



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

## Ecoacústica del gall fer *Tetrao urogallus* al Pirineu català

Olga Jordi Torres

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) i a través del Dipòsit Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) y a través del Repositorio Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

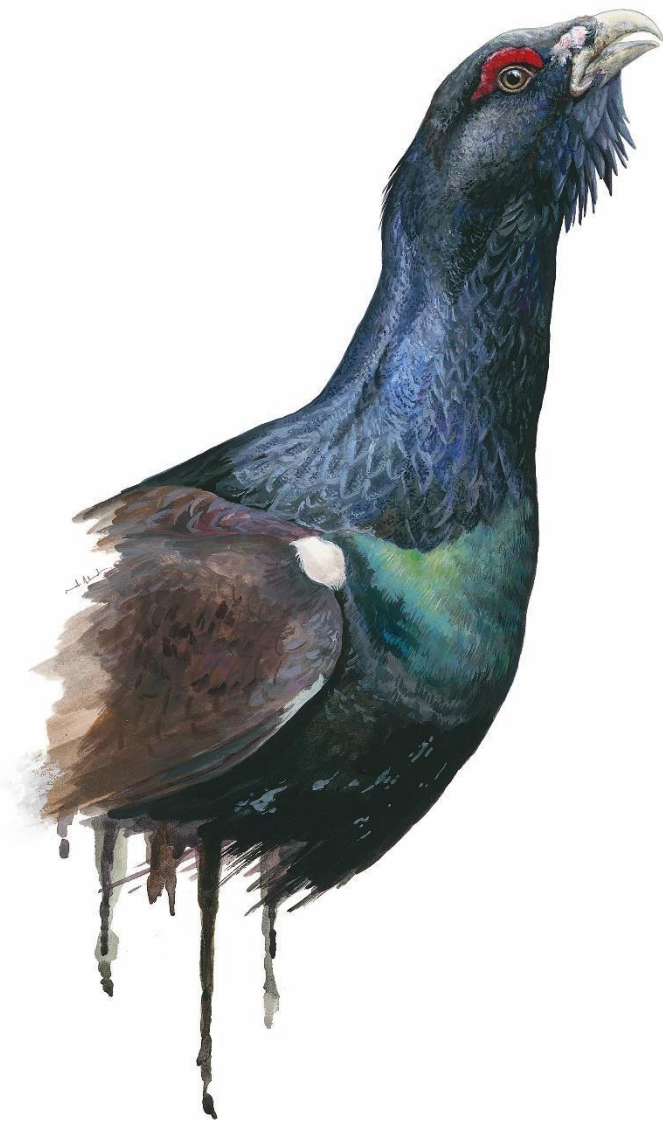
**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) service and by the UB Digital Repository ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

---

**ECOACÚSTICA DEL GALL  
FER *TETRAO UROGALLUS* AL  
PIRINEU CATALÀ**

---

**Tesi doctoral**



**OLGA JORDI TORRES**

**2024**





Facultat de Biologia

Departament de Biologia Evolutiva, Ecologia i Ciències Ambientals

Secció de Zoologia i Antropologia Biològica

Programa de Doctorat en Biodiversitat

## **ECOACÚSTICA DEL GALL FER *TETRAO UROGALLUS* AL PIRINEU CATALÀ**

Memòria presentada per Olga Jordi Torres per optar al grau de Doctora per la Universitat de  
Barcelona



Olga Jordi Torres  
Doctoranda

Dr. Santiago Mañosa Rifé  
Universitat de Barcelona  
Director i tutor de la tesi

Dr. Angelo Farina  
Universitat de Parma  
Director de la tesi

Portada: Blanca Martí

Fotografies: Clara Cortadellas



*“ La bona comunicació és tan estimulants com el cafè negre i igual de difícil d’oblidar al dormir ”. Anne Morrow Lindbergh*



Gabi i Emily. Foto: arxiu propi



*Als meus pares i a la bona amiga Nadja*

“La paraula és condició de realitat”- Gisela Riba





# AGRAÏMENTS



Nabiu  
Foto: Clara Cortadelles



---

## Agraïments

---

Mai haguera pogut imaginar que un dels meus somnis, com era fer la Tesi Doctoral, es faria realitat. Aquí soc, redactant els agraïments i adonant-me que aquell somni que tenia quan fa uns anys vaig acabar la carrera, de cop s'ha materialitzat i s'ha transformat en una història plena d'aprenentatge no sols acadèmic, sinó vital.

Ja de ben petita m'agradaven el Pirineu i els ocells, quina il·lusió que de gran pugui aportar un granet de sorra en la conservació d'ambdós.

Els "culpables" d'això, puc dir que són els meus pares. El meu pare per regalar-me la capacitat de somiar i dir-me amb una petita gravadora regalada fa uns anys "a veure què pots fer amb això" i la meua mare per transmetre'm el caràcter tossut i resiliènt per fer les coses i tirar-les endavant.

Abans que aquesta història comencés, una bona amiga meua em va dir "sabes que tienes que hacer realidad este sueño o intentarlo, si no lo haces te estaràs fallando a ti misma y en esta vida lo que nunca puedes hacer es fallarte a ti misma". Moltíssimes gràcies, Nadja Weisshaupt per haver-me donat l'empenta i suport moral per iniciar i completar aquest camí.

Vull agrair immensament l'ajuda, suport moral, acadèmic i humà al meu director i tutor de tesi Santi Mañosa. Moltíssimes gràcies per haver-me ensenyat tant, amb tanta paciència i bones explicacions. Sempre has trobat les paraules i el tracte adequat per ajudar a mantenir la meua motivació en moments d'estrès durant el procés.

Moltíssimes gràcies també al meu codirector Angelo Farina, sense tu com a codirector, res d'això haguera sigut possible. Gràcies als teus coneixements sobre acústica, he après coses que d'altra manera no haguera pogut i això ha marcat la diferència del treball i ens ha fet anar molt més lluny en el camí per la conservació de la biodiversitat amb l'acústica com a mitjà. Moltes gràcies també per la bona acollida que em fèieu tots al departament durant les meves estades a la Universitat de Parma. Qui hauria dit que la ingeriria acústica practicada a la Casa della Musica de Parma, es podria aplicar en la conservació de la biodiversitat?.

No em puc oblidar d'agrair també al Tècnic del Servei de Fauna de la Generalitat de Catalunya Diego Garcia, al que jo vaig acabar anomenant des de la confiança i el respecte "home dels galls". Com a especialista i responsable d'ambients d'alta muntanya i gall fer, em va aconsellar i ensenyar tot el que va ser necessari per poder realitzar la tesi. Amb ell vaig aprendre també a "pensar com un gall", identificant zones predilectes de gall enmig dels boscos de pi negre i rastres, sabent la manera correcta d'entrar al bosc i realitzar certes prospeccions. Quatre línies són poques per resumir amb qualitat les vivències que hem compartit, però puc dir que totes han sigut fructíferes i han generat bons records.

Gràcies al Diego, vaig poder conèixer posteriorment als que acabarien sent bons companys i amics, aquí em refereixo a les persones del Servei de Fauna i Flora de la Generalitat de Catalunya, als qui puc agrair no només les facilitats administratives necessàries per dur a terme el projecte, sinó també els coneixements extres que m'han proporcionat sobre els ambients d'alta muntanya i les espècies protegides. Moltes gràcies també pels bons moments que hem viscut plegats.

Vull agrair a la Tècnica del Parc Natural de l'Alt Pirineu Elisenda Montserrat, que va ser una de les primeres persones que sempre va trobar temps per ensenyar-me tot el referent als bàsics de la maduresa forestal. Moltes gràcies també a tot l'equip del Parc Natural de l'Alt Pirineu, al Tècnic del Conselh Generau d'Aran Ivan Alfonso i als companys de Paisatges Vius per haver-me facilitat la logística i el coneixement necessaris per desenvolupar les meves tasques. Moltes gràcies també al fotògraf de natura Javier Montes, per haver-me ensenyat a fixar-me en l'etologia del gall fer i fer-me a donar de què si t'hi fixes bé, cada individu de gall fer té el seu caràcter i manera de ser. Gràcies a la meva homònima Olga Nicolás, per compartir moments de suport durant el procés. Sempre em farà gràcia haver coincidit ja no només en nom sinó en espècie d'estudi i entorn.

Efectivament, cada organisme viu és únic i com em va dir un dia la meva bona amiga de muntanyes Meritxell-Anfitrite Álvarez "has de posar nom als organismes vius amb qui treballes, com diu en Gabi Martínez, quan poses nom a una cosa o organisme és quan el veus diferent i més proper". Així va sorgir el nom de dos dels galls més especials d'aquest estudi, Gabi i Serrallonga, en homenatge a aquests dos grans escriptors de natura Gabi Martínez i Jordi Serrallonga, als que vaig tenir el plaer de conèixer entre xerrades de conservació de la natura i llibres a la llibreria de la Meritxell anomenada Naturallibres,

que per si no ho he dit, és una magnífica llibreria d'Alins de la qual mai me'n canso de parlar-ne bé i on la Meritxell em va ensenyar diverses vies de comunicació científica que personalment jo mai havia treballat. Moltíssimes gràcies també per les muntanyes compartides, que sempre van ser font d'inspiració i de pau durant aquest procés de tesi. Les continuarem pujant plegades sempre que puguem i en bona companyia de l'estimat Brontë.

Tot i que el Pallars Sobirà i el seu Parc Natural al principi se'm feia molt gran, literalment perquè és el més gran de Catalunya, a poc a poc van aparèixer bons amics amb qui no només vaig compartir i comparteixo bons moments, sinó que em van ajudar a avançar en aquesta aventura de tesi en tot moment. Gràcies, Miriam Masramon, altrament dita Calverante, per sempre ser-hi a nivell emocional i obrir-me les portes de casa teva i de la teva vida tot esdevenint en un dels pilars més sòlits que m'ha permès avançar. Caldrien massa paraules per descriure tot lo bo que m'has transmès durant el procés, i malgrat que aquí no tinc l'espai necessari per plasmar-les, faré referència a la gran frase que em vas dir en un dels moments finals de la tesi "pensa en tot el que t'ha aportat a la teva vida el fet que un dia vas decidir saber coses del gall fer i que seria de tu si no ho haguessis fet. Sols amb això, has guanyat la partida". I es que és ben cert que a vegades ens hem de deixar endur pels "somnia dels ocells" i anar "alataker" com diria en Ricard.G Endavant amb la conservació de la biodiversitat amb la força de l'actitud descrita com "mala hierba nunca muere" com diria la Montserrat i que "des de l'anonimat", com expressaria la meva companya del servei de fauna de la qual no en mencionaré el nom, tots podem posar el nostre granet de sorra per conservar les espècies i els hàbitats que ens rodegen. En aquesta tesi, humilment jo també he posat el meu granet de sorra pel gall fer i els boscos de pi negre.

Recordo quan al segon any de tesi estava a punt de començar els treballs de camp de maig per tal de gravar els galls i buscava refugi dies abans dels mostrejos. El Pallars estava nevat, tots els refugis estaven tancats. tots? "tots menys un!" com dirien dels gals: el Refugi d'Estaon, el que puc dir que és "el millor poble del món". Un dia de maig em vaig plantar enfront del refugi amb les motxilles i tot l'equipament, feia fred i de cop em va obrir la porta una noia i em va fer passar tot ensenyant-me la meva habitació. Aquella noia, el seu home i el seu fill, els responsables del refugi, es van convertir en uns dels meus millors amics o millor dit, àngels de la guarda amb els quals posteriorment viuria aventures i anècdotes que mai haguera imaginat. Moltíssimes gràcies de tot cor Txell,

Aléix i Enok per fer-me sentir sempre com a casa, ensenyar-me tant i haver compartit amb mi tantes vivències que espero que en siguin moltes més. Amb vosaltres, el Pallars em semblava menys salvatge, ja que em vau ensenyar a "ensalvatgir-me degudament" i els treballs de camp en els boscos nevats de pi negre se'm van fer menys durs i menys freds.

Moltíssimes gràcies, Clara Cortadelles, una de les bones amigues que hi va ser des del principi. La teva màgia, espiritualitat i reflexions, van fer-me veure una dimensió encara més enllà de la que estava vivint entre galls i acústica. Entre llunes, realitats comprimides i natura, m'has ensenyat a avançar i aprendre espiritualment de tots els processos i moments en els quals m'he trobat.

Moltes gràcies a totes les meves amigues "lechuzas pallareses": Ana, Anna, Flor, Pepo, Marga, Gemma, Jordi i Blanca, pels bons moments, pel suport i per la gran ajuda als treballs de camp. Moltes gràcies per sempre ser-hi i deixar-me formar part d'aquest gran "equip pajarero" que en tantes ocasions ens acompanya.

Sou molts i cadascú teniu un gran valor. Moltes gràcies als meus amics més propers, que sempre m'heu animat en les meves "bogeries ocellaires" i m'heu acompanyat en algunes etapes d'aquestes: Albert, Claudia, Saray, Paula, Maria, Marc, Maribel, Maja, Iris, Marta, Mireia, Alba, Cristina, Paola, Marta i Paloma. Tenies raó Saray quan vas dir allò de "la cabezoneria que tienes serà lo que te hará tirar para adelante". Gràcies, Paula per les estones d'humor que m'has donat en moments d'estrès i pels moments de calma entre fornets càlids de Sants i sortides refrescants. Merci Albert per les sortides a la natura entre muntanyes, boscos i ocells, així com pels teus ànims sempre tan positius en tot moment. Merci Claudia per la teva empenta en els treballs de camp i per la teva energia positiva entre muntanyes. Moltes gràcies Marta. O, la meva bona amiga que de manera espontània va aparèixer port de Boet, i que amb els seus astres i cercles del destí, sempre ha trobat la paraula i reflexió necessàries per fer-me tirar endavant inclús quan tot semblava un vòrtex d'extinció.

Gràcies, el meu amic Jordi, pels entrenaments compartits de Calistenia sempre amb somriures, amb els que hem mantingut el bon esperit i el bon estat físic per afrontar-ho tot. Gràcies, Sílvia i Anna. E per sempre acompanyar-me en els moments clau inclús de manera virtual. Els moments de cafè filosòfic i "couching" grupal eren com una til·la d'alleujament mental.

Gràcies Sisco pel teu bon flow amb el teu "altarcito" i els teus somriures. Gràcies per les teves paraules d'ànims a que comencés a escriure, van ser les primeres del procés de redacció.

Moltes gràcies a la meva bona amiga Gisela, per sempre entendre'm i motivar-me en totes les idees, per donar-me moments de pau i alegria entre cultura i arts escèniques, entre cafès i filosofades, així com entre muntanyes. Sense tu, moments clau com creuar un riu a prop de l'estany del Rosari o seguir caminant entre roques al parc natural haguessin pogut amb mi. I es que a vegades a la vida hi ha moments clau que semblen un abisme i que els has de creuar fent un "Grand Jeté", però si és de la mà de les persones adequades, aquest abisme es redueix.

Com be dèiem fa anys amb la Maja fent referència a una frase de Gandalf del Senyor dels Anells "No he vencido al fuego y a la muerte para intercambiar falacias con un gusano sarnoso", no ens podem rendir mai i sempre hem de lluitar pel que volem. Aixecar-te pel matí amb un "buongiorno" com diria en Ricard.C i fer front al que calgui.

