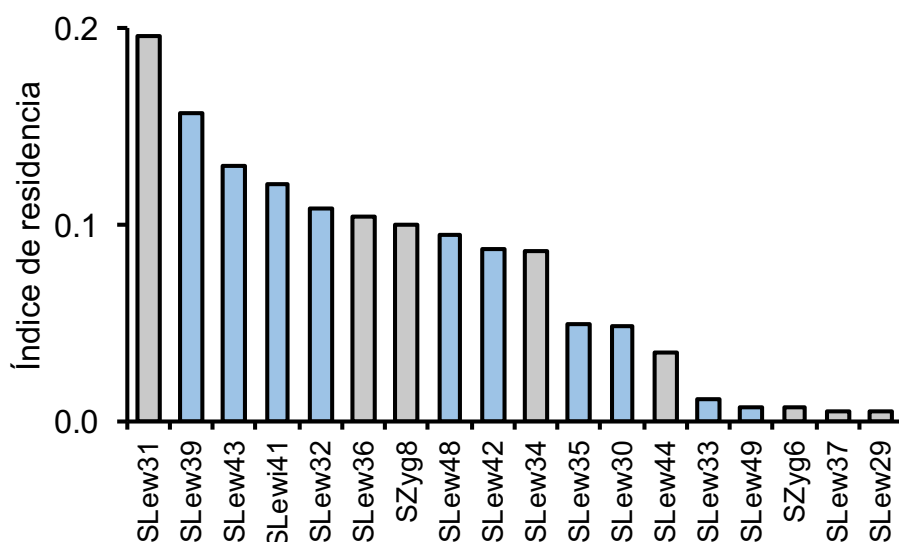


Figura 48. Índice de residencia por individuo en el AES. En colores se representa el sexo, el rosa= hembras y el azul= machos.

### 8.13 Preferencias ambientales de *S. lewini* en el AR

Se muestra el número de detecciones acústicas en comparación con el promedio obtenido de la temperatura superficial del mar a lo largo del periodo de estudio en Isla San Benedicto. Se puede observar una relación discreta con las detecciones y la temperatura fluctuando en un intervalo entre 23.5 y 29.9 ° C (Fig. 49). El tiburón martillo es una especie considerada tropical con preferencia de temperatura de 23-26° C por lo que su distribución y presencia puede estar relacionada a las fluctuaciones estacionales del AR.

En San Benedicto, no se observó una relación aparente entre el número de detecciones y la concentración de clorofila ( $\text{mg. L}^{-1}$ ), cuyas concentraciones fueron muy bajas oscilando entre un intervalo de 0.074 a 0.231  $\text{mg. L}^{-1}$  (Fig. 50).

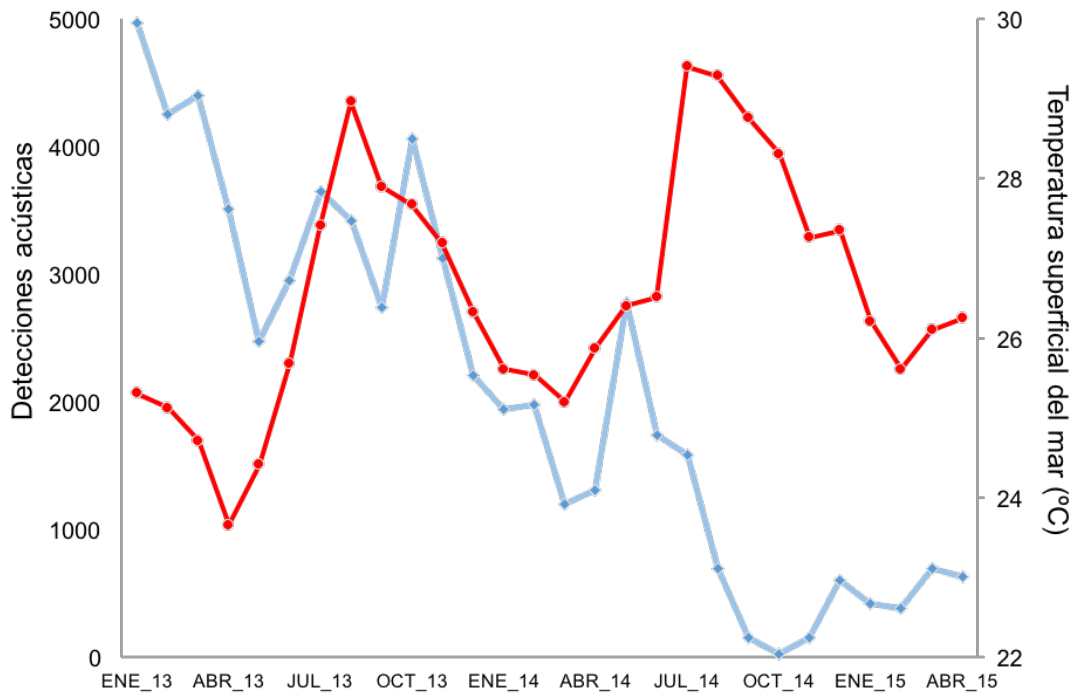


Figura 49. Muestra la relación en el número de detecciones (línea azul) obtenidas de los 11 tiburones martillo y la temperatura superficial del mar (línea roja) a lo largo del periodo de estudio en San Benedicto.

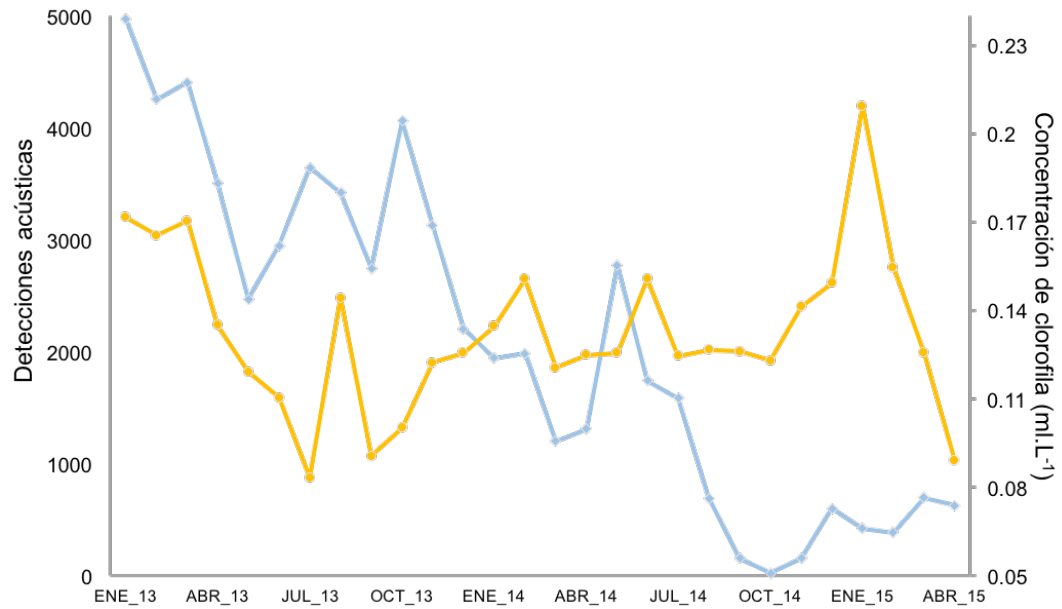


Figura 51.

Figura 50. Muestra la relación en el número de detecciones (línea azul) obtenidas de los 11 tiburones martillo y la concentración de clorofila (línea amarilla) a lo largo del periodo de estudio en San Benedicto.

De acuerdo con el Modelo Aditivo Generalizado, la temperatura de la superficie del mar, la salinidad, la velocidad de la corriente del océano hacia el norte y la altura de la superficie del mar fueron las variables ambientales más influyentes durante los movimientos hacia la montaña submarina de Bernoulli (Figura 51-52, Cuadro 8-9).

El tiburón navegó una distancia considerable desde Roca Partida migrando desde Roca Partida hacia el sur (18.9N a 18.225N) y longitud (-112.250W a -112.100W) mostrando influencia de la temperatura de la superficie del mar, la salinidad, la velocidad de la corriente oceánica hacia el norte y la superficie del mar. (Fig. 53-54-A-E).

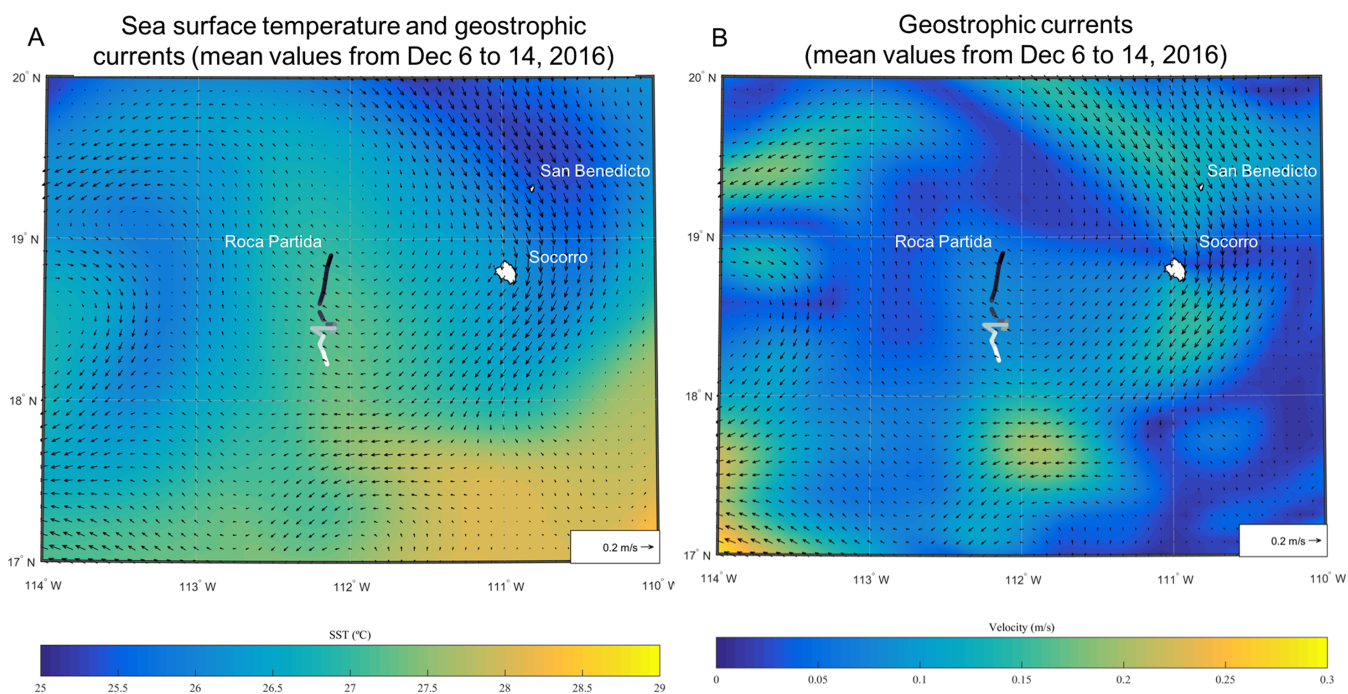


Figura 51-Figura 52. Trayectoria recorrida por TMC SLew30. A. Temperatura de la superficie del mar B. Corrientes geostróficas. Los datos de temperatura y corrientes corresponden a los promedios del 6 al 14 de diciembre de 2016.

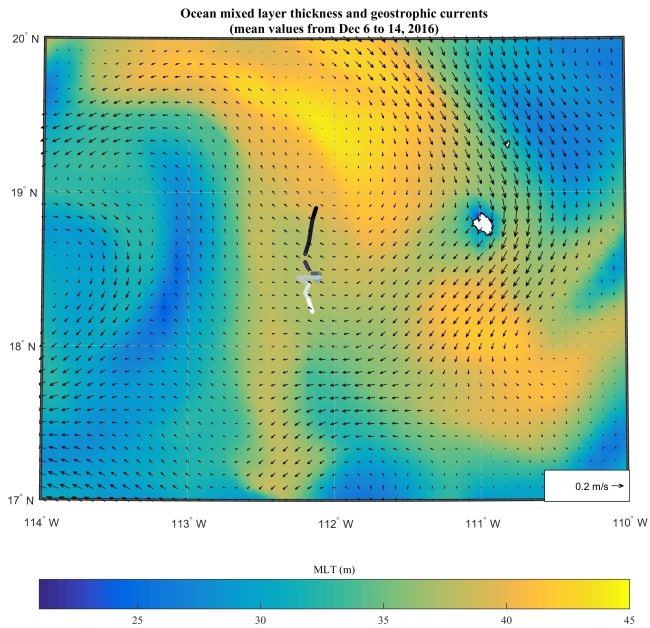


Figura 53. Trayectoria recorrida por TMC SLew30 mostrando la capa de mezcla (m) y velocidad de corriente geostrofica. Los datos de capa de mezcla y velocidad de corriente corresponden a los promedios del 6 al 14 de diciembre de 2016.

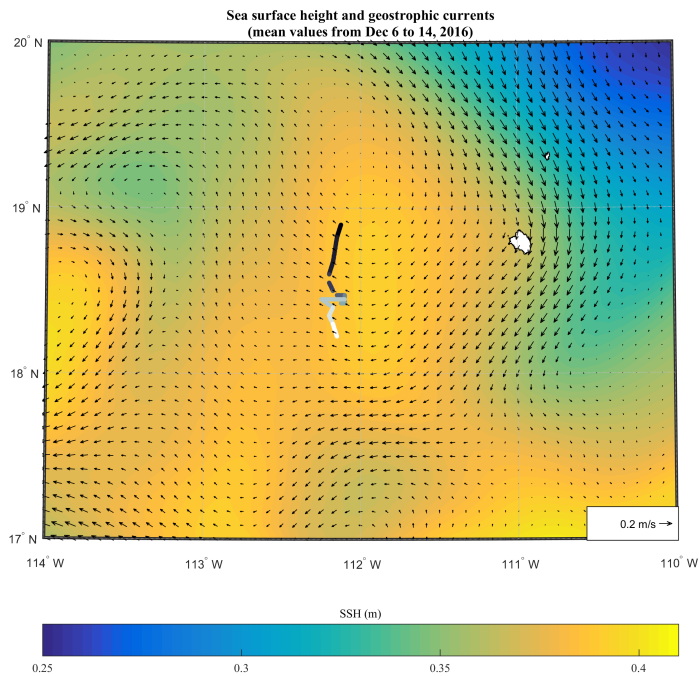


Figura 54. Trayectoria recorrida por TMC SLew30 mostrando la altura del nivel del mar (m) y velocidad de corriente geostrofica. Los datos de nivel del mar y velocidad de corriente corresponden a los promedios del 6 al 14 de diciembre de 2016.

Cuadro 8. Modelo aditivo generalizado de variables ambientales y la migración latitudinal del TMC SLew30 considerando el mejor modelo de predicción de acuerdo con el AIC.

Coeficientes:	Estimación estándar	Error	t valor	Pr(> t )
(Intercepto)	-1.122e+02	1.049e-03	-1.070e+05	< 2e-16 ***
Capa de mezcla	-3.108e-03	1.943e-03	-1.600e+00	0.11
Temperatura	-1.185e-02	2.462e-03	-4.814e+00	2.00e-06 ***
Vel. corriente norte	9.514e-03	1.338e-03	7.112e+00	4.28e-12 ***
Vel. Corriente este	-5.042e-03	3.584e-03	-1.407e+00	0.16
Salinidad	-4.001e-02	2.065e-03	-1.937e+01	< 2e-16 ***
Altura del mar	1.366e-02	2.287e-03	5.975e+00	4.56e-09 ***

Códigos de significancia: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
R-sq. (adj) = 0.601 Desviación explicada = 60.6%  
GCV = 0.00053331 Escala. = 0.0005255 n = 478

Cuadro 9. Modelo aditivo generalizado de variables ambientales y la migración longitudinal del TMC SLew30 considerando el mejor modelo de predicción de acuerdo con el AIC.

