

Identificació bioacústica d'algunes espècies de ratpenats amb sonogrames, espectrogrames i espectres sonors segons la seva freqüència d'ecolocalització.

Pedro Arcas Rivas (pedro.arcas@ribotiserra.cat) INS Institut Ribot i Serra, Sabadell (Barcelona).

José Fenollar Moncho (jfenoll2@xtec.cat) INS Institut Ribot i Serra, Sabadell (Barcelona).

María Mas Navarro (m.granollers.cn@diba.cat) Museu de Granollers-Ciències Naturals, Granollers (Barcelona).

Carles Flaquer Sánchez (cflaquer@ajuntament.granollers.cat) Museu de Granollers-Ciències Naturals, Granollers (Barcelona).

Xavier Jordà Sanuy (xavier.jordasanuy@gmail.com) ADENC-Grup d'estudi dels RAtpenats de Sabadell (GeRAS), Sabadell (Barcelona).

Aquest article forma part del treball de recerca de secundària de batxillerat sobre ratpenats on es tracta la detecció i identificació dels quiròpters mitjançant un detector. Posteriorment, es realitza una comparació entre sonogrames, espectrogrames i espectres sonors d'algunes espècies de quiròpters segons la seva freqüència d'ecolocalització.

Paraules clau: ratpenats, ultrasò, detectors, ecolocalització, sonograma, espectrograma, espectre sonor.

This article is part of an end-of-upper-secondary-education research project about bats, focused on detecting and identification of bats through a detector. Later, a comparison is made between sonograms, spectrograms and sound spectra of some species of bats according to their frequency of echolocation.

Keywords: bats, ultrasound, detectors, echolocation, sonogram, spectrogram, sound spectrum.

INTRODUCCIÓ

Anomenats comunament com ratpenats o quiròpters, són mamífers de la l'ordre Chiroptera. Aquesta engloba més de 1100 espècies de ratpenats arreu del món. Aquestes representen un 20% de tots els mamífers convertint-lo en l'ordre més nombrós després dels rosegadors. Estan presents en tots els continents, exceptuant les àrees properes als pols i algunes illes remotes oceàniques (Hernández i Oliver, 2012).

Arreu d'un 70% de las espècies són insectívores i un 30% són fructífers. Tanmateix, es poden dividir en dos subordres: macroquiròpters i microquiròpters. A nivell europeu, trobem tres famílies

molt importants: els vespertiliònids (la majoria d'espècies europees) i el rinolòfids (inclouen ratpenats de ferradura) i molòssids. La seva alimentació pot ser variada depenent l'espècie. Uns s'alimenten d'insectes, altres són carnívors, també s'alimenten de nèctar, o els ratpenats vampirs, que es nodreixen de la sang de la bèl-lua.

OBJECTIU

L'anàlisi de dades de freqüències de ratpenats que es presenta en aquest article té com a objectiu facilitar que els estudiants de batxillerat puguin fer, amb un coneixement bàsic de les propietats del so, diferents estudis entre espècies de ratpenats o qui-

ròpters. També poden veure la relació entre les diferents matèries estudiades en secundària com són la física i la biologia, entre altres.

ECOLOCALITZACIÓ

La ecolocalització és un procés pel qual els ratpenats o quiròpters aconsegueixen obtenir informació del seu entorn, emeten unes freqüències de ultrasò en forma de crit (generalment entre 20 i 120 kHz) que reboten amb els objectes que hi ha al davant del mamífer, d'aquesta manera, el ratpenat els capta amb l'oïda aconseguint conèixer el seu entorn: poden situar-se en l'espai, detectar, classificar i localitzar les seves preses (Schnitzler i Kalko, 2001). Aquesta tècnica és utilitzada per a la caça d'insectes en situacions de foscor i comunicar-se amb altres membres d'una mateixa espècie.

L'espectrograma, l'espectre sonor i el sonograma

La informació continguda en el so que emeten els ratpenats es pot descriure visualment de diverses maneres; el espectrograma, l'espectre sonor i el sonograma són algunes de les més útils, i aquestes permeten la descripció detallada per realitzar la discriminació entre espècies.

