

Visión ultrasónica de los murciélagos

Fernando Seco Granja y Antonio Ramón Jiménez Ruiz
Instituto de Automática Industrial - CSIC
Ctra. de Campo Real km 0,200, La Poveda
28500 Arganda del Rey, Madrid

E-mail de contacto: fseco@iai.csic.es

Seminario de Sistemas Inteligentes SSI2006, libro de actas, pp. 31-45
Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, 11 de mayo de 2006

Resumen

Los murciélagos se orientan y cazan en total oscuridad mediante la ecolocalización, es decir, la exploración de su entorno con señales ultrasónicas. La capacidad de este biosonar supera con mucho a la de los sistemas equivalentes construidos por el ser humano, y permite a estos mamíferos realizar tareas de alta complejidad. En este trabajo exponemos las características generales de la ecolocalización, así como sus aplicaciones en Robótica móvil.

Palabras Clave: Percepción del entorno, ecolocalización ultrasónica.

1. Introducción

Todos los sistemas inteligentes necesitan, para el desempeño de sus funciones, de mecanismos de percepción con los que obtener información de su entorno que les permitan adaptarse a cambios en el mismo.

Los ultrasonidos, que fueron históricamente una de las primeras tecnologías en ser aplicadas en robótica móvil, han quedado reservados para tareas relativamente sencillas: autocalización, evitación de obstáculos y construcción de mapas del entorno. Para las

labores más sofisticadas (identificación y seguimiento de objetos, interpretación de escenas, etc), se considera que sólo la visión artificial posee suficiente precisión.

Si bien las limitaciones físicas de las señales ultrasónicas en aire son innegables (debidas fundamentalmente a las longitudes de onda relativamente grandes en comparación con la luz), nuestra opinión es que el límite real de la capacidad de esta tecnología para la exploración del entorno no se ha alcanzado, y que son necesarios más avances en transducción, así como en el procesamiento e interpretación de las señales ultrasónicas. Bajo esas condiciones, la “visión” ultrasónica puede ser totalmente competitiva con la “visión” artificial.

Como prueba de esta tesis, en este trabajo expondremos un sistema de percepción del reino animal, con el que ciertos seres vivos son capaces de realizar labores de extraordinaria complejidad y precisión, basándose únicamente en la información obtenida de señales acústicas emitidas al entorno: la ecolocalización ultrasónica de los murciélagos.

2. Historia de la ecolocalización

Es del conocimiento común que, mientras que a los seres humanos nos cuesta desplazarnos y orientarnos en la oscuridad, algunos animales como las lechuzas o los murciélagos eligen la noche para volar y alimentarse, aparentemente sin problemas.

Durante mucho tiempo esto se aceptó como un hecho más de la vida, pero en 1793, el naturalista italiano Lazzaro Spallanzani (1729-1799) decidió averiguar qué capacidad sensorial empleaban estos animales para “ver en la oscuridad”. Para ello, encerró a una lechuza y un murciélago en una habitación, en la que había dispuesto una serie de hilos cruzados de lado a lado, de los que colgaban campanillas, de forma que sonaran si los animales chocaban con ellos. En la penumbra ambos animales eran capaces de volar, pero cuando se hizo la oscuridad total en la habitación, Spallanzani comprobó que la lechuza se desorientaba y chocaba con los hilos y contra las paredes, mientras que el murciélago mantenía intacta su capacidad de volar. La conclusión lógica fue que la lechuza simplemente tenía una visión más sensible que la del hombre, pero que el murciélago debía de tener alguna capacidad adicional que no dependía de la luz.

Con el fin de excluir completamente la visión, Spallanzani procedió a quemar los ojos de los murciélagos para cegarlos completamente, y los liberó en la habitación. No sólo comprobó que estos murciélagos ciegos volaban con igual facilidad, sino que, capturándolos unos días más tarde y examinando el contenido de sus estómagos, habían sido capaces de cazar insectos al igual que sus congéneres con vista.

A punto de creer en un nuevo sexto sentido, Spallanzani comunicó sus resultados a un zoólogo suizo, Charles Jurine, quien ideó otra prueba: taponó los oídos de los murciélagos con bolas de cera, observando que su capa-

cidad de evitar obstáculos se deterioraba notablemente. Spallanzani fue capaz de replicar los hallazgos de Jurine, insertando pequeños tubos metálicos en las orejas de los murciélagos. Ambos concluyeron que el sentido del oído, y no la vista, era fundamental para que el murciélago volara y cazara. Aparte de exponer esta prudente conclusión, Spallanzani y Jurine no realizaron ninguna especulación adicional; aún así, sus opiniones fueron rechazadas por la comunidad científica, que siguió ateniéndose a la explicación convencional, dada por el naturalista francés Georges Cuvier: los murciélagos usaban el sentido del tacto, palpando los objetos de su entorno con las alas¹. El trabajo de Spallanzani y Jurine cayó en el olvido por un siglo entero.

A principios del siglo XX, sin embargo, la situación había cambiado: la navegación comercial y militar experimentaba un importante auge, y con la preocupación por la seguridad de las naves, nació la necesidad de disponer de algún mecanismo para evitar las colisiones con otros barcos o con icebergs. En 1912, el año del hundimiento del transatlántico Titanic, el ingeniero norteamericano Hiram Maxim escribió en la revista *Scientific American*: “los murciélagos detectan los obstáculos escuchando las reflexiones de sonidos de baja frecuencia producidos con sus alas (a aproximadamente 15 Hz), y los barcos podrían evitar colisiones con icebergs u otros barcos instalando un aparato que emitiera sonidos de gran potencia y un receptor que escuchara los ecos de vuelta”. Aunque Maxim estaba equivocado respecto a los murciélagos, su idea básica se hizo realidad hacia el final de la primera guerra mundial con el desarrollo del sónar por el físico francés Paul Langevin (1872-1946). La misma noción de Maxim fue expuesta en 1920 por el fisiólogo británico Hartridge, quien sin embargo apuntó su opinión de que los murciélagos emitían y escuchaban sonidos ultrasónicos, es decir, por

¹Hay que tener en cuenta que hacia 1800, no era en absoluto evidente que pudieran existir sonidos no audibles por el ser humano.

encima del rango audible por el ser humano.