Moltes gràcies també a la meva bona amiga Pilar Oliva, que ha sigut clau en els últims moments d'aquesta tesi aconsellant-me i animant-me fins al final. El teu treball i la teva manera de fer han sigut una gran inspiració. Espero seguir compartint amb tu moments entre natura i rapinyaires.

Moltes gràcies Anna (cromàtica) per transmetre'm moments de tranquil·litat inclús a nivell de l'inconscient i per la teva sensibilitat, creació i passió pel que t'envolta, actitud que m'inspira i m'enriqueix a nivell humà. Capaç d'insuflar qüestions humanes i ètiques mentre et parla de l'escala d'inferència. Gràcies també per fer-me veure que hi ha persones que per un "petit canari" son capaces de sacsejar part d'un sistema i que valoren i s'emocionen amb detalls com una libèl·lula o una marmota.

Moltes gràcies Sonia, que em vas donar una de les últimes empentes motivacionals i consells.

Moltes gràcies Antoni també pels teus consells i bones paraules en els moments finals.

Gràcies també als estudiants de pràctiques de final de carrera per haver-me ajudat de manera tan efectiva i amb tan bona energia als treballs de camp. Sense vosaltres això



tampoc haguera sigut possible. No oblidaré mai aquell "risotto" de bolets. Moltes gràcies, Neus, Vicent, i Javier.

Sou molts els que formeu part d'aquesta història en format de tesi doctoral i em falten pàgines per mencionar-vos a tots, però a tots i cadascun de vosaltres de tot cor, moltes gràcies.

Aprofito per agrair-me a mi mateixa tot l'esforç i la perseverança. I per agrair que ni el word, ni la R, ni els meus micròfons em van fallar mai i que el meu Suzuki (en Jaume) sempre em va portar amb èxit per totes les pistes forestals durant els mostrejos.

En les següents pàgines podeu llegir aquesta història entre galls i boscos alpins, una història que no ha fet més que començar, perquè com diria en Paco Lloret "una tesi no s'acaba mai, una tesi s'abandona. S'abandona a què continuï caminant per ella mateixa".





# ABSTRACT





---

## Abstract

---

Animal communication takes place in environments with specific soundscapes, composed of the sounds generated by living beings (biophony), the sounds of anthropic origin such as that of machinery or cars (antropophony) and the sound generated by the elements such as wind, rain or earthquakes (geophony). Due to the interferences that this soundscape and the characteristics of the physical environment may cause during animal communication, animals adopt strategies which optimize the transmission of their message. The message that each individual sends to the rest of the individuals through their vocalizations, both intra and inter specific, has importance in the day to day life of the animals both for territorial and reproductive purposes. Sounds generated by animals contain characteristics of structure, duration, spectrum and intensity that give the animals a vocal signature that distinguishes them from other individuals. We found that the Western Capercaillie *Tetrao urogallus* male call characteristics which make up the individual vocal signature are those that refer to the frequency and the duration of the call components. This way, Western Capercaillie male can be individually identified and differentiated from each other through their bio-acoustic characteristics. This information can be used in the future to create automatic identifiers that differentiate passive acoustically recorded vocalizations on an individual scale. The data obtained by passive acoustic monitoring at both the individual and species scale can also be useful for biodiversity monitoring. This requires an optimal bio-acoustic sampling protocol, covering a well defined sampling area and providing high quality acoustic records. To achieve this, it is necessary to calculate the distance of propagation and the distance of detection of the acoustic signals. This can be achieved by knowing the real amplitude (dB) value and the characteristics of the microphone. We were able to determine for the first time the real amplitude of a calling male Western Capercaillie and obtain the distance of propagation and the distance of detection. This information can be used to plan bio-acoustic sampling protocols with any type of microphone, to obtain the necessary acoustic data for monitoring purposes. Habitat structure can influence the persistence of a given species in an area by different ways, including the alteration of food availability or the provision of refuges, among other. Here, we explored how the characteristics of sound propagation in an environment can also play a role on determining the persistence of Western Capercaillies on previously occupied forest plots, by facilitating or impairing

communication. To investigate this, we compared forest structure and sound propagation properties on occupied and abandoned forest plots. The sound propagation characteristics of the deserted sites may affect the communication of capercaillies creating distortion and masking of the acoustic signal by excessive reverberation and presence of background noise. Therefore, our results suggest that forest management for Capercaillies should not only favor a forest structure to provide shelter and food, but also to keep the right acoustic habitat properties to enhance animal communication.

---

## Resum

---

La comunicació animal té lloc en ambients amb un paisatge sonor específic, compost pels sons generats pels éssers vius (biofonia), els sons d'origen antròpic com el de la maquinària o els cotxes (antropofonia) i el so generat pels elements com el vent, la pluja o els terratrèmols (geofonia). A causa de les interferències que aquest paisatge sonor i les característiques de l'entorn físic poden causar durant la comunicació animal, els animals adopten estratègies que optimitzen la transmissió del seu missatge. El missatge que cada individu envia a la resta dels individus a través de les seves vocalitzacions, tant intra com interespecífiques, té importància en el dia a dia dels animals, tant amb finalitats territorials com reproductives. Els sons generats pels animals contenen característiques d'estructura, durada, espectre i intensitat que donen als animals una signatura vocal que els distingeix d'altres individus. Hem trobat que les característiques de la veu dels mascles de gall fer *Tetrao urogallus* que componen la signatura vocal individual són aquelles que fan referència a la freqüència i la durada dels components de la seva veu. D'aquesta manera, els individus es poden identificar i diferenciar entre si a través de les seves característiques bioacústiques. Aquesta informació es pot utilitzar en el futur per crear identificadors automàtics que diferencien a escala individual les vocalitzacions enregistrades amb gravadores autònomes. Les dades obtingudes mitjançant monitoratge acústica passiva, tant a escala individual com d'espècie, també poden ser útils per al monitoratge de la biodiversitat. Això requereix un protocol de mostreig bioacústic òptim que cobreixi una zona de mostreig ben definida i que proporcioni gravacions d'alta qualitat. Per aconseguir-ho, cal calcular la distància de propagació i la distància de detecció dels senyals acústics. Això es pot fer coneixent el valor real d'amplitud (dB) i les característiques del micròfon. Vam ser capaços de determinar per primera vegada l'amplitud real de la veu d'un mascle tot obtenint la distància de propagació i la distància de detecció del seu so. Aquesta informació es pot utilitzar per planificar protocols de mostreig bioacústic amb qualsevol mena de micròfon per obtenir les dades acústiques necessàries a efectes de monitoratge. L'estructura de l'hàbitat pot influir en la persistència d'una determinada espècie en una zona per diferents vies, incloent-hi l'alteració de la disponibilitat d'aliments o la provisió de refugis entre d'altres. En aquest sentit, hem explorat com les característiques de la



propagació del so en un entorn també poden jugar un paper determinant en la persistència del gall fer en parcel·les forestals prèviament ocupades, facilitant o deteriorant la comunicació. Per investigar-ho, vam comparar l'estructura forestal i les propietats de propagació del so en parcel·les forestals ocupades i abandonades. Les característiques de propagació del so dels llocs abandonats poden afectar la comunicació dels individus creant distorsió i emmascarament del senyal acústic per reverberació excessiva i presència de soroll de fons. Per tant, els nostres resultats suggereixen que la gestió forestal del gall fer no només hauria d'afavorir una estructura forestal per proporcionar refugi i menjar, sinó també per mantenir les propietats d'hàbitat acústic adequades per millorar la seva comunicació.





# ÍNDEX





---

# Índex

---

- **Agraïments** ..... 8
- **Abstract** ..... 18
- **Introducció** ..... 30
  - El paisatge sonor ..... 32
  - Hàbitat acústic i estructura forestal.....38
  - Ambisònica i les anàlisi de resposta impulsiva ..... 42
  - Marc d'estudi ..... 50
    - \* Espais Naturals protegits: Parc Natural de l'Alt Pirineu... ..... 50
    - \* El gall fer ..... 55
- **Objectius, estructura i desenvolupament de la tesi** ..... 66
- **Capítol 1.** Vocal individuality of Western Capercaillie *Tetrao urogallus* male calls, an ambisonic bio-acoustic approach..... 76
- **Capítol 2.** Sound amplitude (dB) of Western Capercaillie *Tetrao urogallus* male calls ..... 98
- **Capítol 3.** Forest sound propagation and habitat selection in Western Capercaillie *Tetrao urogallus*..... 110
- **Discussió** ..... 138
- **Conclusions** ..... 150
- **Referències** ..... 154



# INTRODUCCIÓ



Cim Monteixo  
Foto: Clara Cortadellas





---

# Introducció

---

## El paisatge sonor

A la profunda selva de Dominica, una illa del Carib, hi habita el Solitari gorjarogenc *Myadestes genibarbis*, un ocell que els locals del territori anomenen “l’esperit” fent referència al so de tipus “sospir metal·litzat” que emet i que pot ser escoltat des d’alguns dels racons del bosc. Aquest so tan característic i a la vegada mimètic amb l’entorn és l’avís que algú ha entrat al seu territori on habita, però difícilment es deixa veure. Heu passejat mai pel bosc i tot escoltant l’entorn heu tingut la sensació de no saber discernir entre els sons produïts per la vegetació o pels animals? Heu estat mai enmig d’un bosc de pi negre i, tot escoltant aquell so que recorda una fusta colpejada, tenir la sensació que hi ha uns altres ulls que us miren des d’algun racó d’entre les branques? Us heu fixat mai en el fet que hi ha boscos que per molt “bonics” que siguin, no hi ha una gran orquestra que toqui una rica melodia?.

Des de temps ben antics hem estat rodejats de sons arreu del món. Els sons sempre han format part de la cultura, comunicació i supervivència dels éssers vius (Wolff, 2021). Essent característics de cada lloc, els ambients sonors han anat canviant amb la història. Amb la Revolució Industrial alguns dels ambients amb abundància de sons naturals es van anar substituint per ciutats dominades per sons artificials com els de les màquines (Schafer, 1977). No va ser fins als anys setanta que el compositor i investigador canadenc R. Murray Schafer va fer ús del concepte “soundscape”, es a dir, “paisatge sonor” tot definint-lo com “les propietats auditives del paisatge” (Schafer, 1977). Actualment, l’Organització Internacional per a l’Estandardització ho defineix com “un entorn acústic tal com és percebut o experimentat i/o entès per una persona o persones en el seu context” (ISO, 2014).

Schafer (1977) va exposar la relació que existeix entre el paisatge sonor i el lloc on s’esdevé, argumentant que “cada paisatge sonor té els seus tons únics i sovint aquests són tan originals que constitueixen marques sonores”. Els paisatges sonors contenen informació rica sobre l’entorn i són indicadors dels canvis que s’hi produeixen (Deichmann et al., 2018; Pijanowski et al., 2011). La ciència que estudia el paisatge sonor des de l’àmbit de l’ecologia s’anomena Ecoacústica (Pijanowski et al., 2011; Farina &

Gage, 2017). Aquesta és una ciència interdisciplinària entre la Bioacústica (disciplina que estudia els sons produïts pels organismes vius) i l'Ecologia (ciència que estudia els organismes vius i la relació entre ells i amb el medi en el qual viuen) que investiga els sons naturals i antropogènics i també la seva relació amb l'entorn (Pijanowski et al., 2011; Pavan et al., 2015). El potencial que té la bioacústica per a la recollida de dades amb mínimes intrusions i impacte en permet l'aplicació a una àmplia gamma d'entorns (Snaddon et al., 2013; Becker et al., 2022; Gibb et al., 2018). La informació que aporta, ajuda a la presa de decisions sobre la gestió de la biodiversitat, tasca crítica per als governs i entitats de recerca que treballen per frenar-ne la pèrdua (Sebastián-González & Hart, 2017; Farina, 2018; Decret 172/ 2022). Juntament amb altres tècniques de detecció, la bioacústica aporta informació per analitzar l'abundància i la distribució d'organismes tant a escala d'espècie com d'individu (Pavan et al., 2015; Buxton et al., 2018; Abrahams, 2019). Per exemple, proporciona informació complementària sobre els processos migratoris detectats en estudis amb radar meteorològic i ciència ciutadana (Weisshaupt et al., 2024). Les dades obtingudes amb bioacústica es poden combinar amb paràmetres de l'ecologia i comportament dels organismes per tal d'estimar-ne els patrons d'ocupació i les dinàmiques poblacionals que al seu torn reflecteixen l'estat de conservació dels ecosistemes naturals que ocupen (Sebastián-González & Hart, 2017; Gasc et al., 2018; Penar et al., 2020; Ross et al., 2023). Buxton et al. (2018) van analitzar el potencial d'utilitzar índexs acústics per avaluar la diversitat, la riquesa i el nombre total de vocalitzacions d'animals als Ghats Occidentals, una regió de punts calents de biodiversitat al sud de l'Índia. Kobayashi et al. (2018) van instal·lar gravadores i micròfons per analitzar l'evolució de la biodiversitat a Naime, Fukushima, que és una zona d'accés no recomanable, ja que està afectada per terratrèmols, tsunamis i radiació.

Els paisatges sonors són doncs un recurs natural reflex de l'estat dels sistemes naturals i de la seva biodiversitat que mereix ser estudiat, gestionat i conservat (Scarpelli et al., 2020). Els components del paisatge sonor s'agrupen segons el seu origen: els sons produïts pels organismes vius formen part de la Biofonia, els sons d'origen geofísic o atmosfèric formen part de la Geofonia i la Antropofonia és constituïda pels sons produïts per l'espècie humana (Odom et al., 2021; Krause, 2008). Tot i que la Geofonia és aparentment una de les àrees menys estudiades de l'ecoacústica (Farina et al., 2021), aquesta presenta una gran importància pel fet que és un dels components del paisatge sonor que trobem en tots els ambients i que al seu torn afecta els organismes vius (Farji-

Brener et al., 2018; Schoeman et al., 2021). L'aire, els rius i la pluja produeixen un soroll de fons que de manera més o menys contínua interfereix amb la resta de senyals acústics (Geipel et al., 2019). Les turbulències del vent generen freqüències d'entre 200 hercis (Hz) i 10 quilohercis (kHz) amb intensitats de so (dB) més elevades als espais oberts sense arbres a causa de la velocitat del vent (Ellinger & Hodl, 2003; Bolin, 2009). La pluja ocorre de manera regular en tots els ambients, exceptuant els deserts, generant freqüències de so d'entre 100 Hz i 5 kHz que interfereixen amb els senyals acústics del 94 % de les espècies de vertebrats, sobretot en l'espectre audible del so (dels 20 Hz als 20 KHz) (Lengagne & Slater, 2002). Així mateix, els rius també generen freqüències de l'entorn d'1 kHz (Brumm & Slater, 2006). Existeixen d'altres fonts sonores que també generen infrasons (freqüències inferiors a 20 Hz), que viatgen distàncies de més de 10 km, com són els trons o els terratrèmols (Johnson et al., 2006). Les interferències que generen de manera quasi constant aquestes fonts de soroll de fons, poden reduir l'espai de comunicació acústica dels animals de l'entorn i aquests han d'adoptar mesures per tal d'optimitzar la transmissió del seu senyal acústic maximitzant la prevalença d'aquest sobre el soroll de fons (Lengagne & Slater, 2002). Dubois i Martens, (1984) van descobrir que les granotes i els ocells que vivien a prop dels rius, es comunicaven en un rang de freqüències que destacava per sobre del soroll de fons de l'aigua corrent. Degut al fet que la pluja i el vent ocorren generalment de manera temporal, moltes espècies no es comuniquen mentre aquest factor és present (Lengagne & Slater, 2002). Les espècies que viuen en entorns oberts sense arbres com poden ser els ocells que habiten els prats o entorns estèpics on el vent genera grans interferències sonores (Ellinger & Hodl, 2003), adopten mesures com l'increment de freqüència (Hz), intensitat (dB) o repetició dels components del seu cant (Priyadarshani et al., 2018).

