

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Eval. Amb. Ecosistemas marinos y Cost.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Monitorización acústico-óptica del comportamiento del atún rojo (*Thunnus thynnus*) en tanques ante ruido acústico”

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:
Ana de Ros Moliner

Tutor/a:
Isabel Pérez Arjona
Victor Espinosa Roselló

GANDIA, 2019

Agradecimientos

Este TFM no habría sido posible sin la colaboración y ayuda de mucha gente:

Quiero dar las gracias a los responsables del ICRA en Mazarrón por permitirnos llevar a cabo este seguimiento en sus instalaciones. A Fran, Diego, Jaime y Fran por toda su ayuda y su paciencia para apuntar cada tarea que hacían en nuestra libreta, que definitivamente me ha hecho la vida más fácil.

A mis tutores Isabel y Victor por sus correcciones y comentarios. A Vicent y a Manu por su paciencia y ayuda guiándome en el mundo de la acústica (que no magia y santería).

A Pau por su ayuda con las cámaras de video. A todo el equipo que desarrolló el SAMARUC, especialmente a Guille que literalmente solamente con su presencia soluciona problemas.

A Elena por todas las horas esfuerzo y lágrimas, pero sobretodo por las risas entre pitidos y coralígeno que hacía las horas un poco más cortas

A Chente y Fernando por leeros el trabajo y a todos los que me han oído hablar de atunes durante estos meses... a todos muchas gracias!

Resumen

La acción antrópica es responsable de una gran cantidad de ruidos en el medio marino y en muchas ocasiones con consecuencias devastadoras para los ecosistemas afectados. El atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) es una especie con una gran importancia económica gravemente afectada por la sobreexplotación, en los últimos 30 años han proliferado las instalaciones destinadas al engrase de los atunes para su posterior venta. Los atunes en cautividad se ven expuestos a una gran cantidad de ruido de origen antropogénico. Durante un mes se realizó un monitoreo para determinar el impacto de la contaminación acústica en el comportamiento de atunes en cautividad en las instalaciones del ICRA en Mazarrón (Murcia). Para ello, se han usado técnicas ópticas (cámara estereoscópica), de acústica pasivas (hidrófono) y acústica activa (ecosondas) en distintas configuraciones (ventral, dorsal y lateral). Los resultados de este estudio muestran una relación entre comportamientos poco habituales y sonidos a baja frecuencia. También se registraron vocalizaciones de los atunes asociadas con la generación de sonidos pulsados de baja frecuencia (100-180 Hz y duración inferior a un segundo).

Palabras clave: *Thunnus thynnus*, comportamiento, ruido submarino, técnicas acústicas, técnicas ópticas

Abstract

The anthropic action is responsible for a great deal of noise in the marine environment and often with devastating consequences for the affected ecosystems. Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) is a species of major economic importance seriously affected by overexploitation, In the past 30 years there has been a proliferation of facilities for the greasing of tuna for subsequent sale. Tunas in captivity are exposed to a large amount of anthropogenic noise. During one month, a monitoring was carried out to determine the impact of noise pollution on the behaviour of tuna in captivity at the ICRA facilities in Mazarrón (Murcia) using optical techniques (stereoscopic cameras), passive acoustic techniques (hydrophone) and active acoustic techniques (echosounders) have been used in different configurations (ventral, dorsal and lateral). The results of this study show a relationship between unusual behaviors and low frequency sounds. Tuna vocalizations associated with the generation of low frequency pulsed sounds (100-180 Hz and duration less than one second) were also recorded.

Key words: *Thunnus thynnus*, behaviour, underwater noise, acoustic techniques, optical techniques

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. OBJETIVOS	8
1.2. CONCEPTOS PREVIOS DE ACÚSTICA SUBMARINA	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
2.2. SISTEMAS ACÚSTICOS	12
Configuración del Sistema de Acústica Pasiva	12
Ecosondas y transductores.....	14
2.3. SISTEMAS OPTICOS	15
2.4. POST-PROCESADO DE DATOS.....	19
3. RESULTADOS	22
4. DISCUSIÓN.....	46
5. CONCLUSIONES	47
6. BIBLIOGRAFÍA.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Atún rojo del Atlántico (<i>Thunnus thynnus</i>).....	7
Figura 2: Vista lateral de la estructura del oído interno derecho de un atún.....	8
Figura 3: Proceso de reflexión y refracción de las ondas acústicas	10
Figura 4. Instalaciones ICRA (Mazarrón, Murcia).....	12
Figura 5. Tanque A del ICRA (Mazarrón, Murcia).....	12
Figura 6. Hidrófono Aquarian H2a	13
Figura 7. Grabadora Zoom H1 Handy Recorder	13
Figura 8. Transductor ES120-7C	15
Figura 9. Configuración del equipo acústico-óptico en posición ventral	17
Figura 10. Ecograma (Ecosonda en posición ventral)	17

Figura 11: Imagen del video (Cámara en posición ventral).....	17
Figura 12. Configuración del equipo acústico-óptico en posición lateral	18
Figura 13. Ecograma (Ecosonda en posición lateral)	18
Figura 14. Imagen del video (Cámara en posición lateral).....	18
Figura 15. Configuración del equipo acústico-óptico en posición dorsal	19
Figura 16. Ecograma (Ecosonda en posición dorsal).....	19
Figura 17. Imagen del video (Cámara en posición dorsal)	19
Figura 18. representación gráfica de los audios generadas por SAMARUC.....	20
Figura 19. Atunes nadando (imagen captada por la cámara en posición lateral)	21
Figura 20: Ecograma del tanque de atunes estudiado (ecosonda en posición ventral)	22
Figura 21: Espectrograma y forma de onda de ruido en una situación "normal"	23
Figura 22. Atún abriendo la boca para alimentarse (Cámara en posición dorsal).....	24
Figura 23: Movimiento de ascenso de los atunes para alcanzar los trozos de pescado.....	24
Figura 24: Alimentación de los atunes (Ecosonda en posición ventral)	25
Figura 25: Movimiento de descenso de los atunes tras alcanzar un trozo de pescado (Cámara en posición lateral).....	25
Figura 26: Atunes "tosiendo/eructando"	26
Figura 28. Espectrograma eructo 8	27
Figura 29. Espectrograma eructo 16	27
Figura 30. Espectrograma eructo 17	28
Figura 31: Ecograma correspondiente al evento 1	31
Figura 32. Evento 1, Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud.	32
Figura 33. Evento 1, Sonido 2 Espectrograma y variación de la amplitud.	32
Figura 33: Ecograma evento 2.....	33
Figura 34. Evento 2, Sonido 1 Espectrograma y variación de la amplitud.	34
Figura 35. Evento 2, Sonido 2 y 3. Espectrograma y variación de la amplitud.	34
Figura 36. Evento 2 Sonidos 4 y 5. Espectrograma y variación de la amplitud.....	35
Figura 37. Evento 2 Sonido 6. Espectrograma y variación de la amplitud.....	36
Figura 38. Evento 2 Sonido 7. Espectrograma y variación de la amplitud.....	36
Figura 40. Evento 3 Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud.....	38
Figura 41: Evento 3 Sonido 2 Espectrograma y variación de la amplitud.....	38
Figura 42. Evento 4 Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud.....	39
Figura 43. Evento 4 Sonido 2. Espectrograma y variación de la amplitud.....	40

Figura 44: Ecograma evento 5.....	41
Figura 45: Ecograma evento 5.....	42
Figura 46. Evento 5 Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud.....	43
Figura 47: Ecograma evento 6.....	44
Figura 48. Ecograma evento 5.....	44
Figura 49. Evento 6 Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud.....	45

TABLAS

Tabla 1. Tipos de ecosondas y aplicaciones	11
Tabla 2. Características de los tanques A y B	11
Tabla 3. Especificaciones técnicas del hidrófono Aquarian H2a	12
Tabla 4. Especificaciones técnicas de la grabadora Zoom H1 Handy Recorder	14
Tabla 5. Especificaciones técnicas transductor ES120-7C.....	15
Tabla 6. Especificaciones técnicas transductor ES200-7C.....	15
Tabla 7. Selección de algunos indicadores disponibles en el SAMARUC.	21
Tabla 8. Vocalizaciones de atunes registradas.....	26
Tabla 9. Comportamientos anómalos registrados.....	30

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas son responsables de la generación de una gran cantidad de ruido en el medio marino con efectos que pueden llegar a ser devastadores en sus ecosistemas; de hecho, la Asamblea General de Naciones Unidas ha señalado el ruido antropogénico como una de las amenazas a la biodiversidad marina. Sin embargo, los estudios sobre los efectos derivados de la contaminación acústica en los sistemas acuáticos son relativamente recientes, y en muchos casos aún se desconoce el alcance de sus consecuencias en la salud de nuestros mares y océanos, lo que implica un retraso con respecto a la legislación específica destinada a gestionar este tipo de contaminación (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente 2012).

Una forma de clasificar las fuentes antrópicas de ruido ambiental puede ser en función de su frecuencia y duración. Dentro de aquellos sonidos de media/alta frecuencia y corta duración encontraríamos los pulsos generados por los sónares y ecosondas, y también en un espectro mayor, desde bajas a altas frecuencias, aquellos derivados de las perforaciones marinas que pueden ser causantes de graves lesiones o incluso la muerte de peces y otros organismos marinos que se encuentren en las proximidades. Sonidos con una frecuencia moderada/baja y una duración mayor pueden afectar a áreas mucho mayores de una forma crónica y por lo tanto afectar a un número mayor de individuos; en este tipo de sonidos encontramos fuentes como buques y barcos de pasajeros o mercancías, pesqueros, instalación y explotación de plataformas “offshore” como parques eólicos marinos (Pérez-Arjona et al 2014).

Al hablar de posibles efectos de la contaminación acústica en las poblaciones de peces, estos pueden influir tanto en su comportamiento (afectando a migraciones, comunicación o incluso a hábitos reproductores) como en su fisiología, aunque debido a la enorme variabilidad entre especies es muy difícil generalizar el posible impacto del ruido submarino (Slabbekoorn et al 2010), pese a que en los últimos años se han multiplicado los estudios sobre el ruido submarino y sus impactos (Peng et al 2015, William et al 2015)

En el año 2001 Bart et al. publicó el primer estudio sobre los efectos de la contaminación acústica en acuicultura en el cual se resaltaba la importancia de este tipo de contaminación como consecuencia de los ruidos debidos a los circuitos de circulación de agua y aire, los sistemas de filtración y el mantenimiento de las instalaciones entre otras fuentes. En este trabajo se subrayaba como la presencia de ruido crónico en las instalaciones podrían tener efectos en la salud y el bienestar de los individuos con el consecuente impacto económico o incluso en la salud pública. La complejidad del problema sumado a la enorme variabilidad entre especies potencialmente afectadas ha supuesto que casi 20 años después, la investigación del impacto de la contaminación acústica en especies tanto en cautividad como en libertad siga requiriendo de más estudios.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) define la acuicultura como la cría de organismos acuáticos, incluyendo peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas. Esta actividad implica la intervención humana para incrementar la producción (alimentando las poblaciones y protegiéndolas de los depredadores entre otras acciones). A diferencia de la pesca, las especies de acuicultura al menos en la etapa final de su ciclo pertenecen a una persona física o jurídica.

Aunque el origen de la acuicultura se remonta a hace más de 4000 años en China, ha sido en los últimos 50 años cuando la importancia de la acuicultura se ha visto incrementada, convirtiéndose en una actividad socioeconómica relevante dando empleo a más de 12 millones de personas en todo el mundo. Los datos relativos al año 2016, sitúan a España como el líder

Europeo en acuicultura (283.831 toneladas) seguido por Reino Unido (192.492 toneladas) y Francia (166.640 toneladas) (APROMAR, 2018).

Acuicultura y *Thunnus thynnus*

Una de las especies más explotadas en el mar Mediterráneo es el atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*, Linnaeus 1758). El atún tiene una enorme importancia económica a nivel mundial y su sobreexplotación ha llevado a la especie al borde de la extinción, si bien las medidas tomadas por la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT), limitando las tallas y cuotas de capturas han conseguido la recuperación del subgrupo la especie que se reproduce en el Mediterráneo (Iccat, 2017) . En los últimos 30 años han proliferado las instalaciones de acuicultura en el Mediterráneo destinadas al engrase de los individuos para comercializarlos una vez que alcanzan la talla deseada.

En la actualidad, el cultivo de atún rojo consiste en capturar los atunes con artes de almadrabas o cerco en las zonas de reproducción o de camino a ellas. Una vez los individuos son capturados, se trasladan a las granjas de engrase donde se pretende aumentar el contenido graso de los atunes alimentándolos a saciedad con especies de bajo valor comercial y alto contenido graso. Una vez que los atunes alcanzan el peso deseado, estos son sacrificados en función de la demanda del mercado (Belmonte et al. 2008).

El atún rojo del Atlántico es un teleósterio de la familia *Scombridae*. Esta especie tiene un cuerpo fusiforme y robusto, azul oscuro en el dorso con la zona inferior blanco plateado con líneas trasversales incoloras con una hilera de puntos. Puede alcanzar los 3 metros de longitud y los 600 kg de peso y una esperanza de vida de entre 15 y 20 años. La enorme capacidad natatoria del atún rojo (velocidad media de 5,9 km/h y máxima entre 13 y 31 km/h) le permite realizar migraciones de largas distancias. Las migraciones estacionales que realiza la especie están asociadas a la búsqueda de alimento y la reproducción (Belmonte et al. 2008, ICCAT 2016) (Figura 1).



Figura 1: Atún rojo del Atlántico (Thunnus thynnus) (Fuente I.E.O. Murcia)

El oído de los atunes se encuentra dentro de la cavidad craneal y carece de una apertura al exterior, careciendo por tanto de oído externo y medio. La estructura del oído interno (Figura 2) consta de tres canales semicirculares con gruesas paredes cartilaginosas y tres cavidades llamadas utrículo, sáculo y lagena (estas dos últimas conectadas anteroposteriormente). Estas tres cavidades están recubiertas de un tejido sensorial (orientado en el plano horizontal en el utrículo y en el plano vertical en el sáculo y la lagena) y muy cerca de este epitelio sensorial encontramos los otolitos. La morfología del sistema auditivo de los atunes parece indicar que

la frecuencia máxima detectable por los atunes se encuentre en torno a los 1000 Hz (Song et al., 2006).

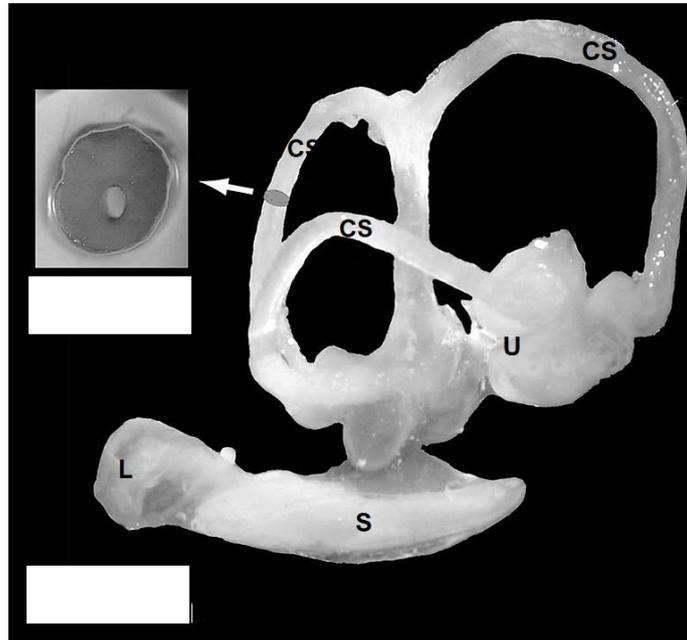


Figura 2: Vista lateral de la estructura del oído interno derecho de un atún rojo. L: Lagena, U: Utrículo, S: Sáculo, CS: Canal Semicircular (Fuente: Song et al., 2006)

El elevado valor económico asociado al atún ha propiciado numerosos estudios sobre su comportamiento en cautividad con la intención de mejorar su gestión, en numerosos casos recurriendo a sistemas de video (Harvey et al. 2003, Costa et al. 2009, Nucci et al. 2010, Puig-Pons et al. 2011, Torisawa et al. 2011). Este tipo de estudios, pueden contribuir a una explotación más sostenible y eficiente de la especie en cautividad y al mismo tiempo contribuir a mejorar el entendimiento en la fisiología y comportamiento de la especie. Por otro lado, las instalaciones de acuicultura también proporcionan un escenario donde poder monitorear el ruido submarino y los efectos en la población de atunes en unas condiciones relativamente controladas.