Un **espectrograma** és una figura en un pla cartesià on l'eix x (abscissa) correspon al temps, usualment en mil·lisegons (ms), i l'eix y (ordenades) a la freqüència, usualment en kHz (Fenton, 2004). D'aquesta manera es pot descriure el canvi en la freqüència del so emès al llarg del temps. Aquestes representacions visuals permeten distingir els tipus de crits que fan servir els ratpenats: Freqüència Modulada (FM), Freqüència Constant (CF, per les seves sigles en anglès), Freqüència Quasi-Constant (QCF, per les seves sigles en anglès) (figures 1, 2 i 3).

L'**espectre sonor** consisteix en una representació gràfica de la freqüència (kHz, en l'eix x) i la intensitat (dB, en l'eix y). Permet identificar la freqüència que conté més intensitat i amb això determinar la freqüència pic del so emès (Fenton, 2004) (figures 4, 6 i 8).

El **sonograma** és una figura que representa l'amplitud de les ones (representades de manera sinusoidal) a les ordenades i el temps en l'abscissa. Amb aquesta figura es pot calcular la durada del so i la durada de l'interval entre els crits (figures 1, 2, 3, 5, 7 i 9).

Components dels polsos d'ecolocalització

Els polsos d'ecolocalització per a totes les espècies estan en general compostos de dos tipus d'elements:

Els elements de **Freqüència Modulada (FM)** els quals es caracteritzen pel canvi de la freqüència en el temps; generalment presenten amples de banda l'ordre de diverses desenes de kilohertz (kHz) (figura 1).

Elements de **Freqüència Constant (FC)** o banda estreta; aquests polsos es caracteritzen per no variar la freqüència al llarg del temps (figura 3). Són apropiats per a l'efectiva detecció d'ecos, a més de classificació de les preses (insectes). No obstant això presenten poca efectivitat en la localització d'aquests (Altriingham, 1996; Arita i Fenton 1997; Schnitzler i Kalko, 2001; Moss i Sinha, 2003).

La majoria dels microquiròpters usen polsos que consisteixen en combinacions d'aquests dos tipus d'elements, alguns autors com ara Kalko i Schnitzler (1993) fan servir en aquests casos el terme **Freqüència Quasi Constant (QFC)** per descriure els polsos d'aquest tipus (figura 2).

DETECTORS D'ULTRASONS

Com hem vist, l'estudi dels quiròpters es veu afectat per fet de ser nocturns, ja que desenvolupen la seva acció durant la nit, així com emeten unes freqüències de ultrasò. Com a solució d'aquest inconvenient, s'han desenvolupat uns detectors d'ultrasò, que aprofiten els crits que emeten els ratpenats com a sistema d'ecolocalització que s'utilitzen per estudiar aquests animals (com exemple pràctic veure Arcas i Fenollar, 2018a, 2018b). La composició d'aquests detectors d'ultrasò són:

- Micròfon sensible al rang d'ultrasò de les diferents espècies de quiròpters.
- Circuit electrònic que transforma la senyal en l'aplicació humana per estudiar-los.
- Dispositiu de sortida (gravadora de so, altaveu i targeta on gravar l'arxiu).

Són molt els tipus de detectors, amb diferents components i usos a nivell professional o a nivell de camp. Tot i així, existeixen diversos tipus de sistemes utilitzats per a la conversió i tractament dels ultrasons. El més utilitzats són quatre:

Detectors heterodins: sintonització d'una freqüència al detectors i segons el soroll audible que emet aquest es pot tenir una aproximació de l'espècie detectada sobre el terreny. Només se sent els crits emesos a freqüències molt properes a la sintonitzada. Generalment, no permeten fer enregistraments dels crits dels detectors i són més

econòmics. Encara que no és el millor detector per fer estudis d'investigació, alguns disposen d'un sistema per fer gravacions molt curtes.

Divisors de freqüència: la freqüència dels crits ultrasònics del ratpenats es divideixen per un factor (normalment per 10) i a la sortida s'escolten els sons en el rang audible. Per exemple, un ultrasò de 65 kHz se sent a 5 kHz.

Podem fer ús d'una gravadora de veu per analitzar els crits, però cal tenir present que la seva freqüència pot estar distorsionada degut a que aquesta està dividida per 10.

