



Vidsupra

Órgano de difusión científica y tecnológica del
Centro Interdisciplinario de Investigación
para el Desarrollo Integral Regional
Unidad Durango
IPN-CIIDIR DURANGO

visión científica
ISSN:2007-3127

EDICIÓN ESPECIAL
Vol. 10 Núm. 2
julio - diciembre 2018





www.ciidirdurango.ipn.mx

Vidsupra

Órgano de difusión científica y tecnológica del
Centro Interdisciplinario de Investigación
para el Desarrollo Integral Regional
Unidad Durango
IPN- CIIDIR DURANGO

visión científica
ISSN: 2007-3127



Directorio

Instituto Politécnico Nacional

- **Mario Alberto Rodríguez Casas.** Director General
- **Héctor Leoncio Martínez Castuera.** Secretario General
- **Jorge Toro González.** Secretario Académico
- **Juan Silvestre Aranda Barradas.** Secretario de Investigación y Posgrado
- **Luis Alfonso Villa Vargas.** Secretario de Extensión e Integración Social
- **María Guadalupe Vargas Jacobo.** Secretaria de Servicios Educativos
- **Reynold Ramón Farrera Rebollo.** Secretario de Gestión Estratégica
- **Jorge Quintana Reyna.** Secretario de Administración
- **Eleazar Lara Padilla.** Secretario Ejecutivo de la COFAA
- **José Cabello Becerril.** Secretario Ejecutivo del POI
- **José Juan Guzmán Camacho.** Abogado General
- **Modesto Cárdenas García.** Presidente del Decanato
- **Blanca Beatriz Martínez Becerra.** Coordinadora de Comunicación Social

CIIDIR Unidad Durango

- **Eduardo Sánchez Ortíz.** Director
- **Erika Cassio Madrazo.** Subdirectora Académica y de Investigación
- **Agustín Ángel Meré Rementería.** Subdirector Administrativo
- **Néstor Naranjo Jiménez.** Subdirector de Servicios Educativos e Integración Social
- **Amelia Quezada Díaz.** Jefa del Departamento de Posgrado
- **Denise Martínez Espino.** Jefa de la Unidad Politécnica de Integración Social
- **Claudia Elia Soto Pedroza.** Jefa de la Unidad de Tecnología Educativa y Campus Virtual
- **César Israel Hernández Ramírez.** Jefe del Departamento de Investigación y Desarrollo Tecnológico
- **Adán Villarreal Márquez.** Jefe de la Coordinación de Enlace y Gestión Técnica
- **Mayra Edith Burciaga Siqueiros.** Jefa del Departamento de Servicios Educativos
- **Víctor Daniel Ríos García.** Jefe de la Unidad de Informática
- **Diana Carolina Alanís Bañuelos.** Jefa del Dpto. de Recursos Financieros y Materiales
- **Sara Silva Haro.** Jefa del Departamento de Capital Humano

“Vidsupra, visión científica” Vol. 10, No. 2 JULIO - DICIEMBRE de 2018. Es una publicación semestral editada por el Instituto Politécnico Nacional, a través del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional CIIDIR-IPN Unidad Durango. Calle Sigma Núm. 119, Fracc. 20 de Noviembre II. C.P. 34220. Teléfonos: (618) 814 2091 y (618) 814 4540. Editor responsable: Eduardo Sánchez Ortíz. Editora asociada: Rebeca Álvarez Zagoya. Producción Editorial: Claudia Elia Soto Pedroza
Certificado de reserva de derechos: No. 04-2010-112211305700-102, ISSN: 2007-3127, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Certificado de licitud de título número 14715. Certificado de licitud de contenido número 12288, ambos otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa por: Carlos Alberto González Cervantes. MGM impresos. Av. División Durango No. 217 Col. Benjamín Méndez C.P. 34020 Durango, Dgo.
Este número se terminó de imprimir el 30 de diciembre de 2018 con un tiraje de 500 ejemplares. Distribución: CIIDIR-IPN Unidad Durango. Distribución gratuita a Instituciones de Educación Superior.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Politécnico Nacional.

Fotografía: Celia López-González. Murciélago insectívoro *Corynorhinus* sp. de Guanaceví, Durango, México.

Índice

EDICIÓN ESPECIAL

Principios de acústica para la comprensión y análisis de llamados de ecolocalización en murciélagos.

Ángel García Rojas, Celia López-González

- 1** INTRODUCCIÓN
- 2** **CAPÍTULO 1: CONCEPTOS BÁSICOS DE ACÚSTICA**
 - ¿Qué es el sonido?
 - ¿Cómo se propaga el sonido?.
 - Representación gráfica del sonido
 - Sonido y ruido
 - Fenómenos presentes en ondas sonoras
- 6** **CAPÍTULO 2: LA ECOLOCALIZACIÓN EN MURCIÉLAGOS**
 - Reseña histórica sobre la Ecolocalización
 - Adaptaciones de los murciélagos para la ecolocalización
 - Generalidades de las llamadas de ecolocalización
 - Tipos de pulsos de ecolocalización
 - Buzz de caza
 - Llamadas sociales
 - Situaciones a las que se enfrentan los murciélagos durante el forrajeo
 - Alcance de la detección de la presa
 - Compensación al efecto Doppler
 - Señales de ecolocalización y espacio de forrajeo
 - Clasificación de murciélagos en gremios tróficos
- 13** **CAPÍTULO 3: MICRÓFONOS PARA LA DETECCIÓN DE LOS PULSOS DE ECOLOCALIZACIÓN**
 - ¿Qué son y cómo funcionan los micrófonos?.
 - Partes del micrófono
 - Características de los micrófonos
 - Micrófonos ultrasónicos
 - Tipos de detectores de ultrasonido
 - Almacenamiento y guardado de los llamados de ecolocalización
 - Velocidad de muestreo y *aliasing*
 - Formatos de audio
- 17** **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SEÑALES DE ECOLOCALIZACIÓN**
 - Análisis de Fourier
 - Visualización de las señales de ecolocalización
 - Parámetros a analizar en las señales de ecolocalización
 - Softwares enfocados a la visualización y análisis de los llamados de ecolocalización
 - Consideraciones al momento del análisis
- 22** **CAPÍTULO 5: UTILIDAD DE LAS SEÑALES DE ECOLOCALIZACIÓN DE LOS MURCIÉLAGOS**
- 23** LITERATURA CITADA

PRINCIPIOS DE ACÚSTICA PARA LA COMPRESIÓN Y ANÁLISIS DE LLAMADOS DE ECOLOCALIZACIÓN EN MURCIÉLAGOS.

Angel García-Rojas^{1, 2} y Celia López-González²

¹ Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, Carretera Durango - México km 22.5, Ejido Villa Montemorelos, Durango, Dgo. C.P. 34371.

² Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Durango, Calle Sigma 119 Fracc. 20 de Noviembre II, Durango, Dgo. 34220
gara940830@hotmail.com (AGR) y celialg@prodigy.net.mx (CLG)

INTRODUCCIÓN

Los murciélagos (Orden Chiroptera) son los únicos mamíferos verdaderamente voladores que existen. Se distribuyen en todos los continentes excepto la Antártida, ocupando gran variedad de hábitats. La mayoría de ellos son insectívoros, aunque también hay frugívoros, nectarívoros, hematófagos y carnívoros (Simmons y Conway 1997). La salud de estas especies es importante para las poblaciones humanas, ya que son controladores de plagas agrícolas y forestales, y se alimentan de animales nocivos para la salud humana como mosquitos transmisores de virus (Kunz *et al.* 2011); otros son dispersores de semillas y polinizadores, por lo que contribuyen a la regeneración de la vegetación en muchos ecosistemas (Medellín y Gaona 1999; Kunz *et al.* 2011).

El orden Chiroptera se divide en dos subórdenes: Megachiroptera y Microchiroptera. Los Murciélagos microquirópteros también se conocen como "los murciélagos con ecolocalización" porque tienen la capacidad de utilizar los ecos de sonidos emitidos por ellos mismos para evadir obstáculos, cazar y comunicarse. Una estrategia para estudiar estos animales es el uso de tecnologías que permiten captar y grabar los sonidos de ecolocalización, con los cuales se puede recolectar información sobre su comportamiento, actividad y estado de sus poblaciones, para posteriormente generar estrategias de conservación y planificación que permitan la continuidad de las poblaciones de murciélagos.

El presente trabajo es una recopilación de información que tiene por objetivo proporcionar el conocimiento básico sobre el fenómeno de la ecolocalización en murciélagos y sus usos. En el primer capítulo se explican los conceptos básicos sobre la física del sonido. En el segundo se mencionan los fundamentos biológicos de los llamados de ecolocalización de los murciélagos. El tercero se enfoca a los aparatos empleados para captar los llamados. En el cuarto se describen los parámetros que son considerados dentro del análisis de los llamados, y en el quinto se habla sobre la utilidad de los mismos.

Este documento está dirigido a estudiantes de licenciatura y posgrado interesados en el estudio de uno de los temas más fascinantes de la biología moderna. Su objetivo es el de servir como texto introductorio a partir del cual el lector pueda empezar a comprender la literatura especializada sobre el tema. Aunque está enfocado a la ecolocalización, los mismos principios aquí explicados aplican al estudio de los sonidos sociales emitidos por murciélagos, un campo de estudio aún en sus primeras etapas a nivel mundial, y prácticamente inexplorado en México, a pesar de ocupar el tercer lugar mundial en diversidad de murciélagos.

Esperamos que sea de utilidad y que de alguna manera contribuya al desarrollo de nuestro conocimiento de uno de los grupos de mamíferos más comunes, más útiles y desafortunadamente menos apreciados de nuestro país.

CAPÍTULO 1: CONCEPTOS BÁSICOS DE ACÚSTICA

El sonido

Es un fenómeno vibratorio en el que tiene lugar la propagación de energía mediante ondas elásticas a través de un medio que puede ser líquido (por ejemplo agua), sólido (por ejemplo metal) o gas (por ejemplo aire). El sonido no existe en el vacío, ya que para que se genere deben existir dos elementos: una fuente generadora de energía y un medio elástico en donde se propague la energía generada, es decir, en donde las moléculas puedan vibrar y chocar entre sí, de tal manera que la energía se transfiera a las moléculas cercanas en una serie de colisiones (Fig. 1). Durante este proceso dicha energía va disminuyendo y convirtiéndose en calor (Bradbury y Vehrencamp 1998).

Propagación del sonido

La propagación del sonido depende directamente de las características del medio y las condiciones en que se da, ya que existen varios materiales que son malos conductores, como los cuerpos blandos (cera, hule espuma, etc.) o porosos (tela, fibra de vidrio, etc.) y otros que son buenos conductores (cobre, aluminio, etc.) (Aguilar y Senent 1986). Los fenómenos acústicos que nos ocupan se dan en el aire (atmósfera terrestre). Para lograr entender el complejo proceso de emisión y captación del sonido es necesario tener en cuenta el fenómeno de atenuación atmosférica, que es la disminución en energía que sufre la onda sonora con la distancia, debida, entre otros factores, a la viscosidad del aire (Millán 2012).

La velocidad de propagación del sonido es de 340 m/s (metros sobre segundo) en el aire a una temperatura de 20° C y una atmósfera de presión, en tanto que en las mismas condiciones, en el hierro viaja a más de 5000 m/s. En el agua las ondas sonoras sufren menos pérdida de energía y se propagan más rápidamente, ya que las partículas que componen el agua están más cercanas unas de otras, por lo que la distancia que tiene que recorrer una partícula para colisionar con otra es mucho menor que en el aire.

Los sonidos pueden estar constituidos por un solo pulso (sonido de corta duración) por ejemplo una explosión o un golpe a una mesa; pero si la acción perturbadora que lo produce continúa de manera periódica, ya sea definida o indefinidamente, la oscilación recibe el nombre de tren de ondas (Bradbury y Vehrencamp 1998; Burbano *et al.* 2003). Es importante identificar el tipo de onda del que estamos tratando cuando hablamos de sonido, ya que existen dos tipos:

Ondas longitudinales: aquellas en las que el movimiento ondulatorio de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda, como es el caso del sonido (Fig. 2). Un claro ejemplo visual del movimiento ondulatorio longitudinal ocurre cuando un objeto cae en una superficie líquida y se genera una serie de ondas que se propagan en todas direcciones por la superficie del líquido.

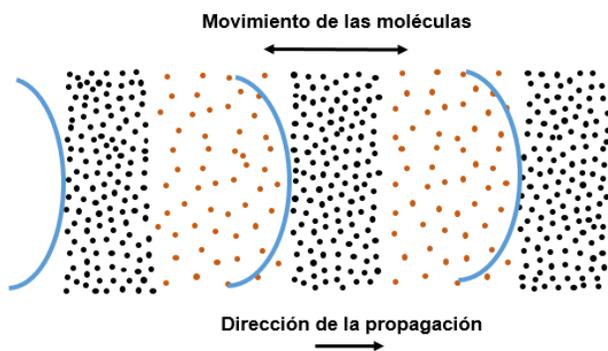


Figura 1.- Propagación del sonido: Mientras las ondas sonoras se propagan (color azul), las partículas que componen el medio de propagación chocan entre sí; al aglutinarse la presión aumenta (puntos de color negro), y al separarse disminuye (puntos de color anaranjado).

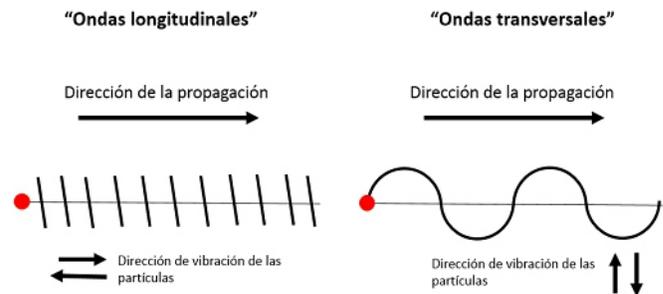


Figura 2.- Ondas transversales y longitudinales. El círculo rojo indica la fuente de emisión, seguido de la forma en que se propagan las ondas dependiendo de su tipo; las flechas pequeñas indican la dirección en que vibran las partículas en cada uno de los casos.