1.1. OBJETIVOS

Los objetivos de este Trabajo de Fin de Máster son los siguientes:

- Estudiar la relación entre los estímulos acústicos y el comportamiento de los atunes mediante un monitoreo basado en técnicas acústico-ópticas.
- Caracterizar el ruido ambiente y las posibles fuentes sonoras en las instalaciones del ICRA a través de un sistema de seguimiento de acústica pasiva.
- Estudio de la generación de sonidos por parte de los atunes en las instalaciones del ICRA.
- Comparación de distintas configuración del sistema acústico-óptico de monitorización del comportamiento de los atunes.

1.2. CONCEPTOS PREVIOS DE ACÚSTICA SUBMARINA

A continuación, se introducen los conceptos básicos de acústica submarina necesarios para comprender el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster.

Ondas acústicas: características y propagación en el mar

Cuando se produce una perturbación mecánica en un fluido u otro medio de propiedades elásticas se producen oscilaciones en la presión que son transmitidas a través de ondas acústicas, este fenómeno es conocido como sonido y su propagación implica transporte de energía sin transporte de materia. El flujo de energía por unidad de superficie y de tiempo es conocido como intensidad (I) y la intensidad total que recibe una superficie es conocida como potencia (P).

En acústica, es el decibelio (dB) la unidad de medida y se basa en los logaritmos de las intensidades relativas a una intensidad de referencia (correspondiente a una presión de $1 \mu\text{Pa}$). Por tanto, el nivel de intensidad (L_I) expresa un ratio de intensidad siguiendo la siguiente ecuación:

$$L_I = 10 \log (I / I_{\text{REF}})$$

La velocidad de propagación de estas ondas (c) depende de la densidad del medio en el que viaja (ρ) y el módulo de elasticidad de este (E , cuantifica la variación relativa de volumen o densidad por las variaciones de presión). Estos términos se relacionan siguiendo la ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Todas las ondas, incluidas las acústicas, vienen definidas por su longitud de onda (λ , distancia entre dos puntos máximos consecutivos de la onda), la frecuencia de la onda (f , número de vibraciones por segundo) y su periodo (T , tiempo en segundos en el que se produce una vibración completa). Estos términos se relacionan entre sí siguiendo la ecuación siguiente:

$$\lambda = c T = c / f$$

La velocidad de propagación del sonido en el mar depende de la temperatura (T , medida en $^{\circ}\text{C}$), la salinidad (S , medida en unidades prácticas de salinidad, psu por sus siglas en inglés) y la profundidad (z , medida en metros). La velocidad del sonido es directamente proporcional a estas variables, por lo que un aumento en cualquiera de ella se traduce en el incremento de la velocidad del sonido como muestra la expresión siguiente.

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T) (S - 35,0) + 0,016 z$$

La propagación de las ondas acústicas está sometidas a procesos de reflexión, refracción y absorción.

La reflexión es el fenómeno que se produce cuando una onda impacta contra un medio con una impedancia acústica distinta (determinado por la densidad del medio y su velocidad de propagación), parte de la energía rebota con un ángulo especular a la onda incidente. Durante el fenómeno de refracción, parte de la energía se propaga en el segundo medio (Figura 3). El proceso de absorción supone la pérdida de potencia de la onda, este fenómeno depende de la longitud de onda de la señal (a mayor longitud de onda, la frecuencia es menor y la absorción es mayor).

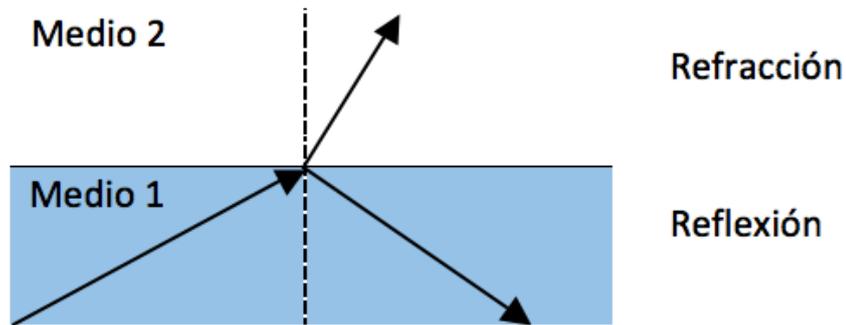


Figura 3: Proceso de reflexión y refracción de las ondas acústicas

Aplicaciones

La alta conductividad del medio marino produce una enorme absorción de las ondas electromagnéticas y por lo tanto su atenuación. Sin embargo, esto no ocurre con las ondas acústicas cuya propagación en el medio marino es especialmente favorable, con una velocidad 5 veces mayor que en el aire y una absorción mil veces menor.

Las características de las ondas acústicas en el medio marino permiten el uso de técnicas de acústica pasiva y activa. Las técnicas de acústica pasiva se basan en el estudio de las ondas presentes en el medio (por ejemplo: a través de hidrófonos) mientras que las técnicas de acústica activa se basan en la generación de ondas que permiten el estudio de los ecos devueltos para usarse en la detección y caracterización del medio marino. Una de las principales herramientas basadas en esto son las ecosondas científicas.

Las ecosondas acústicas son sistemas formados por un procesador, transceptor (sistema de generación de señales eléctricas) y un transductor (elemento formado por materiales con propiedades piezoeléctricas que vibran al pasar una señal eléctrica emitiendo pings de sonido a una determinada frecuencia y duración y viceversa). La señal acústica generada por la ecosonda es transmitida a través del agua en forma de haz direccional, cuando este haz se topa con un objeto, una parte de su energía se refleja (eco) y es captada por el transductor que convierte en una señal eléctrica. Al procesar esta señal, se puede obtener información sobre el objeto y su posición.

La tabla 1 muestra los principales tipos de ecosondas, su funcionamiento y principales aplicaciones.

Tabla 1. Tipos de ecosondas y aplicaciones

Ecosonda	Funcionamiento	Aplicaciones
Sonda Monohaz (single-beam echosounder)	Un único haz acústico viaja por la columna de agua, rebota en el fondo y el eco es recibido por el transductor	<ul style="list-style-type: none"> Batimetrías Clasificación de fondos
Sonar de Barrido Lateral (Side Scan Sonar)	Haz acústico muy fino longitudinalmente y ancho transversalmente que emite hacia el fondo con un ángulo de 65°. Las frecuencias usadas son más elevadas por lo que la precisión es mayor	<ul style="list-style-type: none"> Detección de fondos Caracterización de fondos (texturas de fondos y cartografía de la vegetación marina) Batimetrías Estudio de corrientes
Sondas de haz partidas (Split-beam echosounder)	Haz partido en 4 cuadrantes que permite caracterizar el lugar de rebote basándose en la diferencia en los tiempos de retorno de los cuadrantes	<ul style="list-style-type: none"> Detección precisa de objetos pequeños en el fondo Pesquerías y comportamiento de peces Batimetrías detalladas del fondo
Sondas multihaz (multi-beam echosounder)	Conjunto de haces acústicos muy estrechos que son emitidos simultáneamente (cada uno con un ángulo distinto obteniendo así una cobertura continua del fondo y alta precisión)	<ul style="list-style-type: none"> Batimetrías de amplias zonas Caracterización del fondo

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El monitoreo se llevó a cabo de manera continua del 11 de marzo al 5 abril de 2019 en la Infraestructura para el Control de la Reproducción del Atún rojo (ICRA) que el instituto Español de Oceanografía (IEO) tiene en Mazarrón (Murcia), en cuyas instalaciones encontramos cuatro tanques.

La planta cuenta con los sistemas necesarios para el tratamiento del agua que entra en los tanques (filtración mecánica mediante filtros de tambor, filtración biológica, tratamiento térmico basado en el calentamiento o enfriamiento del agua según sea necesario, filtración química mediante espumazones y ozono y esterilización mediante luz ultravioleta). Actualmente solo dos de los tanques albergan atunes los cuales están separados en función de su edad/tamaño, albergando unos 80 atunes cada uno. La tabla 2 muestra las características de estos tanques.

Tabla 2. Características de los tanques A y B

	Diámetro interior (m)	Profundidad en las paredes (m)	Profundidad en el centro (m)	Pendiente del fondo (%)	Volumen del tanque (m ³)	Longitud total/Edad de los atunes
TANQUE A	22	9.0	9.5	4.55	3480	80-90cm (nacidos en 2017)
TANQUE B	20	8.0	8.5	5.0	2565	60 cm (nacidos en 2018)

El entorno controlado del ICRA proporciona una ubicación con unas condiciones ambientales conocidas y relativamente estables. Durante el tiempo que duró este monitoreo los operarios de la planta registraron los dispositivos o tratamientos que llevaron a cabo en los tanques o en las inmediaciones de estos (compresores, bombas de recirculación, luces de la planta, alimentación de los atunes etc.), así como observaciones de cualquier comportamiento inusual de los atunes, para poder correlacionarlo con las imágenes y los registros acústicos (de la ecosonda y del hidrófono).



Figura 4. Instalaciones ICRA (Mazarrón, Murcia)



Figura 5. Tanque A del ICRA (Mazarrón, Murcia)

2.2. SISTEMAS ACÚSTICOS

Configuración del Sistema de Acústica Pasiva

En el tanque A se colocó un hidrófono Aquarian H2a conectado a una grabadora fuera del agua, de esta manera se realizó un monitoreo casi continuo de los ruidos a los que se ven expuestos los atunes. La capacidad de almacenamiento de la grabadora permitía grabar alrededor de 23 horas de manera continuada y una vez al día debía interrumpirse la grabación durante 2-3 horas para vaciar los datos. La tabla 3 muestra las especificaciones técnicas del hidrófono utilizado.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del hidrófono Aquarian H2a
(Fuente: www.aquarianaudio.com)

Directividad	<10 Hz a >100 KHz
Sensibilidad	-180 dB re: 1 V/ μ Pa (20 Hz a 4 kHz)
Impedancia de salida	1 K Ω
Potencia	0.6 mA



Figura 6. Hidrófono Aquarian H2a
(Fuente: www.aquarianaudio.com)



Figura 7. Grabadora Zoom H1
Handy Recorder
(Fuente: www.zoom-na.com)

La grabadora usada en el monitoreo fue el modelo Zoom H1 Handy Recorder (Figura 7). A este dispositivo se le conectó el hidrófono por la entrada de línea de tal modo que se pudieron registrar los datos haciendo uso de una pequeña ganancia que permitiese registrar las señales de manera adecuada. La tabla 4 contiene las especificaciones técnicas de la grabadora usada en el monitoreo.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la grabadora Zoom H1 Handy Recorder
(Fuente: www.zoom-na.com)

Pistas que puede grabar a la vez	2
Pistas que puede reproducir a la vez	2
Funciones	Lo-cut Filter, Auto REC Level, Marker
Formato grabación/reproducción	WAV: 44.1/48/96kHz, 16-/24-bit MP3: 44.1kHz, 48/56/64/80/96/112/128/160/192/224/256/320kbps
Conversión A/D	24-bit, sobremuestreo 128x
Conversión D/A:	24-bit, sobremuestreo 128x
Procesamiento de señal	32 – bit
Medios de grabación	Tarjeta microSD (16MB - 2GB) Tarjeta microSDHC (4GB - 32GB)
Pantalla	LCD retroiluminada de 127 segmentos
Micro estéreo incorporado	Unidireccional con condensador
Ganancia	0 a +39 Db
Ganancia mínima con atenuación digital	-28 Db
Máximo nivel de presión de sonido	120 dB SPL
Entrada Mic/Line	Jack estéreo de 1/8" (soporta alimentación Plug-in)
Impedancia de entrada	20kΩ (nivel de entrada: 0 a -39 dBm)
Salida Phones/Line	Mini Jack estéreo de 1/8"
Impedancia de carga de salida	10kΩ ó más
Nivel de salida nominal	-10dBm
Nivel de salida de auriculares	20 mW +20 mW (carga de 32 Ω)
Impedancia de carga de salida	10kΩ ó más
Nivel de salida nominal	-10 dBm
Interfaz USB	Tipo: mini-B (compatible con USB 2.0 High Speed), funcionamiento del tipo de almacenamiento de gran capacidad Formato: 44.1 kHz/16 bit ó 48 kHz/16 bit
Requisitos de alimentación	1 pila AA alcalina o Ni-MH, o adaptador AC (AD-17, tipo USB A a AC)
Duración de la batería (pila alcalina)	10 horas (MP3), 9.5 (WAV)
Dimensiones	44 (A) x 136 (P) x 31 (H) mm
Peso	60 g (sin pilas)

Ecosondas y transductores

Para evaluar los posibles cambios en el comportamiento de los atunes ante los estímulos acústicos submarinos se usaron ecosondas de alta frecuencias ya que permite una mayor resolución de las imágenes obtenidas. En el tanque A se colocaron dos ecosondas científicas EK-80 a 120 kHz y EK-60 a 200 kHz de Simrad, una junto a un transductor splitbeam de 120 kHz (modelo ES120-7C) y otro de 200 kHz (modelo ES200-7C). Las tablas 5 y 6 muestra las especificaciones

Tabla 5. Especificaciones técnicas transductor ES120-7C
(Fuente: www.simrad.com)

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Tipo	Split-beam	θ -3dB, β 1 (°)	7.26
f (kHz)	120	θ -3dB, β 2 (°)	7.24
STx,v (dB ref. 1 μ Pa/V)	171.5	Ψ	0.0091
STx,i (dB ref. 1 μ Pa/A)	209.3	Ψ (dB)	-20.4
SRx (dB ref. 1 V/ μ Pa)	-186.4	H	0.75
Qmáx	650	Z (Ω)	19.6
IDmáx (dB)	28.41	θ (Z) (°)	-8.7
		WTx,máx (W)	1000



Figura 8. Transductor ES120-7C
(Fuente: www.simrad.com)

Tabla 6. Especificaciones técnicas transductor ES200-7C
(Fuente: www.simrad.com)

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Tipo	Split-beam	θ -3dB, β 1 (°)	7.2
f (kHz)	200	θ -3dB, β 2 (°)	7.20
STx,v (dB ref. 1 μ Pa/V)	185.1	Ψ	0.0087
STx,i (dB ref. 1 μ Pa/A)	210.1	Ψ (dB)	-20.6
SRx (dB ref. 1 V/ μ Pa)	-190.0	H	0.75
Qmáx	660.7	Z (Ω)	17.9
IDmáx (dB)	28.2	θ (Z) (°)	-8.7
		WTx,máx (W)	1000

2.3. SISTEMAS OPTICOS

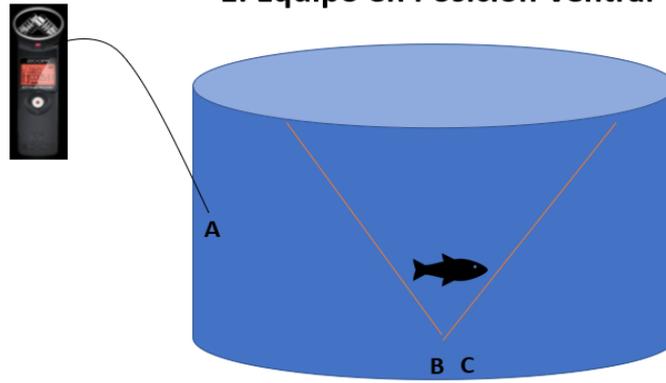
Las cámaras estereoscópicas permiten obtener la representación en 3D de las imágenes tomadas, lo que permite estimar no solo la longitud de los individuos, si no también estimar la biomasa. En los últimos años se ha generalizado el uso de este tipo de cámaras en granjas de acuicultura, por ejemplo, para monitorear y registrar la transferencia de los atunes de una jaula a otra (Costa et al 2009., Muñoz-Benavente et al. 2018, Puig-Pons et al. 2019), por lo que su utilidad ha sido ampliamente verificada en este ámbito.