Coeficiente:	Estimación estándar	Error	t valor	Pr(> t )
(Intercepto)	-1.122e+02	1.049e-03	-1.069e+05	< 2e-16 ***
Temperatura	-8.735e-03	1.604e-03	-5.444e+00	8.36e-08 ***
Vel. Corriente norte	9.203e-03	1.184e-03	7.772e+00	4.85e-14 ***
Salinidad	-3.855e-02	1.647e-03	-2.340e+01	< 2e-16 ***
Altura del mar	1.147e-02	1.339e-03	8.564e+00	< 2e-16 ***

Código de significancia: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
R-sq. (adj) = 0.6 Desviación explicada = 60.4%  
GCV = 0.000532 Escala = 0.00052644 n = 478

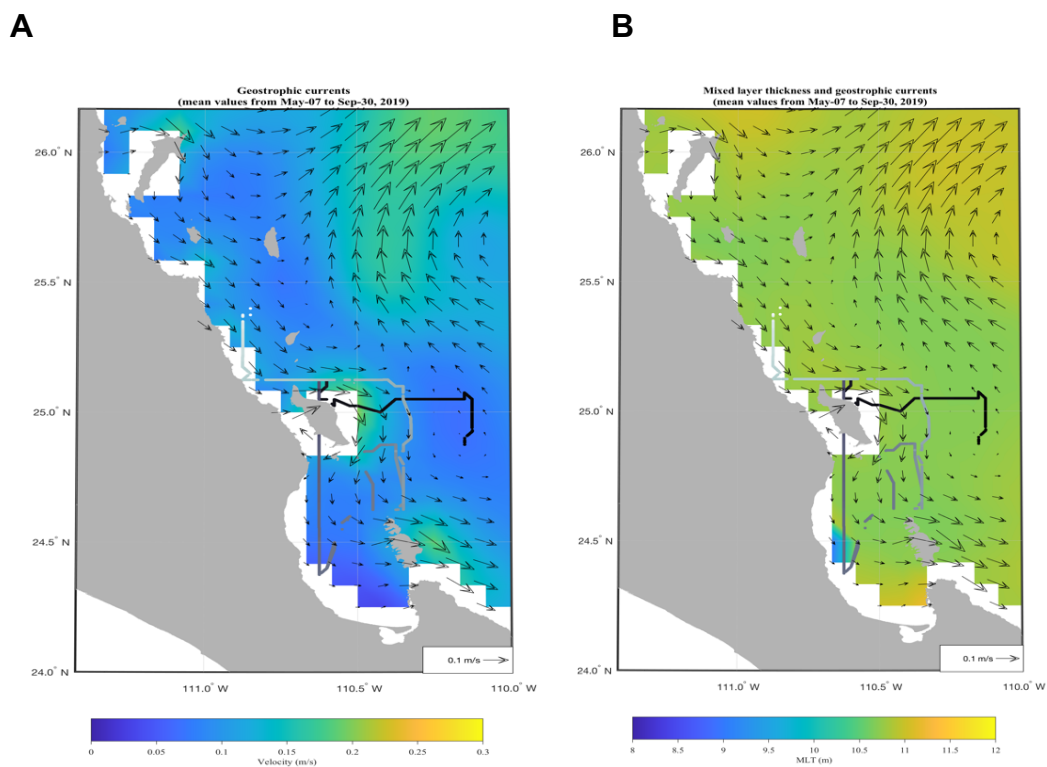
### 8.14 Preferencias ambientales de *S. lewini* en el AES

En el AES, TMC SLew50 migró hacia las islas del norte y luego regresó al sur de la isla de Espíritu Santo en profundidades donde la capa de mezcla fue similar oscilando entre los 10-10.5 y hacia la parte costera de la Bahía La Paz, donde la capa de mezcla fue más superficial con 9.5 m (Fig. 55).

La salinidad fue muy homogénea, con concentraciones entre 35.7 y 35.8 UPS, durante todo el trayecto, respecto a la temperatura superficial del mar, varió levemente,

durante los días de trayecto, en el inicio de su trayectoria, en EBES, la temperatura fue de 28° C, conforme fue migrando hacia el Norte la temperatura cambio hasta los 28.7° C, posteriormente cuando retornó y se encontraba en las zona costera de la bahía, la temperatura fue menor de 27.6°C. (Fig. 56).

Respecto a la velocidad de corriente y la direccionalidad de la corriente, se observa que en el inicio de su trayectoria, en el EBES, la velocidad se encontraba entre 0.1 y 0.15 m/s con la corriente direccionada hacia el sureste, cuando se movió al norte, la dirección de corriente estaba hacia el sur moderada, después cercano a la Isla San José, la corriente aumentó fluyendo al sureste, sin embargo, el TMC continuo, hasta las islas cercanas a Loreto, con la corriente fuerte y veloz dirigida hacia el sur, de regreso descendiendo con la corriente a su favor y una velocidad constante , después el flujo de corriente, vira nuevamente hacia el sureste, para finalmente hacia el sur de la Isla Espíritu Santo, cambiar hacia el este. (Fig. 56).



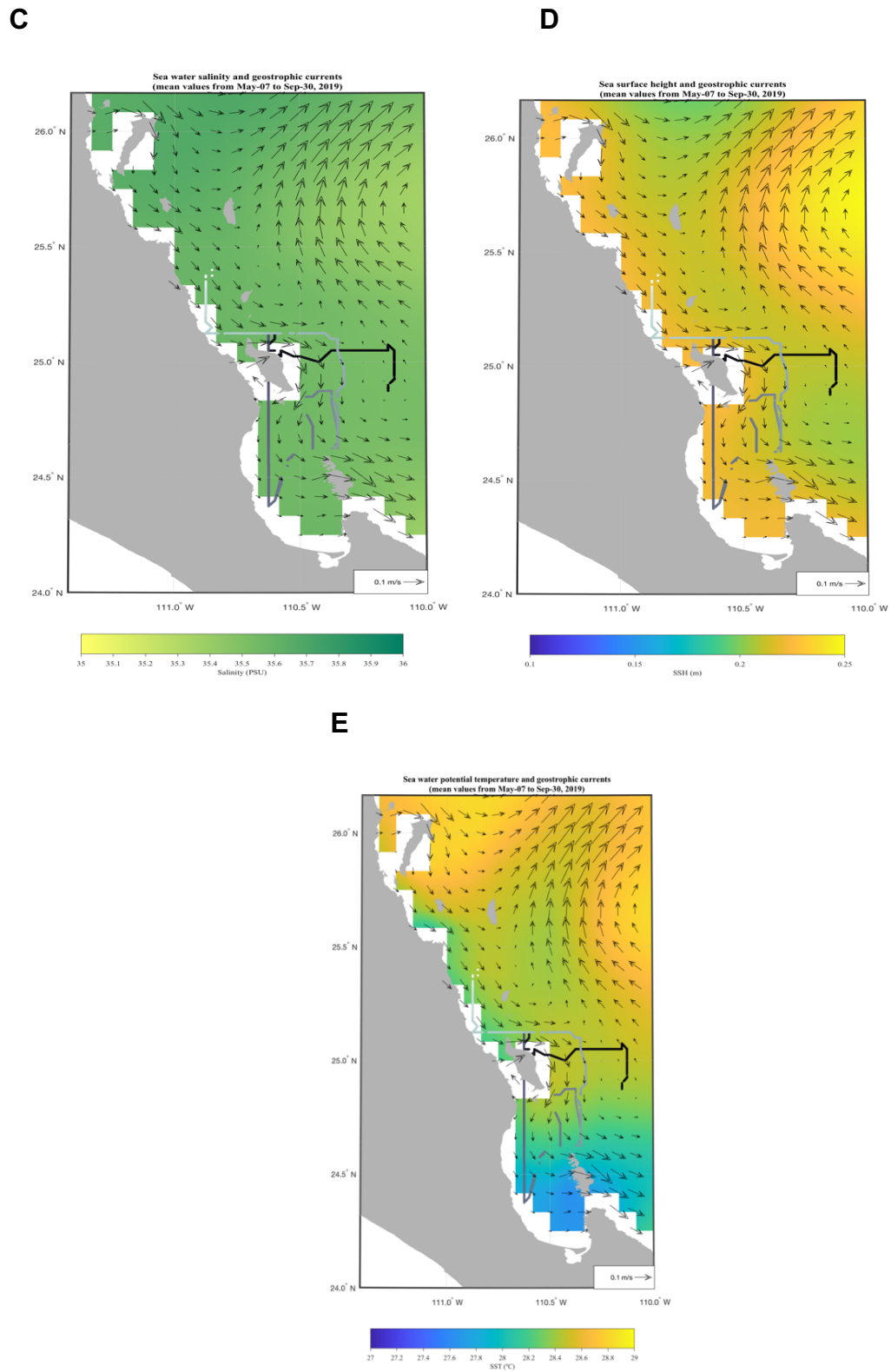


Figura 55. A. Mapa de la trayectoria recorrida por el TMC hembra SLew50, donde se muestran preferencias ambientales acordes a los promedios de su recorrido mayo 7 a septiembre 28 2019. A.

Capa de mezcla y dirección de corriente geostrófica, B. Salinidad del agua y dirección de corriente geostrófica. C. Corriente geostrófica, D. Altura del nivel del mar y E. Temperatura potencial del mar.

## 9. DISCUSIÓN

### 9.1 Capturas y marcaje general

El TMC *Sphyrna lewini* es una de las especies más importantes en la pesca comercial a escala artesanal e industrial en el Océano Pacífico mexicano (Bejarano-Álvarez *et al.*, 2011; Ketchum *et al.*, 2020), principalmente, para la comercialización de aletas y productos derivados al mercado asiático (Rose, 1998; Clarke, 2006; Musick & Musick, 2011), pero es altamente vulnerable debido a su bajo potencial de sobreexplotación (Baum *et al.*, 2003; Baum & Myers 2004), a sus estrategias reproductivas tipo K, caracterizadas por una madurez sexual tardía, fecundidad baja, crecimiento lento y gestación prolongada (Piercy *et al.*, 2007), tener distribución circuntropical, un comportamiento de agregación, un uso de hábitat costeros y oceánicos en diferentes estadios de vida (Klimley & Nelson, 1981; Hoyos-Padilla *et al.*, 2014; Salinas-de-León *et al.*, 2017) y a la degradación del ecosistema marino (Myers *et al.*, 2007; Sandin *et al.*, 2008). Lo que ha propiciado que, en los últimos 30 años, sus poblaciones hayan disminuido en un intervalo de 76-89% en algunas regiones del mundo (Hayes *et al.*, 2009; Baum & Blanchard, 2010; Gallagher *et al.*, 2014), por lo que recientemente se le considera una especie *en peligro crítico* a nivel mundial por la UICN (Rigby *et al.*, 2019) y sea clasificada en el apéndice II en CITES, 2012.

En México está protegida por un periodo corto de veda del 1 de mayo a 31 de julio a partir de 2012 ante la NOM-029-PESC-2006 (DOF, 2007, 2014). No obstante, la falta de políticas de protección total en la gestión y manejo pesquero y la regulación insuficiente en algunas áreas como los montes submarinos y los ambientes costeros como manglares e isla oceánicas como corredores marinos interinsulares han propiciado la reducción significativa de sus poblaciones (Klimley *et al.*, 2005; Hoyos-Padilla *et al.*, 2014; Ketchum *et al.* 2020).

## 9.2 Detecciones y estacionalidad en el AR y AES

En el AR, se obtuvieron alrededor de 65,000 detecciones acústicas, provenientes de 17 TMC marcados, con una proporción sexual de 14 hembras por dos machos y un individuo indeterminado, con un intervalo de tallas entre los 150-300 cm de LT. En cambio, para el AES, se obtuvieron 8,700 detecciones con individuos más pequeños, entre los 107-174 cm de LT, y una proporción sexual balanceada de 15 hembras por 13 machos. Considerando que los machos maduran sexualmente a los 150-230 cm de LT y las hembras lo hacen a los 200-250 cm de LT, con una talla de primera maduración  $L_m = 225$  cm LT (Cortés, 2000; Piercy *et al.*, 2007). La población de TMC de AR está conformada de individuos subadultos y adultos, mientras que en el AES la mayoría fueron juveniles y subadultos.

Esto es un indicador del comportamiento de segregación de *S. lewini* donde se ha reportado que suelen segregarse por sexo y tallas en sitios de agregación de juveniles y adultos (Klimley, 1987). En el PET y el Golfo de California, se han registrado migraciones costeras de TMC hembras para parir a sus crías (Torres-Huerta *et al.*, 2008; Hoyos-Padilla *et al.*, 2014; Ketchum *et al.*, 2014a). Los neonatos se desarrollan en aguas costeras hasta su estadio juvenil (Klimley & Nelson, 1984) y cuando son subadultos y adultos, se mueven a un ambiente semi-oceánico (Hoyos-Padilla *et al.*, 2014; Salinas-de-León *et al.*, 2017).

En el AR, se han observado grandes cardúmenes de hembras, en particular en la Isla San Benedicto, esta estrategia de segregación por sexo, les permite a las hembras evitar la depredación en zonas centrales de su área de distribución formando grandes cardúmenes y además les permite interactuar socialmente y aparearse (Klimley & Nelson, 1984, Klimley, 1985; Hearn *et al.*, 2010), por lo que posiblemente en San Benedicto existan áreas centrales de refugio como el sitio Cañón, que tiene una estación de limpieza donde se agregan las hembras como mecanismo de protección y para maximizar sus oportunidades de limpieza. En contraste con el AES, donde la proporción de sexo es balanceada y está conformada por juveniles y subadultos, por lo que en esta área aún no existe esta segregación, este comportamiento es similar a lo

reportado en otras áreas costeras como La Reforma y Bahía de La Paz (Rodríguez-Arana, 2018)

### **9.3 Movimientos diarios de *S. lewini* en el AR**

En el AR, los TMC presentaron un patrón de movimientos diarios, el cual es más evidente en la Isla San Benedicto, donde los TMC marcados permanecieron alrededor de la isla detectándose en los cuatro receptores instalados durante las horas diurnas (07:00-19:59 h), en cambio, el número de detecciones disminuye notablemente durante la fase nocturna (20:00-06:59 h). Entre sexos, presentaron un patrón similar de movimientos diarios, pero entre sitios, si se observaron pequeñas diferencias. Los tiburones que se detectan en los receptores de Cañón y Dedos de Lava ubicados al sur de la Isla presentaron el mayor número de detecciones a partir de las 10:00 h hasta las 12:00 h, que comenzó a disminuir gradualmente hasta las 18:00 h, a partir de esa hora, las detecciones son mínimas, por lo que se mueven fuera del intervalo de detección hacia el ambiente pelágico probablemente para alimentarse y regresan diariamente alrededor de las 10:00 h. En el receptor de Boiler, el mayor número de detecciones se dio entre las 12:00-16:00 h, detectándose de 10:00-18:00 h y en Cuevitas, el mayor número de detecciones fue de las 13:00-18:00 h, los tiburones también se mueven a partir de las 18:00 h y regresan igual a partir de las 10:00 h.

Este patrón ha sido reportado en el AES, donde observaron que los martillos presentaban un patrón de movimiento diario relacionado al ciclo circadiano, residiendo en cardúmenes durante la fase diurnas en la Isla Las Animas y EBES y se alejaban del monte submarino de 4-20 km en la fase nocturna, señalando que los martillos utilizan rutas específicas para llegar a sus zonas de alimentación y regresan paralelamente por estas rutas al día siguiente (Klimley & Nelson *et al.*, 1984; Klimley *et al.*, 1988 y Klimley *et al.*, 1993, Klimley, 2005).