Ni Maxim ni Hartridge intentaron comprobar sus teorías, pero en 1938 el zoólogo norteamericano Donald Griffin (1915-2003), que trabajaba en la universidad de Harvard estudiando la migración de las bandadas de murciélagos, supo que el físico norteamericano George Washington Pierce (1872-1956) acababa de construir el primer micrófono piezoeléctrico, capaz de detectar vibraciones ultrasónicas. Pierce se mostró encantado de colaborar con Griffin, y juntos comprobaron que, efectivamente, el murciélago emite continuamente sonidos inaudibles por el hombre, y que si bloqueaban la emisión o la recepción de los mismos, impedían su vuelo.

Ayudado por otro investigador, Robert Galambos, Griffin emprendió una larga serie de experimentos con los murciélagos, descubriendo muchos de los hechos básicos sobre el uso de los ultrasonidos que expondremos en el apartado 4. Para definir esta nueva capacidad de los murciélagos, Griffin acuñó el término *ecolocalización* en 1944². Pronto se descubrió que otros animales, notablemente los cetáceos como las ballenas y delfines, también estaban dotados de capacidad para ecolocalizar. La ecolocalización es hoy en día un campo de intenso estudio en fisiología comparativa, neurociencia, robótica, computación y acústica.

Griffin dedicó su vida a investigar las capacidades sensoriales y el comportamiento de los animales, y fue uno de los máximos defensores del cognitivismo animal, corriente filosófica según la cual todos los seres vivos po-

²La Real Academia Española dice que el término correcto es “ecolocación”, y lo hace provenir de la raíz latina *eco+locatio* (posición). En realidad, Griffin le dio el nombre “echolocation”. La opción elegida por la RAE supone dos problemas: (a) la traducción al español de “to locate” y “location” es “localizar” y “localización”, no “locar” ni “locación”; (b) ¿cómo traduciríamos el verbo “to echolocate” y el adjetivo “echolocating”, ambos de uso ubicuo en la literatura inglesa sobre el tema? Por estas razones, en este texto emplearemos ecolocalización, ecolocalizar, etc.

seen consciencia y desarrollan procesos mentales que determinan su comportamiento ³.

3. Sónar robótico y biosónar

Hacia la época del descubrimiento de la ecolocalización “...el sónar y el radar eran desarrollos militares clasificados, y la idea de que los murciélagos pudieran conseguir algo remotamente similar a los últimos triunfos de la ingeniería electrónica no solamente era poco plausible sino repugnante para muchas personas”, según Griffin.

Sin embargo, sesenta años de estudio del biosónar han demostrado claramente la superioridad de los murciélagos sobre los robots construidos por el ser humano para el aprovechamiento inteligente de los ultrasonidos en la percepción (en nuestra defensa podemos alegar la gran ventaja de que ha dispuesto la ecolocalización animal para refinarse a lo largo de cincuenta millones de años de evolución). En este apartado veremos una breve comparación de las características más relevantes del sónar ultrasónico robótico y biológico.

3.1. Sónar en sistemas robóticos

Una de las aplicaciones clásicas de los ultrasonidos en Robótica es la localización del robot por la medida de tiempos de vuelo (TOF) de señales emitidas o recibidas por el mismo a transductores fijos en el entorno de desplazamiento. La posición se determina triangulando los rangos estimados a los puntos de referencia. Gracias a que la velocidad del sonido en el aire es relativamente baja

³La hipótesis opuesta, conocida como conductismo, y defendida por J. B. Watson y B. F. Skinner, afirma que sólo podemos hablar con propiedad del comportamiento o conducta observada de los sujetos, y que la existencia de estados mentales es inabordable de forma científica.

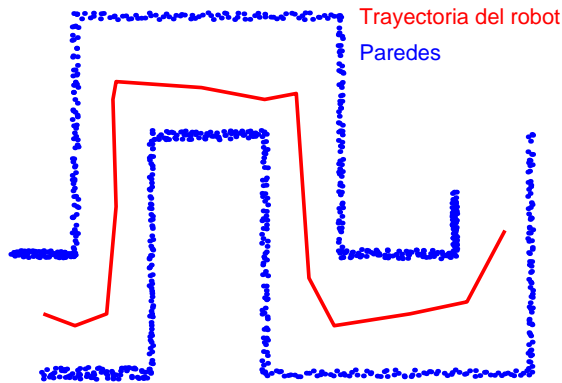


Figura 1: Localización y construcción de mapas mediante ultrasonidos (SLAM). Los puntos azules corresponden a reflexiones puntuales de la señal ultrasónica.

(340 m/s), los TOF y por tanto la posición, pueden medirse con alta precisión [5].

La segunda aplicación robótica de importancia de los ultrasonidos se produce en la navegación de un vehículo por un entorno previamente desconocido. En este caso, mediante el sónar se mide la posición (rango y orientación) de los posibles obstáculos en su camino, con el fin de evitarlos y, además, construir un mapa de su entorno [6]. Esta técnica robótica se conoce como SLAM (*Simultaneous Location and Mapping*), y se ilustra en la figura 1. La mayoría de robots convencionales llevan para este fin un anillo de transductores ultrasónicos en su perímetro (figura 2a).

En los mapas convencionales generados por SLAM, como el mostrado en la figura 1, las estructuras se construyen por agrupación de puntos, cada uno de los cuales corresponde al eco devuelto por un reflector supuestamente puntual. Esta cruda aproximación a la realidad se debe a las limitaciones de la unidad sensora (un único emisor/receptor ultrasónico) y del procesamiento de la señal recibida. En 1987 R. Kuc publicó un artículo clásico [7] en el que demostraba que la combinación de tiempos de vuelo de las señales ultrasónicas recibidas por varios transductores permitía

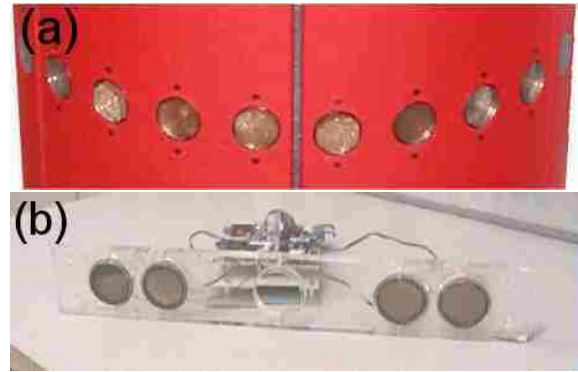


Figura 2: (a) Anillo de transductores capacitivos del robot móvil B-21 de RWI; (b) Unidad sensora formada por dos transmisores y cuatro receptores descrita en [18].

la clasificación de los reflectores en tres categorías simples: paredes planas, esquinas y vértices. Mediante estas plantillas básicas es posible construir mapas de entorno mucho más precisos que con simples puntos individuales.