El tanque A cuenta con un cámara de video estereoscópica. La cámara estereoscópica estaba formada por dos cámaras Gigabit Ethernet cuya resolución era de 1720x1080 pixeles y una velocidad de 12 fotogramas por segundo. Las cámaras fueron ensambladas en un marco de 85 cm de longitud y una convergencia entre ambas de 5°. El sistema estaba conectado a un umbilical para proporcionar suficiente energía a ambas cámaras, así como para transferir las imágenes a un ordenador en superficie que codificaba los videos dependiendo de la cámara que lo ha grabado (derecha o izquierda). La sincronización de ambas cámaras se realizó a través del IEEE 1588 PTP (Precision Time Protocol).

Durante el monitoreo tanto la cámara de video como las ecosondas fueron colocadas en diferentes posiciones dentro del tanque para obtener imágenes con distinta perspectiva de los atunes. En la primera etapa del monitoreo (hasta el 18 de marzo), la cámara y las ecosondas fueron colocadas en el fondo del tanque enfocando hacia arriba por lo que se obtuvieron imagen ventrales de los atunes. A continuación, del 19 al 30 de marzo la cámara y las ecosondas se colocaron en el lateral del tanque por lo que se tomaron imágenes laterales de los atunes y, por último, se colocaron flotando en la superficie del tanque con la cámara enfocando hacia el fondo obteniendo imágenes dorsales de los atunes. Durante todo el monitoreo el hidrófono se situó en un lateral del tanque a una profundidad media (4 metros).

A continuación, se puede observar un esquema de las distintas configuraciones del equipo, así como un ejemplo de los ecogramas y las imágenes grabadas en cada uno de los casos.

1. Equipo en Posición Ventral



A: Hidrófono conectado a la grabadora
B: Ecosondas EK-80 a 120 kHz y EK-60 a 200 kHz de Simrad
C: Cámara de Video

Figura 9. Configuración del equipo acústico-óptico en posición ventral

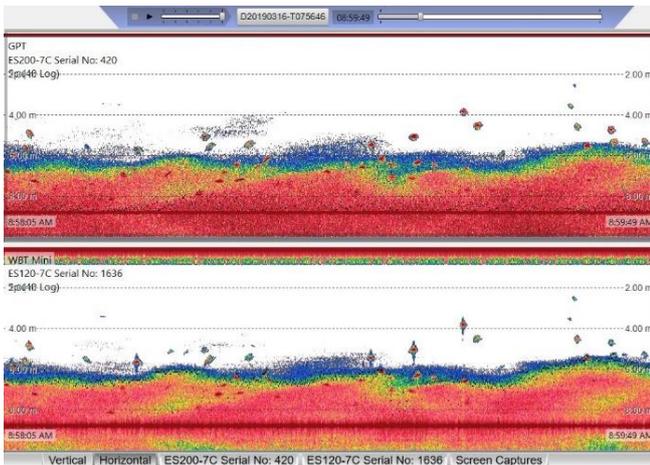
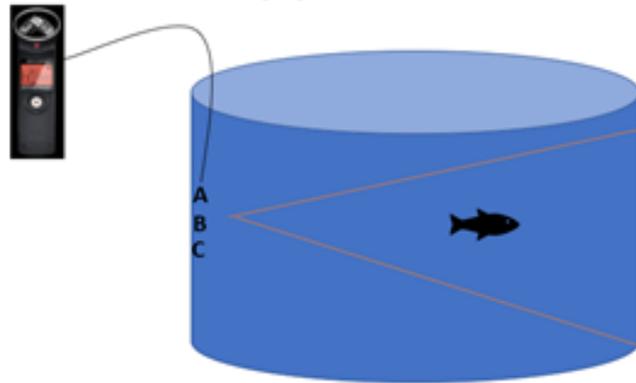


Figura 10. Ecograma (Ecosonda en posición ventral)



Figura 11: Imagen del video (Cámara en posición ventral)

2. Equipo en Posición Lateral



A: Hidrófono conectado a la grabadora
B: Ecosondas EK-80 a 120 kHz y EK-60 a 200 kHz de Simrad
C: Cámara de Video

Figura 12. Configuración del equipo acústico-óptico en posición lateral

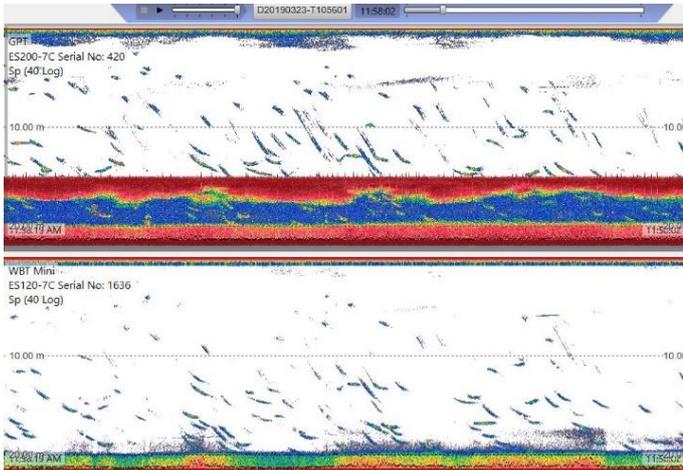
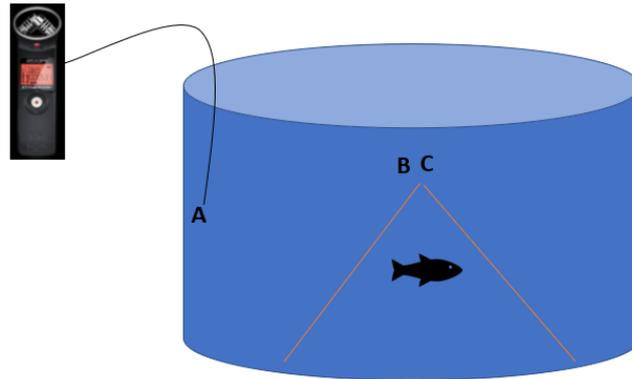


Figura 13. Ecograma (Ecosonda en posición lateral)



Figura 14. Imagen del video (Cámara en posición lateral)

3. Equipo en Posición Dorsal



A: Hidrófono conectado a la grabadora
B: Ecosondas EK-80 a 120 kHz y EK-60 a 200 kHz de Simrad
C: Cámara de Video

Figura 15. Configuración del equipo acústico-óptico en posición dorsal

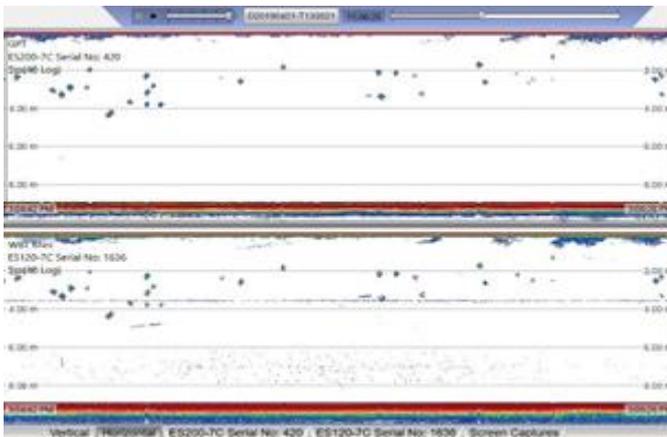


Figura 16. Ecograma (Ecosonda en posición dorsal)



Figura 17. Imagen del video (Cámara en posición dorsal)

2.4. POST-PROCESADO DE DATOS.

Software SAMARUC

Los datos de audio grabados durante el monitoreo fueron examinados usando el software SAMARUC desarrollado por investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia. Este software por un lado genera una representación gráfica BIG DATA de diferentes indicadores calculados a partir de las grabaciones analizadas (Figura 18), y por otro lado permite observar los espectrogramas de dichas grabaciones.

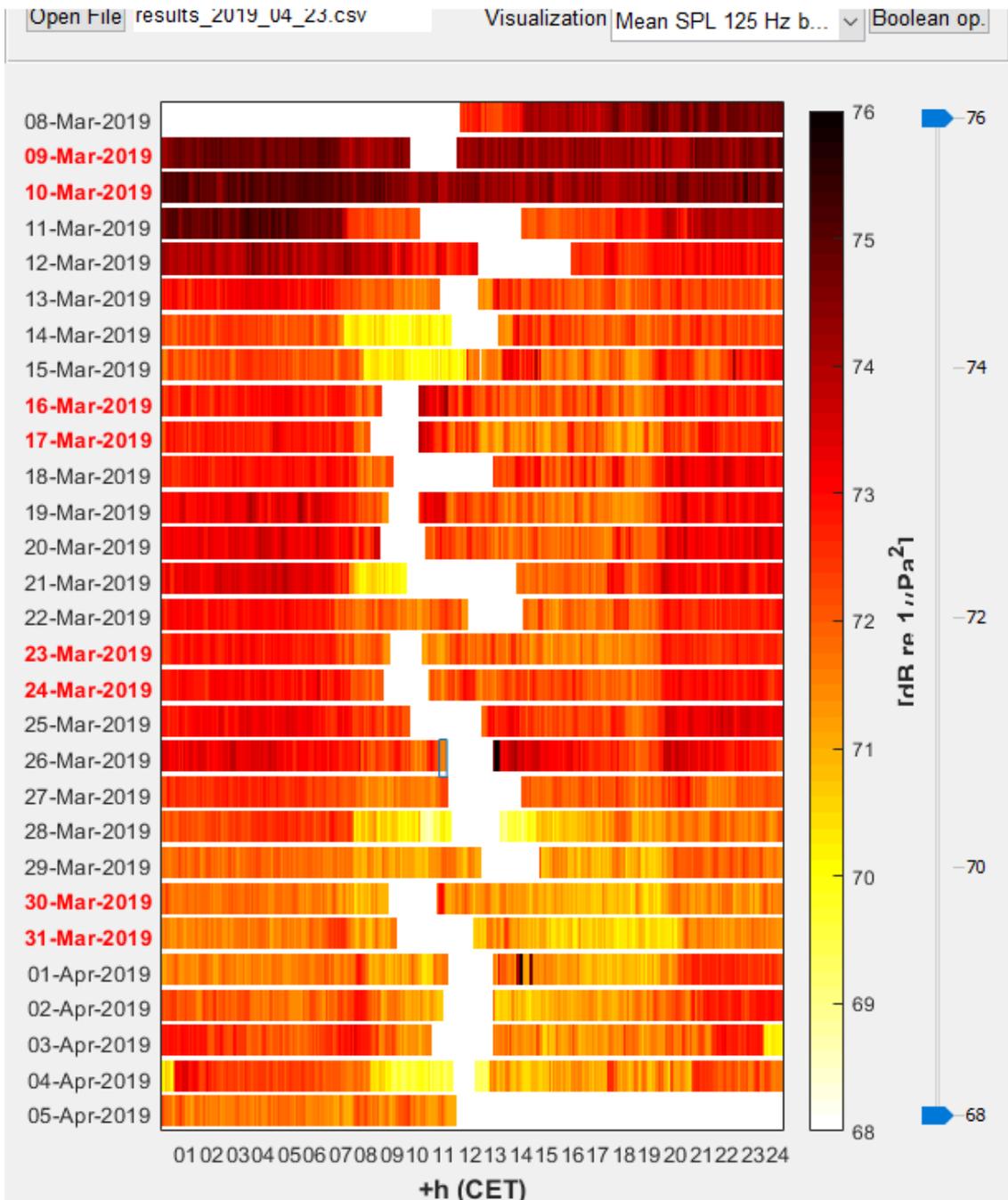


Figura 18. representación gráfica de los audios generadas por SAMARUC
(Indicador usado: Mean SPL 125 Hz Band)

Este programa tiene diferentes indicadores obtenidos de las grabaciones acústicas submarinas los cuales se visualizan en mapas de pseudocolor representando en el eje horizontal las horas del día y en el eje vertical los días en los cuales se han realizado las grabaciones. En la leyenda de colores se visualizará el rango de valores en los cuales se distribuye en indicador elegido, concretamente, en el caso del indicador “Mean SPL 125 Hz band”, en amarillo claro se podrán ver valores de dB SPL re 1 μ Pa² cercanos a 68 y en negro valores cercanos a 76 dB SPL re 1 μ Pa².

De entre todos los indicadores disponibles, los que se usaron para analizar los datos acústicos y una breve explicación de ellos se encuentran en la tabla siguiente (Tabla 7).

Tabla 7. Selección de algunos indicadores disponibles en el SAMARUC.

Indicador	Explicación
STA/LTA events	Ratio que mide si la energía del trozo de grabación seleccionado se distribuye de forma puntual (Short Term Average, STA) o a lo largo de todo el trozo (Long Term Average, LTA)
PTR Pulsed Events	Ratio que mide la energía de un trozo de grabación seleccionado según su distribución en el espectrograma, concretamente entre la energía distribuida verticalmente (sonidos impulsivos o pulsados) y horizontalmente (sonidos frecuenciales o centrados en una frecuencia con una duración determinada)
Mean SPL 63 Hz Band	calcula en nivel de presión medio en cada grabación de 5 minutos en dB SPL referidos a 1uPa en la banda de tercio de octava de 63 Hz
Mean SPL 125 Hz Band	calcula en nivel de presión medio en cada grabación de 5 minutos en dB SPL referidos a 1uPa en la banda de tercio de octava de 125 Hz
Mean SPL 2000 Hz Band	Indicador que calcula en nivel de presión medio en cada grabación de 5 minutos en dB SPL referidos a 1uPa en la banda de tercio de octava de 2000 Hz

El uso de este software permite visualizar si dentro de alguno de los indicadores existe algún patrón determinado (ya sea diario, semanal, etc). La visualización de estos indicadores permite determinar si existen eventos específicos que puedan resultar inusuales o que potencialmente puedan influir en el comportamiento de los atunes.

Visionado de los videos

Las imágenes grabadas con la cámara estereoscópica fueron visionadas usando el programa VLC Media Player. Durante el visionado se anotó cualquier comportamiento inusual de los atunes.



Figura 19. Atunes nadando (imagen captada por la cámara en posición lateral)

Software ecosonda EK80

Para examinar los datos recogidos con las ecosondas, se utilizó el software SIMRAD EK80. Este programa permite visualizar los ecogramas resultantes.

En la imagen 20 se muestra un ejemplo de un ecograma, la imagen superior corresponde a la ecosonda que opera a 200 Hz y la inferior a la ecosonda que opera a 120 Hz. En el eje x se muestra la distancia con respecto a la ecosonda, en este caso como las ecosondas se

encuentran en posición ventral mayor distancia con respecto a la ecosonda supone una posición menos profunda de los obstáculos detectados (en este caso atunes). En el eje y se muestra la escala temporal. La escala de colores del ecograma refleja la intensidad de la señal recibida.

La Figura 20 muestra un ejemplo de un ecograma cuando la ecosonda está situada en posición ventral. En la imagen se observa claramente una línea roja que corresponde a la superficie del tanque, debido a la posición ventral de la ecosonda esta línea se sitúa en la franja de los 8 metros. También puede verse la posición de los atunes en la columna de agua.