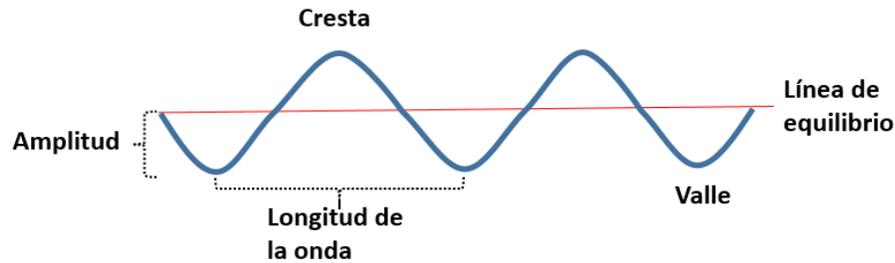


Figura 3.- Representación gráfica de un conjunto de ondas sinusoidales y sus componentes.

Ondas transversales: son aquellas en las que el movimiento ondulatorio de las partículas del medio es perpendicular a la dirección de propagación, algunos ejemplos son la luz y las olas del mar (Fig. 2).

Representación gráfica del sonido

Para su estudio, el sonido se representa gráficamente como una serie de ondas sinusoidales simples (Fig. 3). Sin embargo, en realidad las vibraciones mecánicas raramente producen ondas simples, y con frecuencia encontraremos ondas más complejas (Fig. 4). Una onda sonora simple posee las siguientes características:

Amplitud: representa la altura de la onda con respecto al punto de equilibrio, y se relaciona directamente con la intensidad del sonido.

Cresta: es el punto más alto de la onda con respecto a la línea o punto de equilibrio.

Frecuencia: es el número de veces que se repite la onda durante un segundo, la unidad de medición es ciclos sobre segundo (c/s) o Hertz (Hz).

Línea de equilibrio: es la línea que indica la posición de equilibrio de alguna partícula suspendida en el aire (punto medio de la vibración).

Longitud de onda: es lo que mide una onda (de cresta a cresta o de valle a valle) en metros (m).

Periodo: es el intervalo de tiempo que dura una onda, y puede transcurrir entre cresta y cresta o entre valle y valle, medido en segundos (s).

Valle: es el punto más bajo de la onda con respecto a la línea o punto de equilibrio.

Velocidad: se refiere a la rapidez con la que se

propaga la onda a través del medio, se representa en metros sobre segundo (m/s).

Intensidad o volumen: es la cantidad de energía del sonido que emite una fuente sonora. La intensidad del sonido está relacionada con la amplitud; por lo que a mayor sea la amplitud, o la altura de la onda, mayor será el volumen del sonido (García 2010). Una de las maneras más habituales de medir la intensidad de un campo sonoro es mediante el nivel de presión sonora (NPS), que es la fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie. La unidad de medida de la presión es el Pascal (Pa), que se define como la fuerza que se ejerce sobre una superficie ($P = \text{fuerza/superficie}$) medida en Newtons/m². Para fines prácticos, en acústica el NPS se mide en decibelios (dB) (Millán 2012). Esta unidad mide la intensidad de un sonido comparándola con la intensidad mínima que el oído humano puede percibir (0 dB).

Sonido y ruido

Las vibraciones mecánicas raramente producen una onda simple (Fig. 3), sino que con frecuencia encontramos ondas más complejas (Fig. 4). El ruido es un caso particular de sonido complejo, el cual se caracteriza por ser una combinación de sonidos aleatorios de distintas frecuencias muy próximas entre sí.

Fenómenos presentes en ondas sonoras

Reflexión: es el rebote de las ondas sobre un medio no transparente al sonido (Fig. 5), es decir, un objeto que se interpone a la onda (Poó 2006). Es importante tener en cuenta que dependiendo de la composición de la superficie reflejante, algunas ondas se modificarán más que otras, produciendo retardos y ecos en la señal que pueden cambiar la forma original de la misma (Serrano 2012).

Refracción: consiste en la desviación en la dirección de propagación de una onda cuando pasa de un medio a otro de diferente densidad (Fig. 6).

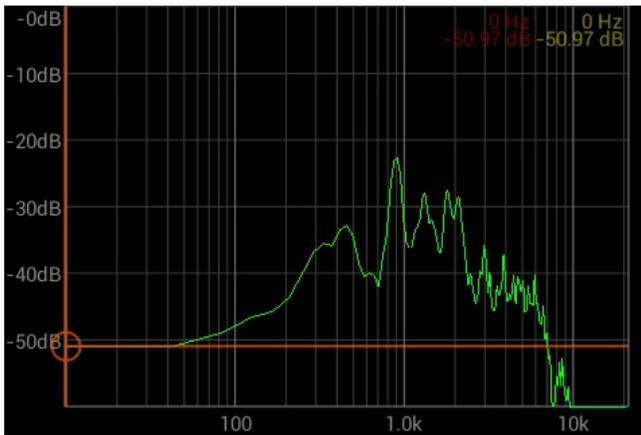


Figura 4.- Representación gráfica del sonido de un aplauso, capturado con la aplicación para celular SpecScope versión 1.0. 4.

Difracción: es el fenómeno mediante el cual se generan nuevas ondas cuando una onda se interpone con algún obstáculo y atraviesa una rendija, que funciona como emisora de una nueva onda diferente a la original (Fig. 7).

Interferencia: se refiere a la superposición de ondas para formar una onda nueva. La amplitud de las ondas resultantes de interferencia puede aumentar, disminuir o anularse (Fig. 8). Cuando la cresta de una onda se traslapa con la cresta de otra, sus efectos individuales se suman y producen una onda de mayor amplitud, esto se denomina interferencia constructiva; cuando la cresta de una onda se traslapa con el valle de otra, sus efectos individuales se reducen o se pueden anular, produciendo interferencia destructiva (Hewitt 2007).

Reverberación: ocurre cuando una onda se refleja numerosas veces en objetos muy cercanos al receptor. La reverberación es la persistencia del sonido dentro de un recinto después de que la fuente original ha dejado de emitirlo.

Enmascaramiento: es un efecto en la percepción sonora en el que los sonidos de menor intensidad son opacados por uno o más sonidos de mayor intensidad; quedando inaudible el de menor intensidad. El enmascaramiento puede darse hacia delante o hacia atrás: hacia adelante cuando el sonido de mayor intensidad (enmascarador) ocurre primero que el de menor intensidad (enmascarado); hacia atrás cuando el sonido de menor intensidad (enmascarado) ocurre primero que el de mayor intensidad (enmascarador).

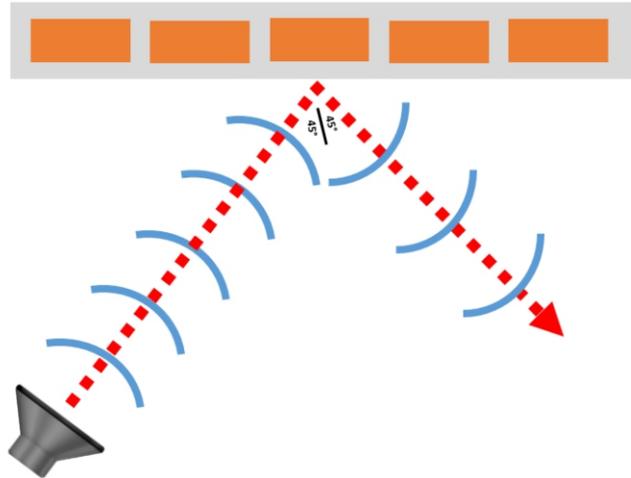


Figura 5.- Reflexión de ondas sonoras. Una bocina emite ondas sonoras (color azul), las cuales chocan y rebotan en un muro, en un ángulo igual al del que incide el sonido emitido.

Efecto Doppler: se refiere al cambio de frecuencia que se percibe cuando una fuente sonora se aproxima o se aleja de un receptor. Para entender mejor el fenómeno imaginemos que estamos parados frente a un auto que se mueve hacia nosotros con el claxon presionado todo el tiempo. Lo que perciben nuestros oídos es un aumento de frecuencia o tono del sonido conforme el auto se aproxima. Cuando el auto se aleja, nuestros oídos percibirán que el sonido se hace más grave (la frecuencia disminuye). A medida que la fuente en movimiento emite ondas sonoras, cada onda sucesiva se emite desde un punto diferente (más cercano o alejado) al receptor que la onda inmediata anterior. Esto da por resultado que la distancia entre las ondas sucesivas, o la frecuencia, sea mayor o menor que la de la fuente (Tippens 2011).

Armónicos: también conocidos como hipertonos o sobretonos. Son múltiplos de la frecuencia del sonido original (sonido o frecuencia fundamental). La frecuencia de un armónico es más alta que la del sonido fundamental, sin embargo la amplitud de los armónicos es muy variante, y generalmente disminuyen conforme se van generando más armónicos. El sonido fundamental es considerado el primer armónico (Whitlow y Simmons 2007; Fenton 2013).

Pulso: corresponde a una unidad de un tren de ondas (finito o infinito--Fig. 9), ya sea de cresta a cresta o de valle a valle.

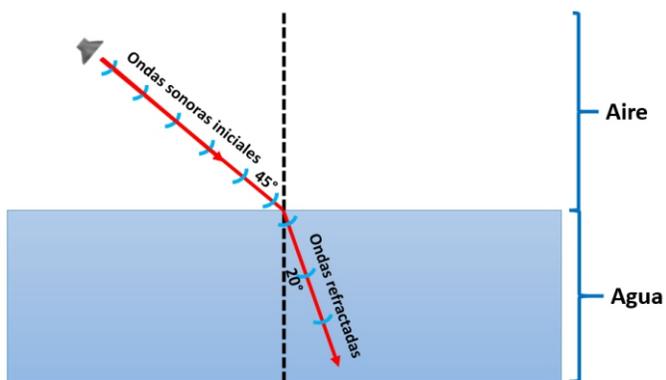


Figura 6.- Refracción de ondas sonoras. Una bocina emite ondas sonoras, las cuales inicialmente se propagan en el aire y al pasar a un medio más denso (color azul) cambian su dirección y velocidad.

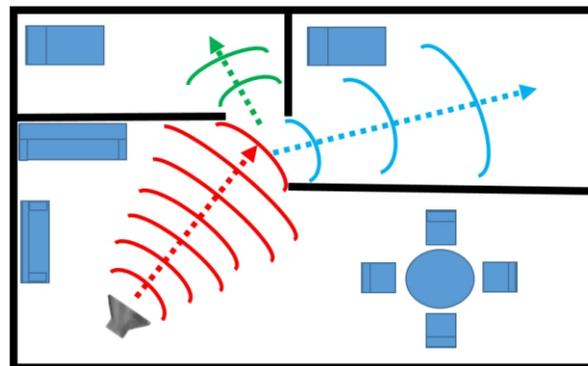


Figura 7.- Difracción de las ondas sonoras. Una bocina en una sala emite ondas sonoras que al encontrarse con los marcos de las puertas, generan nuevas ondas. Los marcos de las puertas funcionan como un nuevo punto de emisión de sonido.

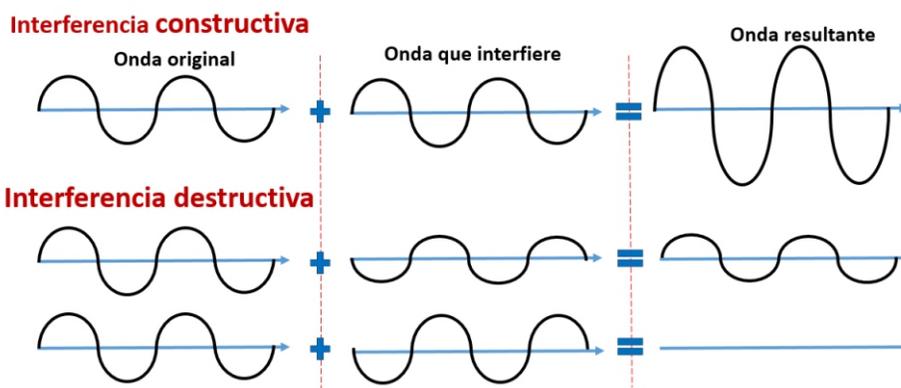


Figura 8.- Tipos de interferencia. Representación gráfica de la interferencia constructiva (parte superior) y destructiva (partes media e inferior).

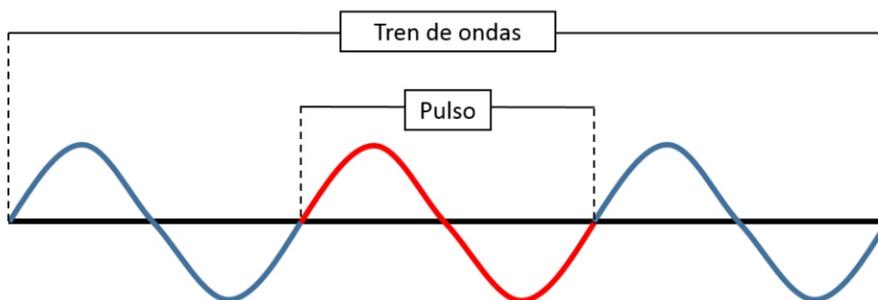


Figura 9.- Tren de ondas y pulso. Representación gráfica de un tren de ondas, del cual se ha seleccionado un pulso (color rojo).

CAPÍTULO 2: LA ECOLOCALIZACIÓN EN MURCIÉLAGOS

Reseña histórica sobre la Ecolocalización.

La investigación sobre el sonar de los animales se remonta a 1773 con el científico italiano Lazzaro Spallanzani (Grinnell 1995; Whitlow y Simmons 2007), quien en una sala con cortinas pesadas, velas, cintas, campanas y metodologías para controlar las señales auditivas, propuso que los murciélagos podían "ver con sus oídos"; sin embargo no fueron suficientes los conocimientos de la época para explicar la manera en que lo hacían (Fenton 2013).

Cinco años más tarde, el científico suizo Charles Jurine descubrió que los murciélagos se volvían incapaces de esquivar obstáculos si se les tapaban los oídos (Whitlow y Simmons 2007). A pesar de este conocimiento, tanto Jurine como Spallanzani no lograron formular una teoría sobre la ecolocalización. Fue hasta 1938 que Robert Galambos y Donald Griffin utilizaron un detector de ultrasonidos desarrollado por William Pierce, para mostrar que los murciélagos ecolocalizaban emitiendo ultrasonido y recibiendo los ecos (Griffin 1944, 1958; Whitlow y Simmons 2007). Poco tiempo después Griffin descubrió que los murciélagos pueden volar en la total oscuridad de las cuevas sin golpear las paredes o estalactitas y acuñó el término ecolocalización para describir el fenómeno (Griffin, 1958).