L'Antropofonia té un origen històric relativament recent (Farina et al., 2021) i actualment té un paper rellevant en la majoria de paisatges sonors, tant aeris com aquàtics i terrestres (Duarte et al., 2015). Molts dels sons d'origen antròpic generen un tipus de soroll de fons que aporta riquesa al paisatge sonor, donat que molts d'ells formen part de la cultura de les poblacions (Pavan, 2017). Però amb la industrialització han aparegut moltes fonts de so que han donat lloc a sorolls de fons amb característiques que han impactat negativament en els paisatges sonors i els organismes vius que els ocupen (Shannon et al., 2016; Francis et al., 2017; Hanache et al., 2020). Molts d'aquests sons es generen a baixes freqüències i poden viatjar a kilòmetres de distància (Blickley &

Patricelli, 2010) provocant alteracions en la comunicació i interaccions dels organismes vius (Francis et al., 2009; Chan et al., 2010; Mullet et al., 2017a) i causant canvis en les seves comunitats (Habib et al., 2007; Francis et al., 2012; Pavan et al., 2017). Els sorolls generats pels vehicles a motor o elèctrics poden arribar fins als 10 kHz i intensitats de l'ordre de més de 140 dB, espectre de dolor per alguns organismes vius, (Di et al., 2014; Rochat et al., 2016) i poden acabar alterant la comunicació dels animals (Tripovich et al., 2012; Carosi et al., 2017; Bermúdez-Cuamatzi et al., 2020).

Les característiques del soroll de fons, així com la capacitat que mostren els organismes per fer-hi front, determina si aquell soroll de fons pot arribar a ser un problema per aquests (Goodwin & Shriver, 2011; Luther & Derryberry, 2012). Per exemple, quan els ratpenats veuen afectada la seva ecolocalització per la presència de soroll de fons, la seva taxa de captura de preses decau (Barber et al., 2010). Si el soroll de fons es manté constant això requerirà que els animals generin adaptacions a llarg termini (Grant & Grant, 2010; Bermudez-Cuamatzin et al., 2020; Halfwerk & Slabbekoorn, 2009) mentre que si els nivells de soroll de fons són fluctuants, les espècies mostren adaptacions més plàstiques i puntuals ajustant les característiques del seu senyal acústic com puguin ser els augments de freqüència (Hz) i intensitat (dB) o canvis en els moments de comunicació (Gross et al., 2010; Cardoso & Atwell, 2011). Per exemple, els ocells que viuen a prop dels aeroports, avancen o retarden els seus pics de comunicació diària per tal d'evitar la coincidència amb el moment de més soroll produït pel trànsit aeri (Dominoni et al., 2016) i en altres casos canten a freqüències més altes o més baixes amb la mateixa finalitat (Wolfenden et al., 2019).

La comunicació també es pot veure afectada pel soroll de fons generat per altres espècies o per individus de la mateixa espècie que ocupen un mateix espai i emeten sons al mateix temps, fet que pot generar dificultats de distinció entre ells (Brumm & Slabbekoorn, 2005; Luther & Wiley, 2009). En aquest cas parlem de Biofonia, la qual inclou l'estudi de tots els sons produïts pels organismes vius i permet inferir la riquesa en biodiversitat i la qualitat de l'hàbitat d'un determinat indret (Gibb et al., 2018). Per exemple, l'índex de riquesa acústica avalua el nombre, presència i distribució d'espècies o individus a partir de les seves vocalitzacions (Hart et al., 2020; Gémard et al., 2021; Farina et al., 2021b; Grinfeder et al., 2022). Estudis com el que van fer Robinson et al. (2023) demostren les capacitats de l'anàlisi acústic per inferir la qualitat de terrenys ecològicament restaurats, considerant la diversitat no només dels organismes sobre la

superfície del terreny, sinó també dels microorganismes que habiten sota els primers centímetres de la superfície del terreny. La detecció i quantificació dels sons produïts per aquests microorganismes en proporcionen un índex d'abundància i diversitat que reflecteix l'estat de restauració del sòl.

L'evolució de la comunicació animal en un context d'hàbitat queda explicada per dues hipòtesis. La Hipòtesi de l'Adaptació Acústica considera que els animals evolucionen en les seves adaptacions per tal de produir sons amb unes característiques tals que maximitzin la propagació sonora en funció de les característiques atenuants de l'entorn físic (Morton, 1975; Hansen, 1979). Segons la Hipòtesi del Nínxol Acústic (Krause, 1993) seria la competència entre espècies la que genera una diversificació de senyals acústics amb característiques pròpies de cada espècie, individu i entorn. Els orígens d'aquest pensament els trobem en la Teoria del Nínxol d'Hutchinson (1957), de manera que podem concebre l'espai acústic com un recurs pel qual els organismes competeixen tant en l'espectre de freqüències com en el temporal per trobar el seu òptim beneficiós. Per tal de minimitzar l'emascament i facilitar la propagació i reconeixement intraespecífica i interespecífica, els senyals acústics divergeixen en característiques temporals i espectrals (Memet et al., 2022). Per tant, en funció de les característiques de l'entorn, trobarem un conjunt d'espècies i comunitats amb uns senyals acústics de característiques similars i òptimes per aquell entorn (Tobias et al., 2014).

En conseqüència, cada tipus d'hàbitat acústic té una composició sonora pròpia formada per les comunitats acústiques de les espècies presents a la zona (Biofonia), pels processos físics i climàtics (Geofonia) i per les activitats humanes (Antropofonia) (Bormpoudakis et al., 2013; Farina et al., 2016). Al seu torn, els senyals propis de cada hàbitat acústic proporcionen als animals informació de la qualitat de l'hàbitat, possibles riscos, recursos i presència de competidors intra i interespecífics (Mullet et al., 2017). Sovint els animals poden trobar-se amb poques densitats o absents en determinades zones que no els són òptims o que encara no han pogut colonitzar, cosa que es tradueix en una disminució de la biodiversitat que al seu torn es reflecteix en un empobriment de l'hàbitat acústic (Bormpoudakis et al., 2013; Mullet et al., 2017). La investigadora Esther Sebastiánvan, en una de les entrevistes que li van fer, va recórrer a la metàfora "nos encaminamos a esa primavera silenciosa en la que cada vez habrá menos vocalizaciones" per reflexionar sobre el progressiu empobriment de l'hàbitat acústic. Aquesta metàfora fa referència al concepte "La primavera silenciosa" desenvolupat en el llibre que va escriure

l'any 1962 la biòloga Rachel Carson i que porta per títol aquest mateix concepte. Doncs tal com ja s'advertia en aquesta obra l'any 1962, cada vegada hi ha menys espècies i individus en els entorns naturals i els seus cants són més homogenis i pobres (Sebastián-González & Hart, 2017; Paxton et al., 2019).

La diversitat acústica la trobem en tot el regne animal, però els ocells són un grup que mostra moltíssimes variacions, diversitat i estratègies d'acústica comunicativa (Schreiber & Beckenbauer, 2013; Berger-Tal et al., 2019; Chronister et al., 2023). Investigacions prèvies han determinat que els ocells utilitzen la comunicació acústica amb finalitats territorials, socials o reproductives (Wegge et al., 2005; Fujiwara & Tobari, 2021). En poblacions denses com per exemple els ocells que viuen en colònies, es generen un elevat nombre de senyals acústics conspecífics amb característiques similars que causen interferències i dificulten la comunicació interindividual (Jouventin & Aubin, 2002). Per aquest motiu, el repte que comporta afrontar aquesta situació porta els individus a adoptar tàctiques que els permetin identificar i distingir els senyals acústics dels seus conspecífics (Lohr et al., 2003) tot generant una signatura vocal pròpia de cada individu (Liu et al., 2013; Fujiwara & Tobari, 2021; Gémard et al., 2021). En els casos d'ocells que tenen un sistema social i d'aparellament lek com poden ser els *Trochilidae*, *Tyrannidae* o els *Chiroptera* entre d'altres, aquesta signatura vocal pròpia de cada individu els permet distingir-se i identificar-se entre ells, inclús quan tots canten al mateix temps en els moments d'aparellament i de territorialitat (Westcott, 1992; Snow, 2008; Collier et al., 2022). En algunes ocasions, els ocells miren d'evitar la superposició entre espècies o individus tot canviant les propietats dels seus cants i reclams, així com el moment del dia en què els emeten (Hart et al., 2021; Chronister et al., 2023). Aquest seria el cas del gall fer *Tetrao urogallus*, el qual per evitar que el seu so de baixa intensitat (Jordi et al., 2023) quedi emmascarat per la resta de sons de més intensitat com poden ser la merla o pinsà comú (Schalz, 2023), canta a la matinada abans que la resta d'espècies comencin a emetre sons. Tanmateix, no tots els ocells són igualment susceptibles a aquestes dificultats de comunicació. Entre els ocells hi trobem espècies com ara els que formen part dels Passeriformes, Psittaciformes i Trochiliformes, els quals poden variar fàcilment les propietats dels seus cants i reclams com són la freqüència (Hz), durada (s), intensitat (dB) o sintaxi (nombre i distribució sil·làbica) per millorar la transmissió del seu missatge (Potvin & Mulder, 2013; Roca et al., 2016). Però la resta que no formen part d'aquests grups, com el gall fer, no tenen tanta capacitat de modular el seu so (Fujiwara

& Tobari, 2021) de manera que els problemes derivats de la comunicació poden dificultar o impedir l'ocupació d'una determinada zona o comprometre l'èxit reproductiu (Schroeder et al., 2012; Erbe et al., 2022).

## Hàbitat acústic i estructura forestal

Els boscos constitueixen un dels ecosistemes terrestres més diversos i multifuncionals a causa de la seva complexa estructura i a la varietat de processos ecològics essencials que s'hi esdevenen (Fornoff et al., 2019; Europarc-España, 2020). Aquests no tan sols són valuosos pel patrimoni natural que contenen, sinó també pels nombrosos beneficis que ofereixen relacionats amb la salut i el benestar dels éssers vius (Europarc-España, 2020). A Europa, els boscos recobreixen una extensió de 176 milions d'hectàrees, la qual cosa representa el 42 % del territori, i hi trobem una diversitat de fins a 79 tipus d'hàbitats forestal diferents, esdevenint, per tant, un dels ecosistemes més prominents i importants (Europarc-España, 2018, 2020). La superfície actual de bosc a Espanya representa el 54.8 % del territori nacional i es correspon amb 27 tipus diferents d'hàbitat forestals considerats d'interès comunitari (Europarc-España, 2020). A Catalunya trobem que el 60 % de la superfície és forestal (Mallarach et al., 2013; Montserrat, 2013).

A Europa predominen boscos que han estat sotmesos a intervenció humana mitjançant l'aprofitament sostingut dels seus recursos o amb intervencions que busquen la regeneració natural (Europarc-España, 2020). A Europa, la major part del territori forestal és cobert per boscos generalment molt homogenis tant en espècies com en estructura d'edats, els quals són especialment vulnerables a pertorbacions com el foc o les plagues, sobretot en l'actual context de canvi climàtic (Danescu et al., 2018; Colangelo et al., 2021). Aquest escenari és degut a la llarga història d'ús intens que els va apartar de la seva estructura inicial i també a l'abandonament d'alguns conreus, pastures i d'altres aprofitaments de la muntanya (Mallarach et al., 2013; Danescu et al., 2018). Els boscos madurs es defineixen com aquells que estan formats per un mosaic de rodals en totes les fases del seu desenvolupament i ecosistemes naturals forestals que no mostren signes d'activitat humana ni fragmentació d'hàbitats i són prou grans per a mantenir tota la diversitat biològica (Europarc-España, 2020; Colangelo et al., 2021). Aquests són avui en dia extremadament escassos a tot el món: a Europa s'estima que només entorn el 5 % dels seus boscos poden considerar-se madurs inalterats. Aquests estan localitzats



fonamentalment en la taigà russa i a Catalunya, on en representen menys de l'1 % (Mallarach et al., 2013; Europarc-España, 2020). L'absència de boscos inalterats no exclou que de manera local existeixin bosquetes o rodals en els quals una baixa petjada humana permeti l'evolució del bosc fins a aconseguir una certa maduresa. Els boscos en els quals ha cessat la intervenció humana poden arribar a tenir característiques pròpies dels boscos madurs (MCPFE, 2007).

Per tal d'entendre degudament com és un bosc madur, hem d'entendre les fases implicades en el cicle vital del bosc. Les fases de desenvolupament del cicle vital del bosc succeeixen de manera cíclica i les podem trobar alternades en diferents rodals. Hi ha una primera fase de clariana en la qual una pertorbació obre un espai d'alguns centenars de metres quadrats. La segona fase és de regeneració en la qual es desenvolupen llavors i brots gràcies a l'entrada de llum que ha permès la clariana. Durant la fase d'ocupació els arbres van guanyant altura fins a tancar completament la coberta per sobre del sòl però sense arribar a experimentar mortalitat per competència. Seguidament, el bosc entra en la fase d'exclusió, durant la qual s'accentua la competència intra i interespecífica per la llum i comença a aparèixer fusta morta corresponent als arbres que no sobreviuen el procés. En aquesta fase apareixen molts més organismes sapròfits i detritívors, cosa que fa que hi hagi un augment de la biodiversitat. En la fase de maduració alguns arbres comencen a arribar al límit de la seva longevitat i també moren, tot generant fusta morta de grans dimensions. És la fase en què s'acumula major quantitat de biomassa i es genera diversitat de classes d'edat que es tradueix en diversitat horitzontal i vertical de les mides dels arbres. Finalment, el bosc arriba a una fase de senescència en la qual hi trobem la major diversitat vertical i horitzontal d'espècies arbòries, algunes de grans dimensions alternades amb arbres més joves de totes les edats. La mortalitat de petits grups d'arbres contigus dona lloc a un mosaic de clars que augmenten la diversitat horitzontal i la possibilitat de l'establiment de noves generacions d'arbres. Amb l'edat dels arbres supervivents de grans dimensions augmenten les probabilitats que es produeixin danys no letals que generen una gran diversitat de dendromicrohàbitats (ferides i forats al tronc, esquerdes en l'escorça, etc.). En aquest moment apareix fusta morta de grans dimensions que juntament amb els dendromicrohàbitats fan que en aquesta fase trobem un alt grau de diversitat d'organismes (Franklin et al. 2002; Fiedler et al., 2007; Flaquer et al., 2007; Europarc-España, 2020). Un altre dels valors dels boscos madurs és que poden actuar com a reservoris i fixadors de carboni molt potents, ja que la biomassa que concentren

constantment està emmagatzemant carboni, afavorint així un augment de resiliència contra el canvi climàtic (Harmon et al., 1990; Europarc –Espanya, 2018). A més, l'estructura d'aquests boscos afavoreix la infiltració d'aigua cap als aqüífers, regulant i evitant escolaments superficials i els aiguats (Europarc-Espanya, 2020). Sobretot i tal com hem dit, gràcies a les característiques i propietats que tenen els rodals madurs i senescents, aquests són els que més biodiversitat contenen. L'escassetat d'aquests rodals madurs i senescents fa que la major part de les espècies que s'hi troben estretament vinculades, tals com el gall fer, siguin molt escasses i es trobin en general amenaçades (Fiedler et al., 2007; Gustafsson et al., 2012; Europarc-Espanya, 2020).