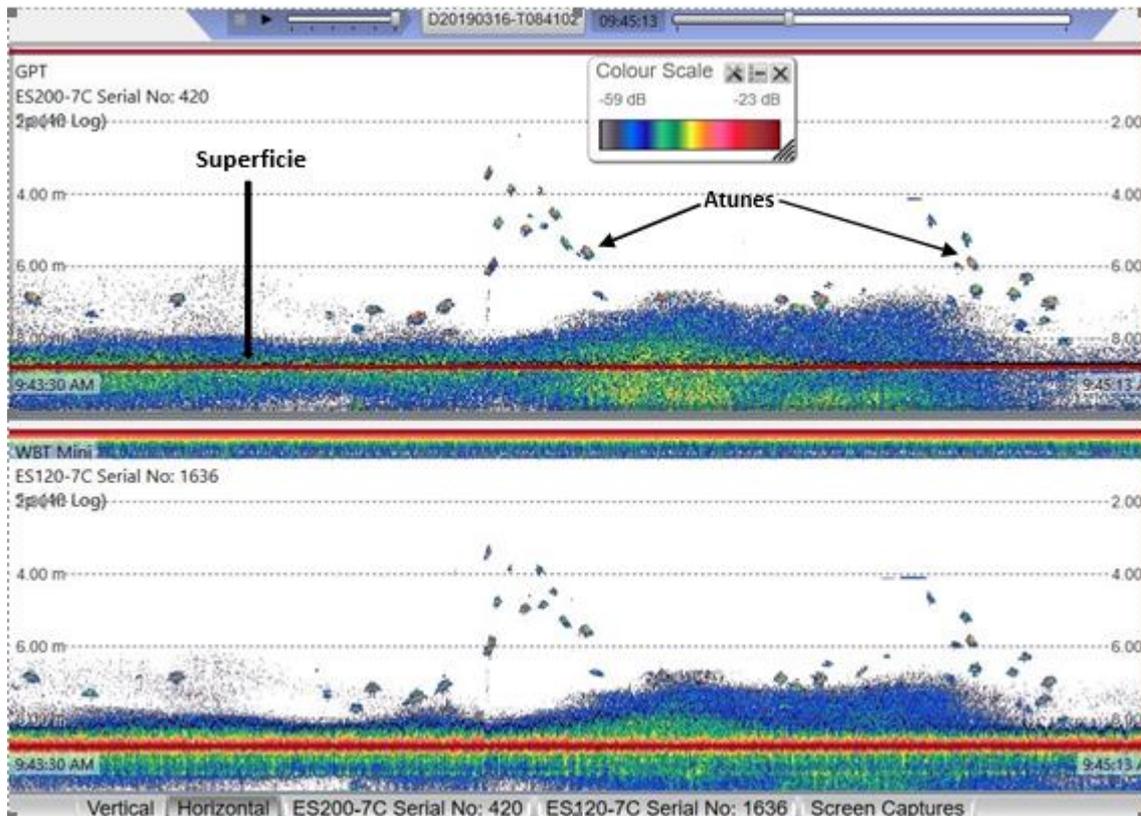


Figura 20: Ecograma del tanque de atunes estudiado (ecosonda en posición ventral)

3. RESULTADOS

COMPORTAMIENTO HABITUAL

Durante el tiempo que duró el monitoreo, se pudo observar un patrón de nado circular relativamente constante en el cual los atunes recorren la mayor área disponible dentro del tanque, lo que coincide con el comportamiento habitual de la especie en cautividad (Nucci et al. 2010).

Los tanques en los que se encuentran los atunes están sometidos a una gran variedad de sonidos a los cuales apenas reaccionan. Estos sonidos son consecuencia tanto del mantenimiento y desempeño de las actividades normales llevadas a cabo en las instalaciones como de otras fuentes ajenas a ellas (ejm: tráfico en la carretera cercana).

La Figura 21 muestra el espectrograma del tanque durante una situación normal en la que no se detectan sonidos anómalos. Puede observarse la presencia de un sonido de baja frecuencia (50 Hz) que se podría considerar crónico ya que está presente siempre en el tanque. Aparentemente se registran además armónicos superiores del mismo a 100 y 150 Hz.

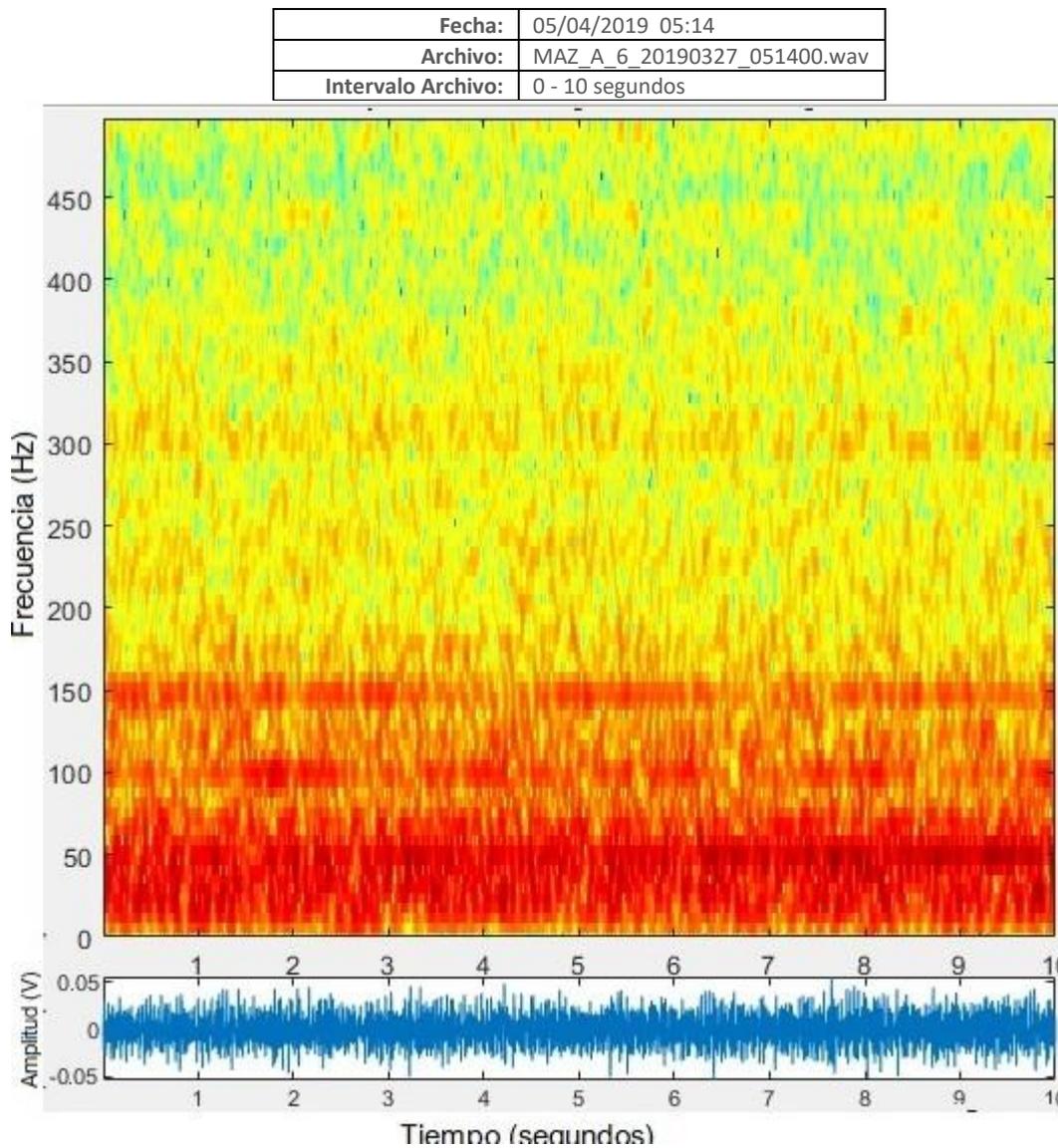


Figura 21: Espectrograma y forma de onda de ruido en una situación "normal"

ALIMENTACIÓN

Los operarios alimentan a los atunes a saciedad dos veces al día (mañana y tarde) con trozos de pescado descongelado (principalmente caballa, arenque y boqueron) que son lanzados al interior del tanque. Ante la presencia de trozos de pescado, los atunes nadan hacia la superficie y una vez que han alcanzado los trozos parecen aumentar la profundidad. La distintas disposiciones del equipo presentan una gran influencia en la calidad de los datos obtenidos y por lo tanto en el análisis de estos eventos.

La posición dorsal de la cámara tiene una utilidad limitada en cuanto al estudio del comportamiento de los atunes al alimentarse. Como la cámara se encuentra en una plataforma flotante en la superficie del agua, está se mueve impactar los trozos de pescado en

el agua por lo que la calidad de las imágenes se ve afectada (Figura 22). Además, el rango de visión de las cámaras es limitado a una porción del tanque, y cuando los operarios lanzan el pescado evitan interferir con el equipo por lo que lo lanzan a una distancia prudencial de este. Sin embargo, puede intuirse en los videos que en los extremos del encuadre de la imagen se observan el movimiento de ascenso/descenso de atunes.



Figura 22. Atún abriendo la boca para alimentarse (Cámara en posición dorsal)

La cámara en posición ventral ofrece una mejor visión del comportamiento de los atunes ante los trozos de pescado, aunque, una vez más, la utilidad de las imágenes está totalmente condicionada al lugar de impacto de los trozos de pescado. El aumento de velocidad y disminución de la profundidad de nado de los atunes puede apreciarse en los videos y ecogramas. En uno de los videos examinados, los trozos de pescado son lanzados en el centro de la imagen por lo que es posible observar claramente el comportamiento de los atunes al aproximarse a la comida (Figura 23)



*Figura 23: Movimiento de ascenso de los atunes para alcanzar los trozos de pescado
(Cámara en posición ventral)*

La Figura 24 muestra un ecograma durante un periodo de alimentación de los atunes cuando la posición de la ecosonda se encuentra en posición ventral, por lo que el eje Y está invertido en el ecograma con respecto a la profundidad. La parte izquierda del ecograma muestra la posición de los atunes antes de que los empiecen a alimentar y se puede apreciar que se encuentran en la franja de los 6 metros (es decir en torno a los 2 metros de profundidad), y una vez que empiezan a alimentarlos se concentran en la franja de los 8- 10 metros (cerca de la superficie) debido a que están alcanzando los trozos de pescado. Además, puede apreciarse algunos atunes a una profundidad mayor una vez que han alcanzado los trozos de atún.

Fecha:	11/03/2019 05:14
Archivo:	D20190311-T162548.raw
Intervalo Archivo:	5.22.27 – 5:24:12
Configuración del equipo:	Posición ventral

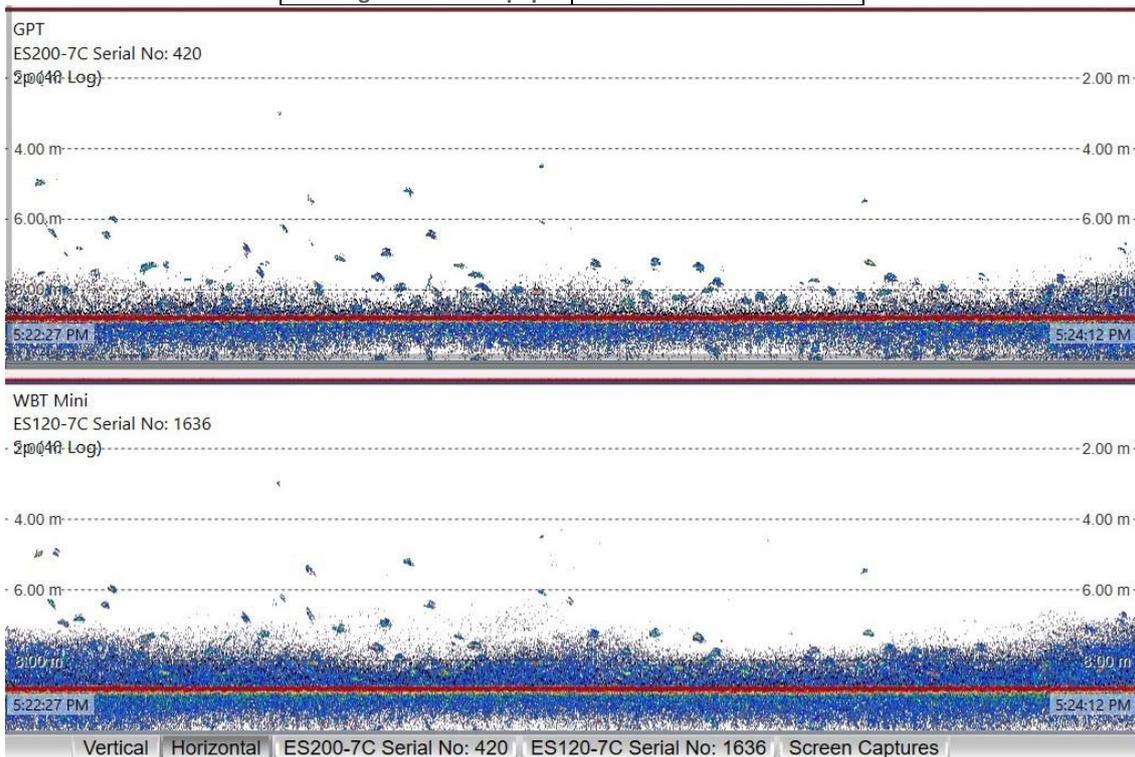


Figura 24: Alimentación de los atunes (Ecosonda en posición ventral)

La cámara en posición lateral inclinada permite una mejor apreciación de la disminución de la profundidad de los atunes cuando estos son alimentados (Figura 25)



Figura 25: Movimiento de descenso de los atunes tras alcanzar un trozo de pescado (Cámara en posición lateral)

VOCALIZACIONES

Durante el visionado de los videos se registraron numerosas vocalizaciones en algunos individuos, las cuales pueden recordar a un episodio de "tos" o incluso a un "eructo". Cuando esto ocurría se podía observar cómo abrían la boca ampliamente mientras el área del opérculo y el abdomen se contraían (Figura 26). Estos eventos fueron registrados normalmente tras la alimentación de los atunes.



Figura 26: Atunes "tosiendo/eructando"

Estas vocalizaciones solamente se pudieron detectar cuando la cámara estaba situada en posición lateral y debido al ruido presente en el tanque, el audio asociado a estas vocalizaciones solo se pudo registrar en tres ocasiones. Los sonidos asociados a estas vocalizaciones se encuentran entre 100-180 Hz. Sonidos pulsados de baja frecuencias asociado con los atunes confinados han sido descritos en una publicación con anterioridad. En dicha publicación, el rango de frecuencia variaba entre 20 y 130 Hz (Allen et al. 2003).

La tabla siguiente (Tabla 8) muestra un resumen de las vocalizaciones registradas durante el monitoreo.

Tabla 8. Vocalizaciones de atunes registradas

Evento registrado	Fecha	Hora Video	Frecuencia	Duración del evento (segundos)
1. Atún eructando	20/03/2019	8:27:05	Audio no disponible	NA
2. Atún eructando	20/03/2019	8:30:28	Audio no disponible	NA
3. Atún eructando	20/03/2019	8:36:57	Audio no disponible	NA
4. Atún eructando	20/03/2019	8:42:08	Audio no disponible	NA
5. 2 atunes eructando a la vez	20/03/2019	8:42:09	Audio no disponible	NA
6. Atún eructando	20/03/2019	8:44:24	Audio no disponible	NA
7. Atún eructando	21/03/2019	9:14:00	No detectado	NA
8. Atún eructando	21/03/2019	9:14:27	150-180 Hz	0.6
9. Atún eructando	21/03/2019	9:19:58	No detectado	NA
10. Atún eructando	21/03/2019	9:24:23	Audio no disponible	NA
11. Atún eructando	21/03/2019	9:26:15	Audio no disponible	NA
12. Atún eructando	21/03/2019	9:40:21	Audio no disponible	NA
13. Atún eructando	21/03/2019	9:41:59	Audio no disponible	NA
14. Atún eructando	21/03/2019	9:42:39	Audio no disponible	NA
15. Atún eructando	21/03/2019	9:08:41	No detectado	NA
16. Atún eructando	21/03/2019	9:02:31	100-150 Hz	0.7
17. Atún eructando	21/03/2019	9:04:15	150-160 Hz	0.8

A continuación, se muestran los espectrogramas de los eructos detectados.