En otras regiones insulares del PET, este patrón de movimientos también ha sido estudiado, como en Isla Malpelo (Bessudo *et al.*, 2011a) y las Islas Galápagos, donde reportan una preferencia significativa a permanecer en todos los sitios de las Islas

durante la fase diurna y para ambas temporadas (cálida y fría) presentando sus primeras detecciones a las 06:00 h y alejándose a partir de las 18:00 h (Hearn *et al.*, 2010; Ketchum *et al.*, 2014a). En otro estudio se demostró que los TMC realizan excursiones diarias de forrajeo focal (<50 km) presuntamente para alimentarse de sus presas predilectas, los cefalópodos oceánicos (Ketchum *et al.*, 2014a) y por último, en Isla del Coco, se encontró que los TMC se mueven dentro y fuera del AMP durante las excursiones nocturnas se mueven dentro y fuera del AMP de Isla del Coco en un radio de 22 km (Nalesso *et al.*, 2019).

En Roca Partida el patrón de movimientos diarios abarcó la fase diurna y algunas horas de la fase nocturna que va de las 20:00-00:00 h, lo que contrasta con lo reportado en otras regiones insulares del PET donde el patrón es evidente, en Roca Partida en cambio, los martillos permanecieron más tiempo cercanos a la isla detectándose desde las 10:00-00:00 h, registrando el mayor número de detecciones de las 17:00-00:00 h, a partir de esa horas las detecciones disminuyen drásticamente, por lo que no hay un patrón de movimientos tan claro como en San Benedicto, lo cual podría estar relacionado con las características propias del islote Roca Partida, que se encuentra alejado y con una superficie de apenas 0.001 km<sup>2</sup>, posiblemente con una gran disponibilidad de presas potenciales cercanas al islote y por ende al intervalo de intervalo de detección de los dos receptores, por lo que, no tienen que recorrer tanta distancia para alimentarse. En Isla Malpelo, Bessudo *et al.* (2011a), atribuyen un alto número de detecciones en la fase nocturna relacionada a la alta concentración de nutrientes y clorofila-a (Rodríguez-Rubio *et al.*, 2007), que permite una alta disponibilidad de alimento en la isla. Por lo que, al incrementar la abundancia de alimento cercano a la isla, los TMC no tienen la necesidad de moverse lejos para alimentarse.

#### **9.4 Movimientos diarios de *S. lewini* en el AES**

En el AES se observó que el patrón de movimientos diarios no fue evidente, ya que comprendió la fase diurna y también algunas horas de la fase nocturna, detectándose principalmente de 13:00-02:00 h en hembras y para machos de las 16:00-02:00 h, presentando incluso una mayor presencia en las horas nocturnas de 20:00-

02:00, para ambos casos. Estos resultados contrastan con los trabajos reportados por Klimley & Nelson *et al.*, (1984), Klimley *et al.*, (1993) y Klimley, (2005) donde señalan que todos los TMC se alejan de EBES entre las 18:00-20:00 h, y regresan entre las 04:00-07:00 h del siguiente día evidenciando un claro patrón de movimientos entre la fase diurna y nocturna en EBES y Las Animas. Esta discrepancia puede deberse, a que en los trabajos de Klimley y colaboradores, todos los individuos considerados fueron adultos, en cambio en este estudio, los TMC marcado fueron juveniles y subadultos, por lo que se pudieran estar alimentando de presas disponibles cercanas a intervalo de detección como peces, pequeños crustáceos y rayas, alejándose menos del sitio como lo reportaron Hoyos-Padilla *et al.* (2014) en Bahía La Paz donde mencionan que los movimientos de juveniles son más locales, permaneciendo el aguas costeras y poco profundas y se alimentan de presas con bajo contenido calórico y cuando son subadultos se alejan a zonas más profundas para alimentarse de calamares que les proveen mayores reservas energéticas.

Otra posible explicación es la gran productividad biológica alrededor de EBES que favorece a todos los eslabones tróficos, Klimley (2005) observó que en el monte submarino existe el “efecto de masa”, donde al pasar por montículos se generan corrientes que causa un disturbio hidrodinámico con giros y vórtices, este fenómeno oceanográfico favorece el ascenso de nutrientes a través de las surgencias; por lo tanto al tener alimento disponible los movimientos nocturnos hacia zonas profundas son menos frecuentes.

A nivel de individuos, podemos observar que algunos TMC, se detectan constantemente en todo el ciclo circadiano, mientras otros se detectan en ambas fases hasta las 02:00 h, disminuyendo cuando regresando de sus excursiones al día siguiente entre las 06:00-09:00 h.

### **9.5 Movimientos a mediana escala de *S. lewini* en el AES**

Respecto al marcaje y recaptura del TMC, se recapturaron tres organismos por pescadores artesanales a los pocos días después de su captura y marcaje, lo que representó un porcentaje de recaptura del 9.7%. Permanecieron en libertad poco

tiempo de 20 a 86 días, siendo todos capturados hacia el sur y sureste desde el punto de partida EBES encontrando una conectividad en diferentes zonas del GC (Bahía La Paz, La Ribera, Cabo Pulmo en B.C.S. y Aguamitas en Sinaloa). La hembra recapturada, recorrió una distancia de 163 km, mientras que los dos machos, recorrieron 138 y 214 km, respectivamente.

El TMC macho juvenil que recorrió más distancia fue recapturado en Aguamitas, Sinaloa cercano a La Reforma, un área de crianza de *S. lewini*, que se caracteriza por ser amplia, con sustrato limoso y poca profundidad (Rodríguez-Arana. 2018), por lo que este movimiento nos da un indicio de la interconectividad entre el EBES y el área de crianza de La Reforma. Lo cual, a su vez, es lamentable, ya que en La Reforma operan flotas pesqueras de menor y mayor altura con diversos artes de pesca que se dedican principalmente a la extracción de camarón (Salomón-Aguilar *et al.*, 2009) e impactan directa y negativamente al TMC al ser capturados por las redes de arrastre camaroneras en el área de crianza, afectando sus poblaciones.

El porcentaje de recaptura que obtuvimos en este estudio fue alto considerando el número de organismos capturados y marcados con marcas convencionales que fue de 31 individuos. En comparación con otros estudios, Trejo-Ramírez (2016), en Bahía de La Paz, obtuvo un porcentaje de recaptura de 3.5%, de los 230 tiburones bironche *Rhizoprionodon longurio* que se marcaron; mientras que, en La Reforma, Sinaloa, Rodríguez-Arana (2018), registró un porcentaje mayor de recaptura del 23.5% con 8 recapturas de 34 *S. lewini* marcados. En otro estudio, en el área de crianza de Rebalcito, Jalisco, reportaron un porcentaje de recaptura del 57% con TMC juveniles (Rosende-Pereiro & Corgos, 2018).

### **9.6 Movimientos interinsulares de *S. lewini* en el AR y AES**

Los TMC fueron detectados acústicamente en seis de los 13 receptores instalados en diferentes sitios de las islas, en particular en todos los sitios de San Benedicto, en los dos receptores de Roca Partida; sin embargo, 16 de los 17 tiburones,

no presentaron movimientos interinsulares, sino que permanecieron en las islas donde fueron marcados, solo se observó un movimiento interinsular. El tiburón SLew9, una hembra de 200 cm de LT, que fue marcada en San Benedicto, pero fue detectada del 5 al 6 de mayo de 2009 en el receptor de Roca Partida Oeste, con 23 detecciones, recorriendo una distancia estimada de 137 km.

Este movimiento interinsular de San Benedicto a Roca Partida nos da evidencia de que algunos TMC pueden realizar movimientos interconectados entre islas de manera esporádica entre San Benedicto a Roca Partida y posiblemente entre las demás islas del AR. Realizando migraciones de trayectos considerados como distancia media (50-300 km) de acuerdo con la clasificación de tipos de movimiento basado en la distancia que los TMC recorren en la RMG propuesta por Ketchum *et al.*, (2014a).

En otras islas oceánicas del PET, se han registrado movimientos interinsulares del TMC, entre Isla Malpelo y la Isla del Coco, donde a través de marcas satelitales estudiaron los movimientos entre individuos, sugiriendo que presentan una amplia variabilidad en la direccionalidad de los movimientos que pudieran estar relacionados con la disponibilidad de hábitats como montes submarinos distribuidos en el PET y a la dinámica oceánica (Bessudo *et al.*, 2011a).

Ketchum *et al.* (2014b), también observaron que los TMC se movían entre hábitats insulares interconectados, como, por ejemplo; de la Isla Darwin a la Isla del Coco y de regreso, y también de Wolf a la Isla del Coco y de Darwin a Malpelo. Hearn *et al.* (2010), también reportan movimientos interinsulares, entre la Isla Wolf y Darwin y entre sitios en la RMG y que tienen preferencias a cierto sitios considerados puntos calientes de biodiversidad con características oceanográficas específicas y donde abundan depredadores topos.

Recientemente, Nalesso *et al.* (2019), reportan también movimientos interinsulares entre el corredor migratorio Coco, Malpelo y Galápagos, y mencionan que las poblaciones de martillos de Islas Galápagos e Isla Malpelo utilizan esta Isla como

punto de navegación o de tránsito, demostrando así que los tiburones pueden formar una red de puntos calientes de biodiversidad en corredores marinos del PET.

En el AES, los 16 TMC marcados con transmisores acústicos fueron detectados en el receptor instalado en el EBES, detectándose únicamente alrededor del AES, sin detectarse en otros sitios de la red de 18 receptores en Bahía de La Paz o los 13 en Cabo Pulmo. En el AES, se obtuvieron 8, 667 detecciones, que, en comparación con las obtenidas en AR, solo representaron un 13% del total de detecciones. El número tan bajo de detecciones se debió a que el receptor de EBES tuvo una falla en la batería, por lo que dejó de grabar información acústica a partir del 8 de mayo de 2019, que fue la última detección registrada. Sin embargo, estos resultados nos dan un indicio de la alta residencia que existe en el AES.

### **9.7 Movimientos horizontales y verticales a gran escala de *S. lewini* en el AR**

Estos movimientos a gran escala fueron obtenidos por transmisores satelitales tipo MiniPat, que logramos colocar en dos TMC, por medio de marcaje externo, uno en suroeste de Roca Partida y otra en el sitio Cañón, San Benedicto. En Roca Partida, se registró la trayectoria de SLew24, un TMC macho de 240 cm de LT, que realizó una larga trayectoria desde el sur de Roca Partida donde se le colocó la marca hasta la parte oeste del monte submarino Bernoulli, migrando una distancia de 148 km en nueve días en dirección sur realizando dos tipos de comportamientos migratorios: a) movimientos direccionales con un patrón oscilatorio de movimientos verticales continuos y b) movimiento erráticos o no direccionales con inmersiones verticales donde permaneció la mayor parte del tiempo cercano a la capa de mezcla (30-40 m).

El patrón de inmersiones fue con movimientos verticales más profundos y amplios durante la fase nocturna en comparación con la fase diurna, principalmente durante los primeros días, no se observó un patrón diario de inmersiones. Jorgensen *et al.* (2010), sugieren que estas inmersiones particulares se llevan a cabo para optimizar sus oportunidades de caza persiguiendo a sus presas y que los movimientos oscilantes

son para navegar, detectando con mayor facilidad los campos geomagnéticos en el sustrato.

Es posible que el tiburón martillo se estuvo alimentando durante la fase nocturna en el oeste del islote de Roca Partida y subsecuentemente se movió hacia otro hábitat realizando inmersiones poco profundas y cercanas a la termoclina. En relación con lo anterior, Bessudo *et al.* (2011), observaron a través de censos visuales que los tiburones permanecen justo debajo de la termoclina tanto en la temporada cálida como la fría, aunque señalan que estos gradientes térmicos no son limitantes para el tiburón martillo.

En San Benedicto, se registró la trayectoria de SLew53, un TMC hembra de 250 cm de LT, que realizó una pequeña trayectoria alrededor de la Isla San Benedicto, migrando a la parte noroeste y eventualmente retornando. Recorrió una distancia de 113 km realizando movimientos direccionales y un patrón vertical similar al del TMC marcado en Roca Partida, con movimientos oscilatorios en forma de yo-yo. Alcanzó una profundidad máxima de 980 m, con una preferencia de entre los 0-60 m, con movimientos oscilatorios más amplios durante la noche, respecto al día, además, toleró un gradiente de temperatura entre los 5-25 °C, con una notable preferencia a permanecer lo mayor parte del tiempo entre los 23-25 °C.

Estudios similares señalan que los martillos siguen un patrón particular de geomagnetismo que les permite orientarse mientras hacen recorridos a corta y gran distancia permitiéndoles seguir corredores marinos (Klimley & Nelson 1984; Klimley, 1993).

La variabilidad en la direccionalidad de movimientos puede deberse a los diversos hábitats disponibles en el Archipiélago de Revillagigedo, donde existen 11 montes submarinos verificados. Amante & Eskins (2009) en su estudio de batimetría en el Parque Nacional de Revillagigedo, señalaron que pueden existir cerca de 35 montes submarinos en el archipiélago, además de una dinámica oceánica particular que

confluye en la zona, que permite que se muevan entre hábitats isleños conectados siguiendo trayectoria y corredores marinos posiblemente para maximizar sus oportunidades de alimentación.

Los resultados de movimientos verticales obtenidos por las marcas MiniPAT, fueron oscilatorios en forma de yo-yo, presentando una preferencia a permanecer entre los 30-60 m, lo que coincide con los estudios de Bessudo *et al.* (2011b) en Isla Malpelo; Ketchum *et al.* (2014a) en la RMG. Donde señalan que algunos factores ambientales, como los cambios en las condiciones oceanográficas, la disponibilidad de presas y la distribución, pueden influir en los movimientos verticales mostrados por una especie en diferentes momentos y ubicaciones (Schaefer & Fuller, 2002; Sepulveda *et al.*, 2010). Los tiburones martillo están asociados a las características batimétricas como montes submarinos, cordilleras, bordes, y a las condiciones oceanográficas como corrientes, termoclina y profundidad (Klimley *et al.*, 1993; Hearn *et al.*, 2010; Ketchum *et al.*, 2014b). En este estudio, encontramos que la capa de mezcla y la temperatura influyen en los movimientos verticales.

Estos tipos de movimientos podrían estar asociados a la depredación o para orientarse en aguas abiertas durante la noche (Klimley *et al.*, 1993; Jorgensen *et al.*, 2009). Es interesante notar que los movimientos verticales durante los primeros cuatro días fueron más profundos que los días subsiguientes. Ketchum *et al.* (2014b) encontraron evidencia de movimientos altamente interconectados entre islas y montes submarinos entre las islas Wolf y Darwin, en la RMG. Klimley (1985) sugiere que los tiburones martillo en EBES permanecen en cardúmenes cuando están cerca de las islas o los montes submarinos y cuando migran largas distancias lo hacen individualmente hasta llegar cerca del monte EBES.

Las migraciones a larga distancia realizadas por las hembras están relacionadas con el embarazo cuando las hembras realizan migraciones estacionales hacia aguas costeras para dar a luz (Hearn *et al.*, 2010, Hoyos-Padilla *et al.*, 2014, Salina-de León *et al.*, 2017). Pero también puede realizar movimiento interconectados entre islas o

montes submarinos (Bessudo *et al.*, 2011a; Ketchum *et al.*, 2014a). En las islas Revillagigedo se han registrado aproximadamente 35 montes submarinos con relieves de más de 1000 m de profundidad. Se sabe que estos cuerpos volcánicos submarinos son puntos calientes para la biodiversidad marina (Boehlert & Genn, 1987; Worm *et al.*, 2003).