Esta idea fue llevada a la práctica en la década de los 90 por investigadores como H. Peremans [12], L. Kleeman [6] y J. Ureña [18], construyendo unidades sensoras compuestas de varios transductores emisores y receptores, logrando la clasificación de múltiples reflectores en entornos reales. Como muestra se puede ver la unidad construida por J. Ureña y colaboradores en la universidad de Alcalá de Henares (figura 2b), formada por dos transductores emisores y cuatro receptores de tipo electrostático. Este grupo trabaja asimismo en la modulación y codificación de las señales ultrasónicas, que permitan emisiones múltiples al medio, y en el procesamiento de dichas señales en tiempo real [18].

Las principales limitaciones de los ultrasonidos en Robótica vienen dadas por [8]: restricciones en la respuesta en frecuencia, sensibilidad y directividad de los transductores existentes; las altas longitudes de onda que hacen que la mayoría de los objetos reflejen el sonido de forma especular, dificultando la

interpretación de los ecos recibidos; y la interferencia mutua de las señales producidas por varios sistemas operando simultáneamente.

3.2. Sónar en la naturaleza

Aunque las limitaciones físicas de los ultrasónicos rigen de igual manera para los sónares de origen biológico, existen seres vivos capaces de aprovechar estas señales para la percepción de su entorno con tal grado de éxito que su desplazamiento y la obtención de alimento dependen de ellas.

En trabajos como [2] se exponen muchas de las características de la ecolocalización de los murciélagos que desafían a nuestra capacidad de emulación:

- Representación de su entorno cercano (unos 5 m de rango enfrente del animal) con una resolución de milímetros.
- Operación tanto en espacios abiertos como en bosques, en presencia de multitud de reflectores de la señal ultrasónica.
- Emisión, recepción y procesamiento de señales ultrasónicas con un gran ancho de banda (típico, 100 kHz).
- Habilidad para la detección, posicionamiento y seguimiento de insectos.
- Compensación activa del efecto Doppler producido por el movimiento relativo del animal y la presa.
- Cancelación de la interferencia producida por las señales ultrasónicas de otros murciélagos, siendo muchas especies capaces de vivir de forma gregaria.

Este comportamiento resulta mucho más sorprendente si consideramos que la “unidad de procesamiento” del murciélago es un cerebro con unos pocos gramos de peso, y que su “frecuencia de operación” (velocidad de las señales neurológicas) es de unos pocos kilohertzios.



Figura 3: Murciélago orejudo de Townsend (*Corynorhinus townsendii*). Fuente de la fotografía: Nevada Bureau of Land Management.

4. Ecolocalización

4.1. Datos generales sobre los murciélagos

Los murciélagos son mamíferos voladores del orden *Chiroptera* (literalmente, “mano-ala”), y son los únicos mamíferos capaces de volar⁴. Existen aproximadamente 1100 especies de murciélagos, por lo que suponen un 20% de las especies totales de mamíferos.

Se dividen en dos subórdenes, de los cuales los pequeños (suborden *Microchiroptera*) poseen biosonar. El peso típico de un murciélago pequeño es de 5-20 g, y su envergadura de 40-200 mm. Se alimentan de insectos, pequeños mamíferos y peces, néctar y fruta, y, en ocasiones, de la sangre de otros animales.

La estructura que sustenta el ala del murciélago se ha formado a partir de su pata y mano delanteras, como se ve en la figura 3. Las patas traseras están dobladas en un ángulo de 180°, contribuyendo también al control y movimiento del ala. Los huesos y alas de los murciélagos son muy flexibles, lo cual les proporciona una maniobrabilidad en el vuelo superior a la de los pájaros.

⁴ Algunas especies de ardillas son capaces de planear saltando de árbol en árbol, pero no de volar de verdad.

La mayoría de los murciélagos están activos de noche o en el crepúsculo, porque allí encuentran menos competencia por la comida, y, a la vez, están libres de depredadores. Aunque su sentido más desarrollado es la ecolocalización, poseen una visión perfectamente funcional. Muchas especies de murciélagos son sociales y cohabitan en cuevas, puentes, etc⁵.

Se conoce relativamente poco de la evolución de los murciélagos (al ser tan ligeros sus esqueletos, fosilizan mal); los fósiles más antiguos datan del periodo Eoceno, hace unos 50 millones de años, y ya aparecen con sus dos rasgos más significativos, la capacidad de volar y la ecolocalización. Este hecho es problemático, puesto que no está claro cómo pudieron evolucionar a partir de sus antecesores, una dificultad ya reconocida por el propio Darwin en “El origen de las especies” (1859). En [16] se pueden encontrar los datos experimentales conocidos y las hipótesis existentes sobre el origen de la ecolocalización en los murciélagos.

4.2. Fisiología del sistema emisor y receptor de ultrasonidos

La ecolocalización es tan importante para el murciélago, que prácticamente todo su cuerpo (y en especial la laringe, orejas, oído y cerebro) se ha adaptado para el uso más eficiente de la misma.

Los murciélagos generan los ultrasonidos en su laringe y los emiten por la boca; para ello poseen unas cuerdas vocales muy delgadas, pero tensadas por poderosos músculos. Exhiben un gran control sobre la gama de frecuencias excitadas, así como el contenido de armónicos de las señales. Los niveles de sonido producidos son relativamente al-

tos (con un SPL de 100-110 dB a 10 cm de la boca), aunque también existen especies de murciélagos susurrantes que emiten sonidos de sólo 60 dB (equivalente al nivel de una conversación normal). Para minimizar el gasto de energía, el murciélago emite la señal ultrasónica en la espiración que acompaña al batido de las alas.

El sistema auditivo de los murciélagos sigue el esquema general de los restantes mamíferos. Las orejas (pinnae) de los murciélagos son muy grandes, a menudo mayores que la cabeza del animal, y poseen crestas de refuerzo, y un saliente (trago), cuya función exacta se desconoce, pero cuya eliminación deteriora la capacidad de ecolocalización del murciélago.