Fecha:	21/03/2019
Archivo:	MAZ_A_6_20190321_091400.wav
Intervalo Archivo:	35 – 40 segundos

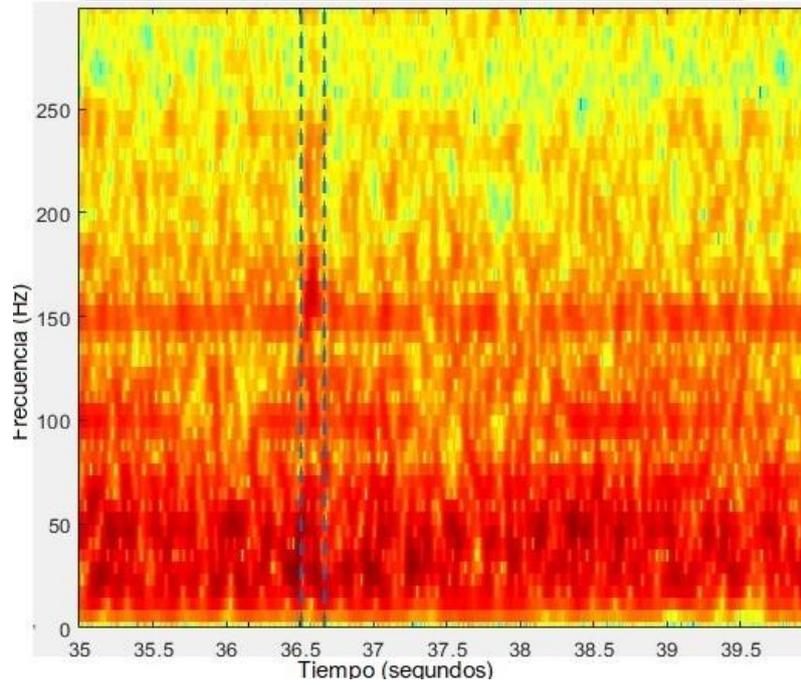


Figura 27. Espectrograma eructo 8

Fecha:	21/03/2019
Archivo:	MAZ_A_6_20190321_085900.wav
Intervalo Archivo:	200 – 205 segundos

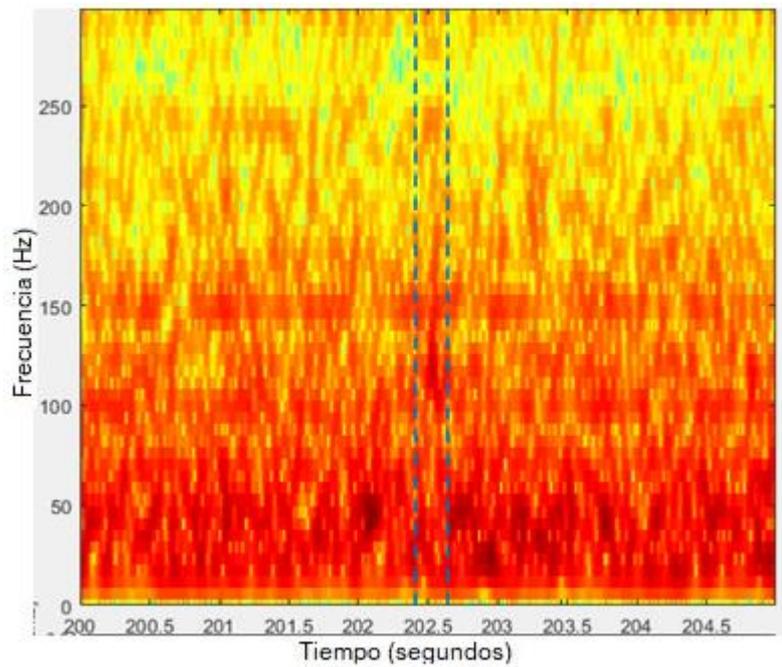


Figura 28. Espectrograma eructo 16

Fecha:	21/03/2019
Archivo:	MAZ_A_6_20190321_090400.wav
Intervalo Archivo:	0 - 5 segundos

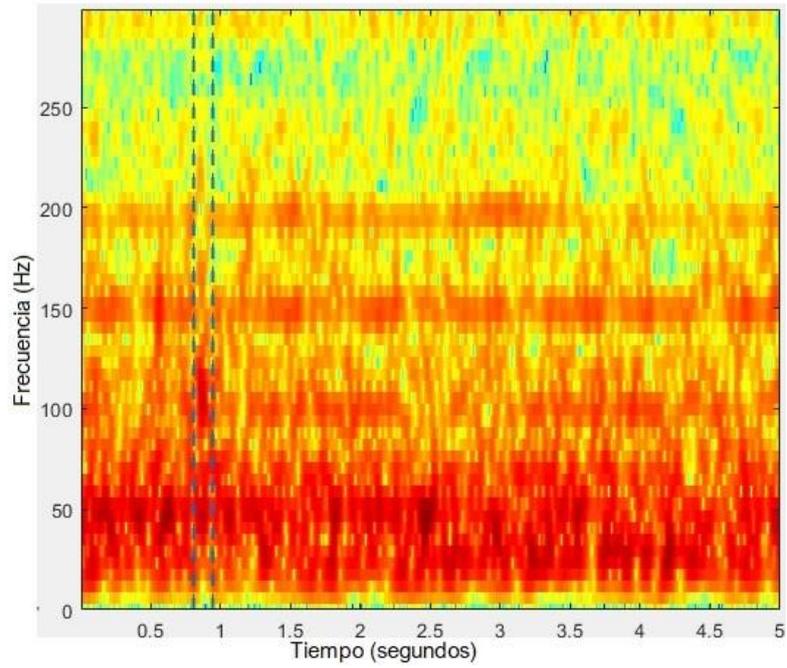
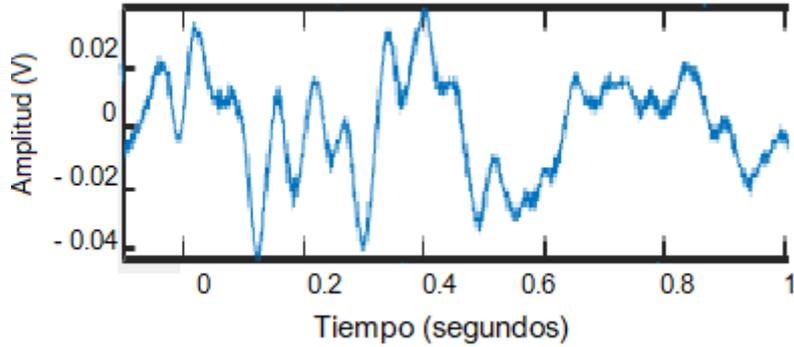
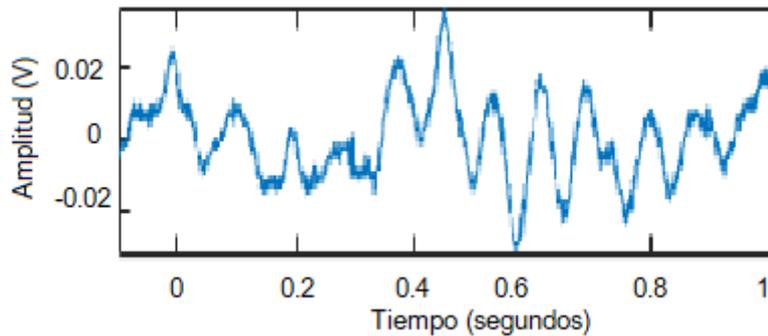


Figura 29. Espectrograma eructo 17

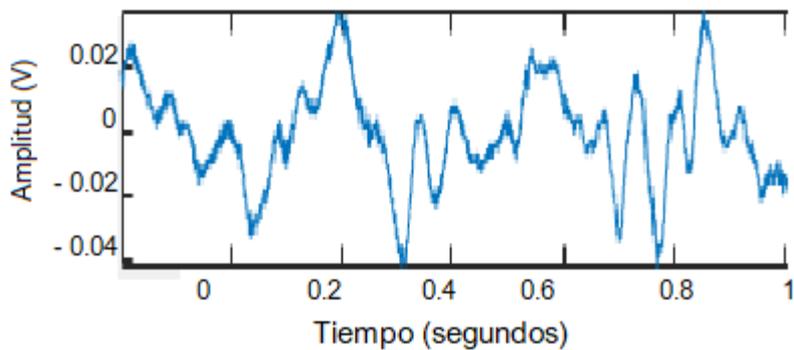
En las gráficas 1, 2 y 3 se muestra la forma de onda (variación de la amplitud en el tiempo) de los eructos 8, 16 y 17 respectivamente.



Gráfica 1: Eructo 8



Gráfica 2: Eructo 16



Gráfica 3: eructo 17

ESPANTADAS, CAMBIOS DE DIRECCIÓN, INCREMENTO DE VELOCIDAD Y CAMBIOS EN EL PATRÓN DE NADO

Como hemos comentado anteriormente, durante el monitoreo los operarios de las instalaciones registraron las actividades de mantenimiento susceptibles de producir contaminación acústica, así como cualquier comportamiento inusual de los atunes. En algunas ocasiones estas anotaciones correspondían a espantadas dentro del tanque. Al examinar el audio correspondientes a estos eventos, se observó que las espantadas parecen ir precedidas de sonidos que se encuentran a unas frecuencias entre 100-150 y 300- 600 Hz.

Durante el monitoreo se detectó un cambio de dirección de nado en todo el banco de peces que fue precedido de eventos sonoros concentrados en torno a los 100-250 Hz y 150-400 Hz

Se detectaron periodos que, pese a no llegar a considerarse una espantada, los atunes incrementaban la velocidad de nado y tendían a agruparse o variar el patrón de nado, en algunos casos llegando a “cerrar el círculo de nado” reduciendo de esta forma de manera el recorrido de nado disponible. Estas situaciones se vieron precedidas de sonidos torno a los 100-250 Hz.

La tabla siguiente (Tabla 9) resume los comportamientos anómalos observados durante el monitoreo, así como los eventos sonoros susceptibles de provocarlos que tuvieron lugar en un periodo de 5 minutos previos a ellos. A continuación, se comentarán brevemente cada uno de ellos.

Tabla 9. Comportamientos anómalos registrados

Evento	Fecha	Hora	Comportamiento	Evento sonoro previo	
				Hora	Evento
1	21/03/2019	08:11:41	Espantada	08:09:23	Frec. 100-200 Hz
				08:11:25	Frec. 100 -150 Hz
2	21/03/2019	16:21:10	Aumento velocidad	16:17:09	Frec. 180-500 Hz
				16:17:20	Frec. 100-150 Hz
				16:17:24	Frec. 180-280 Hz
				16:17:56	Frec. 100-200 Hz
				16:18:00	Frec. 100-250
				16:19:43	Frec. 100-150
				16:20:53	Frec. 200 Hz
3	26/03/2019	16:52:58	Aumento de velocidad y cambio de dirección	16:50:51	Frec 150-400 Hz
				16:51:59	Frec. 100-250 Hz
4	26/03/2019	17:11:20	Espantada	17:10:18	Frec.150-250
				17:10:47	Frec. 150-300
5	19/03/2019	10:13:19	Aumento de Velocidad y agrupamiento	10:12:26	Frec. 150 Hz + 450-750 Hz
6	20/03/2019	12:09:20	Aumento de velocidad y cambio patrón de nado	12:08:52	Frec 150 Hz + frec 500 Hz

Evento 1: Espantada

El 21 de marzo se produjo una espantada en el tanque estudiado. Este evento puede apreciarse claramente en la Figuran 30. EL eje X del ecograma muestra la evolución temporal, al tratarse de un ecograma tomado con la ecosonda en posición lateral el eje muestra la localización de los atunes en el tanque. Durante el evento expuesto en este ecograma se observa como los atunes siguen un patrón de nado “normal” y repentinamente se observa como los atunes detectados presentan formas más alargadas, lo que implica un incremento de velocidad seguido de un agrupamiento de los atunes.

Fecha:	21/03/2019
Archivo:	D20190321-T070921.raw
Intervalo Archivo:	8:10:24 – 8:12:09
Configuración del equipo	Posición lateral

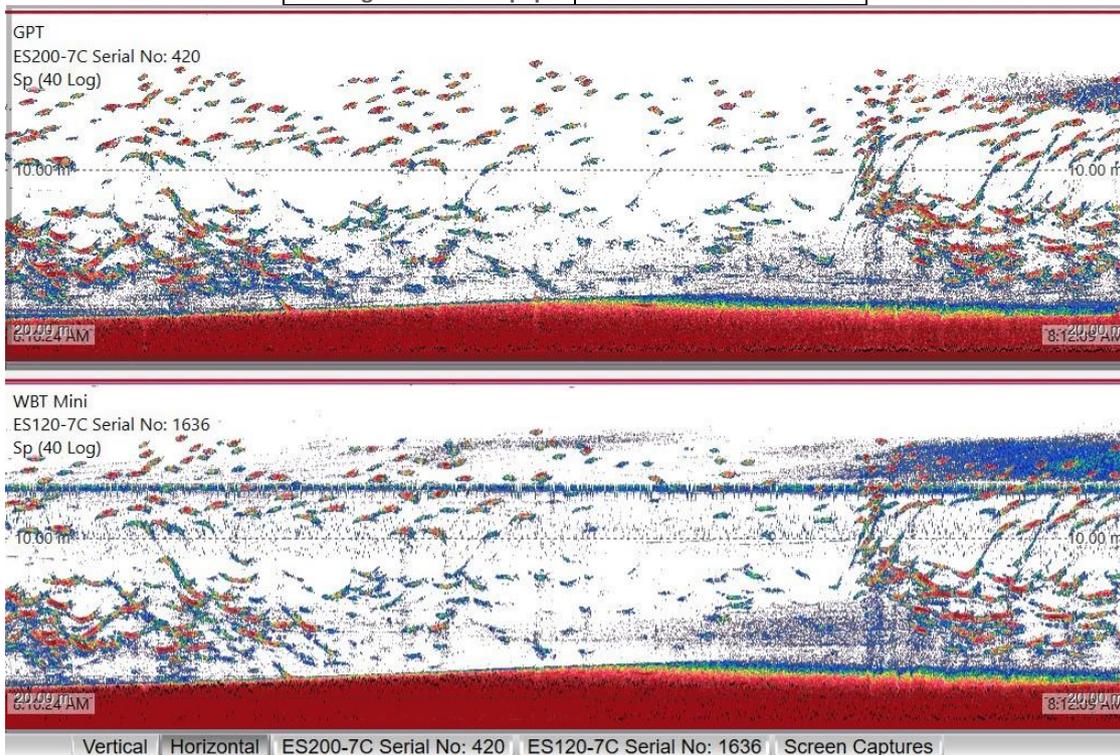


Figura 30: Ecograma correspondiente al evento 1

Se han seleccionado los sonidos que podrían ser la causa de esta espantada.

El primero de estos eventos sucede 2 minutos y 17 segundos antes que la espantada. Se trata de un sonido cuya energía está concentrada entre 100-200 Hz y tiene una duración de 0.6 segundos (Figura 31) El segundo evento se a las 08:11:26. Se trata de un sonido cuya energía se concentra entre 150 y 200 Hz y tiene una duración de 0.57 segundos (Figura 32).

Fecha:	21/03/2019
Archivo:	MAZ_A_6_20190321_080900.wav
Intervalo Archivo:	20 - 30 segundos

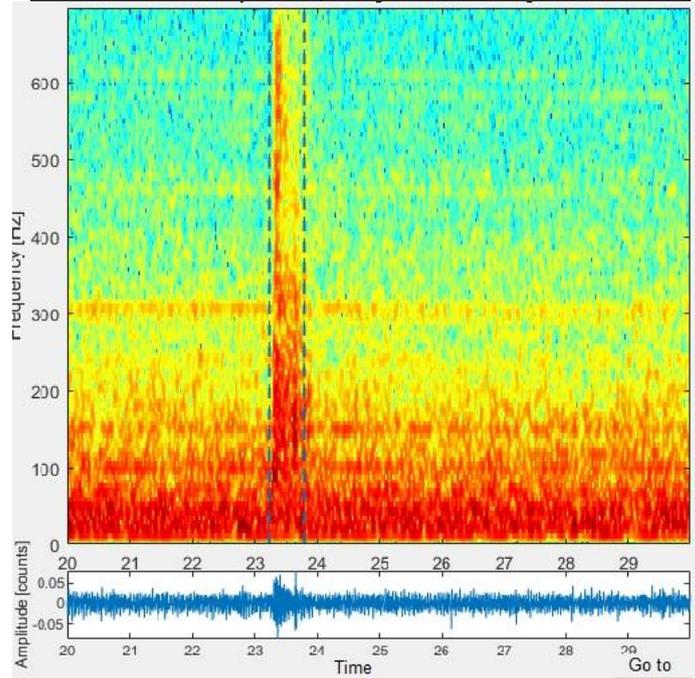


Figura 31. Evento 1, Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda).