En este estudio, el tiburón macho marcado emigraba entre el hábitat interconectado y nadaba a gran distancia desde el islote Roca Partida hasta el monte submarino Bernoulli y posiblemente hasta otro monte submarino en dirección oeste utilizando potencialmente estos sitios como ejes de dispersión para referencia geográfica. Este comportamiento puede optimizar las oportunidades de alimentación y/o la interacción social. Estudios previos realizados cerca de las islas Malpelo y Cocos en la RMG mostraron que *S. lewini* exhibe un patrón de movimiento altamente interconectado entre islas y montes submarinos (Hearn *et al.*, 2010; Bessudo *et al.* 2011; Ketchum *et al.*, 2014a).

Esta atracción particular de los tiburones martillo a los montes submarinos es evidente en otras regiones como EBES (Klimley *et al.*, 1993) y en las Islas Galápagos (Ketchum *et al.*, 2014a), donde los autores sugieren que durante el día se utiliza como refugio social. y como una estación de limpieza con la propuesta de eliminar los parásitos de los peces más limpios (Oliver *et al.*, 2011) y por la noche salen a alimentarse. Por ejemplo, en la Isla del Coco, los tiburones pueden estar utilizando la cadena de montañas submarinas a lo largo de la cresta de los Cocos, extendiendo sus movimientos hacia el suroeste de la isla hacia el Archipiélago de Galápagos (Nalesso *et al.*, 2019). Aparentemente, estos tiburones exhiben topotaxis geomagnética para la navegación utilizando la lava ascendente en el fondo marino como autopistas geomagnéticas (Klimley, 1993; Klimley, 2015).

Las dinámicas oceánicas asociadas a las corrientes y el rango de temperatura preferencial podrían funcionar como un amortiguador, lo que permite mejorar la disponibilidad de presas al tiburón martillo cuando se migran a otros hábitats

adyacentes. El tiburón macho marcado en Roca Partida presentó influencia de las variables de temperatura, la salinidad, la velocidad de la corriente norte mientras estuvo migrando.

### **9.8 Movimientos horizontales y verticales a gran escala de *S. lewini* en el AES**

Jorgensen *et al.* (2009), utilizaron un transmisor satelital PAT en 2004, analizaron el perfil de movimientos verticales encontrando que los tiburones pueden tolerar amplios gradientes de temperatura y pasar la capa mínima de oxígeno tolerando concentraciones muy bajas de oxígeno en cortos periodos de tiempo, sugiriendo que este tipo de inmersiones verticales las realiza para maximizar sus oportunidades de depredación alcanzando profundidades de hasta 980 m.

En el presente estudio, se analizó la trayectoria horizontal de un TMC marcado en EBES a lo largo de la costa oeste del GC, el cual fue marcado en EBES, y siguió una ruta amplia hacia el sur del GC, saliendo hasta el Bajo San Jaime, donde se mantiene a profundidades bajas y realizando dos tipos de movimientos: direccionales y erráticos, después regresando después a la Bahía La Paz, y migra hacia la parte norte del GC, terminando su ruta en una parte central del GC.

En el trabajo de Hoyos-Padilla *et al.* (2014), le colocaron una marca de archivo a otra hembra juvenil, en Bahía de La Paz, y encontraron que siguió una ruta a lo largo de toda la costa occidental del GC, y visitó varias islas hasta la frontera norte de la península de B.C.S. para ser recapturada en Bahía La Paz.

En el 2019, se colocaron dos marcas satelitales MiniPAT a una hembra y un macho, registrándose que se dirigió hacia el norte visitando varias islas primero cerca de La Animas y Loreto, al final de su trayectoria, vuelve a regresar a Bahía de La Paz, observándose de nuevo una fidelidad al sitio. En el análisis de área de distribución acorde a las tres marcas satelitales se observó que el centro del movimiento fue en los alrededores de AES, Las Animas, Isla San José y las Islas del sur de Loreto

### 9.9 Índice de residencia de *S. lewini* entre individuos y por sitios en el AR

El mayor nivel de residencia en el AR, se registró en Roca Partida E, con un IR 0.833, sin embargo, se debe de considerar que este resultado estuvo en función del único TMC que fue registrado en este sitio, el cual fue marcado el 20 de febrero de 2018 y terminó de registrarse el 15 de abril de 2018 detectándose en 50 días de los 54 de monitoreo, por lo que en el estudio se tuvo que hacer un IR específico, ya que el último registro de los TMC marcados previamente fue en 2015, es decir; tres años antes de que fuera marcado este último individuo.

En San Benedicto fue donde se obtuvieron los niveles de residencia más altos entre individuos, en particular en las estaciones de limpieza de El Cañón y Dedos de lava. La alta residencia de hembras martillo en el sur de la isla constituye un importante refugio y sitio de agregación para esta especie, es probable que por su origen volcánico estos sitios cercanos justamente al volcán Bárcena, tengan características geomagnéticas particulares que atraigan a los TMC. Klimley & Nelson (1984) señalaron que las agregaciones de martillo en EBES, se deben a las condiciones geomagnéticas del sitio, así como también, por la presencia de estaciones de limpieza como señalan Bessudo *et al.* (2011a) en Malpelo y Ketchum *et al.* (2014a) en Galápagos.

En las estaciones de limpieza de Cañón y Dedos de Lava, se han observado peces limpiadores como: el pez barbero mariposa *Johnrandallia nigrirostris*, la vieja piedra *Bodianus diplotaenia* y el ángel clarión endémico de la región del AR *Holacanthus clarionensis* que limpian y remueven ectoparásitos a los TMC que se acercan a las estaciones. Esto ha sido observado por medio de buceo autónomo por J.T.K. y E.M.H. Este comportamiento ha sido observado en muchas áreas como el Golfo de California y en varias islas del PET como Cocos, Galápagos y Malpelo.

Las agregaciones de *S. lewini* como las observadas en San Benedicto y Roca Partida, nos pueden indicar que ciertas poblaciones son pequeñas, y altamente localizadas. Esto sugiere una alta vulnerabilidad de esta especie debido a su captura directa, particularmente cercano a la superficie del océano (Klimley & Anderson, 1996;

Ketchum *et al.*, 2011), lo cual pudiera orillar a un descenso drástico de sus poblaciones afectando el reclutamiento de la especie (Baum *et al.*, 2003; Baum & Myers, 2004; particularmente si en su mayoría son hembras adultas.

### **9.10 Índice de residencia de *S. lewini* entre individuos y por sitios en el AES**

En el AES, el IR fue muy bajo en comparación con el AR, de 0.19 en el caso de SLew31 que presentó la residencia más alta, seguido de SLew39 con 0.15, todos los TMC marcado en EBES se detectaron solamente en este sitio, sin moverse a otros receptores, lo que no puede indicar una alta fidelidad y preferencia para agregarse en este sitio.

Pisco-Limonos (2020), señaló que, en 1981, se podía observar un gran número de TMC *S. lewini* en EBES, con un promedio de 60 martillo en un lapso de una hora, en cambio en el 2019, solo se observan en promedio 8 TMC en una hora, esto nos da un indicativo de lo minimizadas que se encuentran las poblaciones de TMC, probablemente porque la gran mayoría que estuvieron conformados principalmente por juveniles y subadultos, fueron capturados por pescadores locales rápidamente en los alrededores del AES, fuera de la reserva de Espíritu Santo, como se observa con las tres recapturas obtenidas donde el máximo de días que uno de los martillo estuvo en libertad fue de 84 días.

Por otra parte, el descenso en el número de detecciones pudiera estar relacionado a la aparición de surgencias locales donde el ensamblaje de peces es menor durante invierno y primavera, por lo que se mueven a suroeste del GC y tienen mayor posibilidad de ser pescados. Además, la temperatura superficial del mar también puede influir, siendo más cálida en la zona costera de Sinaloa que en el GC (Klimley & Butler, 1988).

### **9.11 Preferencias ambientales de *S. lewini* en el AR y AES**

En el AR, los TMC, pueden tolerar un gradiente de temperatura que oscila entre los 5-26° C y tienen preferencia a temperaturas parecidas a aguas semitropicales que oscilan entre los 23-26° C donde permanecieron la mayor parte del tiempo, además tienden a permanecer la mayor parte de tiempo en un intervalo de profundidad preferente entre los 30-50 m, justo debajo de la capa de mezcla. Además, observamos que existe una influencia de la velocidad de corriente oceánica hacia el norte y la altura en la superficie del mar. La dinámica oceánica asociada a corrientes y el intervalo preferente de temperatura podrían funcionar como un amortiguador, que permite mejorar la disponibilidad de presas potenciales para el TMC cuando migra hacia otros montes submarinos y utiliza hábitats adyacentes que le permite orientarse y los utilice como de referencia y navegación para continuar con sus migraciones.

El establecimiento del Parque Marino AR en 2017, considerado actualmente la reserva marina protegida más gran de Norte América (148, 000 km<sup>2</sup>) (CONANP, 2017), ha sido una medida efectiva para la protección de *S. lewini*, considerando su alta residencia y movimientos ocasionales interconectados entre islas. Sin embargo, es necesario además considerar otras medidas de conservación y manejo en áreas costeras del GC y el Pacífico mexicano, además de seguir concientizando a los pescadores locales, en particular a los del sector de pesca industrial, para que, de esa manera comience a recuperarse las poblaciones de esta especie.

## **10. CONCLUSIONES**

Se registraron un total de 73,653 detecciones acústicas durante el 2008-2019 para ambos archipiélagos, de las cuales el 87% se registraron en el AR y 13% en el AES. En el AR, la proporción sexual estuvo sesgada hacia las hembras, siendo todos adultos, en cambio en el AES, la proporción sexual fue balanceada entre machos y hembras y los individuos eran juveniles y subadultos.

En el AR, los TMC presentaron un patrón de movimientos diarios residiendo durante la fase diurna cercanos a la Isla de San Benedicto alejándose del intervalo de detección durante la noche con fines de alimentación. En la Isla Roca Partida este patrón no fue tan evidente, posiblemente con una gran disponibilidad de presas potenciales cercanas al islote. En el AES, este patrón de movimiento no fue tan evidente, ya que los TMC permanecieron en el EBES, hasta las 02:00 h detectándose en parte de la fase nocturna.

Únicamente se presentó un movimiento interinsular en el AR, de un tiburón que se movió de San Benedicto a Roca Partida. En el AES, solo uno de los 17 marcados, se registró en otro sitio, moviéndose de EBES a Las Animas, los demás solo fueron registrados en EBES.

Se observaron movimientos a mediana escala de tres TMC recapturados, todos ellos migraron hacia el sur o sureste del GC, estos fueron capturado en Bahía La Paz, La Ribera, Cabo Pulmo, B.C.S. y cercano al área de crianza de La Reforma, Sinaloa, por lo que nos dieron evidencia de movimientos interconectados entre un sitio de agregación y un área de crianza.

Los patrones de residencia y uso de hábitat de los TMC en el AR fueron diferentes entre sitios y estaciones climáticas, siendo Cañón y Dedos de Lava, los sitios que presentaron una mayor residencia. Por otro lado, en el AES fueron altamente residentes a EBES. Por lo que, en ambos archipiélagos, los tiburones tienen preferencia a sitios centrales de refugio, donde se agregan y residen por tiempos prolongados.

En el AR, se registraron movimientos interconectados entre hábitats (isla-monte submarino) por medio de la telemetría satelital, siguiendo cordilleras marinas posiblemente para orientarse. La conectividad entre hábitats estuvo asociadas a las características batimétricas y a las condiciones oceanográficas como corrientes, termoclina y profundidad.

En el AES, se presentaron movimientos a gran escala de tres tiburones moviéndose entre hábitats insulares rumbo al norte del GC, hasta llegar a las islas de Loreto, y regresar eventualmente a los mismos sitios por lo que se observa una fidelidad al sitio del AES.

En el AES, los tiburones utilizaron como referencia la batimetría y las islas circundantes del Golfo de California, que utilizan como ejes de dispersión para sus migraciones, moviéndose entre isla y maximizando sus oportunidades de alimentación.

Los movimientos verticales oscilatorios más profundos y amplio durante la fase nocturna en comparación con la fase diurna, se observó que el 70 % del tiempo permanecieron en la capa de mezcla entre los intervalos de profundidad de 30-60 en el AR. En cambio, en el AES, los perfiles de movimientos verticales fueron más oscilatorios no diferenciándose de la capa de mezcla, sin embargo, tienen una preferencia a permanecer también entre los 30-60 m de intervalos de profundidad.

Se observó que los tiburones martillo son altamente selectivos a sitios con condiciones particulares de corrientes ascendentes y veloces de las islas, a la temperatura, con una preferencia a permanecer en aguas cálidas entre los 23- 27°C, así como también la profundidad, permaneciendo justo debajo de la capa de mezcla donde se refugian y llevan a cabo actividades esenciales como la exploración de movimientos verticales, realizando inmersiones amplias cuando migran lejos de las islas posiblemente para alimentarse.

## **11. RELEVANCIA DEL ESTUDIO Y RECOMENDACIONES**

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan información importante de sus movimientos y residencia, así como la conectividad presente entre sitios, en

particular la Isla San Benedicto en el AR, donde se observó que los TMC podían realizar movimientos interinsulares, hacia Roca Partida.

Este estudio genera una línea de base para un monitoreo efectivo y para mejorar la conservación y el manejo del TMC *S. lewini*, considerados en peligro crítico. La actual expansión en el Parque marino AR y la reserva marina del AES probablemente permitirán la protección y preservación de esta especie alrededor de hábitats interconectados para ayudar a los tomadores de decisiones en el desarrollo de estrategias de gestión.

## 12. REFERENCIAS

- Aldana-Moreno, A., E.M. Hoyos-Padilla, R. González-Armas, F. Galván-Magaña, A. Hearn, A.P. Klimley, W. Winram, E.E. Becerril-García, J.T. Ketchum. 2019. Residency and diel movement patterns of the endangered scalloped hammerhead *Sphyrna lewini* in the Revillagigedo National Park. *Journal of Fish Biology*, 1-6.
- Amante, C. & B.W. Eakins. 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA.
- Au, D.W., S.E. Smith, & C. Show. 2008. Shark productivity and reproductive protection, and a comparison with teleost. 298–308. *In*: M.D. Camhi, E.K. Pikitch, & E.A. Babcock (eds). *Sharks of the Open Ocean: Biology, Fisheries and Conservation* Oxford: Blackwell. Publishing.
- Awebrey, F.T., S. Leatherwood, E.D. Mitchell & W. Rogers. 1984. Nesting, green sea turtle (*Chelonia mydas*) on Isla Clarión, Islas Revillagigedo, Mexico. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences*, 83(2): 69–75.
- Batschelet, E. 1981. *Circular statistic in biology*. Academic Press, London. 371 p.