El oído medio tiene un tamaño muy reducido, de forma que no filtre las frecuencias ultrasónicas. El músculo estapedio bloquea parte del sonido incidente en el tímpano, contrayéndose unos 10 ms antes de la emisión ultrasónica, y relajándose después, por lo que actúa efectivamente como un control automático de ganancia de la señal acústica.

La cóclea del murciélago es extraordinariamente grande relativa al tamaño de su cráneo (en algunas especies alcanza hasta 1/3 de sus dimensiones), y con una gran longitud para permitir máxima resolución en la separación de frecuencias (ver sección 4.6). Como en los restantes mamíferos, la función de la membrana basilar es crear una representación en frecuencia de la señal ultrasónica; sobre la misma se encuentran las células ciliares (unas 900 en el gran murciélago marrón), sintonizadas a una frecuencia propia, que decrece según nos alejamos de la ventana oval. Estas células transforman las señales mecánicas en nerviosas, excitando del orden de 50000 nervios auditivos, que transmiten las señales a la corteza auditiva, para el procesamiento de orden superior.

El rango auditivo de los murciélagos se extiende hasta aproximadamente 120 kHz, de-

⁵Un ejemplo muy famoso es la colonia de Austin, Texas, con una población estimada de 1.5 millones de murciélagos. Además de consumir cada noche unas diez toneladas de insectos, son una de las atracciones turísticas de la ciudad.

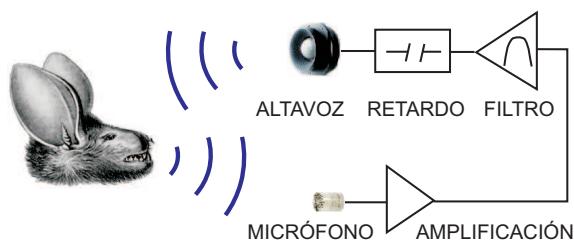


Figura 4: Técnica utilizada por J. Simmons para estudiar la medida de rangos por ecolocalización.

pendiendo de la especie; en ciertas bandas de frecuencia en las que el murciélago necesita máxima capacidad de detección (como en la región CF, ver sección 4.5), el umbral de sensibilidad puede estar en 0 dB.

4.3. Experimentos de Simmons

J. Simmons fue el primer investigador en demostrar experimentalmente (1973) que el fundamento de la ecolocalización es la determinación del rango a la presa, como había conjeturado Hartidge. Para ello colocó a un murciélago de la especie gran murciélago marrón o *Eptesicus fuscus*, de forma que emite señales ultrasónicas hacia un micrófono, las cuales eran recogidas y retardadas antes de ser reenviadas al animal, según se muestra en la figura 4. El murciélago presentó igual comportamiento frente a estas señales artificiales que con ecos auténticos producidos por un obstáculo.

Sobre la misma idea básica, Simmons emprendió varios experimentos, descritos en [2], con el fin de conocer la resolución y la capacidad de discriminación en la medida de rangos por el murciélago. Para ello entrenó al animal a emitir sonidos hacia dos micrófonos, situados frente a él a una corta distancia y con orientaciones distintas. Las señales reemitidas por cada canal son modificadas de una forma controlada, y se estimula al animal a elegir entre dos opciones, recompensándolo con comida si elige la correcta.

En el primer experimento se trataba de ver cuál era la agudeza o umbral de detección de pequeños cambios del TOF medible por el murciélago, distinguiendo entre un objeto inmóvil y otro que sufría pequeños desplazamientos. Sorprendentemente el umbral reportado por Simmons es de tan sólo 40 ns en condiciones de laboratorio, descendiendo hasta 10-15 ns para altas SNRs. Este valor está muy cercano al que da la teoría de radar para un estimador óptimo del retardo, que aproveche totalmente el ancho de banda de la señal emitida⁶.

En el segundo experimento se quiso determinar el tiempo de superposición de ecos, es decir, cuál es la separación máxima entre dos ecos consecutivos de tal forma que el animal los perciba como una única señal ultrasónica. Simmons obtuvo un valor de $350 \mu\text{s} = 60 \text{ mm}$, conocido como *tiempo de integración*.

Sin embargo, por observación directa del comportamiento del animal, se sabe que puede resolver objetos con menor retardo relativo que el tiempo de integración. Por este motivo, en el tercer experimento de Simmons se premió al murciélago si era capaz de distinguir dos objetos muy cercanos, aunque sus ecos ultrasónicos conjuntos constituyeran una única señal. El resultado obtenido varía entre 2 y $10 \mu\text{s}$ (.3 a 1.7 mm), lo cual concuerda con la capacidad del murciélago de detectar y localizar objetos aunque estén cerca de la vegetación.

⁶Este resultado en particular es muy controvertido, pues parece requerir que el murciélago procese la señal ultrasónica de forma coherente, es decir, reteniendo la información de la fase. Las objeciones a esta espectacular precisión provienen del desconocimiento del mecanismo fisiológico sobre el que se sustentaría tal capacidad, y, también, la utilidad que tendría tan alta precisión ($40 \text{ ns} = 7 \mu\text{m}$) para la navegación y la caza. Ver [1] para una discusión.

4.4. Posicionamiento de la presa

La detección y posicionamiento de la presa se muestran esquemáticamente en la figura 5. Para la detección, el murciélago utiliza la amplitud del eco devuelto y el corrimiento Doppler provocado en la señal ultrasónica emitida por el aleteo del insecto. El rango r a la presa se mide por el tiempo de vuelo de la señal ($r = c\text{TOF}/2$, siendo $c = 340$ m/s). El acimut (desviación horizontal) es calculado por la diferencia de tiempos de vuelo en las señales recibidas por cada oreja, mientras que la elevación (desviación vertical), por la diferencia de tiempo de vuelo en diferentes alturas del pabellón auditivo. Esto proporciona las tres coordenadas esféricas necesarias para localizar completamente al insecto.

Las medidas experimentales muestran que los lóbulos de emisión del murciélago son suficientemente grandes como para insonificar una región considerable enfrente del animal (aunque la directividad varía con la frecuencia, un valor típico sería $\pm 30^\circ$ respecto al eje frontal). De esta forma, es inevitable que el murciélago reciba ecos procedentes del fondo (ramas, hojas, etc), a la vez que de la presa. Por el diseño fisiológico del sistema ecolocalizador, el murciélago no puede eliminar esos ecos simplemente moviendo su cabeza hacia la presa, sino que depende del procesamiento de las señales para la resolución de múltiples objetos.