La ecolocalización es un sistema que consiste en la emisión de ondas sonoras, en la mayoría de los casos de alta frecuencia, seguido de la recepción, análisis y discriminación de los ecos provocados por los objetos que se interponen en la dirección de las señales (Schnitzler y Kalko 2001, Schnitzler *et al.* 2003; Whitlow y Simmons 2007); dicho sistema también es conocido como biosonar y es empleado por otros animales como las ballenas y delfines, además de los murciélagos. La ecolocalización no es una característica compartida entre todos los murciélagos, ya que la mayoría de los megaquirópteros no ecolocalizan (Fenton 2013). En cambio los murciélagos del suborden Microchiroptera utilizan una gran variedad de señales que se caracterizan y difieren en ancho de banda, duración, frecuencia, estructura y nivel de presión sonora (NPS). Estas características están relacionadas con sus afinidades filogenéticas, estrategia de forrajeo, dieta, tipo de hábitat, nicho ecológico, historia natural y comportamiento (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003; Jones y Holderied 2007; Whitlow y Simmons 2007; Denzinger y Schnitzler 2013).

Adaptaciones de los murciélagos para la ecolocalización

La ecolocalización es un sistema que se basa en el análisis de los ecos; esto implica que los murciélagos posean adaptaciones tanto para emitir (en la laringe), como para recibir señales (en el sistema auditivo).

Adaptaciones en la laringe: En los murciélagos este órgano es una estructura muy rígida en comparación con la de los seres humanos, ya que los cartílagos aritenoides están fusionados en sus extremos superiores creando una sola estructura. La musculatura lateral del cricoaritenoides puede rotar los cartílagos aritenoides a lo largo de sus ejes hacia la línea media (Fig. 10). Además, los músculos tiroaritenoides están pareados, y se extienden desde el cartílago tiroideo para rodear la parte ventral del cartílago aritenoides, que pulsa las cuerdas vocales (Neuweiler 2000). Estas contracciones musculares actúan juntas para cerrar la glotis y generar más presión.

La intensidad de los pulsos de ecolocalización que emite un murciélago puede alcanzar los 100 dB (Estrada-Villegas *et al.* 2016), y se originan mediante la acumulación de aire bajo la glotis, el cual crea una presión subglótica que incrementa la fuerza de salida del aire al expirar. Se piensa que las presiones subglóticas altas son el resultado de dos especializaciones de la laringe (Neuweiler 2000):

- 1) Los labios membranosos de las cuerdas vocales son rollos gruesos que se aprietan cuando se presionan uno contra otro.
- 2) Las paredes membranosas entre el cartílago tiroideo y el cartílago cricoides son poco gruesas, de modo que durante la acumulación de la presión subglótica, se estiran, almacenando así energía para ser lanzada durante la vocalización.

Adaptaciones en el sistema auditivo: en los quirópteros la audición funciona y está estructurada de una manera muy similar a la de los demás mamíferos; sin embargo, existen modificaciones en la forma y tamaño de la oreja y del trago que están relacionadas con la capacidad de los murciélagos de percibir los ecos de sus presas o de objetos. También destaca la alta sensibilidad del órgano de Corti en el oído interno, que recibe el estímulo de los ecos y manda la señal al cerebro para su posterior interpretación (Neuweiler 2000; Whitlow y Simmons 2007, Schnitzler y Denzinger 2011).

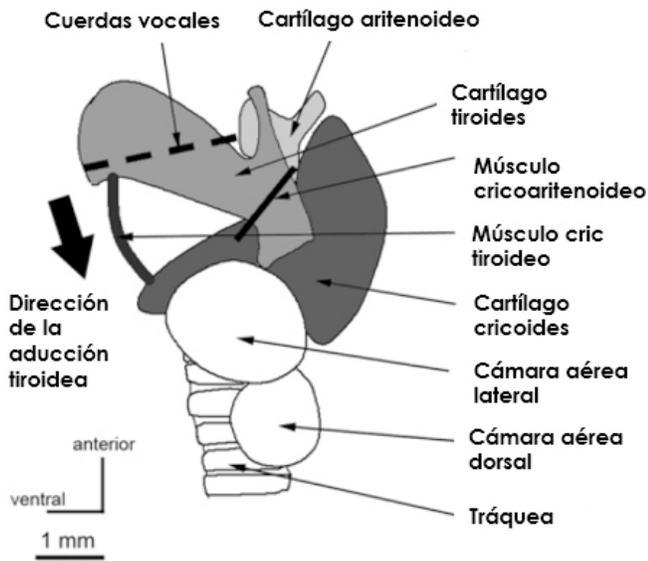


Figura 10.- Imagen lateral de la laringe de un murciélago (Tomada de Metzner y Müller 2016, con permiso de los autores).

dependiendo de las condiciones ambientales y del tipo de sonido emitido (Schnitzler *et al.* 2003; Denzinger *et al.* 2004; Denzinger y Schnitzler 2013).

Las señales están dominadas por un solo elemento acústico llamado frecuencia fundamental, el cual puede estar acompañado de armónicos (Fenton 2013). Los murciélagos ecolocalizan con la laringe y pueden controlar activamente el ancho de banda de la señal a través del uso de los armónicos (Fenton 2013). El ancho de banda es la diferencia entre la frecuencia inicial y la final de un llamado, y permite a los murciélagos distinguir características de los objetivos. Algunos murciélagos amplían el ancho de banda con los armónicos, por ejemplo aquellos que rutinariamente vuelan en lugares con gran presencia de ecos (Denzinger *et al.* 2004; Whitlow y Simmons 2007).

Hay murciélagos que producen llamadas de ecolocalización de corta duración separadas por largos períodos de silencio (bajo ciclo de trabajo), otros producen las llamadas de mayor duración separadas por cortos períodos de silencio (ciclo de trabajo alto) (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003; Fenton 2013; Denzinger y Schnitzler 2013). Russ (1999) menciona que es importante tener en cuenta que el murciélago está produciendo rápidamente una llamada después de otra, así que lo que oímos es un muy rápido "tick-tick-tick" seguido de "tock-tock-tock"; a esto se conoce como la tasa de repetición de pulso, la cual varía entre las especies de murciélagos. Un murciélago alcanza una tasa de repetición máxima cuando

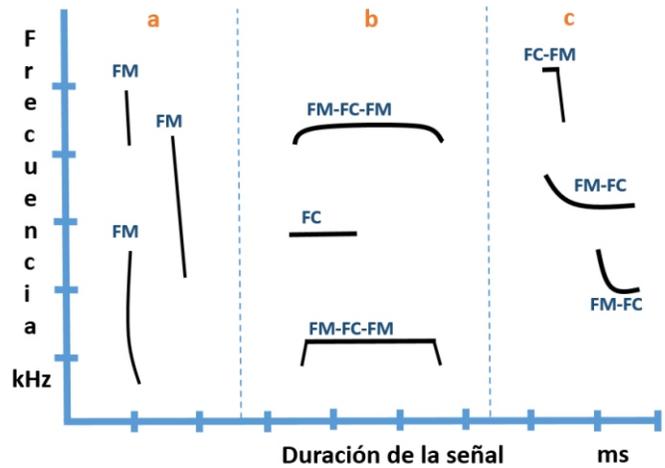


Figura 11.- Formas de los pulsos de ecolocalización de los murciélagos. a) pulsos puramente FM; b) pulsos con predominancia de FC; c) pulsos FC-FM y FM-FC.

se aproxima a atrapar un insecto, en ese momento la frecuencia de repetición del pulso aumenta dramáticamente, lo que en el detector suena como un sonido rápido de "zzzzziipp" que se denomina "buzz de caza" (Russ 1999).

Tipos de pulsos de ecolocalización

Los sonidos de ecolocalización se pueden clasificar en tres tipos (Russ 1999; Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003—Figura 11), y pueden identificarse según sus características visuales en un espectrograma (ver capítulo sobre análisis de señales) como sigue:

Frecuencia Modulada (FM): estos pulsos producen una firma espectral que es útil para la determinación de la forma de un objeto y la discriminación entre tipos de objetos; los murciélagos que utilizan este tipo de llamados viven en ambientes con una densa vegetación. (Neuweiler 2000; Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003). Generalmente los llamados de FM inician en una frecuencia alta y descienden rápidamente en un periodo muy corto. Este tipo de señales es de banda ancha, y codifican información para la detección y clasificación de la vegetación durante la orientación espacial (Schnitzler y Kalko 2001).

Frecuencia constante (FC): son señales utilizadas por murciélagos que forrajean en ambientes con poca o ninguna presencia de obstáculos; en éstas la frecuencia se mantiene invariable, por lo tanto no da información de detalle, pero

permiten detectar las presas y su ubicación (Denzinger y Schnitzler 2013); además, facilitan la detección de los desplazamientos Doppler, por lo que son más adecuadas para la detección en movimiento (Whitlow y Simmons 2007). Los murciélagos de FC operan a frecuencias alrededor de 30 kHz, ya que estas sufren menos atenuación en la atmósfera que las frecuencias más altas y por lo tanto tienen más alcance de detección (Russ 1999; Whitlow y Simmons 2007; Estrada-Villegas *et al.* 2016). La desventaja es que la baja frecuencia corresponde a una gran longitud de onda. Por ejemplo, una onda de 1.13 cm de 30 kHz, solo le permite al murciélago detectar los ecos de insectos mayores de ese tamaño. Las señales de FC normalmente tienen una duración de 10-100 ms (milisegundos) y se utilizan comúnmente como señales de búsqueda (Neuweiler 2000).

Pulsos combinados (FC-FM y FM-FC): son la combinación de FC y FM. Éstas son señales complejas que combinan las capacidades de los llamados de FC y FM. La porción FC permite una buena detección y la parte de FM proporciona información del detalle. Esta señal es ventajosa en densa vegetación, donde es necesario identificar si la presa se mueve o está estacionaria, y si lo que se detecta es o no una presa (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003).

“Buzz” de caza

Un “buzz” de caza es un grupo de pulsos de ecolocalización cortos, de rápida emisión, que son emitidos por los murciélagos antes de hacer contacto físico con su presa (captura del insecto) (Acharya y Fenton 1992). Al detectarla, el murciélago se aproxima a ella, conforme se va acercando disminuye el intervalo de tiempo de la emisión de pulsos con el fin de reducir el tiempo de retorno del eco. De esta manera el murciélago recibe información más detallada de la trayectoria de ésta, para poder seguirla o interceptarla (Acharya y Fenton 1992; Russ 1999).

Los murciélagos que usan señales de FM-FC al localizar una presa pueden convertir gradualmente los pulsos por completo a FM para recibir información detallada sobre ésta (Russ 1999). Al principio, estos barridos (cambios) son de amplio intervalo de frecuencia o ancho de banda, pero a medida en que el murciélago se acerca a la presa, los barridos de FM se hacen más cortos, ya que el murciélago cada vez va obteniendo información más detallada de ésta. Es importante tener en cuenta que los últimos pulsos del Buzz son de menor frecuencia y mayor velocidad con respecto a los pulsos iniciales (Fig. 12), ya que el murciélago está muy cerca de su presa. Después de la emisión del buzz y de la captura de la presa el murciélago consume a los insectos y vuelve a emitir llamadas de búsqueda.

Llamados sociales

Al igual que los sonidos de ecolocalización, los murciélagos producen sonido para la comunicación social, para defender un área de alimentación, pedir ayuda o llamar algún compañero (Russ 1999). Estas llamadas son más complejas en comparación con las llamadas de ecolocalización, a causa de que deben transmitir información y deben de ser capaces de llegar a otro murciélago. Es importante mencionar que aunque todavía escasa, la investigación en esta área ha aumentado mucho en los últimos 15 años, principalmente los análisis de la estructura de la señal y la descripción de la relación entre la emisión de este tipo de señales y el comportamiento del murciélago (Gillam y Fenton 2016).

Funciones de la ecolocalización

Los murciélagos se enfrentan a un gran número de situaciones durante su actividad de forrajeo y desplazamiento, los cuales serán diferentes dependiendo de las características del hábitat y gremio trófico al que

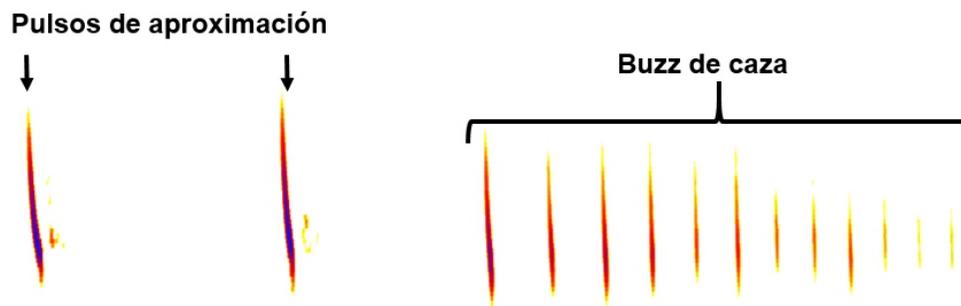


Figura 12.- Representación gráfica de pulsos de aproximación, seguido de un buzz de caza. Se logra apreciar que en la fase de “Buzz de caza”, la frecuencia de los pulsos de ecolocalización disminuye conforme avanza la fase.

pertenezcan (Schnitzler *et al.* 2003; Denzinger *et al.* 2004; Whitlow y Simmons 2007; Denzinger y Schnitzler 2013). Son claros ejemplos de esto la necesidad de evadir obstáculos o de seleccionar rutas con base en puntos de referencia (que deben memorizar) para poder llegar a sus sitios de forrajeo.

Mediante la ecolocalización los murciélagos recolectan información con la cual pueden planificar una trayectoria de vuelo para evitar colisiones durante el desplazamiento o forrajeo. Dependiendo de sus características sensoriales y motoras el murciélago seleccionará la mejor ruta y el mejor lugar para forrajear (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003). Por ejemplo, algunos murciélagos de pequeño tamaño tienen la capacidad de cambiar de dirección rápidamente al perseguir una presa en pleno vuelo, sin embargo otros no poseen estas características, por lo cual es más probable que colisionen contra algún objeto al seguir una presa (Schnitzler *et al.* 2003).