Detectors d'expansió de temps: enregistrament de manera digital sobre el so d'un ratpenats (aproximadament d'un segon) i la seva reproducció un altre cop a un ritme menor dins del rang audible. Permet la identificació d'espècies utilitzant un software d'anàlisi de so i amb uns sonogrames de molt alta qualitat. Durant la reproducció de sons, inhibeix el sentit del so als ratpenats que passen volant. Acostumen a ser més cars que els divisors de freqüència o els heterodins.

Detectors "full spectrum": els detectors més cars que enregistren els ultrasons en targetes SD. Aquests permeten una anàlisi dels crits ultrasònics de l'espectre acurat.

ANÀLISI DE DADES

En aquest apartat es realitza un anàlisi previ de les freqüències utilitzant l'espectrograma, l'espectre sonor i el sonograma. Per tenir més informació sobre les diferents espècies de quiròpters analitzades veure (1) i (2).

Sonograma i espectrograma de vespertiliònids

El primer sonograma que vam estudiar, va ser d'un vespertiliònid anomenat *Eptesicus serotinus* (ratpenat d'horta) (figura 1), que passat a l'espectre, vam obtenir una sèrie de polsos de tipus FMAX. La Freqüència de MÀXima intensitat (FMAX), és un tipus de freqüència quantitativa, on la freqüència arriba el seu màxim rang. Es representa com a freqüència modulada, és a dir, arriba a abastir un ample de banda (BW) molt ample amb duracions molt curtes (barres de freqüències amples).

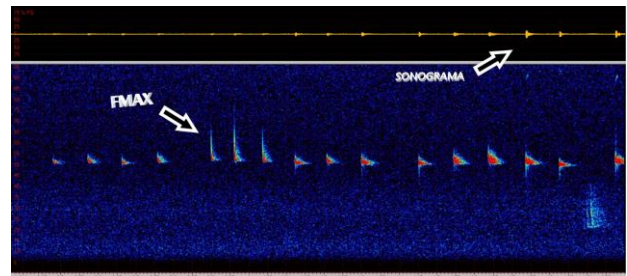


Figura 1. Sonograma i espectrograma d'un *Eptesicus serotinus* (ratpenat d'horta) (25-30 kHz de freqüència de màxima intensitat o FMAX)

Aquesta figura 1 és un ratpenat d'horta (*Eptesicus serotinus*) detectat en una llacuna al Delta de l'Ebre, amb una seqüència de caça (crits molt junts). Com podeu observar, l'ample de banda és molt gran degut al bandwidth (BW) i presenta unes duracions curtes. Els pics que pugen fins a 60 kHz representen el moment de caça on els crits estan molt junts i el so que emeten d'ultrasò augmenta. Al sonograma podem observar la linealitat de la freqüència que arriba un moment que és irregular (veure fletxa sonograma).

A la segona dada tractem amb l'estudi de la Pipistrella comuna (*Pipistrellus pygmaeus*) (figura 2), amb una freqüència de 52 kHz de FMAX i per tant, amb un tipus de freqüència modulada exactament igual a l'anterior. Aquesta està augmentada però presenta crits constants però de curta duració. També veiem en detall l'ample de banda en un període entre 0.03 i 0.05 ms de durada.

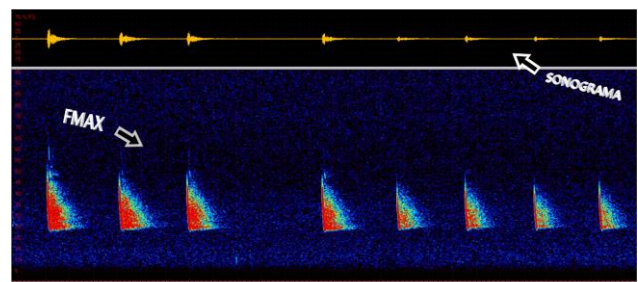


Figura 2. Sonograma i espectrograma d'un *Pipistrellus pygmaeus* (Pipistrella comuna) (52 kHz de FMAX).

La figura 2 es una Pipistrella comuna (*Pipistrellus pygmaeus*) de Les Planes de Vallvidrera que emet crits de freqüència modulada amb pics cap als 48 kHz. Podem observar l'esmentat abans, regularitat de la freqüència emesa vista al sonograma i el tipus de pols que presenta, amb una mena de triangle amb crits que arriben al seu pic als 48 kHz.