Fecha:	21/03/2019
Archivo:	MAZ_A_6_20190321_080900.wav
Intervalo Archivo:	140 - 150 segundos

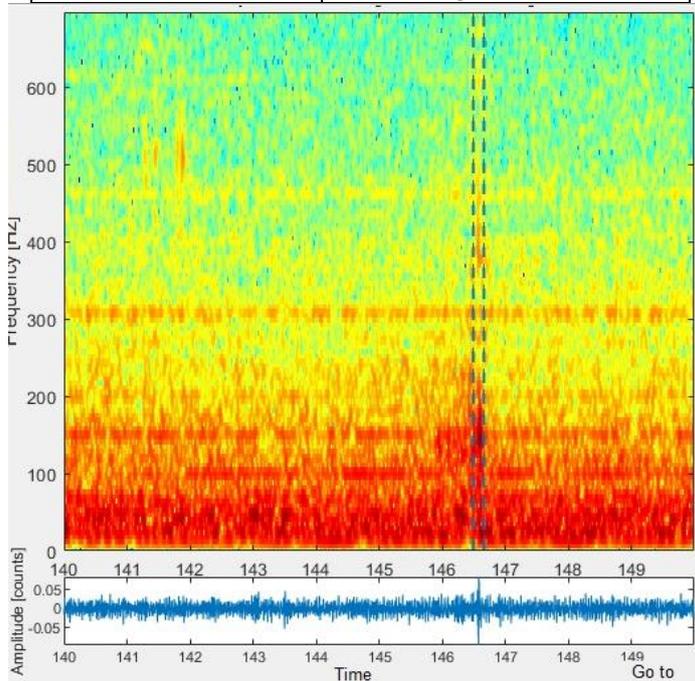


Figura 32. Evento 1, Sonido 2 Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda).

Evento 2: Aumento de velocidad

Los operarios anotaron que se producía una espantada a las 16:23. Al examinar los ecogramas (Figura 33), se intuye un incremento en la velocidad de los atunes a las 16:21 debido a la forma alargada de los atunes detectados, aunque no se ha llegado a considerar una espantada como tal. Como en el caso anterior, la ecosonda estaba en posición lateral por lo que el eje X corresponde al tiempo, mientras que el eje Y indica la posición de los atunes en el tanque.

Fecha:	21/03/2019
Archivo:	D20190321-T152128.raw
Intervalo Archivo:	4:20:06 – 4:21:31
Configuración del equipo	Posición lateral

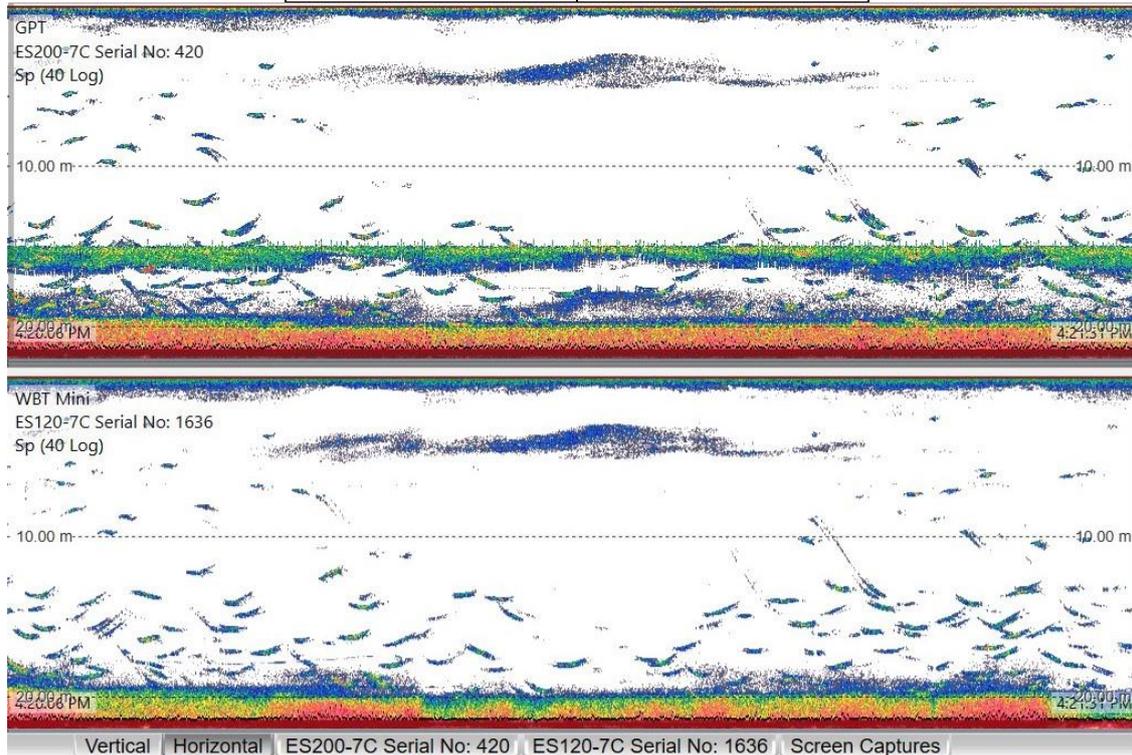


Figura 33: Ecograma evento 2

El primer sonido que podría ser responsable se produce cuatro minutos y un segundo antes que la espantada. Se trata de un sonido cuya energía se concentra entre 180 y 500 Hz y tiene una duración de 0.20 segundos (Figura 34).

El segundo evento se produce tres minutos antes que la espantada. Se trata de un sonido cuya energía se concentra entre 300 Hz y tiene una duración de unos 2 segundos (Figura 35). Apenas dos segundos más tarde se produce otro sonido cuya energía se concentra en torno 180-200 Hz con una duración de 0.36 segundos (Figura 35).

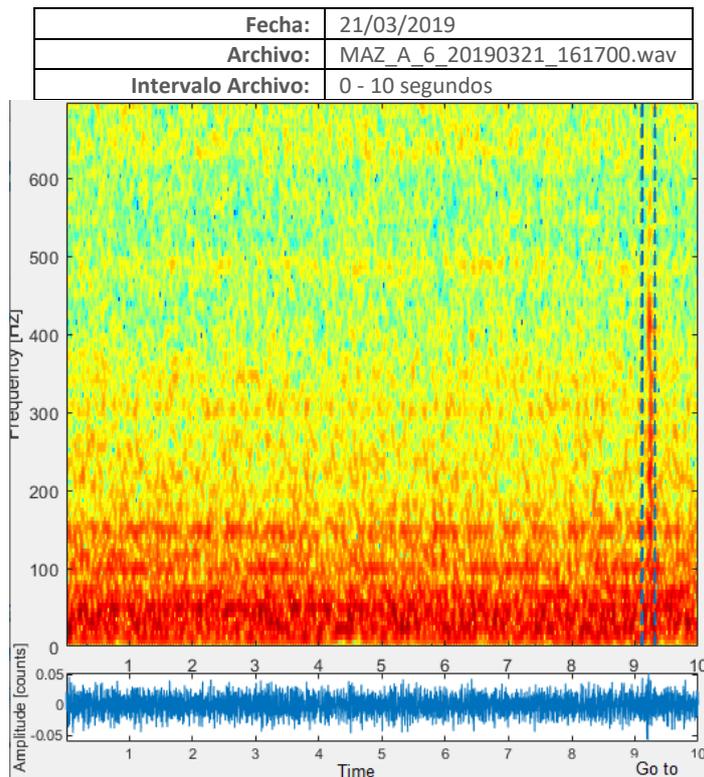


Figura 34. Evento 2, Sonido 1 Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda).

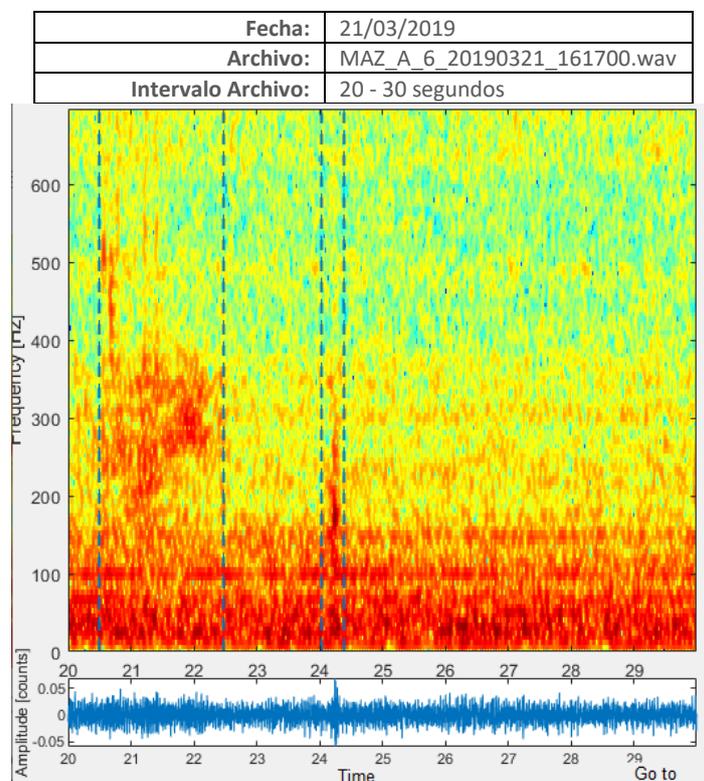


Figura 35. Evento 2, Sonido 2 y 3. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda).

El cuarto sonido sospechoso del aumento de velocidad de los atunes se produce a las 16:17:56 y concentra la energía entre 100 y 200 Hz con una duración de 0.3 segundos. Unos segundos después se produce otro evento con una frecuencia entre 100 y 250 Hz con una duración de 0.86 segundos (Figura 36)

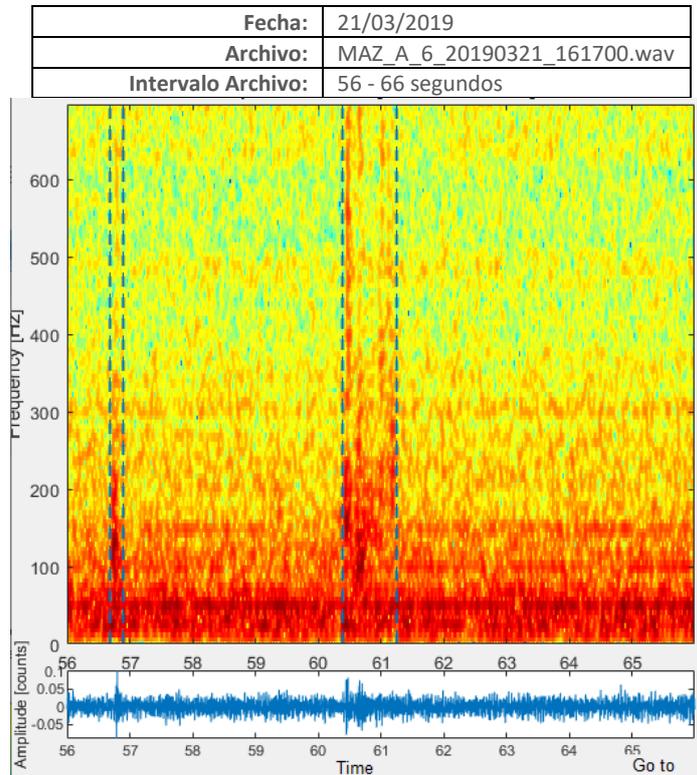


Figura 36. Evento 2 Sonidos 4 y 5. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

A las 16:19:43 se registra otro sonido entre 100-150 Hz durante 0.27 segundos (Figura 37). Por último, Otro sonido fue registrado 17 segundos antes del aumento de velocidad, en este caso se trata de un evento cuya energía se concentra en torno a los 200 Hz durante 0.16 segundos (Figura 38).

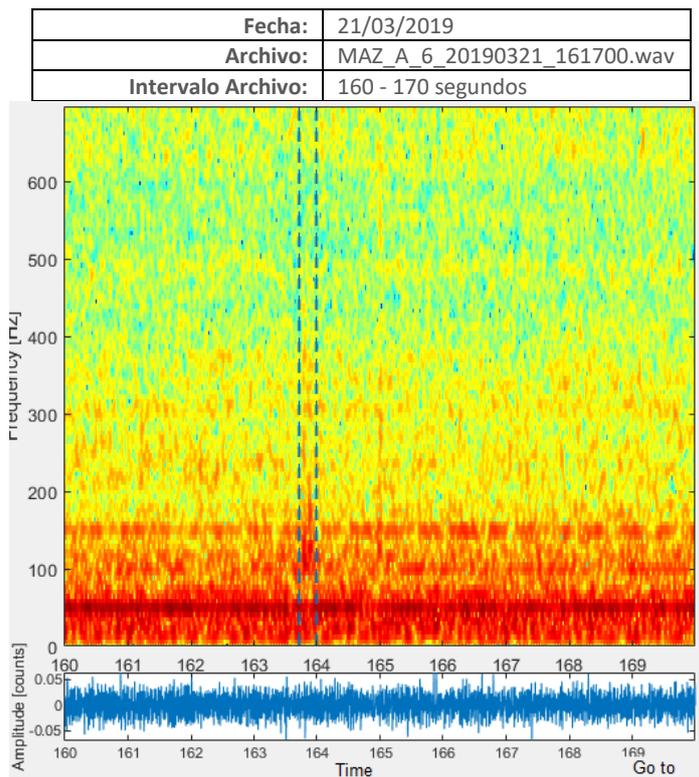


Figura 37. Evento 2 Sonido 6. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

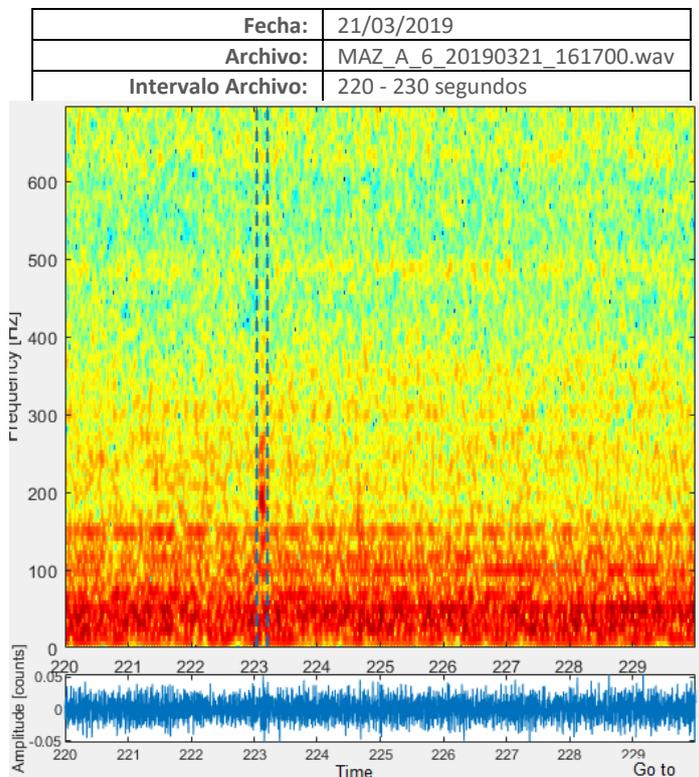


Figura 38. Evento 2 Sonido 7. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

Evento 3: Aumento de velocidad y cambio de dirección.

A las 16:52:58 se aprecia un aumento repentino de la velocidad durante unos 20 segundos y un cambio en la dirección de nado (Figura 39).