Durante el forrajeo los murciélagos requieren distinguir los objetos de su entorno, localizar sus presas, y discriminar entre ecos de presas y ecos de ramas, follaje o suelo (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003; Denzinger *et al.* 2004; Denzinger y Schnitzler 2013). Algunos murciélagos utilizan el oído pasivo (estrategia que consiste en sólo escuchar los sonidos) para encontrar presas, con base en las llamadas y sonidos que emiten los insectos. Sin embargo sin importar si utilizan un sistema activo (ecolocalización) o un sistema pasivo (oído pasivo) todos los murciélagos que ecolocalizan deben realizar las siguientes tareas básicas de percepción (Schnitzler y Kalko 2001):

Detección: un murciélago debe percibir si ha recibido un eco de su propia señal de ecolocalización o ha oído, visto, olido o sentido algo que indique la presencia de la presa u otros objetivos de interés.

Clasificación: mediante la información del eco o de los sonidos de fondo, los murciélagos clasifican los objetos. El eco permite al murciélago identificar el tamaño, forma, material y textura de éstos, y percibir movimientos de las presas, tales como el batir de las alas (Schnitzler 1987).

Localización: con la ecolocalización los murciélagos logran saber la posición de un objeto en el espacio. El intervalo de tiempo entre la señal emitida y eco de retorno permite saber la distancia entre el murciélago y su presa.

Los murciélagos emiten pulsos constantemente, ya que necesitan seguir recibiendo información actualizada de su entorno. Un pulso de ecolocalización proporciona al

murciélago la misma información que nosotros podemos apreciar con una luz estroboscópica, “flashazos continuos” (Russ 1999). A medida que aumenta la frecuencia del pulso, las imágenes separadas pueden comenzar a formar una imagen continua. El número de pulsos producidos por segundo está relacionado con la especie de murciélago, ya que en cada una de ellas los requerimientos y capacidades son diferentes.

Alcance de la detección de la presa

Los quirópteros utilizan diferentes estrategias para la captura de sus presas, un insecto que se encuentra volando lejos del murciélago en un lugar abierto, requiere de una estrategia diferente de captura que un insecto posado en las hojas de un árbol. Algunos murciélagos también emplean el sentido del olfato y vista para identificar su alimento (Geipel *et al.* 2013), por ejemplo *Macrotus californicus* deja de ecolocalizar si la iluminación es buena (Bell 1985). Para que el murciélago detecte un insecto, la longitud de onda de la llamada producida debe ser igual o menor que el tamaño del insecto. Por ejemplo, si un murciélago está tratando de atrapar un insecto con una longitud de ala de 1 cm (0.01 metros), la longitud de onda emitida debe ser menor de 1 cm, por lo que la frecuencia que emite debe ser de al menos $330/0.01 = 33,000$ Hz o 33 kHz (la frecuencia = velocidad del sonido / longitud de onda) (Russ 1999).

En el eco se codifica la información sobre la distancia a la que se encuentra una presa, gracias al retraso entre la emisión de la señal y la recepción del eco. Asimismo, el murciélago puede calcular la velocidad de la presa por los cambios de frecuencia del eco recibido respecto a la frecuencia del sonido emitido (compensación del efecto Doppler, ver adelante). El eco también contiene información sobre tamaño, textura y ubicación de la presa; además el murciélago puede distinguir que los ecos más intensos provienen de insectos de mayor tamaño y con mayor área alar, y determinar su ubicación gracias a la diferencia en la intensidad del eco al entrar por cada oído (Schnitzler y Kalko 2001).

El alcance de la señal de detección de la presa es un gran desafío para los murciélagos ya que la distancia máxima a la que un murciélago puede hacerlo puede ser muy corta, por lo que tendrán que moverse rápidamente para encontrarla y capturarla. El alcance de la detección depende de la frecuencia de la señal, la humedad, temperatura y el tamaño de la presa u objeto (Kober y Schnitzler 1990; Schnitzler y Kalko 2001; Whitlow y Simmons 2007; Fenton 2013; Denzinger y Schnitzler 2013). Por ejemplo, el murciélago *Eptesicus fuscus* se mueve a aproximadamente 5 m/s y puede cubrir su propio intervalo de detección en uno o

dos segundos; al buscar insectos en espacios abiertos, emiten de 5 a 10 sonidos por segundo, por lo que en poco tiempo el murciélago detecta al objetivo con sonido desde diferentes direcciones y recibe los ecos que transportan información sobre el objetivo en ángulos diferentes (Whitlow y Simmons 2007).

Compensación del efecto Doppler

Un murciélago que vuela a cierta velocidad hacia el objetivo recibe ecos de frecuencias más altas debido al efecto Doppler, de modo que cuando caza, la información sobre posición y movimiento de la presa llega distorsionada (Schnitzler 1987; Schnitzler y Kalko 2001; Denzinger y Schnitzler 2013). Para resolver el problema, mientras vuelan, los murciélagos reducen la frecuencia de los pulsos emitidos, lo que compensa el efecto Doppler de los ecos, que retornan a una frecuencia más alta (Moss y Surlykke 2010).

Señales de ecolocalización y espacio de forrajeo

Las características de los diferentes tipos de señales de ecolocalización están relacionadas con el tipo de hábitat y estrategias de forrajeo del murciélago (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003). Los murciélagos tienen limitaciones ecológicas dadas por las características del terreno o de la vegetación, los cuales causan problemas de percepción y locomoción (Fenton 1990; Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003; Denzinger *et al.* 2004; Denzinger y Schnitzler 2013). A continuación se presentan los diferentes tipos de espacios con los que interactúan los murciélagos y las estrategias de ecolocalización que emplean en cada caso:

Espacios abiertos vs. espacios con múltiples obstáculos (clutter en inglés): mientras más cantidad de obstáculos exista en su hábitat o sitio de forrajeo, los murciélagos tenderán a usar llamados de corta duración con altas frecuencias, amplios anchos de banda y con más armónicos. Los murciélagos que se alimentan principalmente en ambientes saturados (por objetos de fondo o ecos) ponen más énfasis en los componentes de FM de sus llamadas, ya que requieren un mayor detalle de su entorno. Por otra parte, los que se alimentan principalmente en un entorno abierto ponen más énfasis en los componentes FC de sus llamadas, ya que hay poca la influencia de ecos que pueden alterar la estructura de las señales de ecolocalización (Schnitzler y Kalko 2001); sin embargo, deben detectar los ecos débiles de sus presas y encontrarlas en una amplia área, por lo que emiten señales de larga duración (entre 8 y 25 ms) y de alta energía que viajan a distancias mayores que las de FM. Los ecos de las señales de FC no proporcionan al murciélago información detallada de la presa.

Espacios de borde de vegetación o cerca de la superficie del suelo o agua: son áreas en las que los murciélagos forrajean en lugares relativamente abiertos con presencia de pocos objetos. El primer problema que deben resolver en este tipo de hábitat es distinguir los ecos de los insectos de los ecos de fondo (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003); además deben caracterizar los objetos para evitar colisiones al momento de la búsqueda y captura de las presas. Para resolver esto emplean señales de FM con un corto periodo de tiempo entre la emisión de pulsos, lo cual brinda un alto detalle de los objetos que se interponen en la señal de ecolocalización.

Espacios saturados: en éstos los murciélagos recolectan sus presas sobre algún sustrato o superficie (recogedores o *gleaners* en inglés) y vuelan entre las ramas y las plantas. Al igual que los que forrajean en bordes de vegetación, deben distinguir entre los ecos de los insectos y los de los objetos de fondo, solo que estos en mayor grado, ya que forrajean en sitios donde están completamente rodeados por objetos generadores de ecos. También deben tener puntos de referencia para evitar colisiones con los objetos de fondo (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003). Para identificar a sus presas estos murciélagos discriminan los ecos del fondo mediante la modulación, es decir, la combinación de una onda portadora de información, con una onda que permite que el mensaje no se distorsione mientras viaja por el aire. Algunos murciélagos que forrajean en espacios saturados utilizan otros sentidos como puede ser la visión, audición u olfato para ubicar y capturar a sus presas. Otros aprovechan las situaciones favorables de ecolocalización a corto plazo en las que el eco de los insectos se encuentra aislado o sobresale de los ecos de los objetos del fondo (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003; Denzinger y Schnitzler 2013).

Clasificación de murciélagos en gremios tróficos

Los murciélagos con una dieta similar requieren de métodos similares para capturar sus presas. Denzinger *et al.* (2004) y Denzinger y Schnitzler (2013) propusieron una clasificación de murciélagos que incluye como criterios gremio trófico, espacio de forrajeo, y el tipo de alimento que consumen:

Forrajadores aéreos en espacio abierto: estos murciélagos no tienen que lidiar con los ecos de fondo; sin embargo sus presas (insectos voladores) se distribuyen en grandes espacios, por lo que han desarrollado un sistema de ecolocalización de largo alcance, basado en la emisión de pulsos de baja frecuencia con altos NPS (104 a 111 dB);

dicho sistema les permite detectar insectos hasta a 20 m de distancia. El tipo de llamadas que emiten estos quirópteros son de larga duración (8–25 ms) y las señales son de banda angosta. En este gremio se encuentran especies de cuatro familias: Rhinopomatidae, Emballonuridae, Vespertilionidae y Molossidae.

Forrajadores aéreos en espacio de borde: estos murciélagos tienen que determinar su posición, ajustar su trayectoria de vuelo y maniobrar para evitar colisiones, además, tienen que recopilar información para el reconocimiento de biotopos; para ello usan señales de búsqueda mixtas que contienen un componente de banda estrecha (FC) precedido o seguido por un componente de banda ancha (FM). Las señales tienen una duración de aproximadamente 3-10 ms, los niveles de emisión de estos murciélagos son algo más bajos que los de los murciélagos que se alimentan en el espacio abierto, oscilando entre 101 y 107 dB. Al momento en que estos murciélagos detectan los obstáculos como bordes donde se percibe el fondo, la estructura de la señal puede cambiar a una de duración más corta y de mayor ancho de banda (Schnitzler y Kalko 2001; Schnitzler *et al.* 2003; Denzinger *et al.* 2004; Denzinger y Schnitzler 2013). También puede cambiar la proporción señal:aleteo de 1:1 a 1:2, lo que incrementa la probabilidad de localización (Neuweiler 2000). En este gremio se encuentran principalmente especies de las familias Emballonuridae, Mormoopidae, Vespertilionidae y Molossidae.

Forrajadores de arrastre en la superficie del agua: son murciélagos que vuelan sobre la superficie del agua en busca de presas. Algunas especies de este gremio emiten señales que pueden ser similares a las de los murciélagos de espacio abierto (Denzinger y Schnitzler 2013). Las señales de estos murciélagos tienen una duración media de 2-4 ms. *Noctilio leporinus* y *N. albiventris* utilizan una combinación de señales FC puras, y señales mixtas FC-FM con un componente FC, seguido de un componente modulado en frecuencia (FM) (Schnitzler *et al.* 1994; Kalko *et al.* 1998); las frecuencias constantes específicas de la especie son 55 y 70 kHz, respectivamente. Algunos murciélagos de este gremio muestran adaptaciones morfológicas para el forrajeo por arrastre sobre el agua, como las patas traseras y los uropatagios altamente especializados para tomar presas de la superficie. Especies de las familias Vespertilionidae (*Myotis spp.*, *Pizonyx vivesi*), Phyllostomidae (*Macrophyllum macrophyllum*) y Noctilionidae (*Noctilio leporinus*, *N. albiventris*) integran este gremio.

Forrajadores en espacios cerrados: se alimentan de insectos que vuelan cerca de la vegetación. Enfrentan el desafío de detectar el eco específico de su presa a pesar de la presencia de muchos ecos del fondo. En el proceso de encontrar alimento, se confunden las señales emitidas con los ecos de las presas y los ecos de la vegetación o el suelo, por lo que se produce el enmascaramiento de las señales (Schnitzler *et al.* 2003; Denzinger y Schnitzler 2013). La adaptación que permite compensar esta desventaja tiene que ver con la fovea auditiva, los ecos de las señales FC-FM de larga duración se modulan al ritmo de las alas de la presa; de esta manera, los murciélagos pueden discriminar entre los ecos modulados de la presa y los ecos no modulados del fondo (Denzinger *et al.* 2004; Denzinger y Schnitzler 2013). Estos murciélagos se han clasificado también como "de ciclo de trabajo alto", y son capaces de detectar desplazamientos Doppler. Todas las especies de este gremio tienen en común que siempre se mantienen el componente FC. Incluye miembros de las familias Rhinolophidae, Hipposideridae, y una especie de Mormoopidae (*Pteronotus parnellii*).

Forrajadores recogedores pasivos en espacio cerrado: son murciélagos que toman sus presas de la superficie de hojas, troncos o del suelo, en hábitats cerrados y complejos en donde no es posible distinguir entre los ecos de la presa y los del fondo. Sus señales de ecolocalización son de corta duración y de banda ancha, permitiéndoles llegar al sitio donde está la presa. En los sitios donde forrajean, los ecos de los llamados no proporcionan información suficiente para distinguir entre ecos de sus presas y del fondo, por lo que se valen de otros sentidos tales como olfato y visión para capturarlas. Bajo condiciones favorables, la visión también puede desempeñar un papel en la detección (Bell 1985), y la ecolocalización se utiliza solamente para guiar el acercamiento al sitio en donde se encuentra la presa. A menudo el murciélago emite de dos a tres señales al ritmo del aleteo, las cuales permiten la orientación espacial para evadir obstáculos y reconocer biotopos; durante el acercamiento a los sitios de forrajeo el tiempo entre emisión de pulsos se acorta. En este gremio se encuentran murciélagos de las familias Phyllostomidae, Megadermatidae, Nycteridae y Vespertilionidae.