Per últim, l'estudi d'un ratpenat especial, que pertany a un gènere diferents dels comuns (vespertiliònids), que és el ratpenat de Ferradura gros (figura 3). És poc comú l'existència de ratpenats que emetin una freqüència de so tant elevada. En primer lloc, pensàvem que es tractaria d'un tipus de freqüència modulada, amb la seva corresponent forma triangular. Però quan ens van passar el sonograma i ho vam passar per l'espectre, els resultats van ser totalment diferents als esperats.

Amb una forma de grapa i una peculiaritat, que les seves "freqüències màximes" eren totalment constants i només disminuïa al principi al final de la duració del crit.

Efectivament, es tracta d'un tipus de Freqüència Constant (FC), que posseeix una estructura allargada, on la freqüència es manté constant en un llarg termini de temps i l'espectre té un pic en una única freqüència.

Sonograma i espectrograma de rino-lòfids

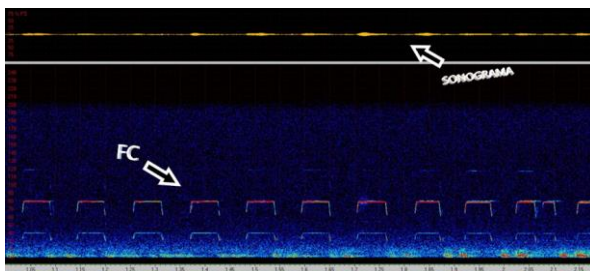


Figura 3. Sonograma i espectrograma d'un ratpenat de Ferradura gros (*Rhinolophus ferrumequinum*).

El ratpenat de Ferradura gros (*Rhinolophus ferrumequinum*) (figura 3) emet crits d'uns 80 kHz a freqüència constant (enregistrat a Tuixent, al Cadí). Com podem observar, presenta la forma de grapa allargada que es manté amb una freqüència constant de 80 kHz. Al sonograma observem com quasi bé no varia en cap moment en funció del temps i la durada entre so i so és de 0.07 ms.

Encara que no haguem estudiat altres dades de diferents espècies de ratpenats, fem evidència de polsos de tipus **FM-QCF (Freqüència Modulada gairebé constant)**, on combina les dues anteriors i s'observa una part **FM** clara i una **FC** que va decreixent contínuament. I per últim, polsos de tipus **QFC (freqüència gairebé constant)**, on la **FM** ha desaparegut i només emeten ultrasons que contenen **QCF**.

Exemples **FM-QCF**: *Serotine i Noctule* (inferiors a 32 kHz).

Exemple **QCF**: *Nyctalus leisleri* (inferior a 32 kHz).

Espectre sonor

Gràcies a l'editor d'àudio Audacity vam estudiar la freqüència de quiròpters mitjançant els seus pics més alts, és a dir, el rang màxim de freqüència que emetien (figures 4, 6 i 8). Vam descobrir en quin moment els ratpenats arribaven a aquesta intensitat de so, expressada en decibels (dB). Després, vam passar el sonograma en forma d'ona (figures 5, 7 i 9) per observar en quin moment i la duració quasi constant dels crits. Totes les gràfiques estan estudiades mitjançant gràfiques que representen els decibels (dB) en funció de la freqüència (Hz).

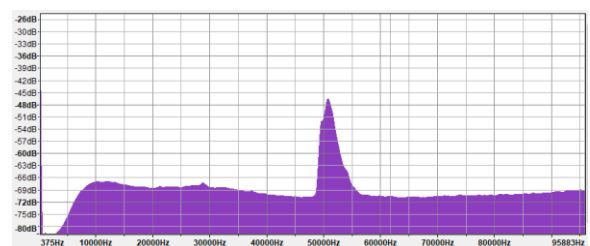


Figura 4. Espectre sonor de *Pipistrellus pygmaes* caçant en forma d'ona (dB).

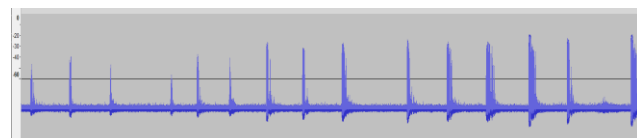


Figura 5. Sonograma de *Pipistrellus pygmaes* caçant.