Els boscos o rodals de bosc madurs contenen diversos grups d'espècies lligats a les seves característiques. Els ocells són un d'aquests grups i entre ells en podem distingir els que fan cavitats per alimentar-se i fer els seus nius com són els picots, els que ocupen algunes d'aquestes cavitats quan són abandonades com és el cas dels rapinyaires nocturns i els raspinells o els que ocupen les copes dels arbres com els pàrids (Europarc-Espanya, 2020). Els picots són un grup més especialitzat i lligat als boscos madurs on fan les seves cavitats i la seva presència pot indicar la bona qualitat del bosc (Drever et al., 2008). Aquest grup necessita arbres vells i de mida gran per poder perforar-los i establir els seus nius o punts d'alimentació (Flaquer et al., 2007) com és el cas del picot negre *Dryocopus matrius* (Camprodon et al., 2007) que el podem trobar als boscos de coníferes del Pirineu. Al seu torn, podem trobar espècies com el mussol pirinenc *Aegolius funereus* (Mariné y Dalmau, 2000) o pàrids com el pica-soques blau *Sitta europaea*, els raspinells *Certhia* sp. i mallerengues que ocupen les cavitats dels arbres, tant les generades i abandonades pels picots com les cavitats i esquerdes d'arbres vells (Camprodon et al., 2007, 2008). Per tant, l'estructura heterogènia d'arbrat i sotabosc dels boscos madurs, no només proporciona el desenvolupament de microhàbitats per artròpodes que són la font d'aliment de molts ocells, sinó que també els proporciona refugi i llocs de reproducció (Europarc-Espanya, 2020). Així doncs, moltes espècies d'ocells les trobem en els boscos madurs on duen a terme el seu dia a dia.

La conservació d'aquests hàbitats forestals madurs és una de les claus per mantenir la viabilitat de les poblacions d'ocells forestals, sobretot d'aquelles espècies especialment vulnerables o d'espècies en perill (Sirkiä et al., 2011; Pakkala et al., 2003). En diversos estudis es mostra la importància de la gestió de l'habitat per la conservació d'espècies forestals sensibles i en perill com el gall fer (Pakkala et al., 2003; Schwendtner et al.,

2005; Drozdowski et al., 2011). Atès que moltes de les situacions que fan front els ocells forestals, ja sigui l'aparellament, la reproducció, el marcatge de territori o d'altres, impliquen la comunicació amb vocalitzacions intra i interespecífica (Collins, 2004; Snow, 2008; Hart et al., 2020; Collier et al., 2022) la conservació de l'hàbitat acústic forma part d'aquest concepte d'hàbitat que cal mantenir en condicions òptimes. El manteniment de l'hàbitat acústic amb unes característiques de propagació sonora beneficioses per les espècies que ocupen un territori depèn de les característiques de l'hàbitat que el conté (Schreiber & Beckenbauer, 2013; Muhlestein et al., 2018). En general, els hàbitats forestals adients per la correcta dinàmica de la biodiversitat són aquells que tenen estructures properes a la maduresa forestal amb una bona integració paisatgística i allunyades de fonts sonores d'origen antropogènic (Antropofonia), així com de l'antropització no compatible amb la preservació d'aquests entorns forestals (Baiges et al., 2020; Europarc-España, 2020; Palau i Garriga, 2023).

Generalment, les vocalitzacions dels ocells que viuen en entorns tancats com els boscos, tals com el gall fer, són molt més estereotipats que les dels ocells que viuen en entorns oberts com els prats, a causa de la visibilitat reduïda i l'estabilitat de les condicions de propagació sonora dels entorns tancats (Brown & Handford, 2000; Boncoraglio & Saino, 2007). Per tal d'assegurar una propagació òptima en aquest tipus d'entorns, aquestes vocalitzacions tenen una duració i una repetició curta amb poca variació del seu rang de freqüència (freqüència modulada de banda curta) concentrant l'energia en freqüències baixes (Naguib, 2003; Boncoraglio & Saino, 2007; Ey & Fischer, 2009). A causa de l'alta estereotípia i poca variació de les vocalitzacions d'ocells forestals, els canvis en l'estructura forestal que impliquin un detriment de la propagació sonora (excessiva atenuació, distorsió per reverberació, etc.) poden esdevenir en la dificultat d'ocupació d'aquestes zones per problemes de comunicació (Lohr et al., 2003; Naguib, 2003; Chobeau, 2014; Erbe et al., 2022). Tot això es deu al fet que la propagació del so a l'aire lliure pateix atenuació fins a la seva extinció resultada de la divergència geomètrica i l'absorció de superfícies. També la dispersió (reverberació) pel xoc amb les diferents superfícies, la temperatura i el vent poden augmentar o disminuir el nivell de pressió del so (la intensitat) (dB) (Boncoraglio & Saino, 2007; Tarrero et al., 2008; Pohl et al., 2015). Així mateix, dins del bosc la transmissió del so es veu afectada principalment per les característiques dendrològiques dels arbres i sotabosc, tot produint dispersió i absorció fins que s'esgota (Ehrhardt et al., 2013; Pohl et al., 2015). La propagació sonora en espais

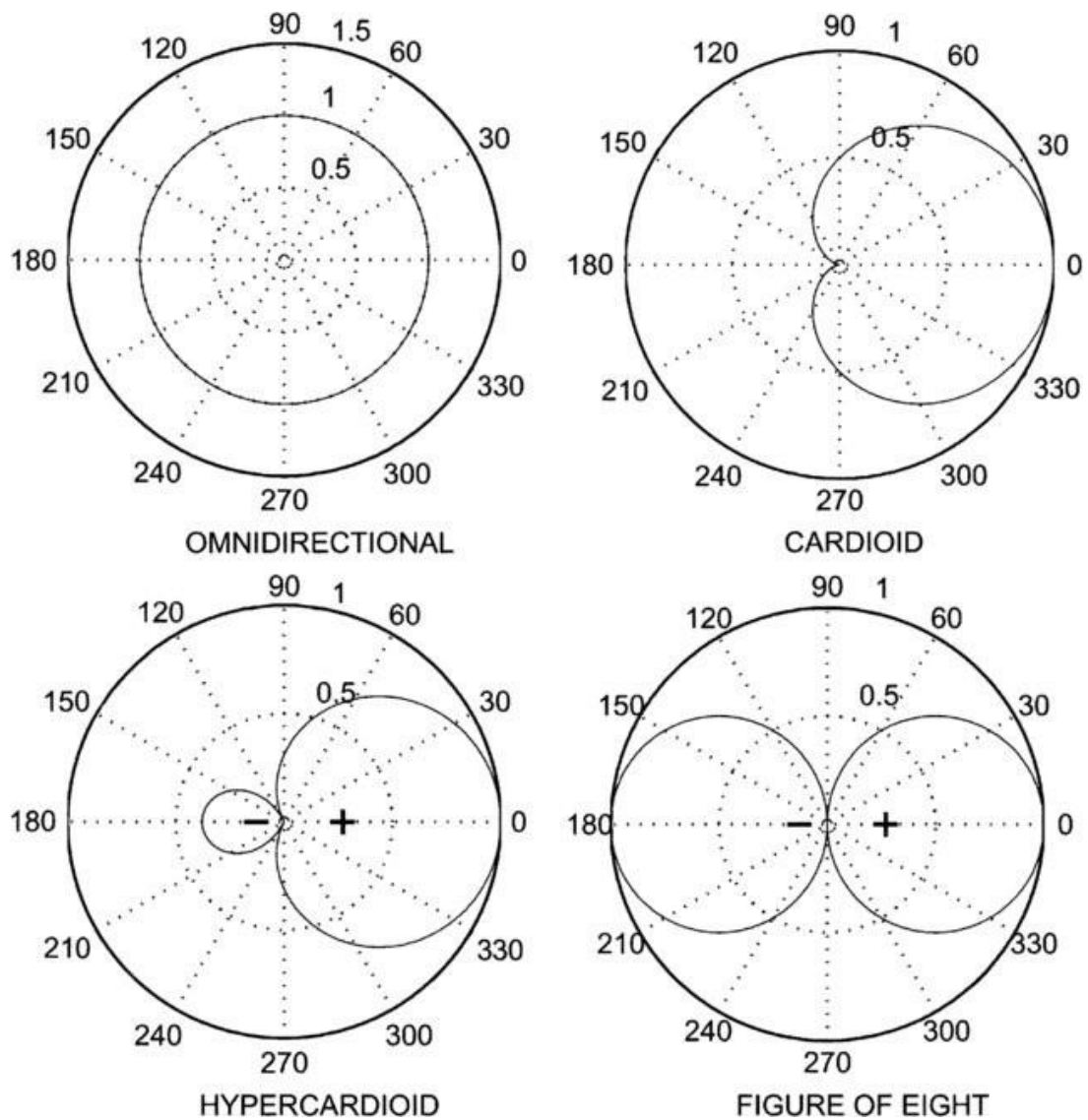
oberts i en boscos ha estat àmpliament estudiada, i malgrat que no és un fenomen fàcil de predir o modelitzar, els descobriments que se n'han extret han servit per a moltes aplicacions (Tarrero et al., 2008; Schreiber & Beckenbauer, 2013; Muhlestein et al., 2018). Alguns d'aquests estudis s'han aplicat per efectuar una gestió forestal enfocada a reduir el soroll de fons d'origen no biofònic present en zones naturals properes a fàbriques o grans nuclis urbans per tal de millorar la comunicació acústica de les espècies animals i la seva conseqüent activitat i presència (Tyagi et al., 2006; Erbe et al., 2022). D'altres s'han enfocats a analitzar la selecció d'habitat que efectuen les espècies animals en funció de les propietats de propagació sonora durant la seva comunicació (Mullet et al., 2017, Garcia et al., 2022). I alguns d'ells s'han centrat en l'efecte que tenen els patrons de propagació sonora d'un entorn, com són l'atenuació i la reverberació, sobre les vocalitzacions dels animals (Slabbekoorn et al., 2002; Slabbekoorn et al., 2007). D'altres estudis han demostrat que per la gestió de l'hàbitat, no només és important tenir en compte criteris d'una estructura forestal madura i òptima per la conservació de les espècies i la potenciació de la biodiversitat (Europarc-España, 2020; Ipinza et al., 2023), sinó que també s'ha vist rellevant incorporar objectius acústics en el maneig forestal (Chobeau, 2014; Iglesias et al., 2019). Així doncs, incorporar criteris acústics en la gestió forestal permet que els canvis que s'efectuen en l'estructura forestal amb benefici de la biodiversitat, estiguin enfocats també en la millora de la propagació sonora i la conseqüent comunicació dels animals que hi habiten, possibilitant-ne així la seva presència (Fang & Ling, 2003; Brumm & Slabbekoorn, 2005).

### Ambisònica i les anàlisi de resposta impulsiva

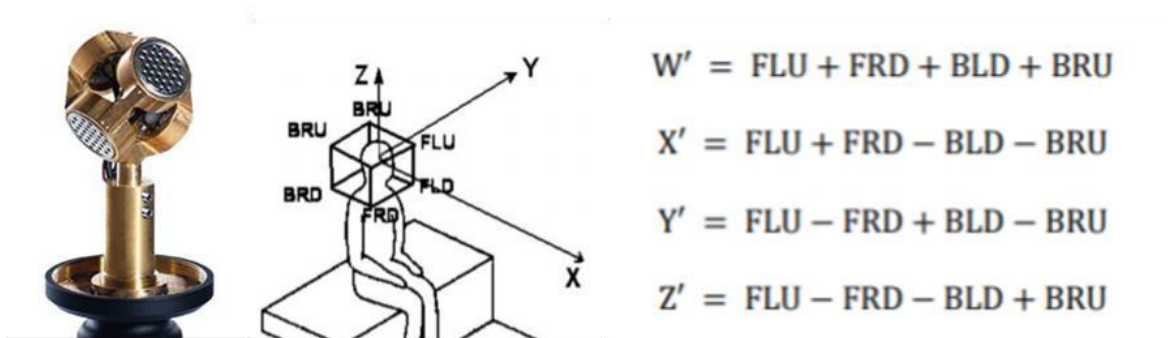
Molts dels estudis de propagació del so segons les característiques físiques de l'entorn (Farina & Tronchin, 2005; Tarrero et al., 2008; Farina & Tronchin, 2013) tenen com a base les investigacions que Michael Gerzon va iniciar l'any 1975. En aquests estudis s'analitzaven les propietats acústiques de les estructures que componen un entorn i com aquestes afecten la propagació sonora (Gerzon, 1975). Les seves investigacions es van centrar principalment a l'interior de teatres italians i dels seus estudis se'n van derivar la creació dels estàndards ISO 3382 que avui en dia es fan servir per mesurar les propietats acústiques d'espais oberts i tancats a través de variables quantitatives acústiques (Farina & Tronchin, 2013; Papadakis & Stavroulakis, 2019). Per tal de poder analitzar el

comportament acústic d'un espai i poder predir el tipus de propagació sonora que s'hi pot donar és necessari l'estudi de la Resposta Impulsiva (RI), consistent en gravar amb un micròfon un so emès d'una manera determinada i analitzar-lo (Gerzon, 1975; Farina & Tronchin, 2013). Aquesta anàlisi permet definir o caracteritzar les propietats acústiques d'un determinat entorn, és a dir, de quina manera es transmet o distorsiona els sons en un determinat ambient.