Forrajadores recogedores activos en espacio cerrado: se presenta nuevamente el problema de numerosos ecos de fondo. La única especie insectívora identificada hasta el momento que utiliza esta estrategia es el filostómido *Micronycteris microtis*, que tiene la capacidad de usar la

ecolocación para capturar presas en follajes altamente densos y acceder a recursos a los que otras especies no pueden. Al buscar las presas emiten pulsos multiarmónicos muy cortos (0.2 ms), de banda ancha, alta frecuencia y baja amplitud. (Denzinger *et al.* 2004; Denzinger y Schnitzler 2013). Este murciélago se alimenta de insectos odonatos; al buscar las presas explora una hoja tras otra y tarda un tercio de segundo en decidir si una hoja está vacía o no (Denzinger y Schnitzler 2013), para lo cual discrimina la presencia de un insecto mediante la recepción de trenes de eco. Los trenes de eco de hojas vacías sólo contienen el patrón de los objetos de fondo, sin un eco de insecto entre ellas, mientras que las hojas con presa producen un eco adicional aislado entre los ecos del fondo. Cuando el murciélago ha detectado una hoja con presa, se sitúa cerca del lugar o atrás de la hoja, para posteriormente hacer el vuelo de aproximación.

Forrajeadores activos/pasivos en espacio cerrado: la única familia que tiene especies en este gremio es Phyllostomidae. Estos murciélagos se alimentan de objetos que son parte del fondo (frutas y flores), y sus ecos tienen que ser encontrados entre los ecos de otros objetos de fondo. Existe evidencia de que los murciélagos que comen fruta y néctar utilizan olores para encontrar la fuente de alimento en el modo pasivo, y la ecolocalización para la localización precisa en el modo activo. Este grupo incluye a todos los murciélagos frugívoros y nectarívoros. Sus señales son de corta duración, alta frecuencia, múltiples armónicos, poca energía y banda ancha.

CAPÍTULO 3: MICRÓFONOS PARA LA DETECCIÓN DE LOS PULSOS DE ECOLOCALIZACIÓN

Qué son y cómo funcionan los micrófonos

Un micrófono es un dispositivo que convierte las ondas sonoras en señales eléctricas. Para que esto ocurra la presión sonora se recibe en una membrana (diafragma), y un convertidor mecánico-eléctrico (transductor) la transforma en una señal eléctrica. Cuando las ondas sonoras llegan al diafragma, se activa la bobina dentro de un campo magnético generado por un electroimán, y ese movimiento crea una señal eléctrica (Gómez y Cuenca 2011). El sonido se puede guardar en una cinta magnética o digitalizar para su uso posterior (Kane y Sternheim 2007).

Partes del micrófono

Diafragma: es una membrana muy frágil que recibe las ondas sonoras y está unido a un sistema que transforma estas ondas en electricidad.

Rejilla: es la protección del diafragma.

Bobina o inductor: es un rollo de alambre conductor que cubre una pieza metálica que genera un campo magnético, el

cual pone en movimiento los electrones del cable, generando corriente eléctrica.

Carcasa: es el recipiente donde van los componentes internos del micrófono (caparazón del micrófono).

Conector de salida: es el medio para llevar la señal eléctrica a algún aparato de almacenamiento o reproducción de sonido.

Características de los micrófonos

Directividad: indica desde qué dirección se recoge mejor el sonido. Es importante conocer las propiedades de directividad de un micrófono para maximizar la calidad de la señal percibida (García 2010), éstos pueden ser:

- 1) Unidireccionales o cañones: captan en una sola dirección, recogen los sonidos desde lugares muy puntuales y a largas distancias. Son ideales para captar ruidos de animales en la naturaleza (Fig. 14).
- 2) Bidireccionales: captan el sonido desde dos lados (Fig. 14).
- 3) Omnidireccionales: captan el sonido desde cualquier dirección (Fig. 14).

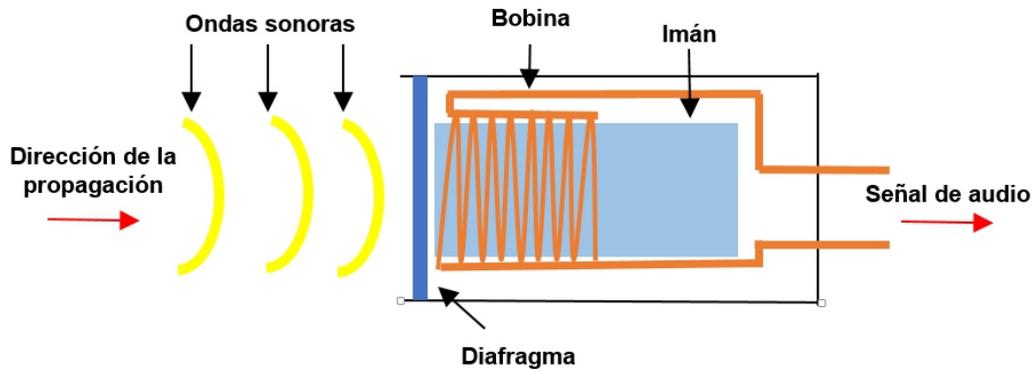


Figura 13.- Componentes internos de un micrófono. Las ondas sonoras golpean el diafragma, el cual activa la bobina, que convierte las vibraciones que recibe el diafragma en corriente eléctrica.

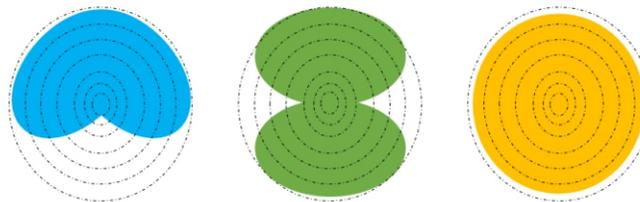


Figura 14.- Directividad de un micrófono. Unidireccional (izquierda), bidireccional (centro) y omnidireccional (derecha).

Sensibilidad: indica la capacidad del micrófono para captar sonidos débiles, de poca intensidad. Los micrófonos de condensador son los más sensibles, seguido de los dinámicos (Gómez y Cuenca 2011).

Impedancia: es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre éste, la impedancia acústica es equivalente a la impedancia eléctrica, es decir una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio (Gómez y Cuenca 2011). Hay que tener en cuenta que la impedancia de salida del micrófono debe de ser como máximo un tercio de la del equipo al que se conecta para evitar pérdida de señal y el incremento de ruidos de fondo (García 2010).

Ruido de fondo: es la tensión o señal que nos entrega el micrófono sin que algún sonido incida en este. Se trata del ruido térmico de la resistencia eléctrica y del ruido electrónico del preamplificador. Estos ruidos se producen por el movimiento de los electrones y los impactos que puede tener la carcasa. El volumen del ruido de fondo que se genera debe de estar como máximo a los 60 dB; pero cuanto más bajo sea, mejor calidad ofrecerá el micrófono. Para que un micrófono sea idóneo, el ruido magnético debe ser menor a los 15 dB y el ruido del campo magnético debe ser menor a los 10 dB (Arellano 2007).

Micrófonos ultrasónicos

Hay muchos tipos diferentes de micrófonos. Sin embargo, para aplicaciones de detección de ecolocalización los más comunes son los de capacitancia, el electret y los piezoeléctricos (Pettersson 2004).

Micrófonos de capacitancia: utilizan una placa metálica trasera, unida a una membrana de plástico metalizada ligeramente desigual, con el fin de que ambos componentes formen las dos placas de un condensador o capacitor (dispositivo similar a una batería que almacena energía eléctrica y la libera rápidamente). Este tipo de micrófonos son usados en los detectores de murciélagos.

Micrófonos de electret: están destinados al uso común del audio humano, pero todavía pueden tener una respuesta utilizable en la gama de frecuencias ultrasónicas. También hay algunos tipos de micrófonos específicamente diseñados para producir mejores respuestas a altas frecuencias. En este tipo de micrófono la sensibilidad de la membrana y el nivel de ruido del preamplificador son los factores más importantes que determinan la capacidad de registrar señales débiles.

Micrófonos piezoeléctricos: son fáciles de usar, robustos, baratos y sensibles. Sin embargo son sensibles sólo en un intervalo de frecuencias muy limitado (banda estrecha). Los micrófonos piezoeléctricos más comunes utilizan una frecuencia central de 40 kHz, pero hay otros tipos disponibles, por ejemplo, de 25 y 32.7 kHz.

Tipos de detectores de ultrasonido

Un detector de murciélagos permite que los sonidos de ecolocalización sean audibles para los seres humanos. Con fines de descripción y análisis, se requiere hacer una conversión de las vibraciones mecánicas de ondas sonoras en una forma que permitan el análisis de su frecuencia, duración e intensidad (Pettersson 2004; Cortés-Calva 2013). En la actualidad existe un gran número de equipos disponibles para la detección de ultrasonidos (Pettersson 2004; Cortés-Calva 2013; Bat Conservation Trust 2016). La investigación de la ecolocalización en los murciélagos se ha abordado principalmente mediante el uso de instrumentos que utilizan cuatro diferentes métodos de detección: los sistemas heterodino, de división de frecuencia, de expansión de tiempo (Pettersson 2004; Cortés-Calva 2013), y más recientemente, la grabación en tiempo real.

Sistema heterodino: es el método más simple; consiste en generar una señal de mayor y otra de menor frecuencia a partir de la señal original que recibe el detector. La señal de mayor frecuencia es el resultado de una suma y la de menor de una resta. Por ejemplo, si un sonido llega a 50 kHz y el detector está sintonizado a 49 kHz, el sonido resultante será $50 + 49 = 99$ kHz (primera señal) y $50 - 49 = 1$ kHz (segunda señal). Podemos escuchar el de 1 kHz, pero el de 99 kHz está en la gama de ultrasonidos por lo que se descarta (Russ 1999). Los detectores que utilizan este sistema registran bandas estrechas, son económicos y con un alto nivel de sensibilidad para detectar los ecos de los murciélagos en tiempo real; sin embargo se pierde parte de la estructura de la llamada, ya que no se preserva la amplitud, duración, frecuencia máxima y mínima, ni los armónicos de la señal original (Pettersson 2004; Parsons y Szewczak 2009; Cortés-Calva 2013; Estrada-Villegas *et al.* 2016; Bat Conservation Trust 2016).

División de frecuencia: este sistema detecta el número de ciclos sobre segundo (Hz) a medida que se recibe el sonido, y sólo registra las ondas cada determinado ciclo. Esto reduce el número de ciclos de la señal original, y por lo tanto reduce su frecuencia. Por ejemplo, un sonido de 30 kHz consiste de 30,000 ciclos por segundo, si se establece un circuito de división de frecuencia para permitir que se registre uno de

cada 10 ciclos, la señal resultante contendrá sólo 3,000 ciclos sobre segundo (3 kHz) y será audible. Estos detectores registran bandas anchas, permiten conservar todas las frecuencias de la señal, pueden utilizarse posteriormente en análisis sonográficos y el tamaño de los archivos de sonido generados es pequeño. Sin embargo durante el proceso de conversión se pierde información de la llamada (amplitud y pulso de mayor energía), y solo se muestra el armónico más fuerte, además a menudo se detectan ruidos de fondo (Russ 1999; Pettersson 2004; Cortés-Calva 2013; Estrada-Villegas *et al.* 2016).

Tiempo expandido: los sistemas de expansión de tiempo hacen uso de la relación inversa entre tiempo y frecuencia. Cada duplicación de la duración de un sonido se traducirá en una reducción a la mitad de su frecuencia. Por ejemplo, un sonido de 40 kHz que dura 10 ms (milisegundos) puede transformarse en una llamada de 20 kHz duplicando su duración a 20 ms. En esta transformación el número de ondas en la llamada original no aumenta, sino que simplemente se extienden a lo largo de un tiempo más largo, aumentando así la distancia entre las ondas, y por lo tanto reduciendo la frecuencia del sonido. Estos detectores registran bandas anchas y la señal resultante contiene la misma información que la señal original, sin embargo el tamaño de los archivos grabados por lo regular es grande. Por lo general estos detectores de expansión de tiempo incluyen un método heterodino y un método de división de frecuencia. (Russ 1999; Parsons y Szewczak 2009; Cortés-Calva 2013; Estrada-Villegas *et al.* 2016).

Grabación en tiempo real o directa: con el aumento de la velocidad de procesamiento de las computadoras modernas y otros dispositivos como las tarjetas de almacenamiento, el ultrasonido puede ser grabado directamente sin transformarlo primero, por lo que las llamadas entrantes se digitalizan en tiempo real y se almacenan en la memoria interna (disco duro, flash compacto, o como archivos de computadora comprimidos o sin comprimir), o bien, la transformación del sonido puede ser realizada y visualizada en tiempo real y continuo. Posteriormente las grabaciones se pueden transferir directamente a una computadora para su análisis. Estos detectores emplean una técnica de banda ancha, y permiten que el sonido no pase por un proceso de conversión, siendo grabado con la máxima resolución posible, por lo que regular mente el tamaño de los archivos será grande; además es un método que requiere mucha energía, y por lo regular la compra adicional de un micrófono (Pettersson 2004; Parsons y Szewczak 2009; Estrada-Villegas *et al.* 2016).

Almacenamiento y guardado de los llamados de ecolocalización

Los detectores de murciélagos tienen que estar conectados a una fuente almacenadora, que puede ser una grabadora, una PC, una tarjeta de memoria, etc. En el mercado actual existe un gran número de dispositivos con gran capacidad y velocidad de almacenamiento que facilitan la digitalización de las llamadas de los murciélagos (Pettersson 2004; Parsons y Szewczak 2009). Estos dispositivos son muy importantes, ya que de ellos depende en gran medida la velocidad de transferencia de datos. En los sonidos digitalizados se registra la fecha, formato y se les asigna un nombre de archivo.

Es importante tener un control de los nombres ya que pueden ser asignados de manera automática por el sistema de grabación o almacenamiento, lo cual puede causar alguna confusión al momento de la revisión o uso de los datos. Para evitar esto se recomienda asignar una etiqueta prediseñada que conlleve a un orden consecutivo, de esta manera las grabaciones seguirán una secuencia y no habrá duplicación de etiquetas. Éstas se pueden asignar manualmente o de manera automática mediante software o por el mismo detector. Para evitar la pérdida o daños en nuestros archivos es necesario hacer una copia de respaldo en otro dispositivo de almacenamiento, al cual se pueda acudir en caso de que algún malware o software afecte las características originales del archivo de audio.