4.5. Señales de ecolocalización

Una de las claves fundamentales del éxito de la ecolocalización radica en las señales empleadas en esa tarea. Para este fin, la evolución ha seleccionado señales que siguen los principios de la teoría de la estimación [9] de forma análoga a las empleadas en el radar y sónar construidos por los seres humanos.

Una secuencia de señales ultrasónicas emitida por un murciélago (*Pteronotus parne-*

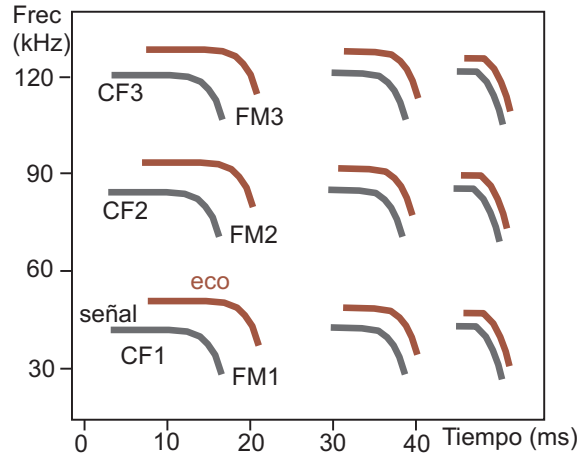


Figura 6: Representación tiempo-frecuencia de las señales típicas producidas por un murciélago.

lli, ver [17]) se muestra en la figura 6, en una representación conocida como espectrograma. Una señal genérica consta de un tren de pulsos a frecuencia constante (CF) terminada por un barrido de frecuencia modulada (FM). Algunos murciélagos emiten sólo una de las componentes, otros las dos, e incluso otras combinaciones como FM-CF-FM. En la figura puede verse como, además de la componente principal (CF₁-FM₁), el murciélago emite armónicos a frecuencia doble (CF₂-FM₂), triple, etc. El propósito de estos armónicos es identificar su propia señal en situaciones de intensa interferencia por otros murciélagos. Obsérvese como, en general, el murciélago tiende a utilizar todo el ancho de banda del que dispone.

Las señales ultrasónicas cambian durante el proceso de caza, que consta de tres fases [3]:

- Detección. Las señales transmitidas son principalmente CF, con una frecuencia de repetición baja (cada 50-100 ms). Esto proporciona gran sensibilidad para la detección de las presas, y especialmente permite determinar con gran precisión cualquier desplazamiento Doppler producido por el batido de las alas de los insectos.

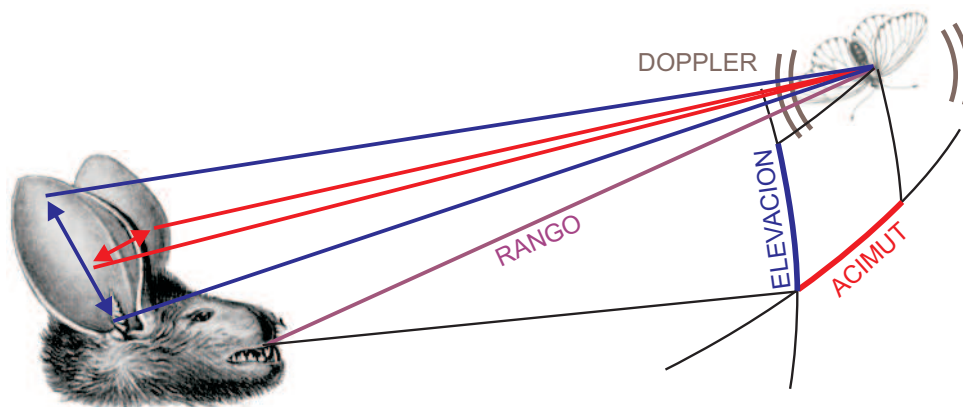


Figura 5: Mecanismos físicos usados en ecolocalización para detectar y posicionar a la presa (explicación en el texto).

- **Aproximación.** El murciélago reduce la componente CF y aumenta la FM, acortando temporalmente las señales pero incrementando su frecuencia de repetición (cada 10-50 ms). En general el murciélago ajusta la duración de la señal ultrasónica para que su longitud sea un poco menor que el doble de la distancia que lo separa de la presa, efectivamente “llenando” todo el espacio entre ellos con sonido.
- **Terminal.** Los pulsos de FM tienen muy corta duración y son muy verticales en el espectrograma, y la frecuencia de repetición es muy alta (4-7 ms), lo que se conoce como “zumbido de alimentación”. El gran ancho de banda empleado da una alta precisión en el posicionamiento de la presa, hasta su captura con la boca o las alas del murciélago.

Los murciélagos poseen un control muy preciso sobre las señales que emiten. Por ejemplo, algunas especies pueden compensar los desplazamientos de frecuencia producidos por efecto Doppler con un margen de error de una milésima parte. Asimismo, también modifican el contenido en armónicos de la señal producida de forma que puedan reconocer su propio eco en presencia de otros murciélagos.

4.6. Procesamiento de señales. El modelo SCAT

El modelo SCAT (Correlación y Transformación del Espectrograma) fue propuesto por el grupo de J. Simmons en los 90 [14], y es la base de nuestra comprensión del procesamiento de señales realizado por el murciélago (ver también las referencias [11, 13]).

Conceptualmente, el modelo SCAT divide el procesamiento de la señal ultrasónica en tres bloques:

Bloque coclear. Su función es cambiar la representación unidimensional (temporal) de la señal recibida por el tímpano en otra de dos dimensiones (tiempo-frecuencia), conocida como espectrograma. Esta representación, conocida como tonotópica, es propia del sistema auditivo de los mamíferos [2]. Fisiológicamente, la acción de la membrana basilar del oído interno del murciélago corresponde a un banco de filtros paso-banda muy sintonizados que dividen la señal entrante en bandas de frecuencia, y extraen su envolvente.

Por ejemplo, consideremos que el murciélago emite un chirp⁷ de duración 2 ms que recorre de forma descendente las frecuencias de

⁷Para simplificar, ignoraremos en el ejemplo la emisión de armónicos de la señal principal.