- Baum, J. K., R.A. Myers, D.G. Kehler, B. Worm, S.J. Harley, P.A. Doherty. 2003. Collapse and conservation of shark populations in the Northwest Atlantic. *Science*, 299, 389–392.
- Baum, J. K. & R.A. Myers. 2004. Shifting baselines and the decline of pelagic sharks in the Gulf of Mexico. *Ecology Letters*, 7(2): 135–145.
- Baum, J.K., W. Blanchard. 2010. Inferring shark population trends from generalized linear mixed models of pelagic longline catch and effort data. *Fisheries Research* 102: 229–239.
- Bejarano-Álvarez, M., F. Galván-Magaña & R.I. Ochoa-Báez. 2011. Reproductive biology of the scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* (Chondrichthyes: Sphyrnidae) off southwest Mexico. *Aqua International Journal of Ichthyology*, 17(1): 11–22.
- Benhamou, S. & D. Cornelis. 2010. Incorporating Movement Behavior and Barriers to Improve Biological Relevance of Kernel Home Range Space Use Estimates. *Journal of Wildlife Management*, 74: 1353–1360.
- Bessudo, S., G.A. Soler, A.P. Klimley, J.T. Ketchum, A. Hearn & R. Arauz. 2011a. Residency of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) at Malpelo Island and evidence of migration to other islands in the Eastern Tropical Pacific. *Environmental Biology of Fishes*, 91: 165–176.
- Bessudo, S., G.A. Soler, A.P. Klimley, J.T. Ketchum, R. Arauz, A. Hearn, A. Guzmán & B. Calmettes. 2011b. Vertical and horizontal movements of the Scalloped Hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) around Malpelo and Cocos Islands (Tropical Eastern Pacific) using satellite telemetry. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 40: 91–106.
- Blásquez, L. 1960. Hidrología y Edafología. 103-126. *En*: J. Adem. La Isla Socorro. Archipiélago Revillagigedo. UNAM. Monografías del Instituto de Geofísica, México.
- Boehlert, G.W. & A. Genin. 1987. A review of the effects of seamounts on biological processes. 43:319–334. *In*: B.H. Keating, P. Fryer, R. Batiza & G.W. Boehlert (eds). *Seamounts, Islands and Atolls*.: Geophysical Monograph Series. Washington DC.

- Bond, M.E., E.A. Babcock, E.K. Pikitch, D.L. Abercrombie, N.F. Lamb & D.D. Chapman. 2012. Reef sharks exhibit site-fidelity and higher relative abundance in marine reserve on the Mesoamerican Barrier Reef. *Plos One*, 7(3): e32983.
- Bonfil, R., M. Meyer, M.C. Scholl, R. Johnson, S. O'Brien, H. Oosthuizen, S. Swanson, D. Kotze, M. Paterson. 2005. Transoceanic migration, spatial dynamics, and population linkages of white sharks. *Science*, 310:100–103.
- Brattstrom, B.H. 1990. Biogeography of the Islas Revillagigedo, Mexico. *Journal of Biogeography*, 177–183.
- Bryan, W.B. 1966. History and mechanism of eruption of soda-rhyolite and alkali basalt Socorro Island, México: *Bulletin of Volcanology*, 29: 453–479.
- Carballido-Sánchez, E.A. 1991. Estratigrafía de la porción centro-meridional del Volcán Evermann, Isla Socorro, México. Memoria. Convención sobre la Evolución Geológica de México. Instituto de Geología, UNAM, México. 22 p.
- Carballido-Sánchez, E.A. 1994. The geology and petrology of Socorro Island, Revillagigedo Archipelago, Mexico. PhD. Thesis. Tulane University. 265 p.
- Carter, A.L., A. Meriwether, W. Wilson, M. Bello, E.M. Hoyos-Padilla, M.E. Inall, J.T. Ketchum, A. Schurer, A.W. Tudhope. 2020. Assessing opportunities to support coral reef climate change refugia in MPAs: A case study at the Revillagigedo Archipelago. *Marine Policy*, 112: 103769.
- Castellanos, A. & A. Ortega-Rubio. 1994. Características Generales. 19-29. En: A. Ortega- Rubio & A. Castellanos (eds). *La Isla Socorro, Reserva de la Biosfera Archipiélago de Revillagigedo, México*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. México.
- Chapman, D.D., K.A. Feldheim, Y.P. Papastamatiou & R.E. Hueter. 2015. There and Back Again: A Review of Residency and Return Migrations in Sharks, with Implications for Population Structure and Management. *The Annual Review of Marine Science*, 7: 547–70.
- Cisneros-Montemayor, A.M., A. Ayala-Bocos, O. Berdeja-Zavala & E.E. Becerril-García. 2020. Shark ecotourism in Mexico: Scientific research, conservation, and contribution to a Blue Economy. 71–92. In: S. Larson & D. Lowry (eds). *Conservation of Mexican Sharks*, Advances in Marine Biology. Academic Press.

London, United Kingdom.

- Cigas, J. & A.P. Klimley. 1987. A microcomputer interface for decoding telemetry data and displaying them numerically and graphically in real time. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 19(1): 19–25.
- CITES: Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. 2012. *Proposals for amendment of appendices I & II (CoP16 Prop. 43)*. <http://www.cites.org/eng/cop/16/prop/E-CoP16-Prop-43.pdf>. Fecha de consulta: 14 de mayo 2017.
- Clarke, S.C., M.K. McAllister, E.J. Milner-Gulland, G.P. Kirkwood & C.G.J. Michielsens. 2006. Global estimates of shark catches using trade records from commercial markets. *Ecology Letters*, 9: 1115–1126.
- Clobert, J.J., F.L. Galliard, J. Cote, S. Meylan, M. Massot. 2009. Informed dispersal, heterogeneity in animal dispersal syndromes and the dynamics of spatially structured populations. *Ecology Letters*, 12: 197–209.
- Compagno, L.J.V. 1984. *Sharks of the World. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. Part II (Carcharhiniformes)*. FAO Fisheries Synopsis 125 (4), Part II. FAO, Rome.
- Compagno, L.J.V. 1988. Carcharhiniformes. 251–655. *In*: M. Kautenberger, N. De Angelis. FAO Species Catalogue, *Sharks of the World. An Annotated and Illustrated Catalogue of Shark Species Known to Date*. Rome, Italy.
- Compagno, L.J.V., F. Krupp & W. Schneider. 1995. Tiburones. 648-743. *In*: W. Fischer, F. Krupp, W. Schnider, C. Sommer, K. E. Carpenter & V.H. Niem (eds). *Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca. Pacífico centro-oriental*. Roma, Italia.
- Compagno, L.J.V., M. Dando & S. Fowler. 2005. *Shark of the world*. Princeton University Press Oxford. United Kingdom. 368 p.
- CONANP: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2004. *Programa de conservación y manejo reserva de la Biósfera Archipiélago de Revillagigedo*. México. CONANP-SEMARNAT. México. 328 p.

- CONANP. 2017. Estudio previo justificativo para la declaratoria del Parque Nacional Revillagigedo. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 214 p.
- Cortés, E. 2000. Life history patterns and correlations in sharks. *Reviews in Fisheries Science*, 8: 299–344.
- Del Moral-Flores, L.F., J.M Gracian-Negrete & A.F. Guzmán-Camacho. 2016. Peces del Archipiélago de las Islas de Revillagigedo: Una actualización sistemática y biogeográfica. *BIOCYT Biología, Ciencia y Tecnología*, 9(34): 596–619.
- Dingle, H. & A. Drake. 2007. What is migration? *BioScience*, 57 (2):113–121.
- Domeier, M.L. & N. Nasby-Lucas. 2008. Migration patterns of white sharks *Carcharodon carcharias* tagged at Guadalupe Island, Mexico, and identification of an eastern Pacific shared offshore foraging area. *Marine Ecology Progress Series*, 370: 221–237.
- Dorsey, R.J. & P.J. Umhoefer. 2000. Tectonic and eustatic controls on sequence stratigraphy of the Pliocene Loreto basin, Baja California Sur, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 177–199.
- Dorsey, R.J., P.J. Umhoefer, J.C. Ingle & L. Mayer. 2001. Late Miocene to Pliocene stratigraphic evolution of northeast Carmen Island, Gulf of California: implications for oblique rifting tectonics. *Sedimentary Geology*, 144: 97–123.
- Ebert DA (2014) On Board Guide for the Identification of Pelagic Sharks and Rays of the Western Indian Ocean. <http://www.iotc.org/science/species-identification-cards>. Fecha de consulta: 02 de enero 2020.
- Espinoza, M., M.R. Heupel, A.J. Tobin & C.A. Simpfendorfer. 2015. Movement patterns of silvertip sharks (*Carcharhinus albimarginatus*) on coral reefs. *Coral Reefs*, 34(3), 807–821.
- Ekstrom, P. 2004. An advance in geolocation by light. *Memories of the National Institute of Polar Research*, 58: 210–226.
- FAO. 2000. Fishstat capture production (1950–2005) database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAQ localisation Argos. Revisado: 26 de mayo 2020. (<https://www.argos-system.org/support-and-help/faq-localisation-argos/>).

- Fernández, E.A. 1992. Carta de Oceanografía en el Atlántico Nacional de México, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Ferrari, A. & A. Ferrari. 2001. Guide des Requins. Plus de 120 espèces de monde entier. Delachux et Niestlé, Paris. 220 p.
- Fiedler, P.C. & L.D. Talley. 2006. Hydrography of the Eastern Tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69: 143–180.
- Flores-Martínez, I.A., Y.E. Torres-Rojas, F. Galván-Magaña & J. Ramos-Miranda, 2017. Diet comparison between silky sharks (*Carcharhinus falciformis*) and scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) off the south-west coast of Mexico. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 97(2): 337–345.
- Fourrière, M., H. Reyes-Bonilla, A. Ayala-Bocos, J.T. Ketchum, J.C. Chávez-Comparan. 2016. Checklist and analysis of completeness of the reef fish fauna of the Revillagigedo Archipelago, Mexico. *Zootaxa*, 4150 (4): 436–466.
- Fowler, S. 2014. El estado de conservación de los tiburones migratorios. Secretaría del PNUMA/CMS, Bonn, Alemania, 31 p.
- Gallagher, A.J., N. Hammerschlag, D.S. Shiffman & S.T. Giery. 2014. Evolved for Extinction: The Cost and Conservation Implications of Specialization in Hammerhead Sharks. *BioScience* 1–6.
- Grutter, A.S. 1999. Cleaning fish really do clean. *Nature*, 398, 672-673.
- Hamilton, W. & K.E.F. Watts. 1970. Refuging. *Annual Review Ecology Systematics*, 1: 263-286.
- Hammerschlag, N., A.J. Gallagher & D.M. Lazarre. 2011. A review of shark satellite tagging studies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 398: 1–8.
- Hayes, C.G., Y. Jiao & E. Cortés. 2009. Stock Assessment of Scalloped Hammerheads in the WesternNorth Atlantic Ocean and Gulf of Mexico. *North American Journal of Fisheries Management*, 29: 1406–1417.
- Hearn, A., J.T. Ketchum, G. Shillinger, A.P. Klimley & E. Espinoza. 2008. Programa de investigación y conservación de tiburones en la Reserva Marina de Galápagos. Reporte Anual 2006-7. Santa Cruz, Galápagos, Ecuador.

- Hearn, A., J.T. Ketchum, A.P. Klimley, E. Espinoza & C. Peñaherrera. 2010. Hotspots within hotspots? Hammerhead shark movements around Wolf Island, Galapagos Marine Reserve. *Marine Biology*, 157: 1899–1915.
- Heithaus, M.R., A.J. Wirsing, L.M. Dill & L.I. Heithaus. 2007. Long-term movements of tiger shark satellite-tagged in Shark Bay, Western Australia. *Marine Biology*, 151: 1455–1461.
- Hooge, P.N., W.M. Eichenlaub & E.K. Solomon. 2000. Using GIS to analyze animal movements in the marine environment. 37–51. *In*: G.H. Kruse, N.B. Anthony, M.W. Dorn, S. Hills, R.N. Lipcius, D. Pelletier, C. Roy, S.J. Smith & D.B. Witherell. *Publication of an organization other than U.S. geological survey*. Biological Science Center. Alaska. U.S.
- Hoyos-Padilla, M., J.T. Ketchum, A.P. Klimley & F. Galván-Magaña. 2014. Ontogenetic migration of a female scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* in the Gulf of California. *Animal Biotelemetry*, 2: 2–9.
- Hueter, R.E. 1994. Bycatch and catch-release mortality of small sharks in the gulf coast nursery grounds of Tampa Bay and Charlotte Harbor. Final report. 183
- IUCN. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. 2007. The conservation status of pelagic sharks and rays. Report of the IUCN Shark specialist group. Pelagic sharks red list workshop. University of Oxford, Oxford, United Kingdom.
- Jorgensen, S.J., A.P. Klimley & A.F. Muhlia-Melo. 2009. Scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini*, utilizes deep-water, hypoxic zone in the Gulf of California. *Journal of Fish Biology*, 74: 1682–1687.
- Ketchum, J.T. 2011. Movements patterns and habitat use of scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) in the Galapagos Islands: Implications for the design of Marine Reserves. PhD. Thesis. University of California, Davis, California. 190 p.
- Ketchum, J.T., A. Hearn, A.P. Klimley, C. Peñaherrera, E. Espinoza, S. Bessudo, G. Soler & R. Arauz. 2014a. Inter-island movements of scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) and seasonal connectivity in a marine protected area of the Eastern Tropical Pacific. *Marine Biology*, 161: 939–951.

- Ketchum, J.T., A. Hearn, A.P. Klimley, E. Espinoza, C. Peñaherrera & J. Largier. 2014b. Seasonal changes in movements and habitat preferences of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) while refuging near an oceanic island. *Marine Biology*, 161: 755–767.
- Ketchum, J.T., E.M. Hoyos-Padilla, A. Aldana-Moreno, K. Ayres, F. Galván-Magaña, A. Hearn, F. Lara-Lizardi, G. Muntaner-López, M. Grau, A. Trejo-Ramírez, D.A. Whitehead & A.P. Klimley. 2020. Shark movement patterns in the Mexican Pacific: A conservation and management perspective. 1–37. *In*: S. Larson & D. Lowry (eds) *Conservation of Mexican Sharks*. Advances in Marine Biology. Academic Press London, United Kingdom.
- Klimley, A.P. & D.R. Nelson. 1981. Schooling of the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*, in the Gulf of California. *Fishery Bulletin*, 79(2): 356–360.
- Klimley, A.P. & D.R. Nelson. 1984. Diel movement patterns of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) in relation to El Bajo Espiritu Santo: a refuging central-position social system. *Behavioral Ecology Sociobiology*, 15: 45–54.
- Klimley, A.P. & S.B. Butler. 1988. Immigration and emigration of a pelagic fish assemblage to seamounts in the Gulf of California related to water mass movements using satellite imagery. *Marine Ecology Progress Series*, 49: 11–20.
- Klimley, A.P., S.B. Butler, D.R. Nelson & A.T. Stull. 1988. Diel movements of scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini* Griffith and Smith, 18, to and from a seamount in the Gulf of California. *Journal of Fish Biology*, 33 (5): 751–761.
- Klimley, A.P. 1993. Highly directional swimming by scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini*, and subsurface irradiance, temperature, bathymetry, and geomagnetic field. *Marine Biology*, 117: 1–22.
- Klimley, A.P., J.L. Castillo-Geniz, I. Cabrera-Mancilla. 1993. Descripción de los movimientos horizontales y verticales del tiburón martillo *Sphyrna lewini* del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas*, 19(1): 95–115.
- Klimley, A.P. & S.D. Anderson. 1996. Residency Patterns of White Sharks at the South Farallon Islands, California. 365–373. *In*: A.P. Klimley & D. Ainley (eds). *Great*

- White Sharks. The biology of Carcharodon carcharias*. Academic Press, San Diego, California.
- Klimley, A.P., L.J. Boeuf, K.M. Cantara, J.E. Richert, S.F. Davis & V.S. Sommeran. 2001. Radio-acoustic positioning: a tool for studying site-specific behavior of the white shark and large marine vertebrate. *Marine Biology*, 138: 429–446.
- Klimley, A.P., J.E. Richert & S.J. Jorgensen. 2005. The home of blue water fish. *American Scientist*, 93: 42–49.
- Klimley, A.P. 2015. Shark trails of the eastern Pacific. Tracking their subjects by satellite, biologists learn when sharks migrate, where they go, and how they use magnetic clues on the ocean floor for navigation. *American Scientist* 103: 276–283.
- Kohler, N.E. & P.A. Turner. 2001. Shark tagging: A review of conventional methods and studies. *Environmental Biology of Fishes*, 60: 191–224.
- Lincoln, R.J. & G.A. Boxshall. 1995. Diccionario de ecología, evolución y taxonomía. Fondo de Cultura Económica, 672 p.
- Lowe, C.G. & R.N. Bray. 2006. Fish movement and activity patterns. 534-553. In: L.G. Allen, D.J. Pondella & M.H. Horn (eds). *The Ecology of Marine Fishes: California and Adjacent Waters*. University of California Press, Berkeley, California.
- Mayr, E. 1967. Animal species and evolution. The Belknap Press of Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts.
- MiniPAT user guide. 2018 (<https://static.wildlifecomputers.com/MiniPAT-User-Guide1.pdf>). Retrived: 26 may 2020.
- Mollet, H.F. & G.M. Cailliet. 2002. Comparative population demography of elasmobranchs using life history tables, Leslie matrices and stage-based matrix models. *Marine and Freshwater Research*, 53: 503–515.
- Morrissey, J.F. & S.H. Gruber. 1993. Home range of juvenile lemon sharks *Negaprion brevirostris*. *Copeia*, (2): 425-434.
- Muhlía-Melo, A.F., A.P. Klimley, R. González-Armas, S. Jorgensen, A. Trasviña-Castro, J. Rodríguez-Romero & A. Amador Buenrostro. 2003. Pelagic fish assemblages at the Espiritu Santo seamount in the Gulf of California during El Niño 1997-1998 and non-El Niño conditions. *Geofísica Internacional*, 42(3): 473-481.