Velocidad de muestreo

La velocidad de muestreo es definida por el detector y el dispositivo de almacenamiento, e indica el número de veces que se muestrea (registra) una señal sonora durante un período de tiempo (Russ 1999). Para que se registre de manera precisa la señal del murciélago, es importante que la velocidad de muestreo del micrófono y equipo de grabación sean lo suficientemente altas, por lo que se recomienda que sean por lo menos el doble de la máxima frecuencia que deba almacenarse (Russ 1999; Parsons y Szewczak 2009). Por ejemplo, las grabadoras profesionales de calidad analógica pueden grabar sonido en frecuencias de hasta aproximadamente 15 kHz; cuando se digitalizan estas grabaciones, se debe utilizar una frecuencia de muestreo mínima de 30 kHz (Parsons y Szewczak 2009). Si la velocidad de muestreo es baja, la onda sonora original no se muestrearán completa, y afectará la calidad del archivo digital (Russ 1999).

Actualmente en muchas tarjetas de sonido de computadoras se pueden establecer a velocidades de muestreo específicas, por ejemplo 11025, 22050, y 44100 Hz; no obstante se debe seleccionar la de mayor velocidad

(Russ 1999). El tamaño de los archivos de audio también depende de la resolución (o profundidad) de la tarjeta de sonido, la cual se mide en bits (que representan el número de muestras que la computadora toma de una onda de sonido) (Russ 1999; Parsons y Szewczak 2009). Parsons y Szewczak (2009) mencionan como regla general, que las vocalizaciones de los murciélagos deben grabarse con una resolución de 12 o 16 bits, que se logran con la mayoría de las tarjetas de sonido de las computadoras y de las tarjetas de sonido especializadas actuales. A mayor resolución, mayor tamaño del archivo.

Formatos de audio

En la unidad de almacenamiento se guarda el archivo digital en algún formato de audio digital. A continuación se describen algunos de los formatos de audio más comunes:

Formato .wav (Waveform Audio File Format): presenta una muy buena calidad, se puede reproducir en una gran cantidad de dispositivos electrónicos de audio y no

conlleva pérdida de información. La desventaja de este formato es que sus archivos requieren de mucho espacio de almacenamiento, pero se pueden utilizar fragmentos muy cortos de audio para minimizar el tamaño del archivo.

Formato MP3 o MPEG-1: poseen una gran capacidad de compresión, pero generan pérdida de datos mediante el filtrado de ciertas partes del sonido original, lo que baja la calidad del archivo digital y limita las posibilidades de análisis.

Formato OGG: Es un formato más reciente que los anteriores, muestra una buena capacidad de compresión y buena calidad de reproducción, sin embargo hay pocos aparatos capaces de reproducir este formato. Es importante tener en cuenta que algunos softwares solo funcionan con cierto tipo de formato de archivos, por lo que hay que cuidar que el equipo produzca archivos analizables por el software a utilizar.

CAPITULO 4: ANÁLISIS DE SEÑALES DE ECOLOCALIZACIÓN

Con los llamados de ecolocalización guardados digitalmente en un dispositivo de almacenamiento se procede a su análisis. Para esto las llamadas se leen en un software especializado (ver adelante). La información grabada contenida en el sonido que emiten los murciélagos se puede graficar y analizar en dos dominios: el de tiempo, es decir, los cambios que sufre una señal en el tiempo, y el de frecuencia, o sea el espectro de frecuencias que puede tener una señal, también conocidas como información temporal y espectral, respectivamente (Parsons *et al.* 2000; Parsons y Szewczak 2009).

Análisis de Fourier

El análisis de Fourier es una herramienta matemática que parte del hecho de que las ondas complejas no son más que la combinación de ondas sinusoidales simples. Esta herramienta permite analizar señales periódicas complejas mediante su descomposición en ondas más simples (sinusoidales). Estas ondas se representan en el dominio del tiempo (oscilograma) y de la frecuencia (espectrograma). La señal se analiza por partes, para esto se van tomando porciones de la señal original (bloques) mediante el uso de “ventanas”, que determinan las ondas a analizar en un intervalo de frecuencia (banda).

Las ventanas son funciones matemáticas usadas para evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados. Existe un gran número de ventanas, cada una con sus propias características, por lo que seleccionar una función de ventana no es tan simple; para elegir alguna se debe calcular el contenido de frecuencias de la señal original (National Instruments 2017). Russ (1999) menciona que hay muchas funciones de ventanas diferentes para el análisis de las llamadas de ecolocalización: Hanning, Hamming, Blackman y Bartlett, y sus resultados difieren ligeramente; no obstante, la ventana Hamming es una de las más usadas. Es importante tener en cuenta que debido a que una ventana puede dejar fuera partes de una señal muy compleja, hay que traslaparla con la siguiente en un cierto porcentaje (del 50 al 95%) para evitar la pérdida de información.

Visualización y análisis de las señales de ecolocalización

Las señales acústicas se visualizan y analizan mediante software que permite representarlas gráficamente, ya sea como sonogramas (espectrogramas), oscilogramas, o espectros de poder (Russ 1999; Hernández 2010).

Oscilograma: representa las variaciones en amplitud (eje vertical) a lo largo del tiempo (eje horizontal). De esta forma se obtiene una imagen gráfica de la forma de la onda (Fig.15) (Hernández 2010).

Espectrograma: también llamado sonograma, es la representación gráfica del espectro de frecuencias de la emisión sonora en el tiempo. El espectrograma puede revelar rasgos como altas frecuencias o modulaciones de amplitud que no pueden apreciarse incluso aunque estén dentro de los límites de percepción del oído humano. Normalmente, un espectrograma representa el tiempo sobre el eje horizontal, la frecuencia sobre el eje vertical (Fig. 16) y la amplitud de las señales mediante una escala de colores o de grises (Russ 1999; Hernández 2010).

Espectro de poder vs. frecuencia: otra representación que pueden tener las señales de ecolocalización es la que sitúa la frecuencia en el eje horizontal y la amplitud en el eje vertical. Permite visualizar la energía (intensidad) de los pulsos con respecto a la frecuencia (Fig. 17) (Russ 1999; Hernández 2010).

Parámetros a analizar en las señales de ecolocalización

Algunos de los parámetros más comunes para la caracterización y análisis de los llamados de ecolocalización (Parsons y Jones 2000; Gannon *et al.* 2004; Parsons y Szewczak 2009; Knörnschild *et al.* 2012; Jung *et al.* 2014; Estrada-Villegas *et al.* 2016) se describen a continuación:

Tipo del pulso: se identifica si se trata de un pulso de Frecuencia modulada (FM), frecuencia constante FC o FC-FM.

Duración: es lo que dura el pulso en milisegundos (ms). Se mide en el espectrograma, desde donde inicia el pulso hasta donde termina (Fig. 18).

Ancho de banda: es la diferencia entre la frecuencia inicial y final de un pulso.

Intensidad: indica la energía con la que es emitido un pulso. Se mide en dB con el espectrograma, mediante una escala de colores (Fig. 18), o de manera puntual, a una frecuencia dada, con el espectro de poder.

Tiempo entre pulsos: es el lapso que hay del inicio de un pulso al inicio del próximo, en milisegundos (ms), se mide en el espectrograma (Fig. 18).

Frecuencia inicial: es el número de Hz al inicio del pulso, se mide en el espectrograma (Fig. 18).

Frecuencia final: es el número de Hz al final del pulso, se mide en el espectrograma (Fig. 18).

Frecuencia máxima del pulso: Es la máxima frecuencia que alcanza un pulso, se visualiza con el espectro de poder y en el espectrograma (Fig. 18).

Frecuencia mínima del pulso: Es la mínima frecuencia que alcanza un pulso, se visualiza con el espectro de poder y en el espectrograma (Fig. 18).

Armónicos: Lisón (2011) menciona que los armónicos pueden ser un buen parámetro para identificar algunas especies de murciélagos, mediante la comparación de los pulsos y el uso de fonotecas (ver adelante); sin embargo se debe tener cuidado de no analizarlos como si se tratase de pulsos de ecolocalización. Para comprobar si un pulso es armónico de otro, debemos observar en el espectro de la frecuencia de máxima energía (espectro de poder); si el pulso es un armónico, este será múltiplo de la frecuencia fundamental.

Además de estas características básicas, el software más moderno para el análisis de llamados permite la medición automática de muchas otras características. La decisión sobre cuántas y cuales utilizar deberá ser tomada en función de la pregunta de investigación que se pretende contestar, la calidad de los llamados y el tipo de muestreo que se haya hecho (heterodino, división por diez, etc.).

Software para la visualización y análisis de los llamados de ecolocalización.

Actualmente existe una gran variedad de software para analizar, clasificar, grabar y procesar señales de ecolocalización, su utilidad dependerá de los objetivos del usuario y del sistema de captura de señales que utilice; algunos de ellos están diseñados para trabajar con hardware específico (detectores, micrófonos, tarjetas, etc.), por lo que es necesario que el usuario tenga claros sus objetivos de trabajo para poder escoger la combinación más adecuada y económica. A continuación se mencionan algunos softwares empleados en la investigación con los pulsos de ecolocalización, de los cuales hay una buena cantidad de tutoriales en <https://www.youtube.com/>.

Avisoft RECORDER: es un software de grabación que permite visualizar la señal en un espectrograma y oscilograma en tiempo real; proporciona un buen control de la grabación de los pulsos, ya que el operador del equipo

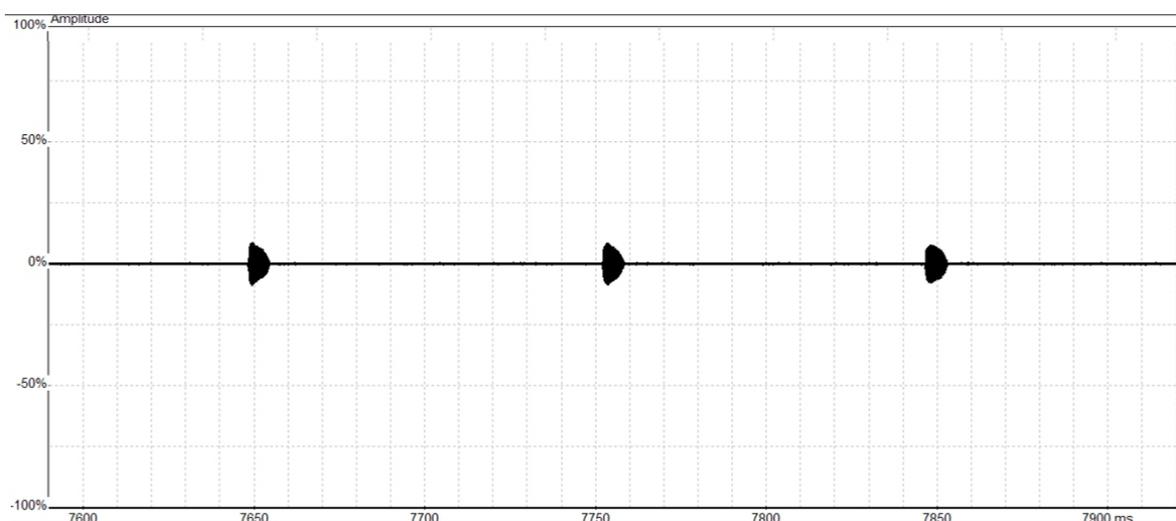


Figura 15.- Algunos pulsos de ecolocalización de un murciélago en un oscilograma en el software BatSound versión 4.2. En el eje X se aprecia el tiempo, y en el eje Y la amplitud.

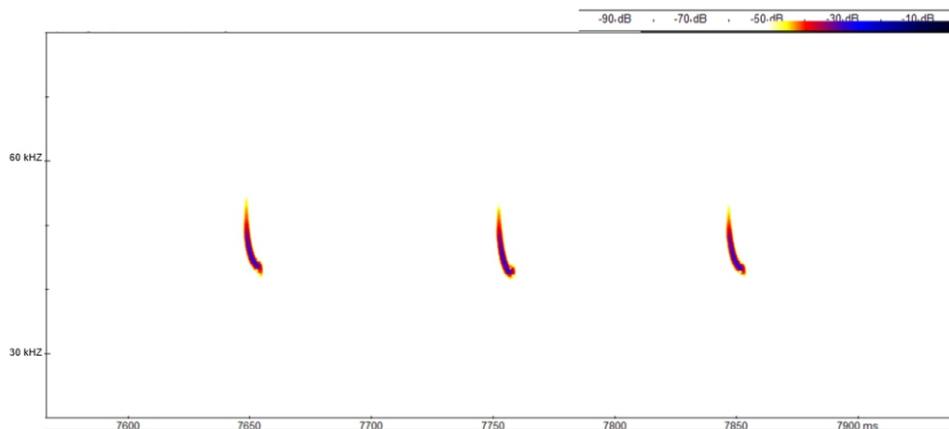


Figura 16.- Algunos pulsos de ecolocalización de un murciélago en un espectrograma en el software BatSound versión 4.2. El eje X representa tiempo y el eje Y la frecuencia. En colores la intensidad de la señal medida en dB.

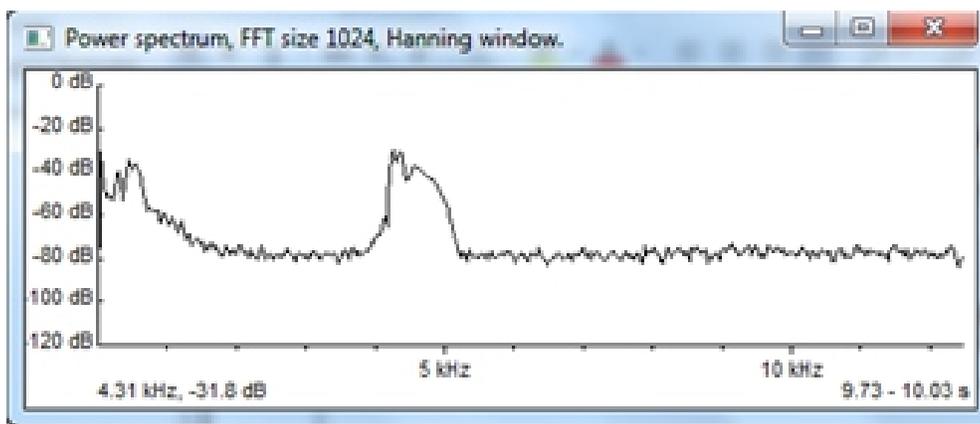


Figura 17.- Espectro de poder de un pulso de ecolocalización de un murciélago en el software BatSound versión 4.2.