Figura 39. Cambio de dirección de los atunes (Cámara en Posición Dorsal)
A) 16:52:44 B) 16:53:01 C) 16:53:14

Se han encontrado dos sonidos que podrían influir en este comportamiento anómalo por parte de los atunes. El primero de ellos sucede dos minutos antes y se trata de un sonido que concentra la energía entre 150 y 400 Hz con una duración muy próxima a los 2 segundos (1.5 segundos) (Figura 40) El segundo sonido considerado se produce dos minutos antes del cambio en el comportamiento de los atunes, y se trata de un sonido que concentra la energía entre 100 y 250 Hz durante 2.16 segundos (Figura 41)

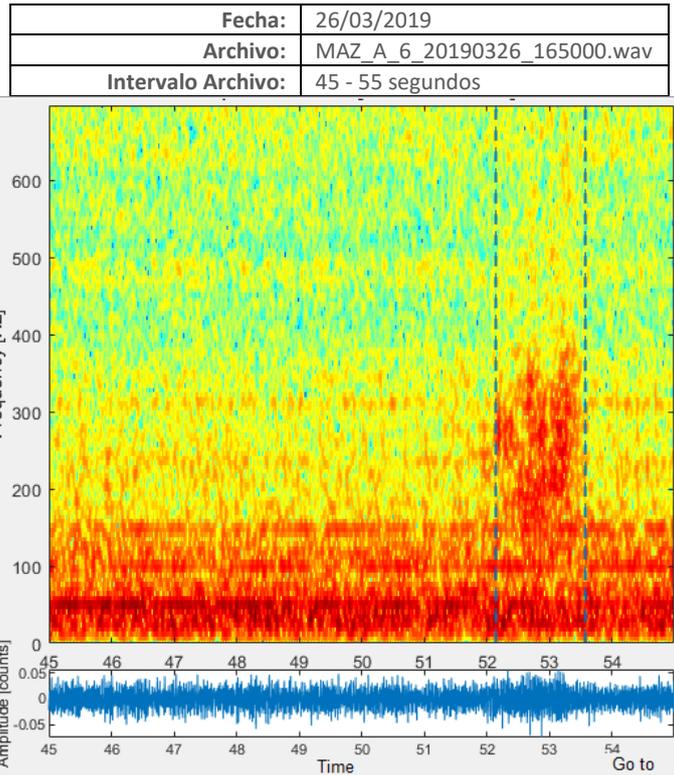


Figura 40. Evento 3 Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

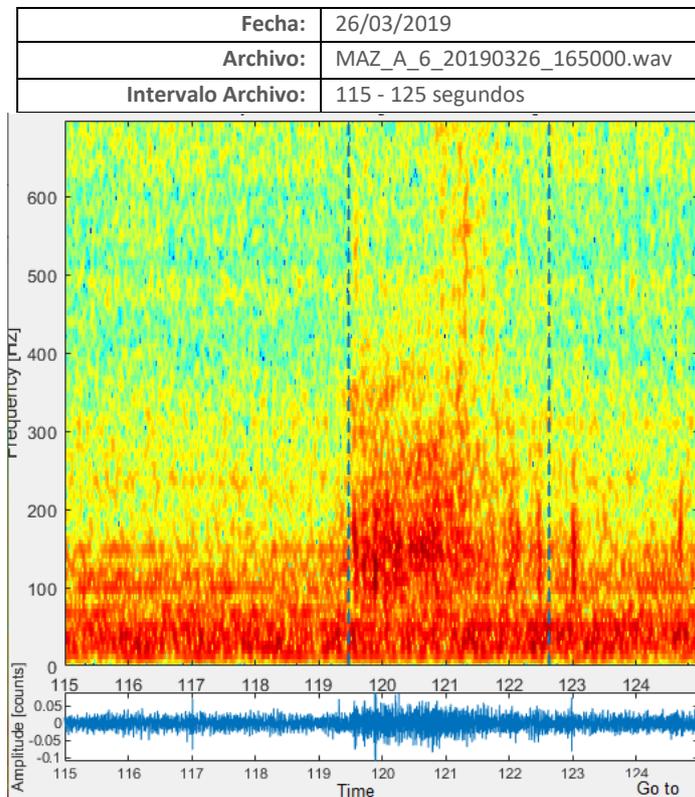


Figura 41: Evento 3 Sonido 2 Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

Evento 4: Espantada

En los videos del 26 de marzo se observa a las 17:11:20 se produce un incremento de la velocidad de nado de los atunes y como salen del plano de la cámara y a continuación, se retoma la normalidad de nueva (el evento en su conjunto dura unos 9 segundos en total).

Al analizar los audios disponibles, se observó un sonido menos de un minuto antes del comportamiento inusual de los atunes. Este sonido presentaba una frecuencia entre 150 y 250 Hz con una duración de 1.25 segundos, seguido de dos sonidos muy cortos entre 50 y 300 Hz (Figura 42). Otro sonido se detectó 30 segundos después. En este caso el sonido duró cerca de un segundo y concentraba la energía entre 150 y 300 Hz con una duración de 0.66 segundos (Figura 43)

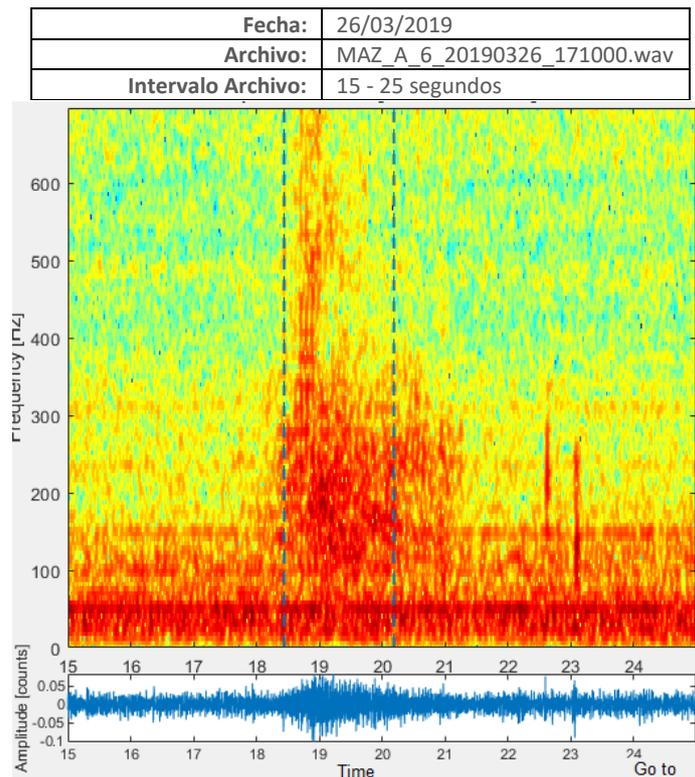


Figura 42. Evento 4 Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

Fecha:	26/03/2019
Archivo:	MAZ_A_6_20190326_171000.wav
Intervalo Archivo:	43 - 53 segundos

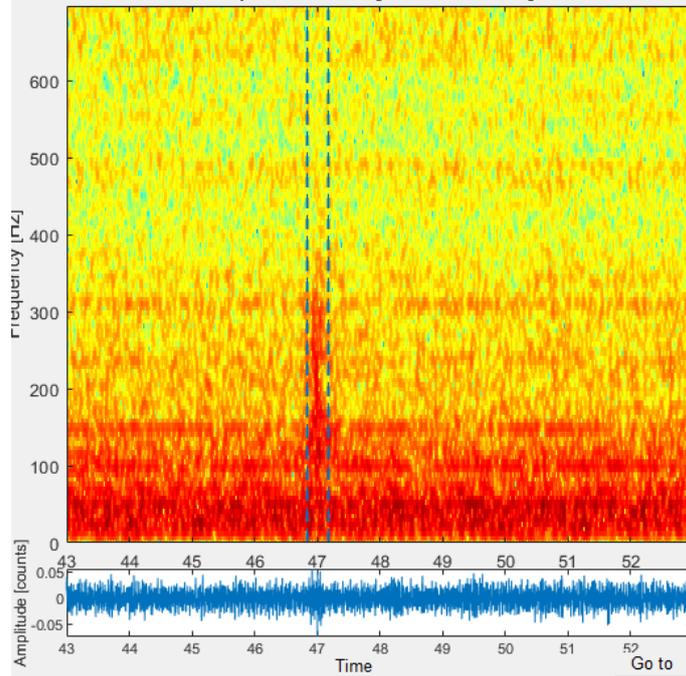


Figura 43. Evento 4 Sonido 2. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

Evento 5: Aumento de velocidad y agrupamiento

En el ecograma de este momento se observa un incremento de velocidad de los atunes seguido del agrupamiento, por lo que en el ecograma se observan “huecos”. La posición lateral de la ecosonda implica que este agrupamiento de los atunes se produce en la parte más alejada del equipo (Figuras 44 y 45)

Fecha:	19/03/2019
Archivo:	D20190319-T090715.raw
Intervalo Archivo:	10:09:58 – 10:11:43
Configuración del equipo	Posición lateral

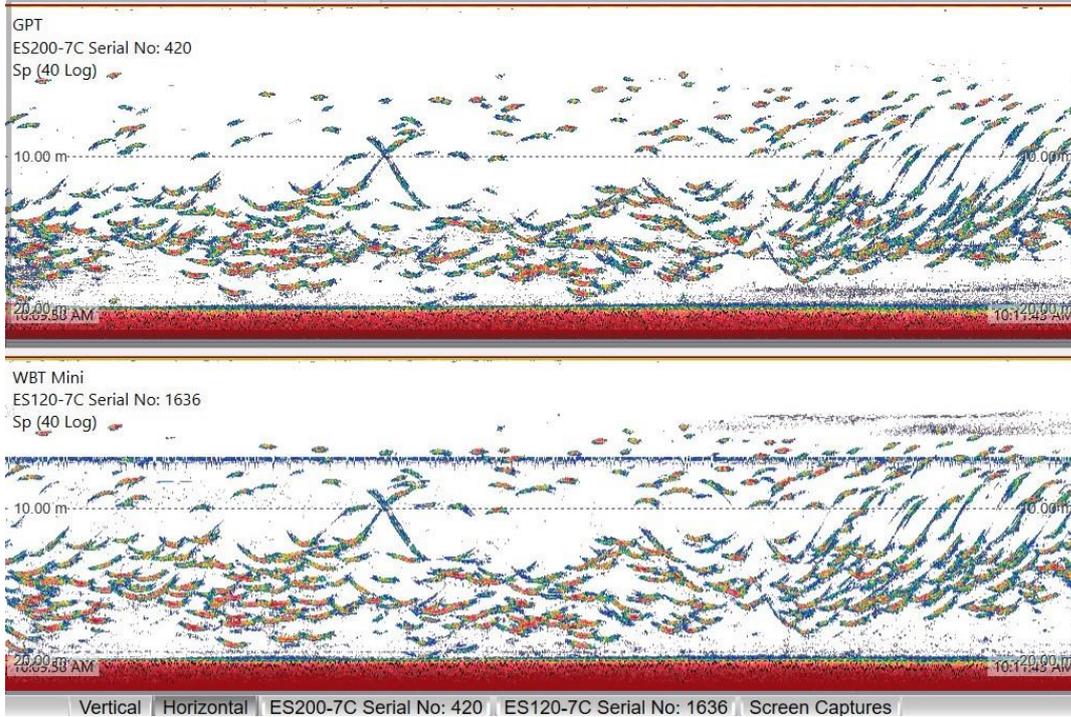


Figura 44: Ecograma evento 5

Fecha:	19/03/2019
Archivo:	D20190319-T090715.raw
Intervalo Archivo:	10:12:03 – 10:13:48
Configuración del equipo	Posición lateral

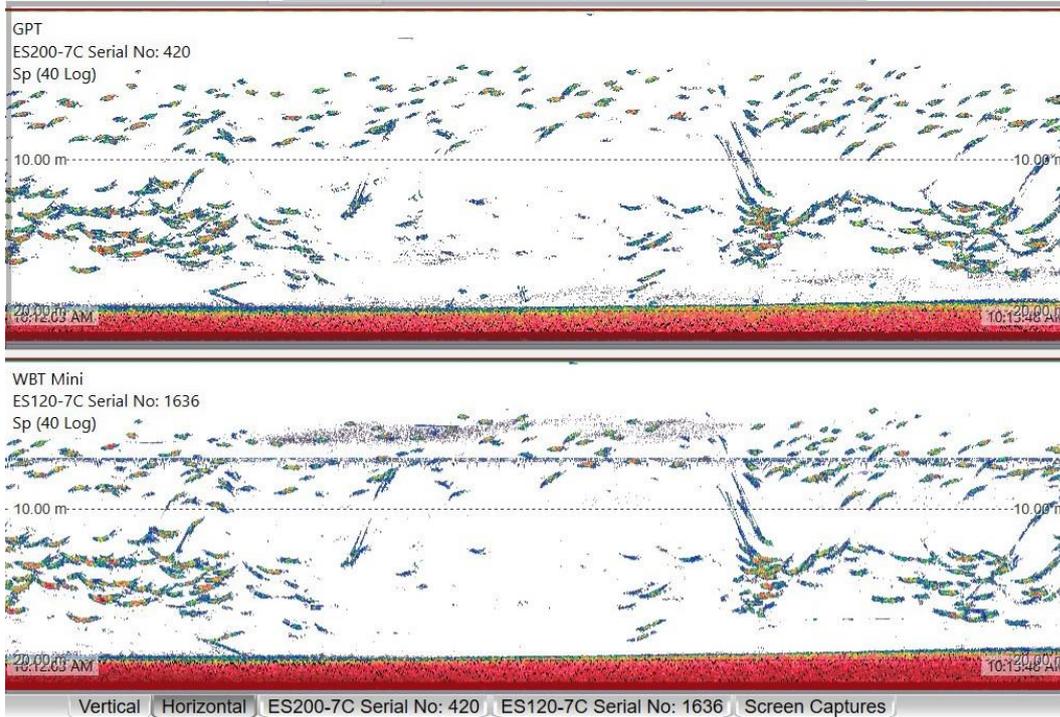


Figura 45: Ecograma evento 5

En el audio asociado a este momento, se observa un sonido constante a 150 Hz interrumpido por otro sonido que concentra la energía entre 350-850 Hz, la duración de este último sonido es de 0.21 segundos (Figura 46).

Fecha:	19/03/2019
Archivo:	MAZ_A_6_20190319_101200.wav
Intervalo Archivo:	20 - 30 segundos

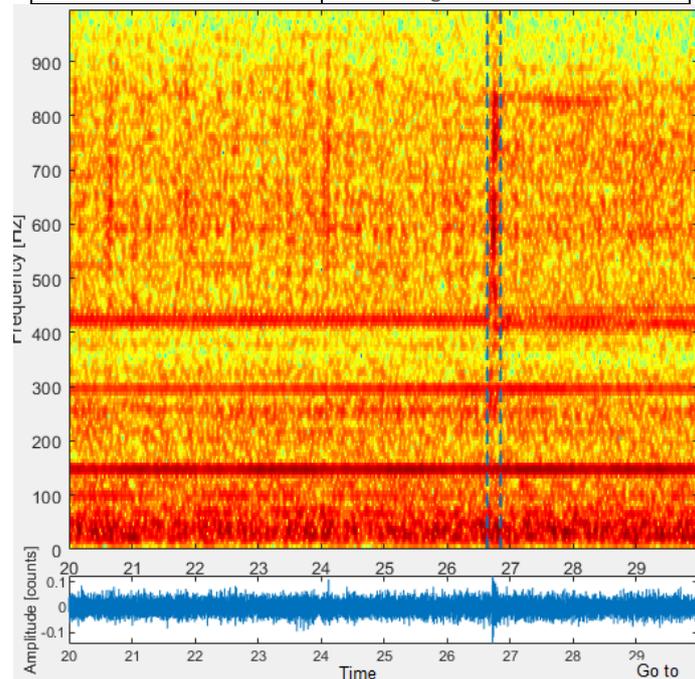


Figura 46. Evento 5 Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

Evento 6: Aumento de la velocidad y cambio de dirección

Los ecogramas de este periodo muestran a los atunes nadando de una manera que podríamos considerar como normal. Se observa al principio relativamente pocos atunes nadando a poca velocidad, de hecho, y unos minutos más tarde se observan más atunes. En la Figura 47 se aprecia como los atunes aumentan la velocidad de nado. Al repasar los videos, se observa que los atunes efectivamente incrementan la velocidad de nado y que además cambian el patrón de nado, parece que cierran el círculo de nado (Figura 48).