Tant a l'espectre com al sonograma passat en forma d'ona i analitzades les seves freqüències, el resultat eren els esperats inicialment. Amb una sèrie de pics màxims, que podem nomenar rang de freqüència màxima que arriben en el cas de les Pipistrelles comunes als 47 dB.

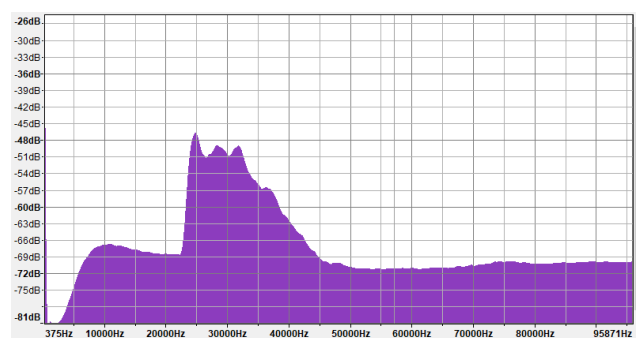


Figura 6. Espectre sonor de l'*Eptesicus serotinus*.

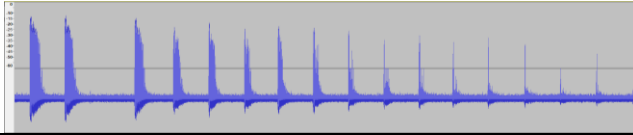


Figura 7. Sonograma de l' *Eptesicus serotinus*.

En aquest cas (figura 6 i 7), a l'espècie de ratpenats dels graners (*Eptesicus serotinus*), els seus pics més alts convergeixen en els 47 dB, però no són tan exagerats com a la Pipistrella comuna, tenint una sèrie d'ultrasons que es manté estàndard en funció dels 25 a 35 kHz. Diferenciem l'emissió de sons a 27 kHz com a FMAX.

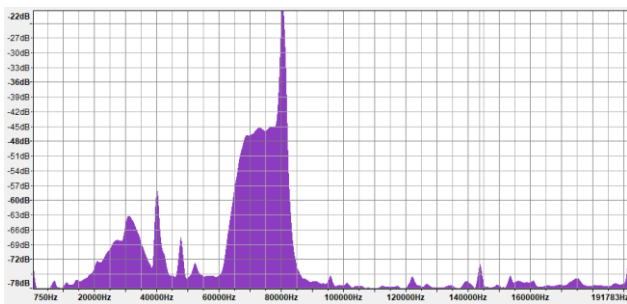


Figura 8. Espectre sonor de *Rhinolophus ferrumequinum* (Ferradura gros).



Figura 9. Sonograma de *Rhinolophus ferrumequinum* (Ferradura gros) en forma d'ona (dB).

En l'últim cas estudiat (figura 8 i 9), de l'espècie de ratpenat de Ferradura gros (*Rhinolophus ferrumequinum*), veiem que la gràfica presenta pics als 20 i 40 kHz d'uns 63 i 56 dB respectivament, però que la seva freqüència constant (FC) és als 80 kHz amb 22 dB. L'augment inicial dels crits emesos, la constant de freqüència durant els primers ms (mil·lisegons) i la disminució d'aquesta de manera dràstica, dona la forma de grapa representada a l'espectrograma anterior.

El sonograma en forma d'ona ens verifica el moment de constància on l'amplitud d'ona augmenta en forma de nanses.