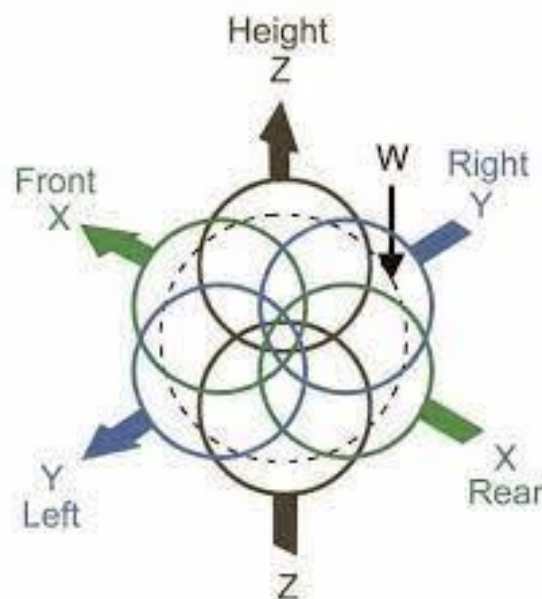
El micròfon captura i transmet les ones sonores a un dispositiu de gravació. Està constituït per unes càpsules que reben el so i el transformen en un senyal elèctric que arriba fins a la gravadora. Les càpsules dels micròfons, a banda d'estar orientades en l'espai respecte a els eixos cartesianes i captar la informació sonora que prové de diferents direccions (Figura 2, Figura 3), tenen un tipus de patró polar determinat segons la construcció del micròfon. La polaritat (o patró polar) d'un micròfon o de les seves càpsules és la seva habilitat per captar el so provinent d'una o altra direcció. La polaritat omnidireccional capta el so que prové de totes les direccions de manera uniforme, la polaritat en "figura 8" capta de la mateixa manera els sons que provenen del davant i del darrere, la polaritat cardioide capta sobretot el so que prové del davant així com una petita part de so que prové dels laterals i la hipercardioide està molt més focalitzada que la cardioide en captar el so que prové del davant (Figura 1). Per tant, els dos últims patrons polars són més direccionals que els primers (Andrew & Chad, 2019). El fet que el patró polar hipercardioide (típic dels micròfons "pistola" o "shotgun") està molt enfocat (és molt direccional) a captar el so del davant, pot ser un limitant en alguns casos pel fet que si la font de so es mou de lloc i no coincideix amb la direcció de captació del micròfon, aquest deixa de captar-lo (Pulkki & Hirvonen, 2005; Hold et al., 2023; Figura 1). Pot ser el cas per exemple de gravar un animal en un entorn natural. Tot i que el patró omnidireccional és molt utilitzat en gravacions entorns naturals o de fauna (Laiolo et al., 2011; Abrahams, 2019; Hart et al., 2020) aquest capta també molt de soroll que pot emascarar la font de so que volem analitzar (Andrew & Chad, 2019).



**Figura 1 .** Patrons polars dels micròfons. El patró omnidireccional capta el so provinent de totes bandes de manera uniforme, la “figura 8” capta el so del davant i del darrere, el cardioide capta sobretot el so que prové del davant i el hipercardioide està molt més focalitzada que la cardioide en captar el so que prové del davant tot i que capta una petita part del darrere. Font: Pulkki & Hirvonen, 2005.



**Figura 2.** Estructura d'un micròfon ambisònic de primer ordre amb 4 càpsules orientades en els eixos cartesianes. La càpsula W rep el so que prové de “front left up (FLU)”, “front right down (FRD)”, “back left down (BLD)” i de “back right up (BRU)”, corresponent a un patró de captació de so (patró polar) omnidireccional. La resta de càpsules capten més el so provinent d'una direcció, com és el cas de la càpsula X que capta el so que prové de “front left up (FLU)” i “front right down (FRD)”. Font: NevaTon.

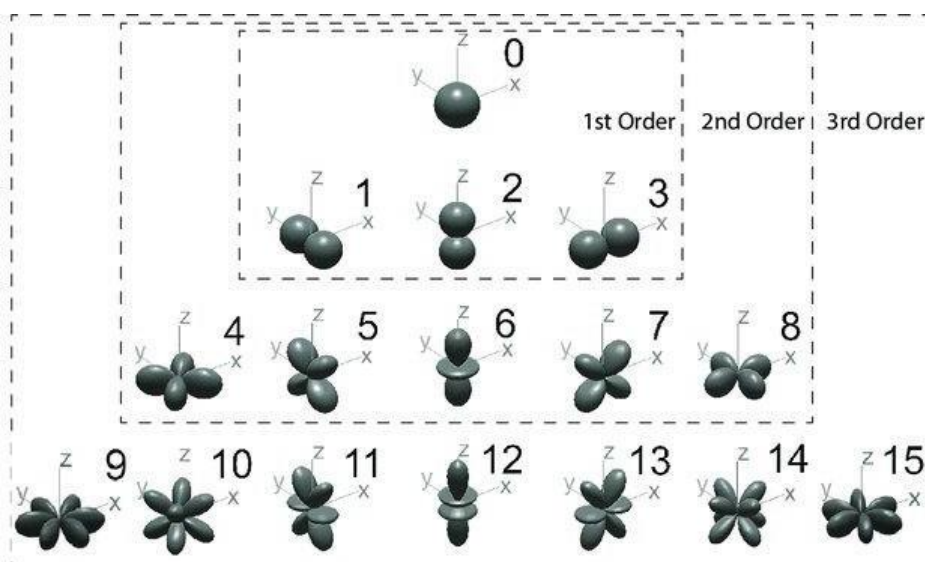


**Figura 3.** Possibles orientacions de les càpsules dels micròfons de primer ordre. Les càpsules X, Y, Z estan orientades en posicions diferents dels eixos cartesianes (esquerra-dreta, davant-darrere i amunt-avall), mentre que la càpsula que capta el canal W omnidireccional ocupa la posició central i capta el senyal que prové de totes les direccions. Font: Ortolani & Uncini, 2016.

Malgrat que inicialment l'anàlisi de Resposta Impulsiva s'efectuava amb l'ús de micròfons d'una o dues càpsules, aquest proporcionava un resultat incomplet. Això era degut al fet que la informació relacionada amb la intensitat del so (dB) i amb la localització de les fonts sonores i dels seus reflexos no es podien percebre totalment (Farina & Tronchin, 2005; Bertet et al., 2013; Farina & Tronchin, 2013). Per poder fer front a aquesta limitació, Michael Gerzon va instaurar l'ús del micròfon de quatre càpsules (micròfon ambisònic de primer ordre) amb el model de micròfon Soundfield que actualment encara es fa servir per a l'estudi de Respostes Impulsives (Gerzon, 1975; Farina, 2007; Farina & Tronchin, 2013). El terme ambisònic prové del llatí (ambire: rodejar i sonus: so) i fa referència a la superposició dels sons captats per les càpsules (Gerzon, 1975; Farina, 2007). A diferència d'altres gravacions que podem obtenir amb altre tipus de micròfons com poden ser els omnidireccionals o direccionals, en els micròfons ambisonics cada càpsula grava informació sobre determinades propietats físiques com la pressió i la velocitat del so, a banda del senyal sonor que prové de totes les direccions (Farina et al., 2010; Farina & Tronchin, 2013).

En els micròfons ambisonics trobem diferents ordres segons la seva morfologia i el nivell de detall amb què es capta el senyal acústic. En l'ordre zero només existeix el senyal de la càpsula W (omnidireccional) que rep la informació relacionada amb la pressió que efectua l'ona sonora sobre les partícules de l'ambient en el qual es troba (aire, sòlid o aigua) durant la seva propagació. En els micròfons de primer ordre s'hi afegeix els senyals X, Y i Z (en patró cardioide o "figura 8), corresponents a les tres càpsules orientades en els eixos cartesianes que reben la informació relacionada amb la velocitat a la qual es mouen les partícules de l'espai (aire, sòlid o aigua) desplaçades per l'ona sonora durant la seva propagació (Gerzon, 1975; Farina et al., 2010; Ortolani & Uncini, 2016; Figura 3). Existeixen micròfons d'ordre superior segons el nombre de càpsules que s'afegeixen als existents de primer ordre per tal d'augmentar el detall de percepció del camp acústic. Així doncs, podem trobar micròfons ambisonics de 1r ordre amb quatre càpsules, de 2n ordre amb nou càpsules, de 3r ordre amb 16 càpsules i així successivament (Moreau et al., 2006; Narbutt et al., 2020; Figura 4). Tot i que amb el temps s'han desenvolupat micròfons ambisonics amb moltes més càpsules com Eigenmike que conté 32 càpsules que poden donar una resolució molt més acurada, l'ús del micròfon Soundfield de quatre càpsules encara es manté, ja que el processament del senyal acústic és molt més senzill i assequible (Farina, 2007; Farina & Tronchin, 2013).





**Figura 4.** Representació de les diferents orientacions dels patrons polars de captació de so que podem trobar en els micròfons ambisonics. Des de micròfons d'ordre 0 fins als d'ordre superior. Aquí es representa fins a l'ordre 3 amb 16 càpsules d'entrada. Font: Narbutt et al. 2020.

Quan l'anàlisi de resposta impulsiva s'utilitza per determinar les característiques acústiques d'un determinat entorn, no només és important el micròfon per gravar el senyal acústic, sinó que la font sonora que s'utilitza també és clau per obtenir un resultat acurat. Existeixen diferents fonts de so, però totes elles han de tenir unes característiques determinades per poder ser aptes per a l'anàlisi de resposta impulsiva: s'ha de generar un so el més omnidireccional possible que permeti una excitació uniforme de l'espai en totes les direccions, amb una intensitat suficient per estar 45 dB per sobre del soroll de fons, que sigui repetible per tal que el so sigui el més similar possible cada vegada que es genera i que la resposta freqüencial sigui l'adequada per tal d'obtenir un so que contingui les octaves de 31.5 Hz fins a 16 KHz (Pavlović et al., 2008; Papadakis & Stavroulakis, 2023). Aquestes fonts de so poden ser connectades al corrent elèctric com és el cas dels amplificadors dodecaedres o poden ser no elèctrics com és el cas dels clapets de fusta, les pistoles o els globus, més adients en entorns on és difícil tenir electricitat com són els espais forestals (Pavlović et al., 2008; Shelley et al., 2013; Papadakis & Stavroulakis, 2019). Alguns dels inconvenients que pot tenir l'ús de fonts de so elèctriques com l'amplificador dodecaedre són el seu elevat preu, el pes, la necessitat d'electricitat i certa complexitat en el postprocessat del senyal acústic. Per tant, alternatives com el clapet de

fusta són encertades en entorns naturals com els forestals o espais oberts on es vulgui fer l'anàlisi de Resposta Impulsiva (Shelley et al., 2013; Chobeau, 2014; Papadakis & Stavroulakis, 2023).

Un cop s'ha generat un so, aquest es propaga en funció de les característiques estructurals de l'entorn i és gravat pel micròfon i analitzat posteriorment per tal d'obtenir els paràmetres acústics de l'anàlisi de Resposta Impulsiva, que al seu torn poden ser correlacionats amb els paràmetres estructurals que defineixen l'entorn (Shelley et al., 2013; Chobeau, 2014). Els paràmetres acústics obtinguts són diversos i es calculen seguint l'ISO 3382 (ISO, 2012) i els protocols derivats en entorns oberts com l'ISO 9613 (ISO, 2024). Tots ells estan relacionats amb l'efecte que tenen les estructures que conformen un espai sobre el temps de propagació del so ( $s$ ), la seva atenuació o amplificació (dB), així com el seu espai i direcció de propagació (Farina, 2007; Campanini & Farina, 2008). En el cas d'un bosc, els paràmetres acústics de l'anàlisi de Resposta Impulsiva es poden relacionar amb l'estructura d'aquest i al seu torn ens pot permetre inferir en les propietats de propagació sonora d'aquest entorn i com poden afectar la comunicació i presència dels animals que hi viuen (Tarrero, 2008; Shelley et al., 2013; Chobeau, 2014). A causa del fet que la propagació sonora al bosc depèn de les estructures que el componen, l'entorn forestal pot ser modificat tot respectant la maduresa forestal per tal de millorar el resultat de propagació sonora, i això pot jugar un paper clau en la gestió d'espècies en perill crític com el gall fer (Brumm & Slabbekoorn, 2005; Farina & Tronchin, 2013).

En aquest estudi de doctorat hem fet servir els avantatges que ens proporciona l'acústica ambisònica actual (Gerzon, 1975) per tal d'estudiar el so i el paisatge sonor del gall fer a una regió del Pirineu Català. Concretament, s'ha fet servir el micròfon ambisònic de primer ordre Neve VR (Figura 5). Aquest té quatre càpsules orientades a l'espai que graven el so, del rang 20 Hz fins a 20 KHz, amb un patró omnidireccional per la càpsula W i amb un patró cardioide per les càpsules Y, X i Z (Farina et al., 2010; Deppisch & Frank, 2020; Sagasti et al., 2023; Figura 5). El fet que aquest micròfon té un soroll propi (produït pel mateix funcionament) molt baix de 4 dB i un punt màxim de distorsió (límit superior d'intensitat de decibels que pot captar abans no distorsioni la gravació) de 143 dB, fa que el seu rang de captació d'intensitats de so sigui de 14 dB fins a 143 dB. Això permet obtenir una qualitat del so molt alta inclús si es tracta de sons relativament fluixos de menys de 70 dB, en ambients atenuants i dispersius del so com poden ser el bosc

(Naguib, 2003; Hart et al., 2020; Jordi et al., 2023). Aquest micròfon va ser connectat a una gravadora Zoom F6 (Figura 6) i va permetre gravar en un format anomenat "32 bits flotant". Aquest format permet obtenir una gravació de so no distorsionada, tant si la font de so està molt a prop i es capta molta intensitat com si està molt lluny i necessitem augmentar molt el volum de captació del so per tal de gravar-la amb la intensitat necessària. Amb aquesta tecnologia ambisònica també podem gravar diferents fonts de so al mateix temps (diferents galls fers) i posteriorment separar-los amb l'ús de micròfons directius virtuals que permetin "apuntar i seleccionar" la font de so desitjada.



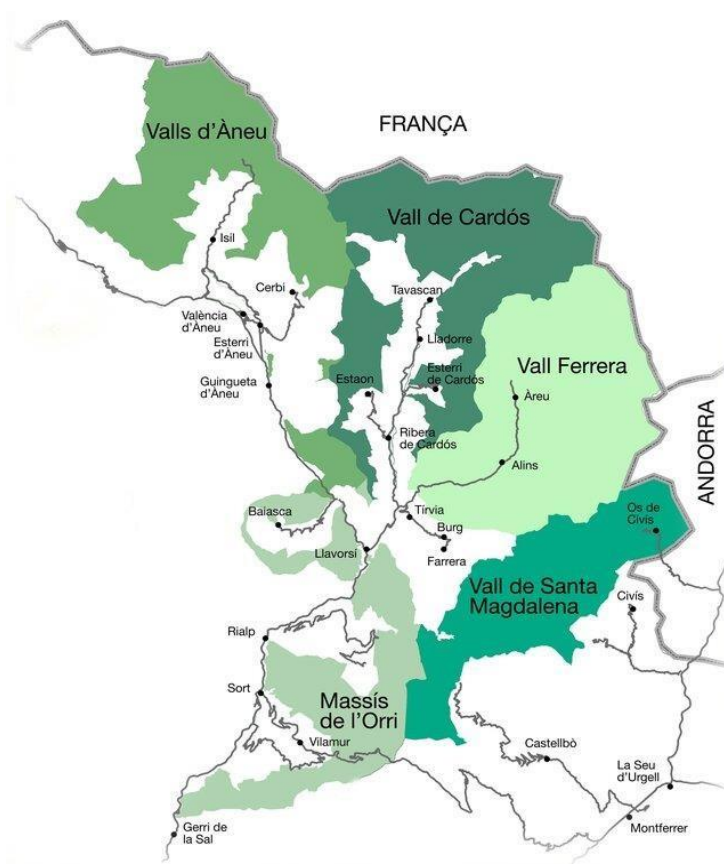
**Figura 5.** Micròfon ambisònic Neve VR. Font: Neve.