- Musick, J.A. 1999. Ecology and conservation of long-lived marine animals. 1–10. *In*: J.A. Musick (ed). *Life in the slow lane: Ecology and conservation of long-lived marine animals*. American Fisheries Society Symposium. Maryland.
- Musick, J.A. & S. Musick. 2011. *Sharks*. FAO Fisheries and Aquaculture Reviews and Studies. Rome, Italy.
- Myers, N., R. Mittermeier, C.G. Mittermeier, G.A.B. da Fonseca & J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*. 403 (6772): 853–858.
- Myers, R.A., J.K. Baum, T.D. Shepherd, S.P. Powers & C.H. Peterson, C.H. 2007. Cascading effects of the loss of apex predatory sharks from a coastal ocean. *Science*, 315: 1846–1850.
- Nalesso, E., A. Hearn, O. Sosa-Nishizaki, T. Steiner, A. Antoniou, A. Reid, S. Bessudo, G. Soler, A.P. Klimley, F. Lara-Lizardi, J.T. Ketchum & R. Arauz. 2019. Movements of scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) at Cocos Island, Costa Rica and between oceanic islands in the Eastern Tropical Pacific. *Plos One* 14(3): e0213741.
- Nathan, R, W.M. Getz, E. Revilla, M. Holyoak, R. Kadmon, D. Saltz & P.E. Smouse. 2008. A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America*, 105(49): 19052–19059.
- Odum, E.P. & G.W. Barrett. 2006. *Fundamentos de ecología*. Thomson, México. 598 p.
- Okubo, A., D. Grunbaum & L. Edelstein-Keshet. 2001. The dynamics of animal grouping. 197-237. *In*: A. Okubo & S.A. Levin (eds). *Diffusion and ecological problems: modern perspectives*. Springer. New York.
- Oliver, S.P., N.E. Hussey, J.R. Turner & A.J. Beckett. 2011. Oceanic sharks clean at coastal seamount. *Plos One*, e14755.
- Papastamatiou, Y.P., C.G. Lowe, J.E. Caselle & A.M. Friedlander. 2009. Scale dependent effects of habitat on movements and path structure of reef sharks at a predator dominated atoll. *Ecology*, 90: 996–1008.
- Papastamatiou, Y.P. & C.G. Lowe. 2012. An analytical and hypothesis-driven approach to elasmobranch movement studies. *Journal of Fish Biology*, 80: 1342–1360.

- Papastamatiou, Y.P., C.G. Meyer, F. Carvalho, J.J. Dale, M.R. Hutchinson & K.N. Holland. 2013. Telemetry and random walk models reveal complex patterns of partial migration in a large marine predator. *Ecology*, 94: 2595–2606.
- Piercy, A.N., J.K. Carlson, J.A. Sulikowski & G.H. Burgess. 2007. Age and growth of the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini* in the northwest Atlantic Ocean and Gulf of Mexico. *Marine and Freshwater Research*, 58: 34–40.
- Pisco-Limones, W.E. Análisis de la percepción sobre las tendencias poblacionales del tiburón martillo (*Sphyrna lewini*) en el Bajo de Espíritu Santo. Tesis de Licenciatura (*en proceso*). Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, B.C.S., México.
- Pitcher, T.J. & J.K. Parrish. 1993. Functions of shoaling behaviour in teleosts. 363–439. *In*: T.J. Pitcher (ed). *Behaviour of teleost fishes*, Chapman and Hall, New York.
- Powell, R.A. & M.S. Mitchell. 2012. What is a home range? *Journal of Mammalogy*, 93(4): 948-958.
- Richards, A.F. 1959. Geology of the Islas Revillagigedo, México. 1. Birth and development of Volcán Bárcena, Isla San Benedicto. *Bulletin Volcanologique*, 22: 73–123.
- Rigby, C.L., N.K. Dulvy, R. Barreto, J. Carlson, D. Fernando, S. Fordham, M.P. Francis, K. Herman, R.W. Jabado, K.M. Liu, A. Marshall, N. Pacoureaux, E. Romanov, R.B. Sherley & H. Winker. 2019. *Sphyrna lewini*. The IUCN Red List of Threatened Species, e.T39385A2918526.
- Robertson D.R. & R.G. Allen. 2015. *Peces costeros del Pacífico Oriental Tropical*. Versión 2.0. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, República de Panamá. (<http://biogeodb.stri.si.edu/sftep/es/pages>). Recuperado 14 enero 2016.
- Robles, J.M. & S.G. Marinone. 1987. Seasonal and interannual thermohaline variability on the Gayamas basin in the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 7: 715–733.
- Rodríguez-Arana, J.P. 2018. Movimientos, conectividad genética y tamaño poblacional del tiburón martillo *Sphyrna lewini*, en sus áreas de crianza al sur del Golfo de

- California. Tesis de Maestría, 76 p. Centro Interdisciplinarios de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional. La Paz, B.C.S., México. 76 p.
- Rodríguez-Rubio, E., A. Schneider, R. Abarca-del-Río. 2003. On the seasonal circulation within the Panama Bight derived by satellite observations of wind altimetry and sea surface temperature. *Geophysics Research Letters*, 30(7): 1410.
- Rose, D.A. 1998. *Shark fisheries and trade in the Americas*. Volumen 1. Traffic North America. Washington, D.C., U.S.A. 187 p.
- Rosende-Pereiro, A. & A. Corgos. 2018. Pilot acoustic tracking study on young of the year scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini*, within a coastal nursery area in Jalisco, Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 46(4): 645–659.
- Royer, F. & M. Lutcavage. 2009. Positioning pelagic fish from sunrise and sunset Times: Complex observation errors call for constrained, robust modeling. 323-342. In: S.S. Gezelius & J. Raakjær (eds). *Methods and technologies in fish biology and fisheries. Making fisheries management work. Implementation of politics for sustainable fishing*. Springer Dordrecht. Heidelberg London.
- Ruiz-Sakamoto. A.T. 2015. Estimación del valor económico total y catálogo de foto identificación de la manta gigante (*Manta birostris* Walbaum, 1792) en el Archipiélago Revillagigedo. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, México. 46 p.
- Salinas-de-León P, M. Hoyos-Padilla & F. Pochet. 2017. First observation on the mating behavior of the endangered scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* in the Tropical Eastern Pacific. *Environmental Biology of Fishes*, 100: 1603–1608.
- Salomón-Aguilar, C.A., C.J. Villavicencio-Garayzar & H. Reyes-Bonilla. 2009. Zonas y temporadas de reproducción y crianza de tiburones en el Golfo de California: estrategia para su conservación y manejo pesquero. *Ciencias Marinas*, 35(4): 369–388.
- Sandin, S.A., J.E. Smith, E.E. DeMartini, E.A. Dinsdale, S.D. Donner, A.M. Friedlander, T. Konotchick, M. Malay, J.E. Maragos, D. Obura, O. Pantos, G. Paulay, M.

- Richie & E. Sala. 2008. Baselines and degradation of coral reefs in the northern line islands. *Plos One*, 3(2): e1548.
- Schaefer, K.M. & D.W. Fuller. 2002. Movements, behavior, and habitat selection of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern equatorial Pacific, ascertained through archival tags. *Fishery Bulletin*, 100: 765–788.
- Schneider, D.C. 1994. *Quantitative Ecology: Spatial and Temporal Scaling.*: Academic Press. San Diego, California. 395 p.
- Sepulveda, C.A., A. Knight, N. Nasby-Lucas, M.L. Domeier. 2010. Fine scale movements of the swordfish (*Xiphias gladius*) in the southern California Bight. *Fisheries Oceanography*, 19(4): 279–289.
- Serviere-Zaragoza, E., R. Riosmena-Rodríguez, H. León-Tejera & J. González-González. 2007. Distribución especial de macroalgas marinas en las islas Revillagigedo, México. *Ciencia y Mar*, 11(31): 3–13.
- Siebe C., J.C. Komorowski, C. Navarro, J. McHone, H. Delgado & A. Cortés, 1995. Submarine eruption near Socorro Island Mexico: Geochemistry and scanning electron microscopy studies of floating scoria and reticulate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 68(4): 239–271.
- Silverman, B.W. 1986. *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman & Hall. Boca Raton, Florida.
- Simpfendorfer, C.A. & M.R. Heupel. 2004. Assessing habitat use and movements. 579–601. *In*: J.C. Carrier, J.A. Musick & M.R. Heithaus (eds). *Sharks and their Relatives II: Biodiversity, adaptative, physiology, and conservation*. CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Sims, D.W. 2005. Differences in habitat selection and reproductive strategies of male and female sharks. 127–147. *In*: K.E. Ruckstuhl, P. Neuhaus (eds). *Sexual segregation in vertebrates: ecology of the two sexes*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Sims, D.W. 2010. Tracking and analysis techniques for understanding free-ranging shark movements and behavior 351–386. *In*: J.C. Carrier, J.A. Musick & M.R. Heithaus (eds). *Sharks and their Relatives II: Biodiversity, adaptative, physiology, and conservation*. CRC Press. Boca Raton, Florida.

- Speed, C.W., I.C Field, M.G. Meekan & C.J.A. Bradshaw. 2010. Complexities of coastal shark movements and their implications for management. *Marine Ecology Progress Series*, 408: 275–293.
- Stevens, J.D., R. Bonfil, N.K. Dulvy & P.A. Walker. 2000. The effects of fishing on sharks, rays, and chimaeras (Chondrichthyans), and the implications for marine ecosystems. *Journal of Marine Science*, 57: 476–494.
- Shaw, E. 1978. Schooling fishes. *American Scientist*, 66 (2): 166–175.
- Taylor, L.R. 1986. Synoptic ecology, migration of the second kind, and the Rothamsted insect survey. Presidential Address. *Journal of Animal Ecology*, 55: 1–38.
- Thomson D.A., L.T. Findley & A.N. Kerstitch. 2000. Reef fishes of the Sea of Cortez: The rocky-shore fishes of the Gulf of California. University of Texas Press, Austin, Texas. 374 p.
- Torres-Huerta, A.M., C. Villavicencio-Garayzar & D. Corro-Espinosa. 2008. Biología reproductiva de la cornuda común *Sphyrna lewini* Griffith & Smith (Sphyrnidae) en el Golfo de California. *Hidrobiológica*, 18(3), 227–238.
- Torres-Rojas, Y., A. Hernandez-Herrera & F. Galvan-Magaña. 2006. Feeding habits of the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*, in Mazatlán waters, southern Gulf of California, Mexico. *Cybium*, 30(4): 85–90.
- Trejo-Ramírez, A. 2017. Caracterización de la bahía La Paz, Baja California Sur, México, como una posible área de crianza del tiburón brinche *Rhizoprionodon longurio* (Jordan & Gilbert, 1882). Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional. La Paz, B.C.S., México. 147 p.
- Turchin, P. 2015. Quantitative Analysis of Movement: Measuring and Modeling Population Redistribution in Animals and Plants. Sinauer Associates Inc. Sunderland, Massachusetts. 396 p.
- Vaudo, J.J., M.E. Byrne, B.M. Wetherbee, G.M. Harvey & M.S. Shivji. 2017. Long-term satellite tracking reveals region-specific movements of a large pelagic predator, the shortfin mako shark in the western North Atlantic Ocean. *Journal of Applied Ecology*, 54:1765-1775.


- Vélez, M.R., O. Mendizabal & F.J. Valdez. 1994. Una reseña de la pesca palangrera de tiburones alrededor de las Islas Revillagigedo. 29-30. *En*: L. Medrano, O.E. Holguín & A. Ortega (eds). *Reunión internacional de investigadores del Archipiélago Revillagigedo*. Manzanillo, México.
- Walker, B.W. 1960. The distribution and affinities of the marine fish fauna of the Gulf of California. *Systematic Zoology*, 9(3): 123–133.
- Webber, D. 2009. Vemco Acoustic Telemetry new user guide. (<https://vemco.com/wp-content/uploads/2012/11/acoustic-telemetry.pdf>). Retrived: 25 may 2020.
- Wood, S.N. 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2nd edition). Chapman and Hall/CRC Press. Boca Raton, Florida. 485 p.
- Worm, B., H.K. Lotze & R.A. Myers. 2003. Predator diversity hotspots in the blue ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100: 9884–9888.
- Worton, B.J. 1995. Using Monte Carlo simulation to evaluate kernel-based home range estimators. *Journal of Wildlife Management*, 59: 794–800.
- Zuur, A.F., E.N. Ieno, N.J. Walker, A.A. Saveliev & G.M. Smith. 2009. *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer-Verlag, New York. 574 p.

### 13. ANEXOS

Anexo 1. Lista de especies de tiburones martillo capturados durante el periodo 2008-2020, mostrando mediciones de captura: LT: longitud total, LF: longitud furcal y LP: longitud precaudal, representadas en centímetros y los tipos de dispositivos telemétricos utilizados con su código individual correspondiente.