CONCLUSIONS

A partir de l'anàlisi de les dades en referència a l'estudi d'espectrogrames, sonogrames i espectres sonors, hem arribat a les conclusions següents:

- Els espectrogrames, sonogrames i espectres sonors presenten diferents visualitzacions dependent de la seva freqüència emesa.
- El rang de freqüència quan els ratpenats cacen arriba a la seva freqüència màxima respecte la freqüència mitjana.
- Hem vist que segons l'espècie de ratpenat, pot variar molt el tipus de freqüència. També destacar la importància de l'anàlisi de dades alhora de veure els resultats als espectrogrames.
- L'ús de la ecolocalització per a l'estudi dels ratpenats és una eina fonamental per als investigadors. Amb un coneixement bàsic de les propietats del so es poden fer estudis de les relacions entre espècies de ratpenats, dels ratpenats amb les seves fonts d'aliment, i l'entorn de la distribució i abundància dels insectívors a escala del paisatge o escales biogeogràfiques. Els diferents tipus d'equips i micròfons disponibles al mercat ofereixen un ampli rang d'alternatives.
- En aquest treball es pretén fomentar l'aplicació del mètode científic i l'aprenentatge en la recerca, i interessar i conscienciar a l'alumnat en la conservació dels ratpenats o quiròpters. També, gràcies a aquest treball ens permet ampliar el coneixement del moviment ondulatori estudiat en classe.
- Hem aplicat les classes teòriques d'acústica i els diferents tipus de freqüències estudiades a un cas pràctic. També s'ha vist la relació entre diferents disciplines com la biologia i la física.

PROPOSTES DE FUTUR

- S'hauria de continuar un protocol de seguiment, identificació i detecció de quiròpters on l'inexpert aprèn una sèrie de recursos per l'aprenentatge, basats en l'ús de detectors heterodins per detectar l'ultrasò i el reconeixement de l'espècie pel tipus de vol (estudi de rutes de vols aquàtics) com el seguiment dels ratpenats aquàtics de Catalunya (programa Quirorius [4] i SEQUI [5]).
- L'estudi de més tipus d'espècies a nivell d'una regió o comunitat autònoma, amb les seves anàlisi de dades.
- Major nombre de deteccions i seguiment de ratpenats en un termini d'un any sencer, fent així estadístiques i canvis dins de les mateixes espècies a nivell general.

Bibliografia

- Altringham, J. (1996). *Bats Biology and behavior*. Oxford University Press.

- Arcas P.; Fenollar J. (2018a). Detecció i identificació de quiròpters segons la seva bioacústica. Publicaciones didácticas. *Revista profesional de investigación, docencia y recursos didácticos*, 95.
- Arcas P.; Fenollar J. (2018b). Pràctica sobre el càlcul de les propietats fonamentals del so a partir de la freqüència d'ultrasò d'ecolocalització dels ratpenats. *Revista Ciències*, 35, 13-16.
- Arita, H.; Fenton, B. (1997). Flight and echolocation in the ecology and evolution of bats. *Tree*, 12 (2), 53-58.
- Fenton, M.B. (2004). *Reporting: essential information and analysis*. dins M. Brigham, E.K. V. Kalko, G. Jones, S. Parsons and H.J.G. A. Limpens, editors. *Bat echolocation research: tools, techniques and analysis*, 133-140. Bat Conservation International, Austin.
- Hernández V. J.; Oliver P. (2012). *Murciélagos. Introducción a las especies ibéricas*. Tundra: Cuadernos de Naturaleza Tundra.
- Kalko, E. K. V.; Schnitzler Y. H. U. (1993). Plasticity in echolocation signals of European pipistrelle bats in search flight – implications for habitat use and prey detection. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 33, 415-428.
- Moss, C.; Sinha, S. (2003). Neurobiology of echolocation in bats. *Current Opinion in Neurobiology*, 13, 751-758.

Schnitzler, H. U.; Kalko E. K. V. (2001). Echolocation by insect-eating bats. *BioScience*, 51, 557-569.

Altres recursos d'interès:

Pàgines d'Internet amb informació sobre els ratpenats o quiròpters:

- Els ratpenats de Catalunya. Fitxes de ratpenats: <http://www.ratpenats.org/CAT/especies/Mmy.php>
- Taula de freqüències. Freqüències característiques dels quiròpters que podem trobar a Catalunya: http://www.quirorius.org/pdf/Taula_frequencies.pdf
- Descobreix els ratpenats: <http://www.ratpenats.org/>

Projectes de seguiment de quiròpters:

- QuiroRius: seguiment de ratpenats aquàtics: <http://www.quirorius.org/el-proyecto/>
- Fundació Limne: SEguiment de QUIròpters amb ultrasons (SEQUI): http://limne.org/index.php/es/?option=com_content&view=article&layout=edit&id=85