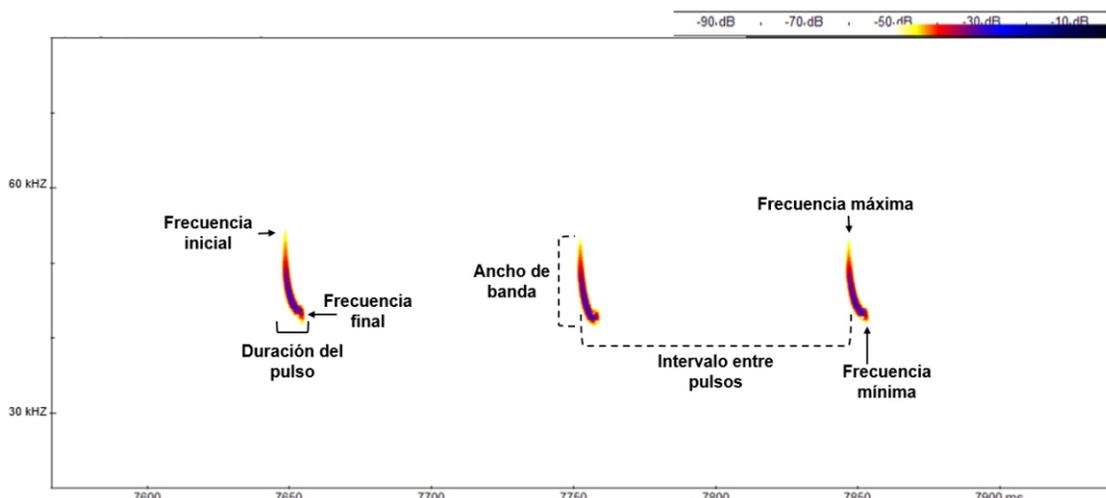


Figura 18.- Parámetros básicos a medir al momento de hacer el análisis de los llamados de ecolocalización en el software BatSound versión 4.2.

selecciona cuando iniciar y parar la grabación; además permite controlar el ruido de fondo mediante filtros electrónicos; y ayuda a identificar fácilmente las grabaciones con la personalización del nombre de las grabaciones. Es compatible con sistemas operativos Microsoft Windows 10, 8.1, 8, 7 o Vista, además de Apple Macintosh basado en Intel. Para poder usar el software hay que conectar un detector a algún dispositivo portátil (laptop o tableta electrónica) compatible con el software (Avisoft Bioacoustics 2017); sin embargo el programa puede ser usado solo si se cuenta con un detector de Avisoft Bioacoustics ya que el detector es una llave electrónica que permite correr el programa (Avisoft Bioacoustics 2017). Por otra parte, la necesidad de tener el detector conectado a un dispositivo portátil hace impráctico su manejo al momento de grabar a los murciélagos activamente (grabación con intervención humana). Para grabación pasiva (grabación sin intervención humana) puede ser más útil si el equipo está protegido contra los elementos.

BatSound: es un software diseñado específicamente para los llamados de los murciélagos, por la empresa Pettersson Elektronik, AB. Permite analizar llamados mediante la visualización en un espectrograma, oscilograma y espectro de poder, lo cual permite examinar detalladamente la forma y tipo de los pulsos, frecuencia máxima y mínima, frecuencia inicial y final, duración, intensidad e intervalo de los pulsos; además se pueden abrir múltiples ventanas con diferentes archivos de sonido al mismo tiempo, y con su amplio intervalo de zoom facilita la comparación y medición de señales. Permite asimismo filtrar ruido de fondo y otras frecuencias. Es compatible con archivos de formato .wav, .mp3 y .wma, si los codecs (codificadores “detector” y decodificadores “dispositivo de almacenamiento”) fueron los adecuados durante la grabación. Las versiones 4.1 y 4.2 son compatibles con sistema operativo Windows XP, Vista, 7, 8 y 10, Linux y OS X (Barlow 2011; Pettersson Elektronik 2017). Es fácil de usar y muchos investigadores hacen uso de éste.

Kaleidoscope Pro: es un software diseñado para ahorrar tiempo durante el proceso de clasificación, análisis y organización de datos obtenidos de los pulsos de ecolocalización. Posee un espectrograma capaz de personalizarse para mayor comodidad y entendimiento. Al igual que el BatSound permite medir parámetros de los pulsos; además Kaleidoscope Pro clasifica las grabaciones con base en metadatos que el usuario introduce. También posee algoritmos de autoidentificación “Auto ID”, que usa una base de datos que posee el software. Sin embargo

este sistema automático solo sirve con las grabaciones en vuelo libre en entornos de poco ruido, y su confiabilidad no es mayor al 80%. Este software es útil con grabaciones de espectro completo (grabación que contiene todas las frecuencias en un archivo de audio digital, sin separar los agudos de los graves) y con grabaciones hechas en tiempo expandido. También permite cargar en un documento Microsoft Office Excel la clasificación e identificación de los murciélagos con base en las características de los pulsos. El software posee un convertidor de archivos de .wav a .wac que reduce el tamaño del mismo, así como su calidad; no obstante permite eliminar ruidos de fondo como lluvia o el sonido de algunos animales (Wildlife Acoustics 2017). Kaleidoscope Pro brinda una licencia gratuita de 15 días al llenar un sencillo cuestionario.

SonoBat: es un software que permite clasificar e identificar especies de murciélagos con base en una biblioteca de referencia que contiene el software; el cual reconoce y rechaza automáticamente las grabaciones que no son viables para ser clasificadas. Es compatible con archivos “.wav”, y con cualquier detector de espectro completo (tiempo real, tiempo expandido). Además, al igual que Avisoft RECORDER, BatSound y Kaleidoscope Pro, permite visualizar y medir algunos parámetros de los pulsos en un espectrograma y oscilograma. También posee una serie de herramientas que permiten quitar el ruido de fondo de las grabaciones (filtrar), extraer y empalmar pulsos representativos de una secuencia de ecolocalización. Sin embargo el sistema de identificación es regional (regiones de Estados Unidos de América), por lo que no puede ser muy útil para identificación de especies en México (Bat Conservation and Management 2017a).

SonoChiro: procesa automáticamente las grabaciones de las señales de los murciélagos. Puede grabar identificar llamados a nivel de género y especie, además da una idea sobre el comportamiento mediante la actividad social (mediante llamadas sociales) y periodo de caza (mediante buzz de caza). Al identificar asigna un con un índice de confianza de 0 a 10 (donde el 0 indica el mínimo y el 10 el máximo grado de confiabilidad), este índice puede ser establecido manualmente por el usuario según le convenga. Al subir las grabaciones al software, como resultado final arroja una lista de los murciélagos identificados con un intervalo de confianza para cada identificación (Biotope 2000). A pesar de que la fonoteca de referencia posee una amplia cobertura de territorio a nivel mundial, para México solo se consideran llamados de murciélagos de Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán (Cantori y Haquart 2017).

Analook: permite identificar, clasificar, organizar y visualizar señales de ecolocalización. Es compatible mayoritariamente con detectores AnaBat de TITLEY SCIENTIFIC y corre en la mayoría de los sistemas operativos Windows. Incluye herramientas para visualizar, analizar y medir los pulsos de los murciélagos. Permite convertir cualquier grabación de espectro completo a formato zero-crossing (.ZC, que es el que lee el software), sin embargo se pierden los armónicos y las frecuencias más altas. Analook también permite extraer los parámetros y clasificar las señales, e identificar especies mediante la comparación de los parámetros de los pulsos. Sin embargo el software no es fácil de usar (Bat Conservation and Management 2017b)

Consideraciones al momento del análisis.

Al momento de la toma de datos y el análisis de las llamadas de ecolocalización se deben considerar algunos aspectos que pueden mejorar la eficiencia y calidad en los datos y análisis de éstos. La revisión y preparación del equipo antes de grabar a los murciélagos es un punto clave para una buena calidad de las grabaciones, además de que permite eliminar contratiempos al momento de grabar.

Las llamadas de ecolocalización deben de ser filtradas. Esto permite eliminar el ruido de fondo o sonidos de otros organismos, con lo cual la señal de interés quedará lo más pura posible. Este ruido se puede eliminar digitalmente utilizando filtros de diferentes frecuencias (Parsons y Szewczak 2009; Barlow 2011; Lisón 2011).

Barlow (2011) recomienda que el primer paso para el proceso de filtrado sea visualizar en el espectrograma la llamada de interés y los ruidos que se desea eliminar, para que de esta manera se pueda determinar correctamente qué frecuencias se deben filtrar. Al terminar el proceso del filtrado se recomienda visualizar de nuevo el espectrograma para asegurar que se obtuvieron los resultados deseados.

Para la etapa inicial del análisis de las grabaciones Lisón (2011) sugiere seleccionar secuencias de pulsos (de 6 a 8) con la menor cantidad de ruidos de fondo posible (pulsos de buena calidad). También aclara que cuando dos o más murciélagos de la misma especie están volando simultáneamente, como consecuencia de diferenciar sus ecos, los llamados pueden variar un poco con respecto su patrón típico, lo cual puede causar un poco de confusión al momento de visualizar y analizar los pulsos. Para esta misma etapa Barlow (2011) propone descartar aquellos archivos en los cuales el audio está sobrecargado de ruidos de fondo, o la intensidad de las llamadas es demasiado baja, ya que pueden estar distorsionadas.

Si los archivos resultan ser demasiado largos o pesados al momento de introducirlos a un software para analizar, medir, comparar, etc., Barlow (2011) recomienda dividir el archivo para que no se sature el programa, o utilizar detectores con la capacidad de generar archivos cada determinado intervalo de tiempo, ya sea manualmente (mediante un botón), o programado (mediante un software), creando así múltiples archivos pequeños.

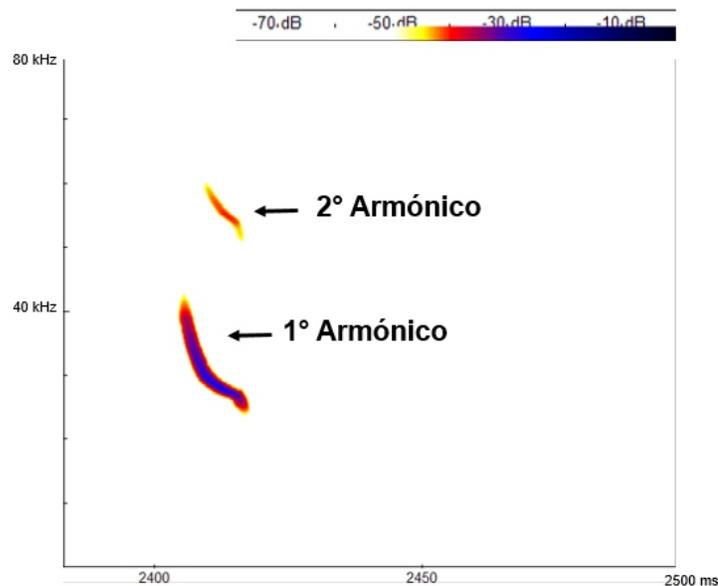


Figura 19.- Visualización de un pulso con un armónico en el espectrograma del software BatSound versión 4.2. El primer armónico es la frecuencia fundamental.

CAPÍTULO 5:

UTILIDAD DE LAS SEÑALES DE ECOLOCALIZACIÓN DE LOS MURCIÉLAGOS

“En los últimos años el avance científico y tecnológico ha permitido ampliar y potenciar el conocimiento sobre la ecolocalización gracias a la amplia disponibilidad y variedad de equipos de detección, grabación y análisis acústicos. Actualmente un gran número de documentos han sido publicados sobre los temas relacionados con la ecolocalización, que van desde la emisión de señales hasta la variación de dichas señales en distintos hábitats o condiciones, esto demuestra cómo los investigadores, las tecnologías y la información pueden dar lugar a la diversificación de un campo de investigación” (Fenton 2013).

Los estudios de acústica con murciélagos son menos invasivos que las técnicas tradicionales, y tienen numerosas ventajas frente a otras metodologías, ya que resultan poco costosos, más eficientes, permiten abarcar más terreno, e identifican parte de la diversidad de murciélagos de una zona en estudios ecológicos y de inventario (Pettersson 2004; Biscardi *et al.* 2004; Fenton 2013; Cortés-Calva 2013). Sin embargo Lisón (2011) menciona que los estudios acústicos también tienen desventajas, como la baja detectabilidad de algunas especies y la imposibilidad de distinguir con fiabilidad al 100% de ellas.

Con las llamadas de ecolocalización se pueden crear fonotecas, que son bases de datos de archivos digitales de audio que sirven como referencia para identificar especies, géneros o familias de quirópteros (Biscardi *et al.* 2004),

sin embargo aún existen muy pocas fonotecas. Para crear una buena fonoteca con grabaciones y datos de calidad es necesario el trabajo colectivo de grupos e instituciones (Biscardi *et al.* 2004; Rivera-Parra y Burneo 2013), así como el establecimiento de protocolos y metodologías estandarizadas (Biscardi *et al.* 2004). Las fonotecas de referencia de calidad permiten replicar metodologías y generar información confiable (Rivera-Parra y Burneo 2013).

Para México, la CONABIO en colaboración con la Asociación Mexicana de Mastozoología A. C., están en el proceso de creación de una fonoteca de sonidos de ecolocalización de murciélagos insectívoros de México. Este proyecto tiene por objetivo la generación de protocolos de captura y procesamiento de llamados, los cuales eventualmente serán incluidos en una plataforma electrónica accesible, en su primera versión, a investigadores. A largo plazo se pretende que pueda servir como herramienta de identificación para el público en general.

Además de este esfuerzo, existen otros a cargo de otros grupos de investigación, que en los próximos años incrementarán el acervo de señales analizables y por lo tanto el potencial para comprender uno de los aspectos más fascinantes de la biología de los mamíferos.