**Figura 6.** Gravadora Zoom F6. Font: Zoom.

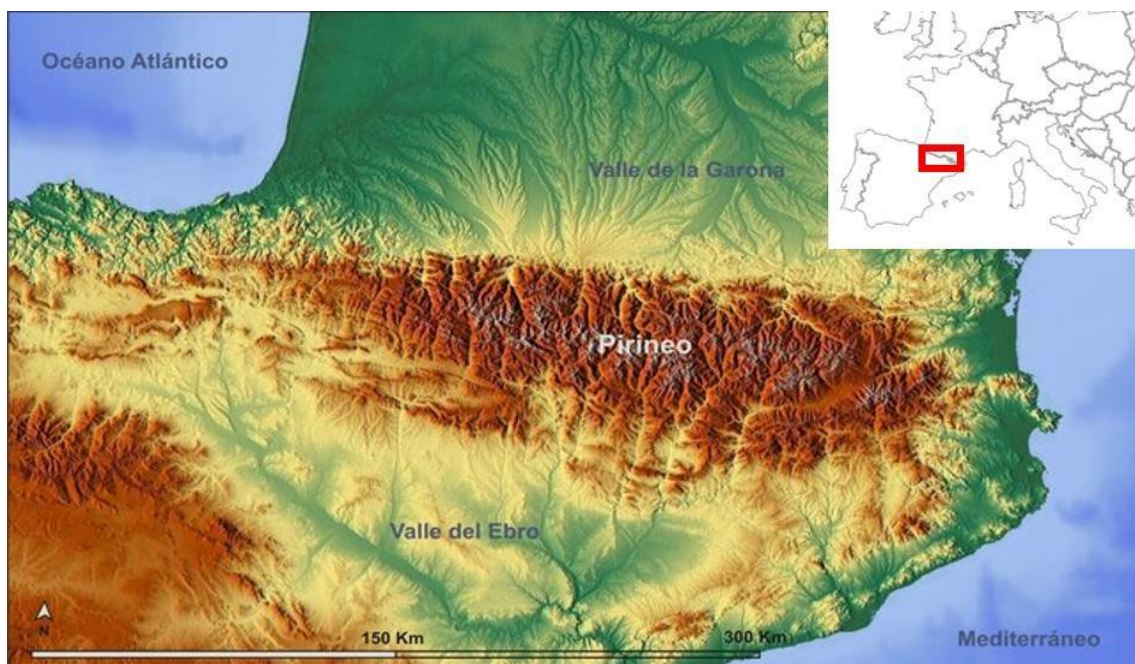
## Espais naturals protegits: Parc Natural de l'Alt Pirineu

Aquesta tesi doctoral s'ha dut a terme al Pirineu català, concretament al Parc Natural de l'Alt Pirineu, declarat com a tal l'any 2003 via Decret 194/2003 (Figura 7). Situat entre el Pallars Sobirà i l'Alt Urgell és l'espai natural protegit més extens de Catalunya amb una superfície de gairebé 80.000 hectàrees. Amb seu al poble de Llavorsí, en aquest parc hi trobem el cim més alt del Pirineu català, la Pica d'Estats (3.143 m) i al seu torn acull un extens patrimoni natural i cultural pirinenc que el fa únic (Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015). Entre molts dels elements singulars que hi trobem en el paisatge com poden ser l'estany Certascan, el més extens del Pirineu, o la cavitat de l'obaga de Baleran, una de les més profundes de Catalunya, hi podem trobar presència de diversos tipus de bosc. Des de boscos mediterranis fins a boscos alpins que contenen nombroses espècies de fauna i flora d'interès, com per exemple l'arbre monumental de grans dimensions del Pla de la Selva al municipi d'Alins (Palau i Garriga, 2013; Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015).



**Figura 7.** Parc Natural de l'Alt Pirineu. Font: Parc Natural de l'Alt Pirineu.

Els Pirineus conformen una barrera muntanyosa de 50.000 km<sup>2</sup> d'extensió que separa la península Ibèrica de la resta del continent, i que s'estén des del golf de Biscaia fins al mar Mediterrani (Améztegui et al., 2010; Figura 8). La posició geogràfica i el gradient altitudinal que arriba fins a més de 3000 m per sobre el nivell del mar, comporta una heterogeneïtat en la meteorologia que al seu torn es tradueix en heterogeneïtat de fauna i flora (Oliva-Vidal, 2022). A les zones de muntanya les condicions ambientals varien amb l'altitud i delimiten una sèrie d'estatges de vegetació que són l'hàbitat d'espècies protegides o en perill crític com el gall fer, el mussol pirinenc *Aegolius funereus* o la perdiu blanca *Lagopus muta* (Pèlachs et al., 2009; Oliva-Vidal, 2022). En l'estatge montà, situat entre 800 m i 1600 m per sobre el nivell del mar, trobem boscos dominats per pi roig *Pinus sylvestris*, fagedes *Fagus sylvatica* i avetoses *Abies alba*. L'estatge subalpí, entre 1600 m i 2300 m, queda dominat per boscos de pi negre *Pinus uncinata*, mentre que a l'estatge alpí, situat a més de 2300 m, només hi ha presència de plantes herbàcies a causa de les fredes temperatures i l'escassa precipitació (Oliva-Vidal, 2022; Améztegui et al., 2010).



**Figura 8.** Mapa altitudinal del Pirineu. Font: Rodriguez, 2010.

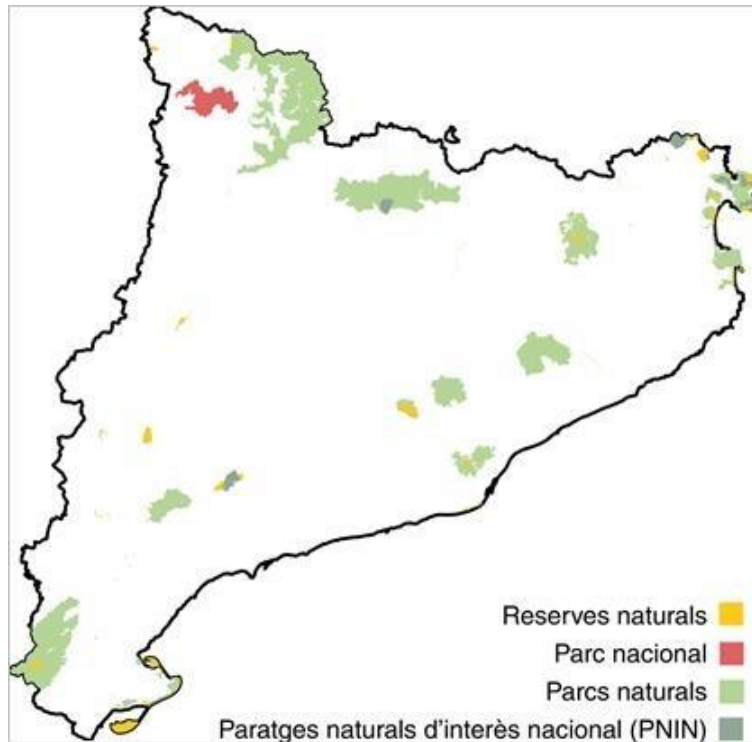
A Catalunya trobem que la regió boreoalpina queda situada en terres d'alta muntanya, Pirineu i Prepirineu. El bosc boreal és un dels biomes més grans i que alberga gran quantitat d'espècies. La seva distribució, evolució i característiques han estat influïdes en gran manera per les fluctuacions de canvis de clima esdevingudes durant el Quaternari (Potapov et al., 2008; Gauthier et al., 2015). Des de la perspectiva geografia es considera que la regió boreoalpina s'inicia a partir dels 1.600 m fins als 2800 m d'altitud, així doncs trobem que l'estatge subalpí amb dominància de boscos de coníferes, abasta dels 1.600 als 2.300 m (Gauthier et al., 2015; Nicolás et al., 2022). A Catalunya, per les comarques pirinenques i prepirinenques, els boscos de coníferes de l'estatge subalpí són dominats per les pinedes de pi negre que substitueixen altitudinalment a les pinedes de pi roig que amb freqüència es veu acompanyat d'un sotabosc de neret *Rhododendron ferrugineum*, nabiu *Vaccinium myrtillus*, boixerola *Arctostaphylos uva-ursi* i ginebra *Juniperus communis* (Figura 9). Tot i que el pi negre és la conífera que puja a més cota a Catalunya, no és l'única espècie arbòria de l'estatge subalpí. En aquest sentit, l'abet és la segona espècie arbòria més rellevant i també es presenta al Pirineu, prepirineu i de manera més testimonial al Montseny. Ambdues espècies també van acompanyades per altres espècies arbòries com moixera de guilla *Sorbus aucuparia* i bedoll *Betula pendula* (Pèlachs et al., 2009 Palau & Garriga, 2013; Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015).



**Figura 9.** Exemple de bosc de pi negre com a espècie dominant alternada amb avet, a l'estatge subalpí del Parc Natural de l'Alt Pirineu amb sotabosc de neret, nabiu, boixerola i ginebra. Font: arxiu propi.

Durant els últims 25 anys s'ha produït el retorn de la població humana a molts pobles i ciutats de les comarques de muntanya al Pirineu, fet que ha desencadenat un increment de les activitats turístiques que ha significat una expansió de les segones residències i la recuperació qualitativa d'activitats com l'artesanía o les activitats agrícoles i ramaderes relacionades amb formes de producció més ecològiques (Soriano & Tulla, 2003; Pèlachs et al., 2009). Aquesta expansió de la població també ha incrementat la necessitat d'efectuar un millor control i gestió per tal de preservar les espècies protegides davant de la pressió que la presència antròpica pot suposar per elles (Palau i Garriga, 2013; Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015). Les figures legals de protecció de la natura i les institucions que vetllen per la conservació del medi ambient, juguen un paper clau en la preservació dels espais naturals i les seves espècies, així com en el correcte desenvolupament de les activitats antròpiques compatibles amb la conservació de la natura (Pèlachs et al., 2009; Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015). Els Espais Naturals de Protecció Especial (els ENPE) són un tipus d'espais naturals protegits designats específicament pel seu interès científic, ecològic, cultural, educatiu, paisatgístic i recreatiu amb l'objectiu de dotar-los d'uns règims de protecció i de gestió adequats. Formen part del Sistema d'espais naturals protegits de Catalunya i juntament amb la resta dels ENP i el territori de Xarxa Natura 2000 configuren tot el Sistema d'espais naturals protegits de Catalunya (Palau i Garriga, 2013; Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015).

Els ENPE, els quals tenen una regulació jurídica pròpia i una gestió individualitzada, confereixen una figura de protecció superior respecte a la resta dels espais naturals protegits. La norma que els designa i n'estableix les categories és la Llei 12/1985. Aquesta determina les figures de parcs nacionals, parcs naturals, paratges naturals d'interès nacional i reserves naturals. Aquests conformen una superfície de 284.774 hectàrees terrestres i 6.020 hectàrees marines en el context del territori català. La Llei 12/1985 estableix 4 categories d'espais naturals de protecció especial (ENPE). Actualment, al territori català hi ha un total de 86 ENPES distribuïts en Parc nacional (1), Parcs naturals (14), Reserves naturals (64) i Paratges naturals d'interès nacional (7) (Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015; Figura 10).



**Figura 10.** Quatre categories i quantitats (núm.) de cada una d'Espais naturals de protecció especial (ENPE) del territori català: Parc nacional (1), Parcs naturals (14), Reserves naturals (64) i Paratges naturals d'interès nacional (7). Font: Parc Natural de l'Alt Pirineu.

La major part del territori del Parc Natural de l'Alt Pirineu és coberta per vegetació eurosiberiana i boreoalpina, de tal manera que a les parts més baixes amb influència de clima mediterrani hi podem trobar alzinars als solells rocosos. En altituds mitjanes de fins a uns 1400 m per sobre el nivell del mar hi trobem boscos de pi roig i diversos tipus de prats de dall. Finalment, a les zones més altes trobem boscos dominats per pi negre que culminen en prats herbacis alpins (Pèlachs et al., 2009; Alonso et al., 2023). En aquest parc natural hi trobem representats vora uns 40 habitants d'interès comunitari en l'àmbit europeu i la seva diversitat de flora arriba fins a unes 1.500 espècies, entre les quals trobem diferents endemismes i espècies que només es troben en aquesta localitat (Palau i Garriga, 2013; Bernadàs et al., 2023). Tot i que al parc hi ha un predomini de les plantes de terrenys silicis, a l'Alt Àneu hi trobem un grup d'espècies d'alta muntanya de terrenys calcaris molt rars en el conjunt de Catalunya com poden ser la flor de neu *Leontopodium alpinum*. També hi són presents algunes espècies que tenen al parc l'única població



catalana, com és el cas de *Hippuris vulgaris* o *Matthiola valesiaca* (Alonso et al., 2023; Bernadàs et al., 2023).

Tot i que a causa dels històrics aprofitaments forestals no queda cap bosc sencer que pugui ser qualificat de bosc no intervingut, gràcies als treballs forestals de conservació que s'hi estan duent a terme cada cop hi podem trobar més taques forestals amb característiques que li confereixen un cert grau de maduresa, com és el cas del bosc de Cireres i Àreu (Alt Àneu) o el d'Arcalís (Alins-Àreu). L'Avet del Pla de la Selva (Alins) està catalogat com a arbre monumental, però també es poden trobar arbres de grans dimensions en molts altres indrets del parc (Pèlachs et al., 2009; Palau i Garriga, 2013; Alonso et al., 2023).