120 kHz a 25 kHz, como se muestra en la figura 7a. Esta señal es descompuesta por un banco de 80 filtros IIR sintonizados a las frecuencias del chirp, con un ancho de banda constante de 4 kHz (la ganancia de este banco de filtros se muestra en la figura 7b), y la salida de cada filtro es rectificadora y filtrada paso-baja con una frecuencia de corte 3 kHz (el recíproco de esta frecuencia, $350 \mu\text{s}$, es el tiempo de integración, que corresponde a la velocidad de respuesta aproximada de las neuronas del sistema auditivo del murciélago). Las salidas de este banco de filtros forman un conjunto de ochenta señales de baja frecuencia, como se muestra en la figura 7c. Si estas señales superan un valor umbral, provocan descargas en un conjunto de neuronas receptoras del oído interno del murciélago.

Bloque de correlación de espectrograma o temporal. La función de este bloque es medir el retardo de las señales producidas en cada canal de frecuencia, desde la emisión de la señal ultrasónica hasta la recepción de los ecos por el murciélago. El fundamento fisiológico de este bloque es el conocimiento de la existencia de neuronas de retardo sintonizadas FM-FM, que se activan cuando reciben dos excitaciones separadas por un determinado tiempo [17]. La existencia de varias de estas neuronas en cada canal de frecuencias implementa de forma efectiva líneas de retardo selectivas por frecuencia en el cerebro del murciélago (ver figura 8).

De esta forma, cuando se recibe la señal de eco, el cerebro del murciélago es capaz de descomponer la señal en sus componentes de frecuencia, y sumarlas compensando el retardo relativo de las mismas. De este modo se obtiene una única señal global con un pico bien definido correspondiente al tiempo de llegada del eco ultrasónico.

Mediante la correlación del espectrograma, el murciélago únicamente podría discriminar ecos con una resolución máxima equivalente al periodo de integración del filtro paso-baja del bloque coclear (unos $350 \mu\text{s}$, o 60 mm),

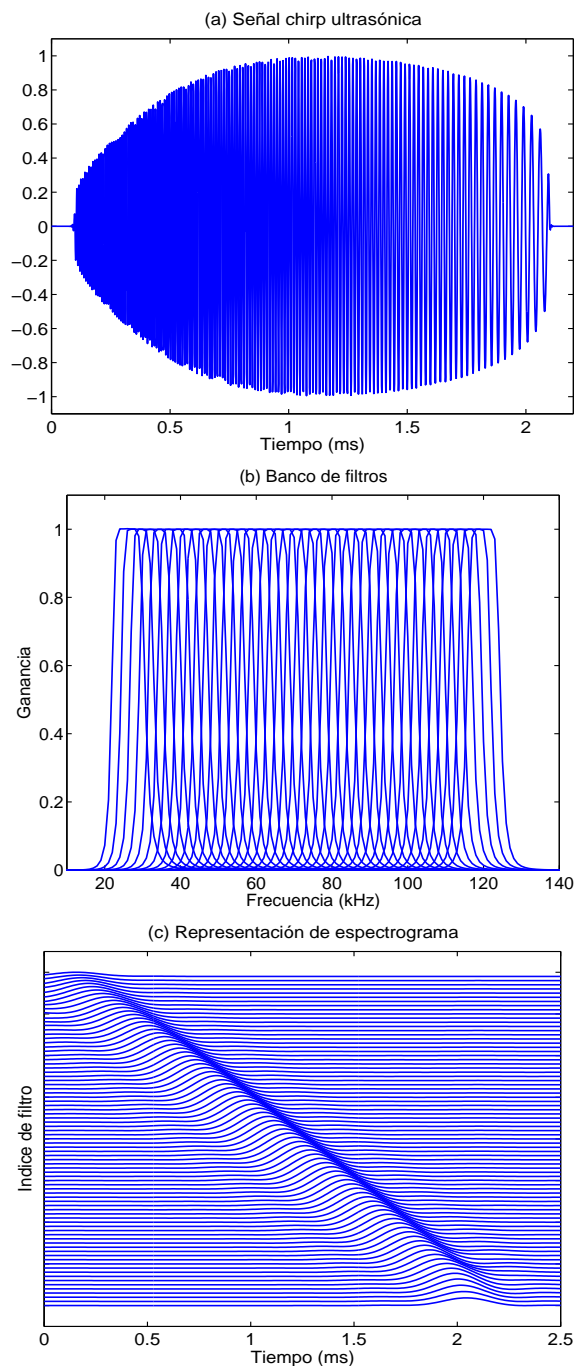


Figura 7: Acción del bloque coclear sobre la señal ultrasónica: (a) chirp emitido por el murciélago; (b) ganancia del banco de filtros (sólo se muestran la mitad de las frecuencias); (c) señales de baja frecuencia producidas a la salida del bloque de filtros (las frecuencias superiores están arriba).

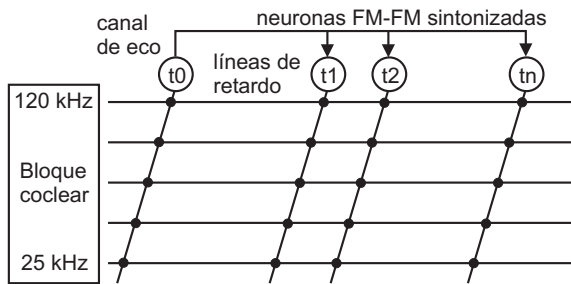


Figura 8: Las neuronas de retardo FM-FM constituyen líneas de retardo por frecuencias, usadas para invertir el esparcimiento temporal del chirp.

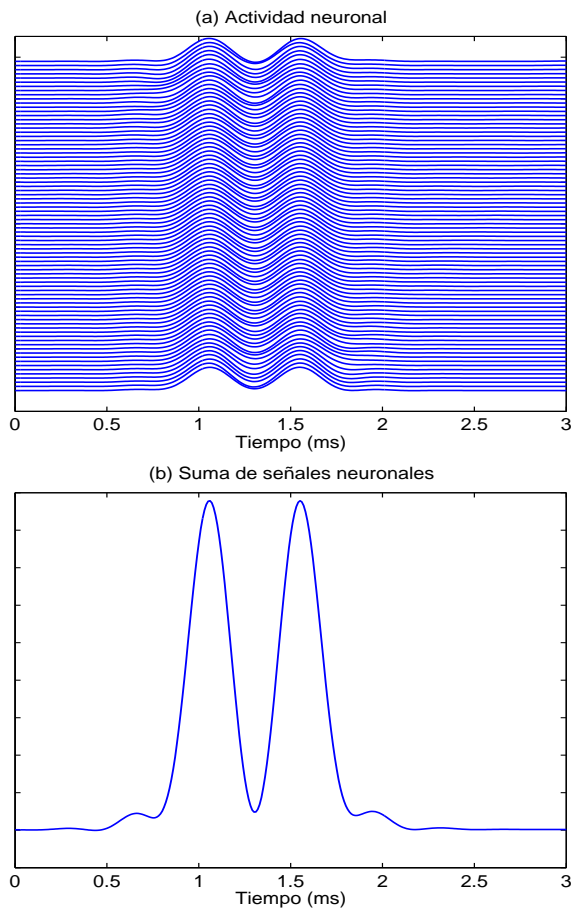


Figura 9: Dos ecos con una separación temporal mayor que el periodo de integración de los filtros de la cóclea son resueltos por el bloque de correlación de espectrograma (separación de $500 \mu s = 85 \text{ mm}$).