Fecha:	20/03/2019
Archivo:	D20190320-T111349.raw
Intervalo Archivo:	12:13:55 – 12:15:40
Configuración del equipo	Posición lateral

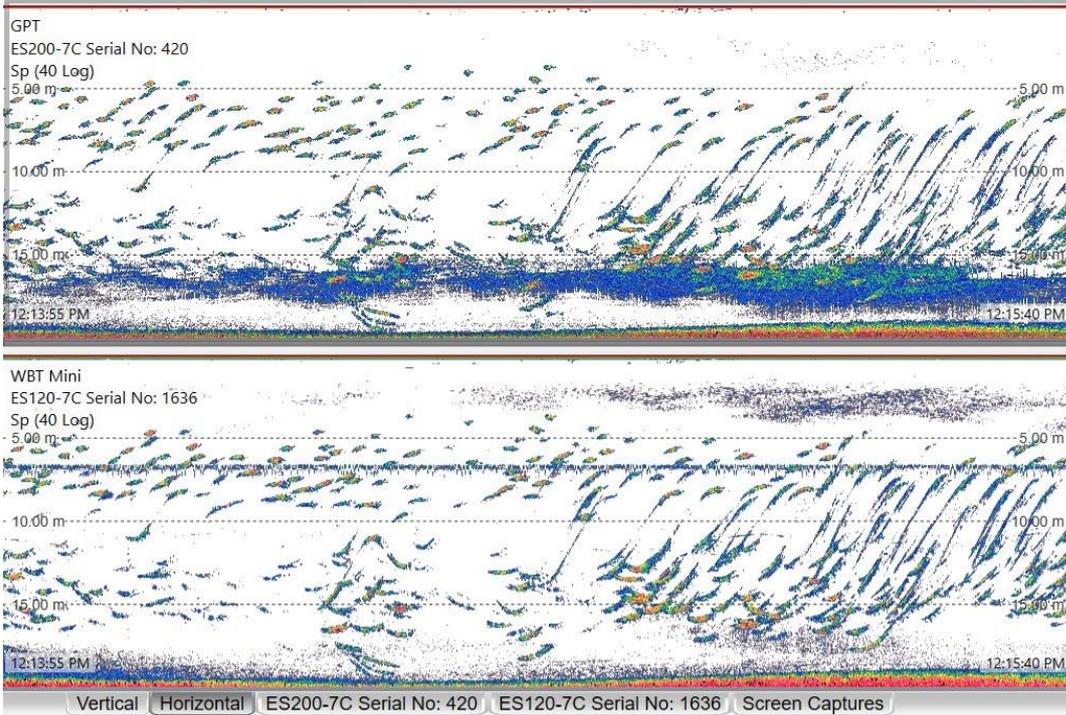


Figura 47: Ecograma evento 6

Fecha:	19/03/2019
Archivo:	D20190319-T111349.raw
Intervalo Archivo:	12:24:59 – 12:26:44
Configuración del equipo	Posición lateral

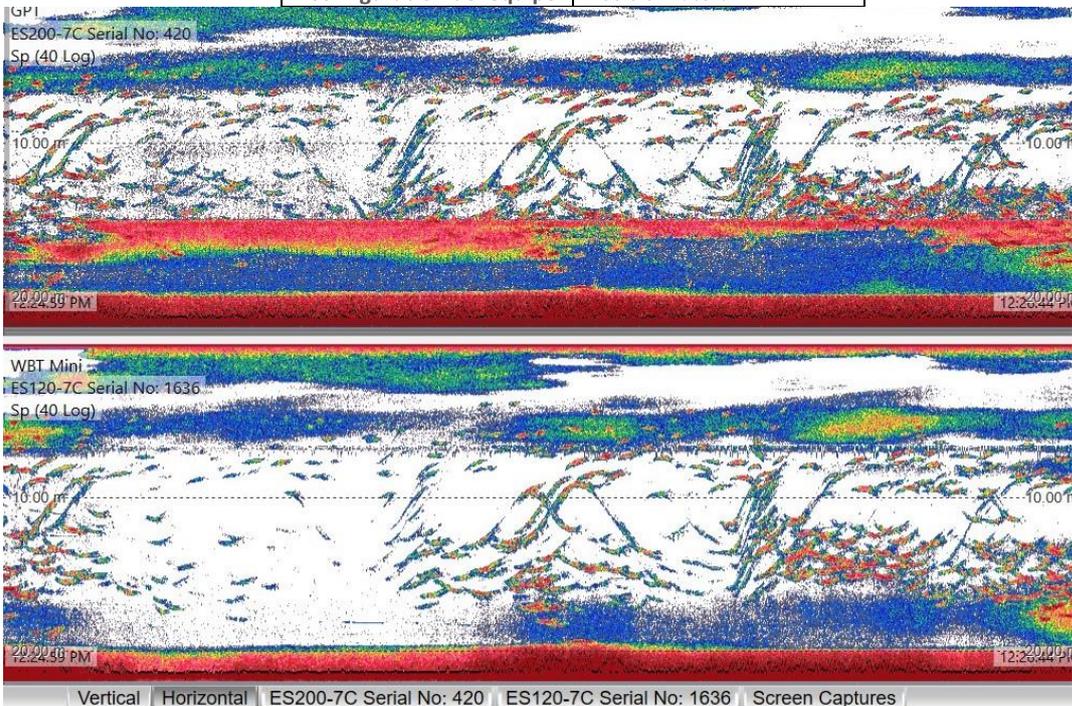


Figura 48. Ecograma evento 5

Además del sonido constante a 150 Hz, durante este periodo se observó un sonido a una frecuencia de 500 Hz que es relativamente constante, aunque presenta algunas interrupciones como se puede observar en la imagen siguiente (Figura 49)

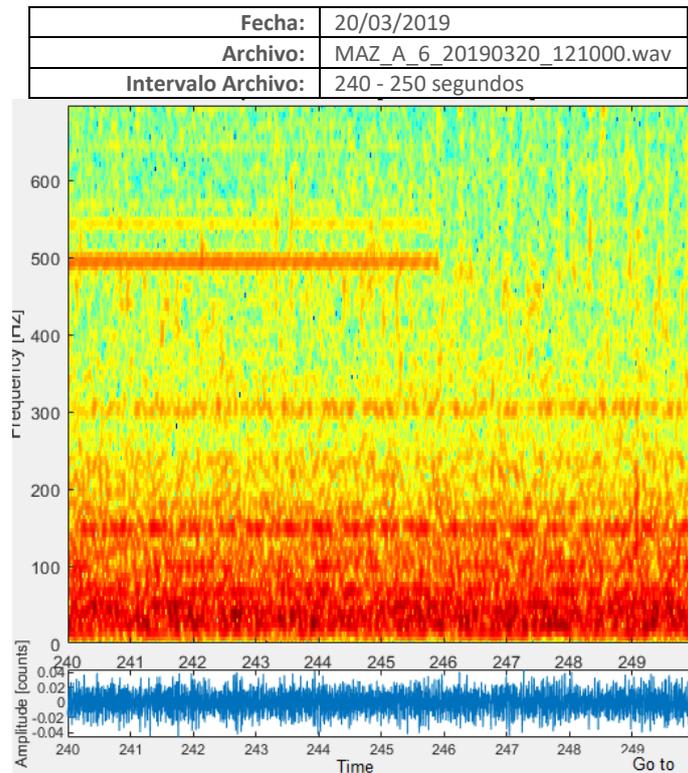


Figura 49. Evento 6 Sonido 1. Espectrograma y variación de la amplitud (forma de onda)

OTROS COMPORTAMIENTOS

La presencia de buzos en el tanque llevando a cabo tareas de mantenimiento provocan cambios en el comportamiento de los atunes. Cuando esto sucede, los atunes aumentan la velocidad de nado, rompen su trayectoria habitual de nado y es posible observar individuos desconcertados. Similar comportamiento ante buzos fue observado por Nucci en el año 2005 (Nucci et al., 2010).

RUIDO DERIVADO DEL MANTENIMIENTO DE LAS INSTALACIONES

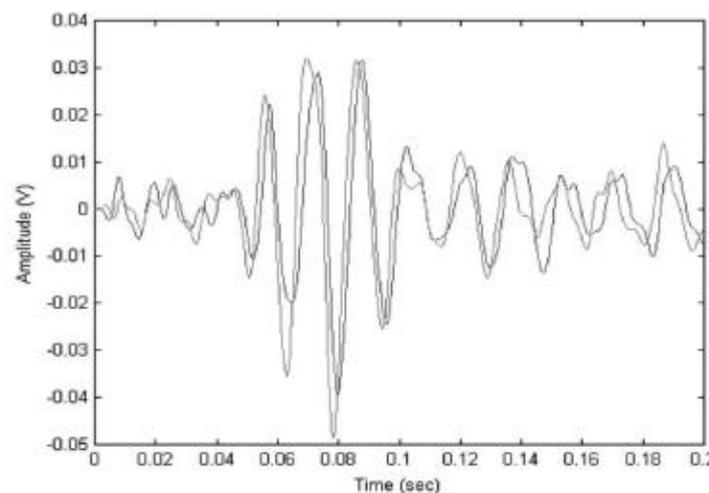
De entre todas las labores de mantenimiento del tanque de los atunes el robot de limpieza encargado de limpiar el fondo parecía tener cierta influencia en el comportamiento de los atunes. Al examinar los períodos en los que se produce la actividad del robot de limpieza, se distingue un sonido constante de unos 150 Hz acompañado de numerosos pitidos a una frecuencia aproximada de 600 Hz los cuales no parecen responder a un patrón concreto. Basándonos en los ecogramas y las imágenes de video grabadas, estos sonidos asociados a la recirculación del tanque parecen estar vinculados con una “agrupación” mayor de los atunes durante el nado, así como la reducción de la profundidad de nado.

4. DISCUSIÓN

El patrón de nado habitual de los atunes se ha visto alterado durante algunos momentos puntuales por la presencia de buzos y del equipo de limpieza del tanque. Durante estos momentos los atunes cerraban el círculo de nado formando un banco más compacto como reacción a estados de “alerta”.

El posible efecto de sonidos de baja frecuencia y cambios en el comportamiento de los atunes como cambios en la profundidad de nado y desorientación de algunos individuos ha sido observado con anterioridad (Perez-Arjona et al., 2014). A lo largo del monitoreo, se ha observado una serie de comportamientos anómalos por parte de los atunes en algunas ocasiones, ante evento que coinciden en el rango de audición de los atunes. Determinar si este comportamiento es consecuencia de alguno de estos eventos sonoros (o de la acumulación de todos ellos) no sería posible actualmente ya que no se han detectado suficientes eventos que permita intuir cierto patrón o llevar a cabo análisis estadísticos. Sería necesario continuar con el monitoreo para recopilar más datos.

En cuanto a las vocalizaciones registradas, se observaron tres sonidos pulsados que coincidieron con ellas y cuyas frecuencias oscilaban entre 100 – 180 Hz las cuales no parecían tener respuesta por parte de otros individuos por lo que se descarta que dichos sonidos estén destinados a la comunicación. En un trabajo anterior en el que se detectaron estas vocalizaciones los sonidos coincidentes oscilaban entre 20 -130 Hz (Allen et al., 2003), por lo que coinciden en el orden de magnitud. En la gráfica 4 se puede observar como la variación de la amplitud de la onda de las vocalizaciones detectadas en esta publicación coincide con las que hemos encontrado en este trabajo.



Gráfica 4. Eructo atún (Fuente: Allen et al., 2003)

Configuración del equipo

Las imágenes de video permiten observar comportamientos muy interesantes como cambios de dirección, comportamiento durante la alimentación y vocalizaciones. Las mejores imágenes en todos estos casos corresponden a la configuración de lateral.

El equipo de acústica activa permite una mejor visualización de los cambios de profundidad y las espantadas. En los cambios de profundidad las configuraciones más adecuadas corresponden a la posición dorsal y ventral, aunque la posición dorsal está más expuesta a

posibles distorsiones por impactos en el agua. Las espantadas por otro lado se aprecian mejor cuando la ecosonda está en posición lateral inclinado.

En cuanto al equipo de sonido sería interesante mejorar tanto la capacidad de almacenaje de la grabadora y así poder monitorear las 24 horas. Por otro lado, la sincronización entre el equipo de acústica pasiva y el de acústica activa y el de la cámara de video no era muy exacto por lo que sería necesario disponer de un sistema automatizado controlado por el mismo equipo con la misma base de tiempos que registre todos los datos de manera síncrona

5. CONCLUSIONES

Este trabajo de final de máster ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Los atunes en cautividad estudiados están sometidos a un gran número de sonidos de origen antropogénicos. Se ha podido intuir una posible relación entre comportamientos poco habituales y episodios de contaminación acústica pero sería necesario recopilar más datos para determinar la forma en que la contaminación acústica puede afectar a los atunes.
- Las vocalizaciones registradas durante este monitoreo coinciden con resultados publicados anteriormente en cuanto al orden de magnitud y posible naturaleza. En el trabajo publicado al respecto sugerían una posible relación entre las frecuencias emitidas por los atunes y la vejiga natatoria y por lo tanto sería muy interesante continuar este trabajo en esta línea.
- La cámara de video en posición lateral es la más adecuada para observar las vocalizaciones, así como el comportamiento durante la alimentación y los cambios de sentido.
- El equipo de acústica activa resulta más adecuado para la visualización de los cambios de profundidad y las espantadas. Mientras que los cambios de profundidad se observan mejor con la configuración ventral, la visualización de las espantadas es mejor con la configuración lateral
- El equipo de acústica pasiva debe mejorarse en cuanto a su capacidad de memoria y también con respecto a la sincronización con el resto del equipo. También sería interesante el uso de hidrófonos con mayor sensibilidad

6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen S., Demer D.A. (2003) Detection and characterization of yellowfin and bluefin tuna using passive-acoustical techniques. *Fisheries Research* 63: 393-403
- Bart A.N., Clark J., Young J., Zohar Y. (2001) Underwater ambiente noise measurements in aquaculture systems: a survey. *Aquaculture Engineering* 25: 99-110
- Belmonte A., de la Gándara F. (2008) Cuadernos de acuicultura: El cultivo del Atún rojo (*Thunnus thynnus*). Fundación Observatorio Español de Acuicultura, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Costa C., Scardi M., Vitalini V., Cataudella S. (2009) A dual camera system for counting and sizing Northern Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*; Linnaeus, 1758) stock, during transfer to aquaculture cages, with a semi automatic Artificial Neural Network tool. *Aquaculture* 291: 161-167
- Harvey E., Cappel M., Shortis M., Robson S., Buchanan J., Speare P. (2003). The accuracy and precision of underwater measurements of length and maximum body depth of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) with a stereo-video camera system. *Fisheries Research* 63: 315-326
- ICCAT. 2006-2016. Manual de ICCAT. Capítulo 2.1.5. Atún rojo del Atlántico. Comisión internacional para la conservación del atún Atlántico. En: Publicaciones ICCAT. Actualizado 2016. [Fecha de consulta: 27/01/2009].
- ICCAT. 2017. Reporto f
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012) Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina. Madrid. 146 pp
- Nucci M.E., Costa C., Scardi M., Cataudella S. (2010) Preliminary observations on bluefin tuna (*Thunnus thynnus*, Linnaeus 1758) behaviour in captivity. *Journal of Applied Ichthyology* 26: 95-98
- Peng C., Zhao X., Liu G. (2015) Noise in the sea and its impacts on marine organisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (10): 12304-12323
- Pérez-Arjona P., Espinosa V., Puig-Pons V., Ordóñez P., Soliveres E, Poveda P., Ramis J., De la Gándara F., Cort J.L. (2014) Effects of offshore wind farms operational noise on bluefin tuna behaviour. 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics
- Puig-Pons V., Muñoz-Benavent P., Espinosa V., Andreu-García G., Valiente-Gonzalez JM., Estruch VD., Ordóñez P., Pérez-Arjona I., Atienza V., Mèlich B., de la Gándara F., Santaella E. (2019) Automatic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) biomass estimation during transfers using acoustic and computer vision techniques. *Aquaculture Engineering* 85: 22-31

- Slabbekoorn H., Bouton N., van Opzeeland I., Coers A., ten Cate C., Popper A.N. (2010) A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology and Evolution* 25: 419-427
- Song, J., A. Mathieu, R.F. Soper, and A.N. Popper. (2006) Structure of the inner ear of bluefin tuna *Thunnus thynnus*. *Journal of Fish Biology* 68:1767-1781.
- Torisawa S., Kadota M., Komeyama K., Suzuki K., Takagi T. (2011) A digital stereo-video camera system for three-dimension monitoring of free-swimming Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, cultured in a net cage. *Aquatic Living Resources* 24: 107-112
- William R., Wright A. J., Ashe E., Blight L.K., Brintjes R., Canessa R., Clark C.W., Cullis-Suzuki S., Dakin D.T., Erbe C., Hammond P.S., Merchant N.D., O'Hara P.D., Purser J., Radford A.N., Simpson S.D., Thomas L., Wale M.A. (2015) Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. *Ocean & Coastal Management* 115: 17-24

-