## El gall fer

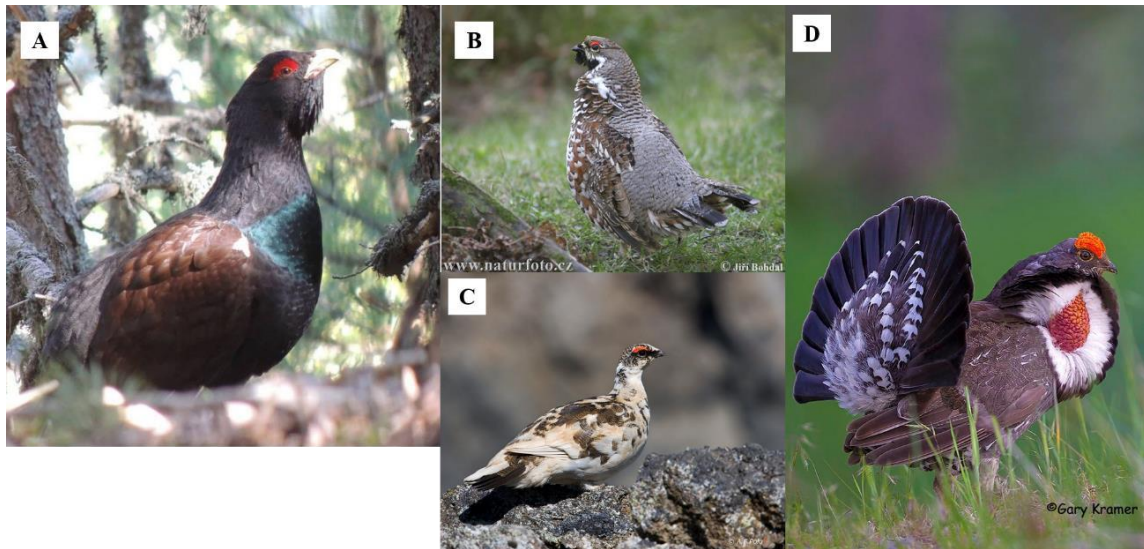
En aquest marc d'heterogeneïtat i mosaïcisme forestal on cada cop hi són presents boscos amb més maduresa i bona estructura, el Parc Natural de l'Alt Pirineu té una de les representacions de fauna boreoalpina més completa de Catalunya on hi podem trobar espècies protegides com l'àguila daurada *Aquila chrysaetos*, el voltor comú *Gyps fulvus* o el trençalòs *Gypaetus barbatus*. També es poden observar l'isard *Rupicapra pyrenaica*, mufló *Ovis orientalis*, cabirol *Capreolus capreolus*, cérvol *Cervus elaphus*, daina *Dama dama* i senglar *Sus scrofa* com a grans mamífers herbívors juntament amb l'os bru *Ursus arctos* (Basora Roca et al., 2010; Beltran & Vaccaro, 2011).

Així mateix, en els ambients oberts de l'estatge de prats alpins s'hi troben espècies protegides com la perdiu blanca o el pela-roques *Tichodroma muraria*. (D.O.G.C, 2022) i als boscos de pi negre, a més de trobar-hi l'emblemàtic gall fer, hi són destacables el mussol pirinenc, la becada *Scolopax rusticola* i el raspinell pirinenc *Certhia familiaris*, tots ells protegits i associats a boscos madurs i remarcables per la seva raresa o singularitat en el context de Catalunya (Basora Roca et al., 2010; Beltran & Vaccaro, 2011). En aquest context destaquem el gall fer, el qual es presenta en el Parc Natural de l'Alt Pirineu com la major població ibèrica (Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015; Figura 11).



**Figura 11.** gall fer mascle del Parc Natural de l'Alt Pirineu. Font: arxiu propi.

Dels quatre gèneres de “gall salvatge” (*Tetrao*, *Bonasa*, *Lagopus* i *Dendragapus*) (Figura 12) que ocupen els freds boscos de coníferes temperats i boreals (Pèlachs et al., 2009; Palau & Garriga, 2013; Song et al., 2021), el gall fer és l'espècie de gall salvatge del gènere *Tetrao* més gran d'Europa (Figura 13). Habita els boscos boreals i temperats predominantment de coníferes que consisteixen en *Pinus* sp., *Picea* sp. i *Abies* sp., des del sud-oest d'Europa fins a l'est de Sibèria (Suter et al., 2002; Sirkia et al., 2011; Figura 14).



**Figura 12.** Exemples dels gèneres de “gall salvatge” A) *Tetrao*, B) *Bonasa*, C) *Lagopus* i D) *Dendragapus*. Font: arxiu propi i fotografies de naturfoto.cz i Gary Kramer.



**Figura 13.** gall fer A) mascle (individu amb el nom Gabi) i B) femella (individu amb nom Emily). Font: arxiu propi.

Tot i que encara es mantenen poblacions sanes al nord d'Europa i Rússia, les poblacions a Europa Central i Occidental han anat disminuint constantment durant el segle XX i la seva viabilitat està seriosament compromesa en moltes àrees (Jahren et al., 2016; Gonzalez et al., 2016; Figura 14). La mida de la població europea, que representa el 40 % de la població mundial, és d'1.330.000-2.110.000 individus madurs i s'estima que

la mida de la població mundial és de 325.000-5.275.000 individus madurs (BirdLife International, 2016; Figura 14). Algunes de les causes de disminució poblacional es troben en la destrucció de l'hàbitat forestal, les molèsties causades per les activitats d'esbarjo d'hivern, les col·lisions amb línies d'alta tensió i tanques, així com la depredació, la caça i l'augment de temperatures (Juana i Kirwan, 2012; BirdLife International, 2016). Tot això ha produït algunes extincions locals i una tendència decreixent a escala global tot i que a escala Europea estigui catalogada com a "mínima preocupació" (Storch, 2007; BirdLife International, 2016, 2024). Existeixen 12 subespècies distribuïdes des d'Europa fins la Sibèria, dues de les quals les trobem a la península Ibèrica. Aquestes són: *Tetrao urogallus cantabricus*, que està catalogada com "en perill crític d'extinció" globalment amb només uns 200 individus situats a les muntanyes Cantabriques (García-Rodríguez et al., 2023) i *Tetrao urogallus aquitanicus* que es troba als Pirineus Catalans, Francesos i Andorrans, i que a Catalunya està catalogada com "en perill crític d'extinció" segons el Decret 172/2022, a causa d'una tendència significativa de declivi de la població (Servei de Biodiversitat i Protecció dels Animals, 2015). Les principals amenaces inclouen el canvi climàtic, la fragmentació de l'hàbitat, la mortalitat per predació sobretot durant la reproducció, la competència amb els ungulats pel sotabosc i les activitats antropogènics (Servei de Biodiversitat i Protecció dels Animals, 2015; Gil et al., 2020).



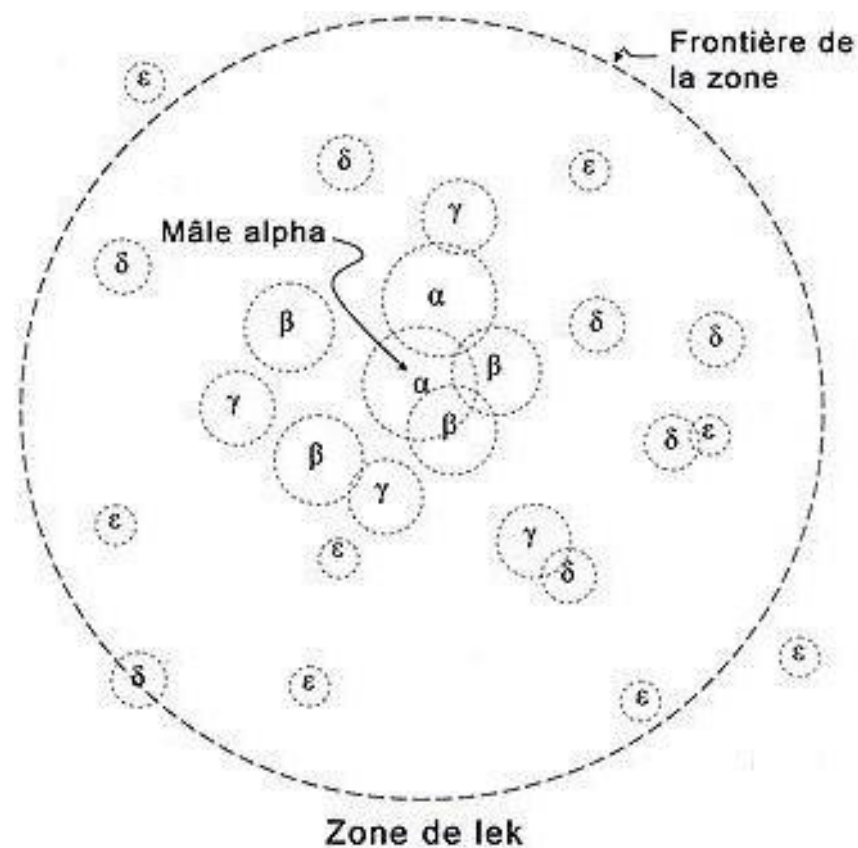
**Figura 14.** Distribució del gall fer a escala mundial. Font: BirdLife International, 2016.

Els mascles pesen fins a uns 6,5 kg i exhibeixen un plomatge de color pissarra amb verd metàl·lic al pit i ales marrons. Tenen unes celles vermelles i cua en forma de ventall amb un patró de taques blanques propi de cada individu que canvia en cada muda anual. Les femelles pesen uns 2,5 kg i presenten tons marrons i blancs en el seu plomatge (Castroviejo, 1975; Sarasa, 2023; Figura 15). A l'hivern s'alimenten fonamentalment d'acícules de pi i romanen inactius per a no consumir energia i poder sobreviure a aquesta època crítica del seu cicle. Durant la primavera fins a finals de tardor incorporen aliments més proteics com a brots i fruits com el nabiu. Quan són pollets necessiten una dieta rica en proteïna com la que poden trobar en els insectes que habiten entre els matolls de sotabosc format per neret i nabiu (Castroviejo, 1975; Servei de Biodiversitat i Protecció dels Animals, 2015; Chua et al., 2021).



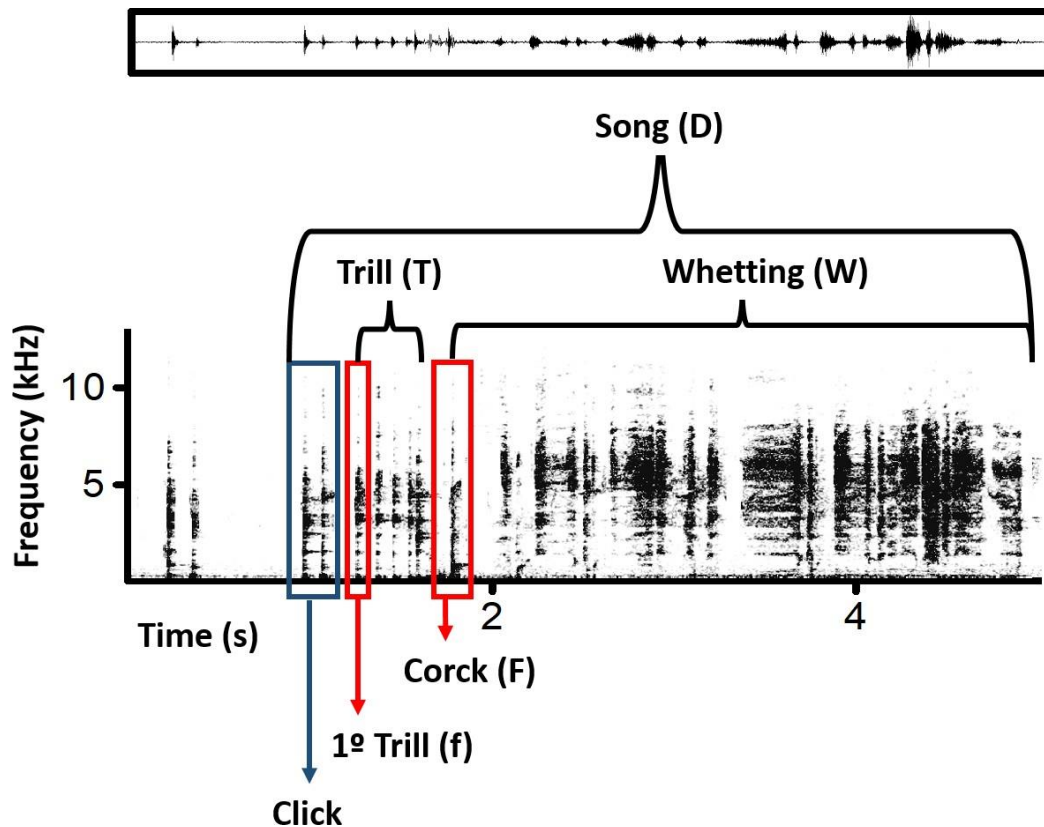
**Figura 15.** Mascle i femella de gall fer. Font: arxiu propi.

Té un sistema dispers d'aparellament de lek en el qual els mascles s'agreguen durant l'època d'aparellament (de març a finals de maig) a unes zones de bosc anomenades cantaders per mostrar-se a les femelles que els visiten amb l'únic objectiu de reproducció (Castroviejo, 1975; Sirkia et al., 2011). Els mascles estableixen una jerarquia entre ells, de manera que trobem un o uns pocs mascles dominants que acostumen a ocupar les zones més extenses i centrals dels cantaders. Així com diferents rangs de mascles menys dominants que ocupen les zones més petites i perifèriques (Wegge et al., 2005; Sirkia et al., 2011; Figura 16). En aquests cantaders, els mascles efectuen un “display” de cants i actitud corporal que té un paper fonamental d'atracció per les femelles que expressen una preferència activa pels mascles amb certes característiques de sintaxi, freqüència i durada en les seves cançons (Liu et al., 2013; Gémard et al., 2021).



**Figura 16.** Exemple d'estructura lek on es mostra com les jerarquies inferiors de mascles se situen a la perifèria i el mascle dominant ocupa una posició central. Font: Höglund & Alatalo, 1995.

El cant de l'espectre audible que emeten els mascles de gall fer està formada per una síl·laba inicial característica, el “click”, que precedeix una ràpida repetició de síl·labes, “trill”, que és immediatament seguit per una síl·laba característica que sona com encetar una ampolla de cava, el “corck”, que dona lloc al “whetting”, una seqüència de síl·labes que sonen com un soroll de raspall (Castroviejo, 1975; Naguib, 2003; Hart et al., 2020; Figura 17). En el cas de les famílies *Tetraonidae*, *Spheniscidae*, *Otididae* i *Anserinae*, les vocalitzacions que emeten estan catalogades com a no harmòniques, és a dir que la seva veu no està formada per la sobreposició de sons simples la freqüència dels quals sigui múltiple de la freqüència més baixa (Policht et al., 2023). Les seves vocalitzacions, així com els sons que emeten amb parts del seu cos, també contenen sons de l'espectre de l'infrasò (inferior a 20 Hz) que forma part de la seva comunicació i que depen de l'estructura corporal i dimensions de l'animal (Lieser et al., 2005; Hart et al., 2020). A la primavera el display sonor que efectuen els mascles a les àrees de bosc que ocupen, juga un paper clau per l'èxit reproductiu anual, així com en la determinació de l'estructura de la jerarquia interna del lek (Gil et al., 2020; Hart et al., 2020). Al seu torn, la transmissió del missatge sonor que emeten els mascles fins als seus destinataris (femelles i altres mascles competidors) depèn de la correcta propagació sonora que es pugui esdevenir en una estructura de bosc determinada (Liu et al., 2013; Chobeau, 2014; Hart et al., 2020). Finalment, les postes d'uns 5 ous s'efectuen entre juny i juliol, posteriorment donaran lloc als pollets que hauran de sobreviure fins que al cap de l'any hagin adquirit la corpulència quasi definitives i al cap de 2 anys ja siguin adults reproductors (Castroviejo, 1975; Coppes et al., 2021).