Tabla 1: Algunas fonotecas de murciélagos en el mundo

Dirección electrónica	Administración	Acceso
http://www.bats.org.uk/	Bat Conservation Trust	No libre
http://www.avisoft.com/	Avisoft Acoustics	Libre
http://www.wildlife-sound.org/	Wildlife Sound Recording Society	Libre
http://www.bristol.ac.uk/	University of Bristol	Libre
http://zoologia.puce.edu.ec/	Pontificia Universidad Católica de Ecuador	Libre

LITERATURA CITADA

- Acharya, L., y M. B. Fenton. 1992. Echolocation behaviour of vespertilionid bats (*Lasiurus cinereus* and *Lasiurus borealis*) attacking airborne targets including arctiid moths. *Canadian Journal of Zoology* 70:1292-1298.
- Aguilar, J., y F. Senent. 1986. Acústica. Pp. 186-192 en *Cuestiones de Física* (J. Aguilar y F. Senent, eds.). Reverté, Barcelona, España.
- Arellano, E. A. 2007. Micrófonos. Tesina, Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán. Ciudad de México, México.
- Avisoft Bioacoustics. 2017. Sound recording software Avisoft-RECORDER. www.avisoft.com/recorder.htm. Consultado el 23 de Julio del 2017.
- Barlow, K. A. 2011. How to use BatScan software for basic sound analysis. www.bats.org.uk/publications_download.php/1085/How_to_use_BatSound_software_for_sound_analysis.pdf. Consultado el 26 de Octubre de 2016.
- Bat Conservation Trust. 2016. Bat detectors. www.bats.org.uk/pages/bat_detectors.html. Consultado el 13 de Noviembre del 2016.
- Bat Conservation and Management. 2017a. Why use SonoBat?. www.batmanagement.com/Ordering/acoustic/sonobat.html. Consultado el 23 de Julio del 2017.
- Bat Conservation and Management. 2017b. Ten-minute acoustic monitoring school. www.batmanagement.com/Ordering/acoustic/acoustichelp.html. Consultado el 15 de Julio del 2017.
- Bell, G. P. 1985. The sensory basis of prey location by the California leaf-nosed bat *Macrotus californicus* (Chiroptera: Phyllostomidae). *Behavioral Ecology and Sociobiology* 16:343-347.
- Biotope. 2000. SonoChiro: identify bats. www.biotope.fr/fr/accueil-innovation/sonochiro. Consultado el 23 de Julio 2017.
- Biscardi, S., J. Orprecio, M. B. Fenton, A. Tsoar, y J. M. Ratcliffe. 2004. Data, sample sizes and statistics affect the recognition of species of bats by their echolocation calls. *Acta Chiropterologica* 6:347-363.
- Bradbury J. W., y S. L. Vehrencamp. 1998. *Principles of animal communication*. Sinauer, Sunderland, Massachusetts, Estados Unidos
- Burbano, S. E., E. G. Burbano, y C. M. Gracia. 2003. Ondas. Pp. 363-395 en *Física General* (S. Burbano, E. Burbano, y C. Gracia, eds.), trigésima segunda edición. Tébar, Madrid, España.
- Cantori, F. y A. Haquart. 2017. SonoChiro 4.0. User guide. Disponible en sonochiro.biotope.fr/doc/SonoChiro_Manual_EN.pdf.
- Cortés-Calva, P. 2013. Ecolocalización (una visión a los quirópteros). *Therya* 4: 9 - 14.
- Denzinger A., E. K. V. Kalko, y G. Jones. 2004. Ecological and evolutionary aspects of echolocation in bats. Pp. 311-326 en *Echolocation in bats and dolphins* (J. A. Thomas, C. F. Moss, y M. Vater, eds.). The University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- Denzinger, A., y Schnitzler H.-U. 2013. Bat guilds, a concept to classify the highly diverse foraging and echolocation behaviors of microchiropteran bats. *Frontiers in Physiology* 4:1- 15.
- Estrada-Villegas, S., R. M. Rodríguez, y K. Barboza. 2016. Ecolocalización en murciélagos: fundamentos, uso y equipos. Red Latinoamericana para la Conservación de los Murciélagos. www.relcomlatinoamerica.net/index.php/bioacustica. Consultado el 23 de Agosto del 2016.
- Fenton, M. B. 1990. The foraging behaviour and ecology of animal-eating bats. *Canadian Journal of Zoology* 68:411-422.
- Fenton, M. B. 2013. Questions, ideas and tools: Lessons from bat echolocation. *Animal Behaviour* 85:869-879.
- Gannon, W. L., M. J. O'Farell, C. Corben, y E. J. Bedrick. 2004. Call character lexicon and analysis of field recorded bat echolocation calls. Pp. 478-484 en *Echolocation in bats and dolphins* (J. A. Thomas, C. F. Moss, y M. Vater, eds.). The University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- García, S. G. 2010. Manual para radialistas analfatécnicos. UNESCO, La Paz, Bolivia.
- Geipel, I., K. Jung, y E. K. V. Kalko. 2013. Perception of silent and motionless prey on vegetation by echolocation in the gleaning bat *Micronycteris microtis*. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 280:1-7.
- Gómez, E. J., e I. D. Cuenca. 2011. Manual técnico de sonido. Séptima edición. Paraninfo, Madrid, España.
- Griffin, D. R. 1944. Echolocation by blind men, bats and radar. *Science* 100: 589 - 590.
- Griffin, D. R. 1958. *Listening in the dark: the acoustic orientation of bats and men*. Yale University Press, New Haven, Connecticut.
- Gillam, E., y M. B. Fenton. 2016. Roles of acoustic social communication in the lives of bats. Pp. 117-140 en *Bat bioacoustics* (M. B. Fenton, A. D. Grinnell, A. N. Popper, y R. R. Fay, eds.). Springer, New York, Estados

- Grinnell, A. D. 1995. Hearing in Bats: An Overview. Pp. 1-36 en Hearing by Bats (A. N. Popper, y R. R. Fay, eds.). Springer, New York, Estados Unidos.
- Hernández, J. M. Estructura y características de la señal acústica. 2010. Estudio y caracterización. jmhweb.wordpress.com/docencia/master-en-biologia-de-la-conservacion-ucm/estructura-y-caracteristicas-de-la-senal-acustica-estudio-y-caracterizacion/. Consultado el 22 de Octubre del 2016.
- Hewitt, P. G. 2007. Física conceptual, décima edición. Pearson Educación, Ciudad de México, México.
- Jones, G., y M. W. Holderied. 2007. Bat echolocation calls: adaptation and convergent evolution. Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences 274:905-912.
- Jung, K., J. Molinari, y E. K. V. Kalko. 2014. Driving factors for the evolution of species-specific echolocation call design in New World free-tailed bats (Molossidae). PlosOne 9:1-9.
- Kalko, E. K. V., H.-U. Schnitzler, I. Kaipf, y A. D. Grinnell. 1998. Echolocation and foraging behavior of the lesser bulldog bat, *Noctilio albiventris*: preadaptations for piscivory?. Behavioral Ecology and Sociobiology 42:305-319.
- Kane, J. W., y M. M. Sternheim. 2007. Física, segunda edición. Reverté, Barcelona, España.
- Knörnschild, M., K. Jung, M. Nagy, M. Metz, y E. K. V. Kalko. 2012. Bat echolocation calls facilitate social communication. Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences 279:4827-4835.
- Kober, R., y H.-U. Schnitzler. 1990. Information in sonar echoes of fluttering insects available for echolocating bats. Journal of the Acoustical Society of America 87:882-896.
- Kunz T. H., E. Braun de Torrez, D. Bauer, T. Lobo, y T. H. Fleming. 2011. Ecosystem services provided by bats. Annals of the New York Academy of Sciences 1223:1-38.
- Lisón, F. 2011. Clave de identificación para llamadas de ecolocalización de los murciélagos de la Península Ibérica. www.researchgate.net/publication/230704525_Clave_de_identificacion_para_las_llamadas_de_ecolocacion_de_los_murcielagos_de_la_Peninsula_Iberica. Consultado el 18 de Marzo del 2017.
- Medellín, R. A., y O. Gaona. 1999. Seed dispersal by bats and birds in forest and disturbed habitats of Chiapas. Biotropica 31:478-485.
- Metzner, W., y R. Müller. 2016. Ultrasound production, emission, and reception. Pp. 55-91 en Bat bioacoustics (M. B. Fenton, A. D. Grinnell, A. N. Popper, y R. R. Fay, eds.). Springer, New York, Estados Unidos.
- Millán, J. M. E. 2012. Instalaciones de megafonía y sonorización. Paraninfo, Madrid, España.
- Moss, C. F., y A. Surlykke. 2010. Probing the natural scene by echolocation in bats. Frontiers in Behavioral Neuroscience 4:1-16.
- National Instruments. 2017. Comprender FFTs y funciones ventana. www.ni.com/whitepaper/4844/es/. Consultado el 05 de Junio del 2017.
- Neuweiler, G. 2000. The biology of bats. Oxford University Press, New York, Estados Unidos.
- Parsons, S., A. M. Boonman, y M. K. Obrist. 2000. Advantages and disadvantages of techniques for transforming and analyzing chiropteran echolocation calls. Journal of Mammalogy 81:927-938.
- Parsons, S., y G. Jones. 2000. Acoustic identification of twelve species of echolocating bats by discriminant function analysis and artificial neural networks. Experimental Biology 203:2641-2656.
- Parsons, S., y J. M. Szewczak. 2009. Detecting, recording, and analyzing the vocalizations of bats. Pp. 91-111 en Ecological and behavioral methods for the study of bats (T. H. Kunz, y S. F. Parsons, eds.), segunda edición. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, Estados Unidos.
- Pettersson, L. 2004. The Properties of sound and bat detectors. Pp. 9-12 en Bat Echolocation Research: tools, techniques and analysis (R. M. Brigham, E. K. V. Kalko, G. Jones., S. Parsons, y H. J. G. A. Limpens, eds.). Bat Conservation International, Austin, Texas, Estados Unidos
- Pettersson Elektronik. 2017. BatSound. www.batsound.com/?p=15. Consultado el 23 de Julio de 2017.
- Poó, J. A. M. 2006. Sonido, conceptos básicos y componentes electrónicos. www.mailxmail.com/curso-sonido-conceptos-basicos-componentes-electronicos/reflexionrefraccion-difraccion-sonido. Consultado el 17 de Octubre del 2016.

- Rivera-Parra, P., y S. F. Burneo. 2013. Primera biblioteca de llamadas de ecolocalización de murciélagos del Ecuador. *Therya* 4:79-88.
- Russ, J. 1999. The bats of Britain and Ireland: Echolocation calls, sound analysis, and species Identification. Alana Books, Belfast, Reino Unido.
- Schnitzler, H.-U. 1987. Echoes of fluttering insects: information for echolocating bats. Pp. 226– 243 en *Advances in the study of bats* (M. B. Fenton, P. Racey, y J. M. V. Rayner, eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Schnitzler, H.-U., y A. Denzinger. 2011. Auditory fovea and Doppler shift compensation: adaptations for flutter detection in echolocating bats using CF-FM signals. *Comparative Physiology* 197:541-559.
- Schnitzler, H.-U., y E. K. V. Kalko. 2001. Echolocation by insect-eating bats. *BioScience* 51: 557-569.
- Schnitzler H.-U., E. K. V. Kalko, I. Kaipf, y A. D. Grinnell. 1994. Fishing and echolocation behavior of the greater bulldog bat, *Noctilio leporinus* in the field. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 35:327-345.
- Schnitzler H.-U., C. F. Moss, y A. Denzinger. 2003. From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats. *Trends in Ecology and Evolution* 18: 386-394.
- Serrano A. P. 2012. Reflexión del sonido. sonidoprofessionalaudio.blogspot.mx/2012/07/reflexion-del-sonido.html. Consultado el 17 Octubre del 2016.
- Simmons, N. B. and T. Conway 1997. Chiroptera. Bats. The Tree of Life web project. Version 1. <http://tolweb.org/Chiroptera/15966/1997.01.01>. Consultado el 23 de septiembre de 2018.
- Tippens, P. E. 2011. Física, conceptos y aplicaciones, séptima edición. McGraw-Hill, México.
- Whitlow, W. L., y J. A. Simmons. 2007. Echolocation in dolphins and bats. *Physics Today* 60:40- 45.
- Wildlife Acoustics. 2017. Kaleidoscope pro 4 analysis software. www.wildlifeacoustics.com/products/kaleidoscope-software-ultrasonic. Consultado el 23 de Julio de 2017.



TU NEGOCIO CUENTA PARA MÉXICO

Para contar con información de calidad en apoyo
a tu negocio y al desarrollo de México

Participa en los **Censos Económicos 2019**.

Espera la visita del INEGI del 1 de febrero al 30 de mayo





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CIIDIR UNIDAD DURANGO

CENTRAL DE INSTRUMENTACIÓN

Laboratorios de fisicoquímica y microbiología
con servicios acreditados de análisis de agua y alimentos

Acreditación ema: A-0553-050/14

Funcionamiento y responsable sanitario COPRISED 02928/F

Servicios:

ANÁLISIS DE ALIMENTOS Y AGUA PARA CONSUMO HUMANO

- Determinación de dureza total en agua NMX-AA-072-SCFI-2001
- Determinación de cloruros totales en agua NMX-AA-073-SCFI-2001
- Determinación de metales pesados en agua naturales y potables (As, Cd, Cr, Pb) NMX-AA-051-SCFI-2001
- Determinación de fluoruros en agua NOM-201-SSA1-2002
- Método para la cuentas de bacterias aerobias en placa NOM-092-SSA1-1994
- Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa NOM-113-SSA1-1994
- Método para determinación de Salmonella en alimentos NOM-210-SSA1-2014 Apéndice A
- Método para determinación de Staphylococcus aureus en alimentos NOM-210-SSA1-2014 Apéndice B
- Determinación de coliformes totales, coliformes fecales y Escherichia coli por NMP NOM-210-SSA1-2014 Apéndice H
- Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa NOM-092-SSA1-1994

ANÁLISIS DE ALIMENTOS Y AGUA PARA CONSUMO HUMANO CON ACREDITACIÓN ANTE LA ema:

- Determinación de coliformes totales, coliformes fecales y Escherichia coli por NMP NOM-210-SSA1-2014 Apéndice H
- Determinación de cloruros totales en agua NMX-AA-073-SCFI-2001
- Determinación de fluoruros en agua NOM-201-SSA1-2002
- Determinación de metales pesados en agua potable y agua purificada (As, Cd, Pb) NOM-117-SSA1-1994

Informes:

DRA. LAURA SILVIA GONZÁLEZ VALDEZ

Coordinadora de la Central de Instrumentación CIIDIR IPN Unidad Durango

Calle Sigma Núm. 119 Fracc. 20 de Nov. II Durango, Dgo. México. C.P.34220

Tel (618) 814-20-91 Y 814 45 40 Extensiones: 82615 Y 82601

Correo electrónico: ci_dgo@ipn.mx

CIIDIR
DURANGO
CENTRAL DE INSTRUMENTACIÓN