como se ve en la figura 9. Sin embargo, la evidencia experimental mostrada en el apartado 4.3 indica que el murciélago posee una agudeza acústica muy superior: su sistema auditivo y nervioso es capaz de discriminar retardos inferiores al tiempo de activación de las propias neuronas del murciélago. Esta sorprendente capacidad se explicará mediante el siguiente bloque del modelo SCAT.

Bloque de transformación de espectrograma o espectral.

En la figura 10a vemos la salida del bloque coclear ante una señal formada por dos ecos con una separación inferior al tiempo de discriminación neuronal. Aunque las señales sumadas por el bloque de correlación de espectrograma produzcan un único pico (parte b), parece claro que existe más información sobre los diferentes objetos que reflejaron la señal en la pauta de interferencia de la parte a. El bloque de transformación del espectrograma se encarga de extraer dicha información y aumentar la resolución del oído del murciélago.

Para ello, en este bloque se crea una señal ponderada de la forma $s(t) = \sum_{i=1}^{N_c} a_i \cos 2\pi f_i t$, donde el sumatorio se extiende a todos los canales de frecuencia ($N_c = 80$), con frecuencias f_i desde 120 a 25 kHz, y pesos a_i iguales a la amplitud de las señales en el espectrograma de la figura 10a. La idea intuitiva es que cada canal de frecuencia “vota” por los retardos en los que considera posible la existencia de un eco. El resultado de este sumatorio se ve en la figura 10c, donde se aprecia como se han resuelto dos objetos separados $50 \mu s$ (9 mm aproximadamente).

4.7. Percepción del entorno

Como hemos visto, se entiende de una forma general el procesamiento de las señales ultrasónicas para la detección y localización de presas. En el proceso de caza, es claro que el animal emplea la información contenida en ecos sucesivos, de forma que pueda calcular

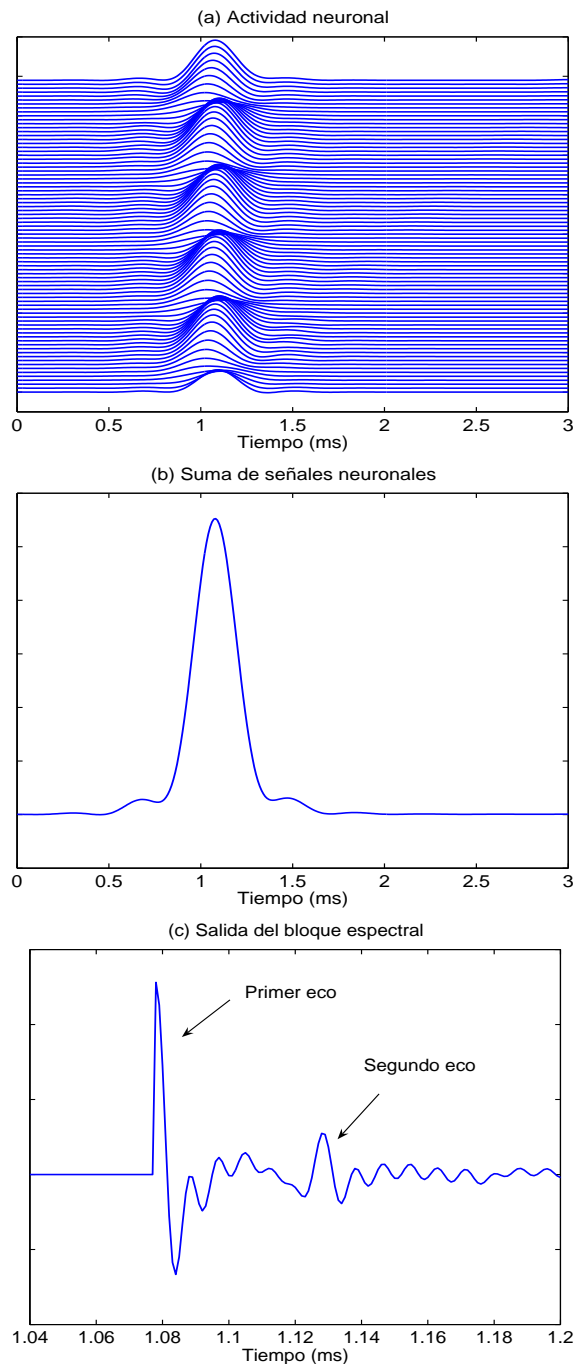


Figura 10: Dos ecos con una separación temporal menor que el periodo de integración forman un patrón de interferencia que permite que sean resueltos por el bloque de transformación de espectrograma (separación de $50 \mu\text{s} = 9 \text{ mm}$).

una trayectoria de interceptación con su presa; si sólo empleara los ecos individuales, el retardo debido al tiempo de vuelo de la señal ultrasónica sería suficiente para que el insecto escapase [10].

Algunas observaciones sobre la navegación de los murciélagos en un entorno medio (fuera del alcance inmediato del sónar pero dentro del área habitual de desplazamiento del animal) permiten suponer que construyen un modelo de su entorno que va más allá de la tarea de caza [15]. Por ejemplo, se sabe que los murciélagos se desplazan siguiendo rutas más o menos estables entre sus lugares de descanso y las zonas de alimentación, y se cree que para ello memorizan marcas sobre la ruta. La alteración artificial de esta ruta (introduciendo un obstáculo nuevo, por ejemplo), causa desconcierto y cambios en la pauta de vuelo del murciélago, hasta que, tras varias pasadas, se familiariza con la nueva marca y la incorpora a su memoria. Del mismo modo, se ha observado que varios murciélagos cazan en grupo (especialmente madres e hijos), lo cual apunta a un proceso de aprendizaje de rutas entre miembros de la especie.