Nombre	Especie	Sexo	LT	LF	LP	Capturado	Región	Sitio de Captura	Longitud	Latitud	ID spaguetti	Tipo de dispositivo telemétricos			
												Acústico	Marcaje	ID Acústico	SatelID
SLew1		F	250			03-feb-04	GC	EBES	-111.2781	27.3380	NA	NA	NA	PAT	NA
SLew2		F	150			01-nov-08	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	53196	NA NA
Slew3		F	150			03-nov-08	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	53200	NA NA
SLew4		I	200			03-nov-08	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	53202	NA NA
SLew5		F	150			04-nov-08	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	53195	NA NA
SLew6		F	230			04-nov-08	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	53198	NA NA
SLew7		F	180			04-nov-08	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	53201	NA NA
SLew8		M	140			04-nov-08	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	53203	NA NA
SLew9		F	200			29-nov-08	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	59069	NA NA
SLew10		F	150			02-dic-09	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	59070	NA NA
SLew11		F	200			03-dic-09	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	59072	NA NA
SLew12		M	180	127	114	20-nov-10	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Interno	46649	NA NA
SLew13		F	300			07-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27633	NA NA
SLew14		F	300			08-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27578	NA NA
SLew15		F	300			09-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27635	NA NA
SLew16		F	200			10-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27634	NA NA
SLew17		F	200			10-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27636	NA NA
SLew18		M	270			11-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27637	NA NA
SLew19		F	270			11-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27638	NA NA
SLew20		F	220			12-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27639	NA NA
SLew21		F	280			12-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27640	NA NA
SLew22		M	250			12-ene-13	AR	San Benedicto	-110.80755	19.29486	NA	V16	Externo	27641	NA NA
SLew23		F	250			08-mar-13	AR	San Benedicto	-110.80733	19.29506	NA	V16	Externo	5388	NA NA
SLew24		M	240			06-dic-16	AR	San Benedicto	-110.8073	19.2951	NA	NA	NA	MiniPAT	154093
SLew25		F	131	101	91	14-dic-17	GC	Animas	-110.52229	25.05457	250	V16	Interno	53635	NA NA
SLew26		I	160			20-feb-18	AR	Roca Partida	-112.08398	18.99184	NA	V16	Externo	14663	NA NA
SLew27	<i>Sphyma lewini</i>	M	159	118	106	15-jul-18	GC	Animas	-110.45216	24.79546	484	V16	Interno	53663	NA NA
SLew28		M	135	103	93	18-jul-18	GC	Animas	-110.49421	24.79675	488	V13	Interno	53662	NA NA
SLew29		F	137	104	95	02-mar-19	GC	EBES	-110.30258	24.70365	266	V16	Interno	13141	NA NA
SLew30		M	135			02-mar-19	GC	EBES	-110.29585	24.69780	NA	V16	Interno	53651	MiniPat 154095
SLew31		F	174	134	125	04-mar-19	GC	EBES	-110.29768	24.69666	378	V16	Interno	9011	MiniPat 57154
SLew32		M	166	128	117	04-mar-19	GC	EBES	-110.29768	24.69666	382	V16	Interno	9012	NA NA
SLew33		M	139	105	94	04-mar-19	GC	EBES	-110.29768	24.69666	399	V16	Interno	9015	NA NA
SLew34		F	148	108	98	04-mar-19	GC	EBES	-110.30260	24.70905	393	V16	Interno	9017	NA NA
SLew35		M	150	119	107	05-mar-19	GC	EBES	-110.29725	24.69642	665	V16	Interno	18711	NA NA
SLew36		F	164	126	117	05-mar-19	GC	EBES	-110.29725	24.69642	668	V16	Interno	18712	NA NA
SLew37		F	107	81.5	74	05-mar-19	GC	EBES	-110.30254	24.70189	395	V16	Interno	53640	NA NA
SLew38		F	167	129	118	05-mar-19	GC	EBES	-110.29725	24.69642	669	V16	Interno	9008	NA NA
SLew39		M	148	111	98	05-mar-19	GC	EBES	-110.30254	24.70189	263	V16	Interno	9010	NA NA
SLew40		M	149	117	108	05-mar-19	GC	EBES	-110.29725	24.69642	377	V16	Interno	9014	NA NA
SLew41		M	154	114	103	06-mar-19	GC	EBES	-110.29768	24.69669	398	V16	Interno	14648	NA NA
SLew42		M	145	110	100	06-mar-19	GC	EBES	-110.29768	24.69669	379	V16	Interno	53652	NA NA
SLew43		M	160	123	110	19-mar-19	GC	EBES	-110.29790	24.69684	579	V16	Interno	7426	NA NA
SLew44		F	117	87	79	19-mar-19	GC	EBES	-110.29790	24.69684	581	V16	Interno	9018	NA NA
SLew45		F	149.5	108	97	19-mar-19	GC	EBES	-110.29790	24.69684	578	V16	Interno	7429	NA NA
SLew46		M	118	87	78	19-mar-19	GC	EBES	-110.29790	24.69684	654	V16	Interno	7432	NA NA
SLew47		F	116.5	89	79	19-mar-19	GC	EBES	-110.29790	24.69684	580	V16	Interno	9020	NA NA
SLew48		M	131	96	87	20-mar-19	GC	EBES	-110.29810	24.69680	583	V16	Interno	7435	NA NA
SLew49		M	159	119	109	24-abr-19	GC	EBES	-110.30192	24.70284	671	V16	Interno	7421	NA NA
SLew50		F	167	134	119	07-may-19	GC	EBES	-110.2979	24.6967	NA	NA	NA	MiniPAT	173070
SLew51		F	145	112	100	08-may-19	GC	EBES	-110.29807	24.69691	584	V16	Interno	7422	NA NA
SLew52		M	150	113	104	18-may-19	GC	EBES	-110.29842	24.69685	670	V16	Interno	7424	NA NA
Slew53		F	250			11-ene-20	AR	San Benedicto	-110.8072	19.29689	NA	NA	NA	MiniPAT	173069
SZyg1		M	222			24-jul-17	GC	Cabo Pulmo	-109.48446	23.62946	NA	V16	Interno	14655	NA NA
SZyg2		F	277			25-jul-17	GC	Cabo Pulmo	-109.48446	23.62946	NA	V16	Interno	14654	NA NA
SZyg4		M	158	119	109	15-jul-18	GC	Animas	-110.45216	24.79546	483	V13	Interno	53665	NA NA
SZyg5	<i>Sphyma zygaena</i>	F	159	122	110	16-jul-18	GC	Animas	-110.46461	24.79678	489	V13	Interno	53659	NA NA
SZyg6		F	148	112	103	19-jul-18	GC	Animas	-110.45216	24.79546	487	V16	Interno	16316	NA NA
SZyg7		F	235	171	162	12-jun-19	GC	EBES	-110.30303	24.70342	586	V16	Interno	22431	NA NA
SZyg8		F	180	139	127	16-jun-19	GC	EBES	-110.30280	24.70255	380	V16	Interno	7413	NA NA

## Residency and diel movement patterns of the endangered scalloped hammerhead *Sphyrna lewini* in the Revillagigedo National Park

Alejandro Aldana-Moreno<sup>1,2</sup> | E. Mauricio Hoyos-Padilla<sup>2,3,4</sup> |  
Rogelio González-Armas<sup>1</sup> | Felipe Galván-Magaña<sup>1</sup> | Alex Hearn<sup>4,5</sup> |  
A. Peter Klimley<sup>4,6</sup> | William Winram<sup>7</sup> | Edgar Eduardo Becerril-García<sup>1,2</sup> |  
James T. Ketchum<sup>2,4,8</sup> 

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, Baja California Sur, Mexico

<sup>2</sup>Pelagios Kakunjá A.C., La Paz, Baja California Sur, Mexico

<sup>3</sup>Fins Attached, Colorado Springs, Colorado, USA

<sup>4</sup>MigraMar, Olema, California, USA

<sup>5</sup>Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador

<sup>6</sup>Biotelemetry Consultants, Petaluma, California, USA

<sup>7</sup>Watermen Project, Geneva, Switzerland

<sup>8</sup>Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, Baja California Sur, Mexico

### Correspondence

James T. Ketchum, Pelagios Kakunjá A.C., Baja California Sur, La Paz, Mexico.  
Email: jtketchum@ucdavis.edu

### Funding information

International Community Foundation, Grant/Award Number: 200309722; WWF/Fundación Telmex-Telcel; WWF/Fundación Telmex Telcel, Grant/Award Number: OM84 3; WWF/Fundación Carlos Slim, Grant/Award Number: GCa2016-10 4; Watermen Project, Grant/Award Number: none

### Abstract

This study is the first description of the residency and diel movements of *Sphyrna lewini* at the Revillagigedo National Park, Mexico. Eleven adult scalloped hammerheads of total length 200–300 cm were monitored using acoustic telemetry during 2013–2015 at four sites at San Benedicto Island. Diel and residency patterns were described based on 58,055 detections by four autonomous receivers. The sharks displayed high daytime residency in two of the four sites, with movements away into the pelagic environment at night. This study generates a baseline for effective monitoring to improve the conservation and management of an iconic but endangered species at this marine reserve.

### KEYWORDS

conservation, Eastern Tropical Pacific, endangered species, site fidelity, telemetry

The scalloped hammerhead *Sphyrna lewini* (Griffith & Smith 1834) is a critically endangered coastal pelagic shark (Rigby *et al.*, 2019) known to aggregate at seamount and oceanic islets throughout its distribution (Gallagher & Klimley, 2018). In the Mexican Pacific, studies have focused mostly on the analysis of dead animals captured by the fisheries department (Bejarano-Álvarez *et al.*, 2011). These studies have shown that *S. lewini* prefers bony fishes and cephalopods (Flores-Martínez *et al.*, 2017) and has a moderate growth ( $k = 0.13$  per year) and a size of

180 and 220 cm total length (TL) for males and females, respectively, at onset of sexual maturity (Anislado-Tolentino & Robinson-Mendoza, 2001; Bejarano-Álvarez *et al.*, 2011). Early studies describing the movements of this species were carried out by Klimley (Klimley, 1987; Klimley *et al.*, 1988; Klimley *et al.*, 1993; Klimley & Nelson, 1981, 1984) using acoustic telemetry in the Gulf of California.

More recently, archival and acoustic tags were deployed on juvenile scalloped hammerheads for a study on nursery areas of this

species on the west coast of Mexico (Hoyos-Padilla *et al.*, 2014; Rosende-Pereiro & Corgos, 2018). An adult scalloped hammerhead tagged with a pop-up archival tag was shown to move out of the Gulf of California and while doing so dive into the anoxic layer of the water column (Jorgensen *et al.*, 2009). Nonetheless, other than this there is little information regarding the movements of adult *S. lewini*, especially in pelagic ecosystems such as the Revillagigedo National Park (RNP). The aim of this study was to report the first observations of the residency and diel movements of *S. lewini* at the RNP to provide general insights into its key areas for monitoring and conservation.

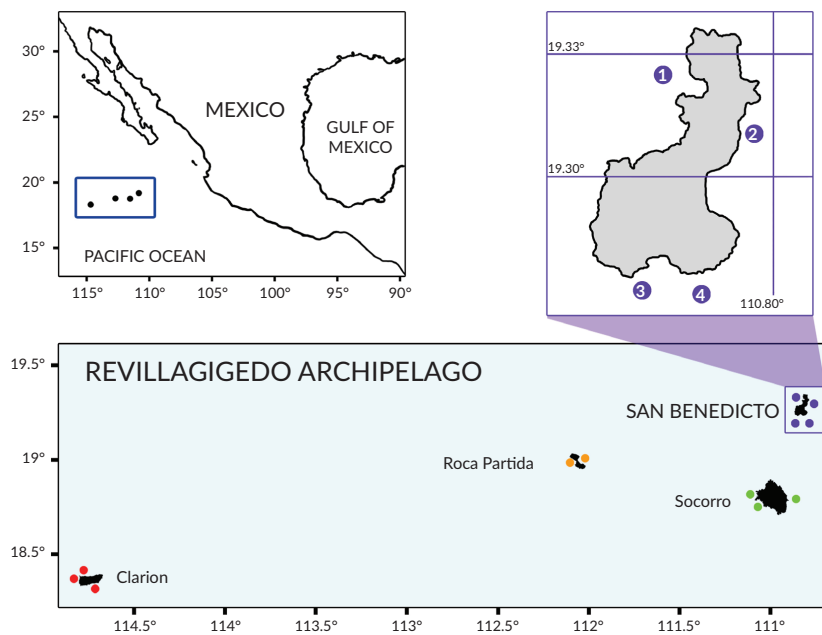
The RNP is considered the largest marine reserve in North America, which includes four volcanic islands—Socorro, San Benedicto, Roca Partida and Clarion—spanning 148,000 km<sup>2</sup> (CONANP, 2017). Scientific expeditions were carried out at the RNP where an array of 12 acoustic receivers (VR2W, VEMCO Ltd., Nova Scotia, Canada) were installed around the four volcanic islands between 2009 and 2013 (Figure 1a). Four receivers were installed at sites known as Boiler, Canyon, Lava Flow and Cuevitas at San Benedicto Island (SBI; 19° 18' 32" N; 110° 48' 44" W; Figure 1b) in 20–40 m depth. At this island, 11 mature scalloped hammerheads were tagged in 2013 by scuba and free diving. Ultrasonic transmitters with unique identifying codes (VEMCO V16, 69.0 kHz) on a stainless-steel barb and tether were attached externally to the dorsal musculature of each shark. Ethics and tagging procedures followed an animal care protocol

(Protocol number 16022, UC Davis Institutional Animal Care and Use Committee). Divers reported the approximated size and sex by the presence of claspers in males and the absence of these structures in females (Compagno *et al.*, 2005).

Residency index was calculated for each of the tagged sharks by dividing the number of days on which a shark was detected with the number of days elapsed from tagging to the last detection. A value of 1 indicates that sharks were always present, whereas 0 indicates periods of absence from the study site (Espinoza *et al.*, 2015). Circular diagrams were generated to describe diel patterns between daytime (06.00–19.00 hours) and night-time (19.00–06.00 hours). In addition, a Rao's spacing test was applied to describe data uniformity throughout the day (Batschelet, 1981; Lund & Agostinelli, 2007).

Nine female and two male hammerheads, with size 200–300 cm TL, were tagged (Table 1). Shark activity was recorded by all four receivers deployed at SBI, but not by the eight receivers deployed around the other islands of the archipelago.

A total of 58,055 acoustic detections were recorded for all tagged sharks. The minimum number of detections per male shark was 368 in 12 days, whereas the maximum number for a female was 23,957 in 807 days (Table 1). The Canyon site reported 72.46% of the detections ( $n = 42,066$ ), followed by Lava Flow 22.27% ( $n = 12,926$ ), Boiler 5.08% ( $n = 2950$ ) and Cuevitas 0.35% ( $n = 203$ ).

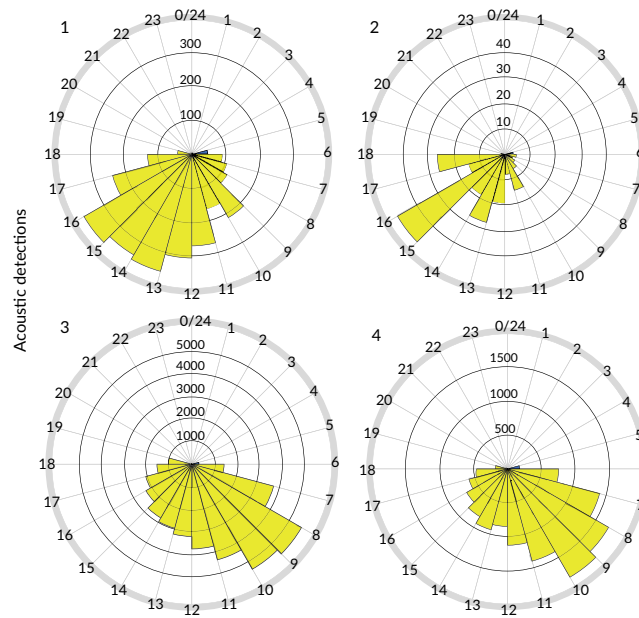


**FIGURE 1** (a) Revillagigedo National Park (boundary given as blue rectangle). (b) The four Revillagigedo islands with black dots indicating the locations of the acoustic receivers (see solid coloured circles) for each island, with an inset showing San Benedicto Island with higher spatial resolution with the locations of the four acoustic receivers: (1) Boiler, (2) Cuevitas, (3) Canyon and (4) Lava Flow

**TABLE 1** Acoustic detections and biological data of the 11 adult scalloped hammerhead sharks tagged in San Benedicto Island during 2013–2014

ID	Sex	TL	Tagging day	Detections	Initial date	Final date	Days detected	Days monitored
HH1	F	300	1 July 2013	797	9 January 2013	5 February 2013	27	802
HH2	F	300	1 August 2013	3690	8 January 2013	27 April 2013	109	803
HH3	F	300	1 September 2013	4612	4 January 2013	25 March 2014	445	807
HH4	F	200	1 October 2013	3638	9 January 2013	2 January 2014	358	802
HH5	F	200	1 October 2013	797	8 January 2013	19 February 2013	42	803
HH6	F	270	1 November 2013	2475	11 January 2013	15 May 2013	124	800
HH7	M	270	1 November 2013	413	10 January 2013	25 January 2013	15	801
HH8	F	250	1 December 2013	23,957	12 January 2013	23 September 2014	619	799
HH9	F	220	1 December 2013	14,136	11 January 2013	22 March 2015	800	800
HH10	M	250	1 December 2013	368	12 January 2013	24 January 2013	12	799
HH11	F	280	3 July 2013	3172	8 March 2013	3 November 2013	240	744

TL, total length (cm).