La evidencia experimental indica que los murciélagos emplean información previa sobre su entorno, prefiriéndola en ocasiones a los nuevos datos disponibles por ecolocalización. Por ejemplo, en un experimento se confinó el vuelo de un murciélago a una porción de una estancia, bloqueando el resto con paneles; cuando éstos fueron retirados, el animal prefería quedarse en la zona que conocía, a pesar de que la ecolocalización le indicaba que poseía más espacio para moverse. En otra prueba, se entrenó a murciélagos para que atravesaran un pequeño agujero en una pared; cuando este agujero fue agrandado, los murciélagos seguían encogiendo sus alas para pasar por él.

En los experimentos llevados a cabo por Holland [4] con murciélagos megaquirópte-

ros de la especie *Rousettus aegyptiacus*⁸, se los entrena para que vuelen por un corredor de 25 m de largo hasta que encuentran la única percha disponible, en la cual pueden colgarse (los murciélagos evitan posarse en el suelo y prefieren descansar boca abajo). Una vez que han aprendido su localización, la modificación del entorno cercano de la percha (moviendo objetos contiguos, ocultándola tras una pantalla, etc) no merma su capacidad para volver a encontrarla, indicando que el murciélago ha memorizado su posición espacial y no tanto los objetos presentes en su entorno inmediato.

Otra característica interesante es que los murciélagos disponen de dos fuentes sensoriales para la percepción del entorno: ecolocalización y visión. Holland trató de determinar hasta qué punto los animales son capaces de “transferir” la información obtenida por un sistema al otro. Así, repitió el experimento anterior iluminando la habitación y bloqueando el sentido de ecolocalización al producir un intenso sonido en la banda de frecuencias usada por esta especie; en una segunda prueba oscureció totalmente la estancia y permitió a los murciélagos ecolocalizar sin visión. El resultado fue que en ambos casos el sujeto era capaz de encontrar y memorizar la posición de la percha, pero que la información no era utilizable por el otro sistema de percepción, debiendo reaprender su entorno de movimiento bajo las nuevas condiciones. Esto cuestiona el nivel de abstracción alcanzado en la representación espacial del entorno que realiza el murciélago.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha expuesto una breve visión del estado del arte de nuestra comprensión de la ecolocalización: la capacidad de los

⁸La única especie de este suborden que tiene capacidad de ecolocalizar; el resto de megaquirópteros usan sólo la visión.

murciélagos y otros mamíferos, para navegar y cazar mediante señales ultrasónicas producidas por ellos mismos.

El estudio del sistema fisiológico del biosonar, el procesamiento de las señales producidas, y la extracción de la información que realizan estos animales, puede ser fundamental para producir avances en los sistemas robóticos autónomos mucho más primitivos desarrollados por el ser humano.

Agradecimientos

Durante la realización de este trabajo el autor disfrutó de un contrato “Juan de la Cierva” del Ministerio de Educación y Ciencia.

Referencias

- [1] K. Beedholm and B. Mohl. Bat sonar: an alternative interpretation of the 10 ns jitter result. *J. Comp. Physiol. A*, 182:259–266, 1989.
- [2] James A. Simmons et al. Composition of biosonar images for target recognition by echolocating bats. *Neural Networks*, 8(7-8):1239–1261, 1995.
- [3] Donald R. Griffin, Frederic A. Webster, and Charles R. Michael. The echolocation of flying insects by bats. *Animal Behaviour*, 8(3-4):141–154, 1960.
- [4] Richard A. Holland, Paul Winter, and Dean A. Waters. Sensory systems and spatial memory in the fruit bat *Rousettus aegyptiacus*. *Ethology*, 111:715–725, 2005.
- [5] A. R. Jiménez, F. Seco, C. Prieto, and J. Roa. Tecnologías sensoriales para la localización en entornos inteligentes. In *Simposio de Computación ubicua e Inteligencia Ambiental, UCAM I’05*, Granada, 2005.
- [6] Lindsay Kleeman and Roman Kuc. Mobile robot sonar for target localization

- and classification. *International Journal of Robotics Research*, 14(4):295–318, 1995.
- [7] R. Kuc and M. W. Siegel. Physical based simulation model for acoustic sensor robot navigation. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(6):766–778, November 1987.
- [8] W. Manthey, N. Kroemer, and V. Magori. Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air. *Meas. Sci. and Technol.*, 3(3):249–261, 1992.
- [9] John Minkoff. *Signals, Noise and Active Sensors*. Wiley Interscience, 1 edition, 1992.
- [10] Cynthia F. Moss and Annemarie Surlykke. Auditory scene analysis by echolocation in bats. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110(4):2207–2226, 2001.
- [11] Nicola Neretti, Mark I. Sanderson, Nathan Intrator, and James A. Simmons. Time-frequency model for echo-delay resolution in wideband biosonar. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113(4):2137–2145, April 2003.
- [12] H. Peremans, K. Audenaert, and J. Van Campenhout. A high-resolution sensor based on tri-aural perception. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 9(1):36–48, 1993.
- [13] H. Peremans and J. Hallam. The spectrogram correlation and transformation receiver, revisited. *Journal of the Acoustical Society of America*, 104(2):1101–1110, August 1998.
- [14] P. Saillant, J. Simmons, S. Dear, and T. McMullen. A computational model of echo processing and acoustic imaging in frequency-modulated echolocating bats: the spectrogram correlation and transformation receiver. *Journal of the Acoustical Society of America*, 94(5):2691–2712, November 1993.
- [15] Hans-Ulrich Schnitzler, Cynthia F. Moss, and Annette Denzinger. From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats. *Trends in ecology and evolution*, 18(8):386–394, 2003.
- [16] John R. Speakman. The evolution of flight and echolocation in bats: another leap in the dark. *Mammal Review*, 31(2):111–130, 2001.
- [17] Nobuo Suga. Biosonar y cómputo neural en los murciélagos. *Investigación y ciencia*, (167):30–38, 1990.
- [18] J. Ureña, M. Mazo, J. J. García, A. Hernández, and E. Bueno. Classification of reflectors with an ultrasonic sensor for mobile robot applications. *Robotics and Autonomous Systems*, 29:269–279, 1999.