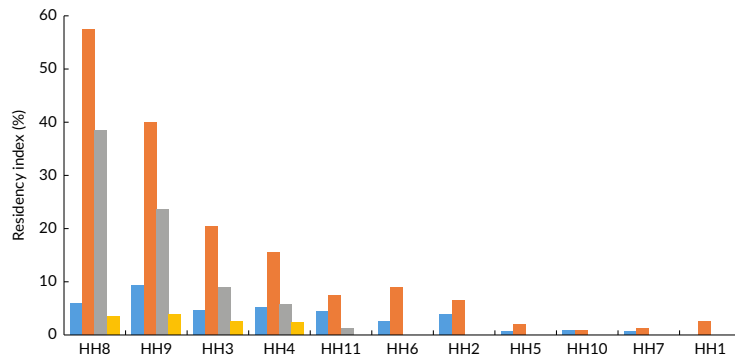
**FIGURE 2** Number of acoustic detections per hour of 11 scalloped hammerhead sharks tagged in San Benedicto Island, Mexico: (1) Boiler ( $n = 2950$ ), (2) Cuevitas ( $n = 203$ ), (3) Canyon ( $n = 42,066$ ) and (4) Lava Flow ( $n = 12,926$ ). ■ Day, ■ Night

The hammerheads spent most of the day within range of the receiver locations. A higher number of detections were observed during the morning, 06.00–12.00 hours, in Canyon and Lava Flow, and during the afternoon, 12.00–18.00 hours, in Boiler and Cuevitas. Overall, a significantly lower number of detections were observed by the four receivers during the night (test,  $P < 0.01$ ; Figure 2).

The sharks remained in the area for 1–27 months, with a mean of 8.9 months (s.e.  $\pm 2.7$ ). Residency index at the four sites ranged from 0.08 to 0.73, with a mean of 0.38 (s.e.  $\pm 0.29$ ; Figure 3). Residency

was significantly higher at Canyon, with values ranging from 0.01 to 0.57, and at Lava Flow, from 0.00 to 0.38, than at Boiler and Cuevitas, with values ranging from 0.00 to 0.01 and from 0.00 to 0.04, respectively (Figure 3).

The scalloped hammerhead shark is one of the most important species in commercial fisheries, as well as in ecotourism activities in the Mexican Pacific (Bejarano-Álvarez *et al.*, 2011; Ketchum *et al.*, in press; Cisneros-Montemayor *et al.*, in press). Nonetheless, the lack of full protection policies and insufficient regulations in some key areas, such as seamounts or oceanic environments, have significantly



**FIGURE 3** Residency index of the 11 scalloped hammerhead sharks analysed according to the locality in San Benedicto Island, Mexico. ■ Boiler, ■ Canyon, ■ LavaFlow, ■ Cuevitas

reduced their populations (Klimley et al., 2005; Hoyos-Padilla et al., 2014; Ketchum et al., in press). Although there is published information regarding the residency of this species in the Gulf of California (Klimley & Nelson, 1984; Klimley et al., 1988), the present study constitutes the first observations of its residency and movement patterns in the RNP.

The present study was focused mostly on adult females. These results may be related to a preference of *S. lewini* to SBI, especially for the southern area of this island where the highest number of detections was observed; this might be related to the proximity of some offshore seamounts where they feed.

The high residency of female hammerheads in the southern area of SBI constitutes an important refuge as shown for this species at a seamount in the Gulf of California (Klimley & Nelson, 1984), which may relate to the magnetic properties of the site (Klimley, 1993) as well as the occurrence of cleaning stations (Bessudo et al., 2011; Ketchum et al., 2014a). In the southern area of SBI, the strong currents could allow low-energy swimming for the scalloped hammerheads during their aggregation in schools, as it has been suggested in other localities like Malpelo (Bessudo et al., 2011), Galapagos (Hearn et al., 2010; Ketchum et al., 2014a) or Cocos (Nalesso et al., 2019).

In addition, the residency of *S. lewini* during the day could be related to the presence of cleaning stations, where blacknose butterflyfish *Johnrandallia nigrirostris*, the Mexican hogfish *Bodianus diplotaenia* and the endemic Clarion angelfish *Holacanthus clarionensis* have been observed by the co-authors (J.T.K. and E.M.H.). This behaviour has been observed in many other areas such as the Gulf of California and several islands in the Eastern Tropical Pacific such as Cocos, Galapagos and Malpelo.

Females of the species within schools compete for males (Klimley, 1985), resulting in pairing and mating socially during the day at these sites (Salinas-de-León et al., 2017). Thus, the insular habitat, recognizable by its bathymetry and magnetic nature, can serve as a refuge, where social interaction occurs, and a staging location to move into the pelagic environment to forage (Klimley, 1993; Klimley et al., 1993; Hearn et al., 2010; Ketchum, et al., 2014a).

The scalloped hammerheads remain at SBI during the day, whereas at night the lower number of detections may be due to the

movement of sharks to offshore areas. This pattern has been suggested as part of the feeding behaviour and diel movements of *S. lewini* in other areas of the Eastern Tropical Pacific (Hearn et al., 2010; Ketchum et al., 2014a,b; Nalesso et al., 2019).

This long-term, high site fidelity suggests that in terms of conservation, SBI may be considered an important aggregation site for this endangered species. Future research on hammerheads at the RNP should include oceanographic and geomagnetic surveys performed *in situ*, especially at depths where the scalloped hammerheads usually are found. Additional work should be performed on cleaning stations, particularly behavioural studies on the cleaning interactions for scalloped hammerheads and other species of sharks.

Aggregations of *S. lewini* like those observed at SBI can indicate that certain populations are small, highly localized and in shallow water (<30 m depth). This makes hammerheads highly vulnerable because their direct capture, especially near the ocean surface (Ketchum et al., 2009), could lead to their decline affecting the recruitment of the species (Baum et al., 2003; Baum & Myers, 2004), particularly if most sharks are adult females.

The establishment of the RNP as a large-scale no-take in 2017 may be an effective tool for the protection of the scalloped hammerhead, considering the occurrence of aggregation sites at SBI as well as at other islands such as Socorro and Roca Partida (author's personal observation). Nevertheless, other conservation and management tools are critical for the protection and recovery of this endangered species in the Gulf of California and the Mexican Pacific.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

We especially thank Sea Escape and Quino El Guardian liveboards for providing space to travel to the islands. We are also indebted to Pelagios Kakunjá for field support. This study was financially supported by the International Community Foundation, Alianza WWF/Fundación Telmex-Telcel, Alianza WWF/Fundación Carlos Slim, the Watermen Project and National Geographic-Fischer Productions. We also thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for the scholarships provided, the Instituto Politécnico Nacional for funding through grants from the Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas and Estímulo al Desempeño de los Investigadores. This

research was carried out under permits from the Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (DGOPA.06668.150612.1691) and Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (F00.DRBPBCPN-APFFCSL.REBIARRE-102/13) of Mexico. We are also grateful to Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales and Dirección del Parque Nacional Revillagigedo for providing necessary permits to conduct research at the Revillagigedo National Park, a UNESCO World Heritage Site.

#### ORCID

James T. Ketchum  <https://orcid.org/0000-0002-7340-4749>

#### REFERENCES

- Anislado-Tolentino, V., & Robinson-Mendoza, C. (2001). Age and growth of the scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* (Griffith and Smith, 1834) along the Central Pacific coast of Mexico. *Ciencias Marinas*, 27(4), 501–520.
- Batschelet, E. (1981). *Circular statistic in biology*. London, UK: Academic Press.
- Baum, J. K., & Myers, R. A. (2004). Shifting baselines and the decline of pelagic sharks in the Gulf of Mexico. *Ecology Letters*, 7(2), 135–145.
- Baum, J. K., Myers, R. A., Kehler, D. G., Worm, B., Harley, S. J., & Doherty, P. A. (2003). Collapse and conservation of shark populations in the Northwestern Atlantic. *Science*, 299, 389.
- Bejarano-Álvarez, M., Galván-Magaña, F., & Ochoa-Báez, R. I. (2011). Reproductive biology of the scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* (Chondrichthyes: Sphyrnidae) off southwest Mexico. *Aqua, International Journal of Ichthyology*, 17(1), 11–22.
- Bessudo, S., Soler, G. A., Klimley, A. P., Ketchum, J. T., Hearn, A., & Arauz, R. (2011). Residency of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) at Malpelo Island and evidence of migration to other islands in the Eastern Tropical Pacific. *Environmental Biology of Fishes*, 91(2), 165–176.
- Cisneros-Montemayor, A. M., Ayala-Bocos, A., Berdeja-Zavala, O., & Becerril-García, E. E. (In press). Shark ecotourism in Mexico: Scientific research, conservation, and contribution to a Blue Economy. In S. Larson & D. Lowry (Eds.), *Conservation of Mexican Sharks, Advances in Marine Biology*. London, UK: Academic Press.
- Compagno, L., Dando, M., & Fowler, S. (2005). *Shark of the world*. New Jersey: Princeton University Press Oxford.
- CONANP. (2017). *Estudio previo justificativo para la declaratoria del Parque Nacional Revillagigedo*. México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Espinoza, M., Heupel, M. R., Tobin, A. J., & Simpfendorfer, C. A. (2015). Movement patterns of silvertip sharks (*Carcharhinus albimarginatus*) on coral reefs. *Coral Reefs*, 34(3), 807–821.
- Flores-Martínez, I. A., Torres-Rojas, Y. E., Galván-Magaña, F., & Ramos-Miranda, J. (2017). Diet comparison between silky sharks (*Carcharhinus falciformis*) and scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) off the south-west coast of Mexico. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 97(2), 337–345.
- Gallagher, A. J., & Klimley, A. P. (2018). The biology and conservation status of the large hammerhead shark complex: the great, scalloped and smooth hammerheads. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 28(4), 777–794.
- Hearn, A., Ketchum, J. T., Klimley, A. P., Espinoza, E., & Peñaherrera, C. (2010). Hotspots within hotspots? Hammerhead shark movements around Wolf Island, Galapagos Marine Reserve. *Marine Biology*, 157, 1899–1915.
- Hoyos-Padilla, E. M., Ketchum, J. T., Klimley, A. P., & Galván-Magaña, F. (2014). Ontogenetic migration of a female scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* in the Gulf of California. *Animal Biotelemetry*, 2(1), 17.
- Jorgensen, S. J., Klimley, A. P., & Muhlia-Melo, A. F. (2009). Scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini*, utilizes deep-water, hypoxic zone in the Gulf of California. *Journal of Fish Biology*, 74, 1682–1687.
- Ketchum, J. T., Hearn, A., Klimley, A. P., Espinoza, E., Peñaherrera, C., & Largier, J. L. (2014a). Seasonal changes in movements and habitat preferences of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) while refuging near an oceanic island. *Marine Biology*, 161(4), 755–767.
- Ketchum, J. T., Hearn, A., Shillinger, G., Espinoza, E., Peñaherrera, C., & Klimley, A. P. (2009). Shark movements and the design of protected pelagic environments within and beyond the Galapagos Marine Reserve. In: M. Wolff & M. Gardener (Eds.), *Proceedings of the Galapagos Science Symposium 2009* (pp. 127–130). Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador: Charles Darwin Foundation.
- Ketchum, J. T., Hearn, A., Klimley, A. P., Peñaherrera, C., Espinoza, E., Bessudo, S., ... Arauz, R. (2014b). Inter-island movements of scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) and seasonal connectivity in a marine protected area of the Eastern Tropical Pacific. *Marine Biology*, 161, 939–951.
- Ketchum, J. T., Hoyos-Padilla, M., Aldana-Moreno, A., Ayres, K., Galván-Magaña, F., Hearn, A., ... Klimley, A. P. (In press). Shark movement patterns in the Mexican Pacific: A conservation and management perspective. In: S. Larson & D. Lowry (Eds.), *Conservation of Mexican Sharks, Advances in Marine Biology*. London, UK: Academic Press.
- Klimley, A. P. (1985). Schooling in the large predator, *Sphyrna lewini*, a species with low risk of predation: A non-egalitarian state. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 70, 297–319.
- Klimley, A. P. (1987). The determinants of sexual segregations in the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*. *Environmental Biology of Fishes*, 18, 27–40.
- Klimley, A. P. (1993). Highly directional swimming by scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini*, and subsurface irradiance, temperature, bathymetry, and geomagnetic field. *Marine Biology*, 117, 1–22.
- Klimley, A. P., Butler, S. B., Nelson, D. R., & Stull, A. T. (1988). Diel movements of scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini* Griffith and Smith, to and from a seamount in the Gulf of California. *Journal of Fish Biology*, 33(5), 751–761.
- Klimley, A. P., Castillo-Geniz, J. L., & Cabrera-Mancilla, I. (1993). Descripción de los movimientos horizontales y verticales del tiburón martillo *Sphyrna lewini*, del sur del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas*, 19, 95–115.
- Klimley, A. P., & Nelson, D. R. (1981). Schooling of the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*, in the Gulf of California. *Fishery Bulletin*, 79(2), 356–360.
- Klimley, A. P., & Nelson, D. R. (1984). Diel movement patterns of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) in relation to El Bajo Espíritu Santo: A refuging central-position social system. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 15(1), 45–54.
- Klimley, A. P., Richert, J. E., & Jorgensen, S. J. (2005). The home of blue water fish. *American Scientist*, 93, 42–49.
- Lund, U., & Agostinelli, C. (2007). Circstats: circular statistics. In: S.R. Jammalamadaka & A. SenGupta (eds.), *Topics in circular statistics. World Scientific, Version 0.2-4*. Retrieved from <http://statweb.calpoly.edu/lund/>.
- Nalesso, E., Hearn, A., Sosa-Nishizaki, O., Steiner, T., Antoniou, A., Reid, A., ... Arauz, R. (2019). Movements of scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) at Cocos Island, Costa Rica and between oceanic islands in the Eastern Tropical Pacific. *PLoS One*, 14(3), e0213741.
- Rosende-Pereiro, A., & Corgos, A. (2018). Pilot acoustic tracking study on young of the year scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini*, within a coastal nursery area in Jalisco, Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 46(4), 645–659.
- Rigby, C. L., Dulvy, N. K., Barreto, R., Carlson, J., Fernando, D., Fordham, S., Francis, M. P., Herman, K., Jabado, R. W., Liu, K. M., Marshall, A.,

Anexo 3. De este estudio se derivaron dos productos científicos que fueron publicados en revistas internacionales e indexadas.

Aldana-Moreno, A., E.M. Hoyos-Padilla, R. González-Armas, F. Galván-Magaña, A. Hearn, A.P. Klimley, W. Winram, E.E. Becerril-García, J.T. Ketchum. 2019. Residency and diel movement patterns of the endangered scalloped hammerhead *Sphyrna lewini* in the Revillagigedo National Park. *Journal of Fish Biology*, 1-6.

Ketchum, J.T., E.M. Hoyos-Padilla, A. Aldana-Moreno, K. Ayres, F. Galván-Magaña, A. Hearn, F. Lara-Lizardi, G. Muntaner-López, M. Grau, A. Trejo-Ramírez, D.A. Whitehead & A.P. Klimley. 2020. Shark movement patterns in the Mexican Pacific: A conservation and management perspective. 1–37. In: S. Larson & D. Lowry (eds). *Conservation of Mexican Sharks, Advances in Marine Biology*. Academic Press London, United Kingdom.