**Figura 17.** Estructura del cant del gall fer. Font: arxiu propi.


La conservació és un dels objectius principals de la gestió de la fauna que implica la protecció de les comunitats biològiques i dels ecosistemes sencers (Soulé, 1985). La importància i els esforços de conservació de moltes d'aquestes espècies en declivi, resideix no tan sols en l'espècie en si, sinó en el fet que totes elles compleixen un paper com espècie paraigües o bioindicadores (Lyu & Sun, 2014; Pilliod et al., 2020; Song et al., 2021). El concepte d'espècie paraigües és un tipus d'estratègia en què per una espècie amb grans necessitats d'àrea (l'espècie paraigües), si es proporciona un hàbitat protegit suficient, facilita la gestió favorable de moltes altres espècies que queden protegides sota el “paraigües” d'aquesta (Wilcox, 1984; Song et al., 2021). Al seu torn, aquestes poden ser en alguns casos bioindicadors de la qualitat de l'entorn (Lyu & Sun, 2014; Pilliod et al., 2020). L'avantatge principal d'una estratègia de conservació d'espècies paraigües és el potencial de conservar nombroses espècies simpàtriques que per definició no estan sotmeses a la separació física per barreres geogràfiques (Caro, 2003). La conservació del gall fer a Catalunya també pot ajudar a manteniment de les poblacions d'altres espècies amb les quals comparteix requisits d'hàbitat (Suter et al., 2002; Pakkala et al., 2003) i al



seu torn depèn del manteniment de boscos alpins i subalpins amb característiques estructurals de maduresa adequades que en permetin l'òptim desenvolupament de les seves dinàmiques en les èpoques crítiques del cicle biològic d'aquesta espècie, com en són l'època d'aparellament i l'època d'hivernada (Europarc-España, 2020; Gil et al., 2020; Nicolás et al., 2022).







OBJECTIUS  
ESTRUCTURA I  
DESENVOLUPAMENT DE  
LA TESI



---

## Objectius, estructura i desenvolupament de la tesi

---

L'objectiu general d'aquesta tesi ha estat, en primer lloc, aprofundir en el coneixement de les característiques generals i individuals del cant del gall fer fent ús de l'acústica ambisònica. En segon lloc, utilitzar aquestes mateixes tècniques per avaluar si les característiques de transmissió sonora dels boscos tenen algun paper en l'ocupació o abandonament dels rodals forestals per part del gall fer, de manera que la gestió forestal pugui, eventualment, incorporar criteris bioacústics encarats a la conservació d'aquesta espècie.

Com a objectius específics tractats en els diferents capítols, hem volgut caracteritzar les vocalitzacions de l'espectre audible del so emès pels mascles de gall fer per estudiar si els individus es poden distingir entre ells mitjançant una assignació correcta a cada individu dels seus propis cants (capítol 1). Determinar l'amplitud real (dB) de l'espectre audible de la veu dels galls, paràmetre essencial per calcular-ne la distància de propagació i detecció del so, necessari per poder planificar correctament possibles protocols de monitoratge bioacústic (capítol 2). Finalment, analitzar si els rodals de bosc abandonats per aquesta espècie presenten característiques acústiques diferents dels rodals on l'espècie encara es manté (capítol 3).

En el **capítol 1** vam voler avaluar la capacitat discriminatòria a escala d'individu del cant del gall fer amb l'objectiu de proporcionar eines bioacústiques que puguin ser utilitzades en els protocols de seguiment de l'espècie. Vam poder gravar en alguna ocasió diversos galls fers a la vegada, separar-los en el post-processat del senyal acústic i poder analitzar els components del cant de cada individu per tal d'acomplir amb l'objectiu de caracterització individual dels mascles de gall fer a partir de la seva veu. Això ho vam poder aconseguir gràcies als avantatges de l'acústica ambisònica per a poder gravar a la vegada diferents fonts de so i posteriorment separar-les entre elles mitjançant micròfons hiperdirectius (molt direccionals) virtuals que permeten "seleccionar" la font de so desitjada (Pulkki & Hirvonen, 2005; Moreau et al., 2006; Farina et al., 2010). El maig de 2021 vam mostrejar vuit parcel·les lek del Parc Natural de l'Alt Pirineu amb presència de gall fer durant una sola sessió nocturna cadascuna per registrar set mascles diferents en cinc d'aquestes parcel·les (dos mascles en dues parcel·les i un mascle en tres parcel·les). El maig de 2022 vam mostrejar dues de les parcel·les on no vam gravar gall fer a l'any

anterior, durant sis sessions nocturnes consecutives cadascuna i aconseguim obtenir sis enregistraments nocturns de dos mascles i cinc enregistraments nocturns de tres mascles. De cadascun dels mascles es van obtenir 90 repeticions del seu cant per sessió. La gravació es va dur a terme entre les 20:00-23:00 hores i entre les 5:00-11:00 hores (hora oficial) des d'un amagatall instal·lat a cada parcel·la d'estudi (Figura 18) durant el pic de la primera quinzena de la temporada de reproducció. Per minimitzar la pertorbació vam entrar a l'amagatall a les 18:30-19:00 hores (1.5 h abans de l'hora habitual d'inici de la pantalla) i vam sortir-ne a les 12:00 hores (Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015).



**Figura 18.** Amagatall de camuflatge des del que es realitzaven les gravacions, instal·lat a una de les parcel·les del bosc de pi negre de la zona de mostreig. Font: arxiu propi.

Per tal de localitzar el lloc òptim per la instal·lació de l'amagatall, vam recórrer al coneixement dels tècnics de seguiment de fauna de la zona sobre la posició i moviments de cada gall conegut, així mateix vam fer ús del reconeixement de rastres per corroborar la correcta posició dels amagatalls (Figura 19). El 15 de maig de 2022 vàrem poder gravar en una sessió matinal efectuada a un dels boscos del Parc Natural de l'Alt Pirineu, fins a 90 repeticions del so d'un mascle de gall fer que es va situar a terra a 1 m de l'amagatall

camuflat i del micròfon prèviament calibrat. El soroll de fons també es va poder mesurar 20 vegades gravant 30 segons del so ambient, just abans que el mascle iniciés el cant.

En el **capítol 2** s'avalua per primera vegada l'amplitud real (dB) del cant del gall fer, així com la distància de propagació i la distància de detecció d'aquests senyals. Vàrem poder gravar un individu de gall fer a 1 m de distància respecte a l'amagatall de camuflatge i això ens va permetre poder obtenir aquest valor d'amplitud real de la seva veu en l'aspectre audible del so. Aquestes dades ens poden permetre planificar mostrejos amb acústica passiva que cobreixin tota la zona, sense superposar sons i obtenir arxius acústics de bona qualitat que posteriorment puguin permetre l'aplicació de classificadors acústics automàtics per la detecció d'individus i espècies diferents. Tots aquests aspectes poden ajudar a obtenir informació bioacústica útil per la conservació de la biodiversitat.



**Figura 19.** Rastres indicatius de gall fer: A) arbre posader amb restes de femtes a la seva base, B) latrina amb femtes d'un mascle, C) femtes d'una femella, D) femtes d'un mascle, E) petjada de femella, F) closca d'ou, G) vèries petjades de diversos mascles que indiquen una possible batalla. Font: arxiu propi.

En el **capítol 3** vàrem estudiar, mitjançant un estudi de resposta impulsiva, si les propietats de propagació del so poden tenir un paper en els patrons d'ocupació i d'abandonament dels boscos per part del gall fer. Això ha estat possible gràcies al fet que



els micròfons ambisonics permeten captar no només el so en si, sinó també els seus components de velocitat, pressió i direcció. Això ens ha permès extreure els paràmetres acústics necessaris per a efectuar l'anàlisi de resposta impulsiva (Bertet et al., 2013; Farina & Tronchin, 2013). D'acord amb les premisses de l'ISO 3382 de l'any 2012 i les seves adaptacions en espais més oberts com l'ISO 9613 del 2024, hem pogut mesurar l'efecte de l'estructura de la vegetació dels boscos actualment ocupats per gall fer i abandonats per gall fer en l'estructura temporal del so, en la seva tendència d'atenuació o increment i en els patrons espacials de propagació (Campanini & Farina, 2008; Girón et al., 2008; Shelley et al., 2013; Alarcão & Inácio, 2022). L'objectiu d'aquest capítol ha estat a considerar si existeixen diferències en els patrons de propagació del so en funció de l'estructura de bosc i si això pot determinar l'ocupació o abandonament de les zones de bosc per part del gall fer.

El primer pas va ser caracteritzar l'estructura de bosc de les zones amb presència actual o abandonats pel gall fer. Amb aquest primer objectiu es va fer ús del protocol RedBosques (Europarc-España, 2019; Europarc-España, 2020; Fungobe, 2024). Amb aquest protocol es van mesurar una sèrie de variables dendromètriques en tres parcel·les circulars aleatòries de 25 m de radi en cadascuna de les 20 parcel·les forestals (algunes de les quals, coincidien amb les empleades al capítol 1). Amb aquestes mesures es van poder obtenir un seguit de variables estructurals del bosc com són el volum total de fusta viva i fusta morta, l'altura dominant dels arbres i d'altres. Així mateix, es van obtenir un conjunt d'índexs forestals (amb valors de 0-10): i) índex de maduresa que està relacionat amb l'edat de la tribuna; ii) índex de petjada humana que reflecteix l'activitat humana; i iii) índex d'integritat espacial que caracteritza el context espacial del rodal. El mostreig forestal es va dur a terme en cadascuna d'aquestes 20 parcel·les forestals durant la temporada de no reproducció, de juny a novembre de 2020 i 2021 (Figura 20; Figura 21).



**Figura 20.** Procés d'obtenció de dades quantitatives i qualitatives forestals segons el protocol RedBosques. Aquí es mostra l'obtenció de l'alçada de cada arbre de la parcel·la amb un làser. Font: arxiu propi.



**Figura 21.** Dos exemples de boscos amb presència de gall fer amb estructura i grau de maduresa diferents. A) Esterri, amb un grau de maduresa de 3.7, conté menys proporció de fusta viva i fusta morta, així com menys arbres de diàmetre gran que en el cas de B) Comes, amb un grau de maduresa de 5.4. Font: Clara Cortadellas.

Un cop va finalitzar l'anàlisi d'estructura forestal, es va procedir amb l'anàlisi d'estructura acústica de les mateixes parcel·les on es va efectuar el mostreig forestal. La font de so empleada va ser un clapet de fusta de la casa italiana Spectra, específicament dissenyat per aquest tipus d'anàlisi. L'alternativa del clapet de fusta com a font de so no elèctrica és ideal i empleada en entorns naturals on no és possible cap font elèctrica com en el nostre cas (Pavlović et al., 2008; Papadakis & Stavroulakis, 2019). El clapet de fusta compleix amb les condicions necessàries per ser una font de so adequada per l'anàlisi acústic de resposta impulsiva efectuat en aquest capítol. El so que genera és omnidireccional i permet una excitació uniforme de l'espai en totes les direccions, te una intensitat suficient per estar 45 dB per sobre del soroll de fons, és repetible per tal de que el so sigui el més similar possible cada vegada que es genera (en aquest cas es va efectuar sempre per la mateixa persona) i la resposta freqüencial conté les octaves de 125 fins a 4000 Hz, necessàries per aquest anàlisi i que al seu torn engloben les octaves que fa servir el gall fer per la seva comunicació (Pavlović et al., 2008; Shelley et al., 2013; Papadakis & Stavroulakis, 2019). Així mateix, el so que genera el clapet de fusta és un tipus de so anomenat "DIRAC" el qual no necessita passar pel procés matemàtic de desconvolució per generar el pic d'impuls, donat que ja genera d'entrada aquest pic d'impuls (Pavlović et al., 2008; Papadakis & Stavroulakis, 2019).

L'enregistrament es va dur a terme entre les 08:00-13:00 hores durant el juliol de 2022, en tres ubicacions aleatòries properes als punts on s'havien pres les mesures d'estructura forestal. Vam utilitzar el micròfon ambisònic Neve VR situat a 1,5 m d'alçada per gravar i el clapet de fusta a 1,5 m d'alçada per generar un so de 100 dB (Papadakis & Stavroulakis 2019; Figura 22). Per a cada ubicació vàrem determinar un punt central des del qual vam definir dos transsectes paral·lels a la línia de cota dividida en quatre distàncies (10 m, 20 m, 40 m i 60 m). A cada distància es van generar cinc impulsos amb el clapet de fusta i es van gravar 30 segons de silenci amb el micròfon situat al punt central (Moreau et al., 2006; Farina et al., 2010; Farina & Tronchin, 2013).



**Figura 22.** Material emprat durant el mostreig acústic, ambdós situats a 1.5 m d'altura. A) clapet de fusta a cada distància (10 m, 20 m, 40 m i 60 m) , B) micròfon Neve VR i gravadora Zoom F6 al centre de la parcel·la. Font: arxiu propi.



## CAPÍTOL 1

---

### VOCAL INDIVIDUALITY OF WESTERN CAPERCAILLIE *TETRAO UROGALLUS* MALE CALLS, AN AMBISONIC BIO-ACOUSTIC APPROACH.

---



Petjades de gall fer mascle  
Foto: arxiu propi

Aquest capítol es basa en el manuscrit:

Jordi. O., Puig. X., Farina, A., Mañosa, S. 2024. Vocal individuality of Western Capercaillie *Tetrao urogallus* male calls, an ambisonic bio-acoustic approach. *Bird Study*. (Enviat; en segona revisió).



## CAPÍTOL 1

### VOCAL INDIVIDUALITY OF WESTERN CAPERCAILLIE *TETRAO UROGALLUS* MALE CALLS, AN AMBISONIC BIO-ACOUSTIC APPROACH.

---

## Abstract

---

Western Capercaillie *Tetrao urogallus* males use their vocalizations during the breeding season for territorial and reproductive purposes. Their calls have genetically predefined characteristics that could confer each bird with a unique and distinguishable vocal signature. To investigate whether call components allow to discriminate between different individual Western Capercaillie males. We used the ambisonic technology, capable of recording in closed forest environments and at long ranges, to record and analyse the calls of twelve male Western Capercaillie during the courtship season on seven lek areas of the Alt Pirineu Natural Parc, in NE Spain. We did a supervised cluster analysis in order to evaluate the power of calls for inter-individual discrimination and correct classification of vocalizations to each particular individual. Although there is some intra-individual variation in the characteristics of the vocalizations, these are smaller than the inter-individual differences and allow a correct discrimination of the calls. We found that the song variables that make up the individual vocal signature and confer discriminatory power are those that refer to the fundamental frequency (frequency where the first peak of sound intensity is found) and the duration of the song components. Western Capercaillie male calls can be individually identified and differentiated from each other through their bio-acoustic characteristics. This may have applications in improving the monitoring and management of the species, opening the door for the future development of non-invasive bioacoustics tools allowing the identification of individual Capercaillie males.

**Keywords:** lekking behaviour; bird song; bio-acoustic; cluster analysis





# 1. Introduction

Scientists have focused their attention on individual variability of bird vocalizations for decades (Fox et al., 2008; Průchová et al., 2017) because they are suitable to provide actual and reliable information about the identity and characteristics of the sound emitter, over long distances and both in open and in cluttered environments (Slabbekoorn et al., 2002; Benedict & Warning, 2017). Previous research has found a vocal signature unique to each individual in some vocal and non-vocal learner bird species, which is important for understanding how individual identity (Rebbeck et al., 2001; Tibbetts & Dale, 2007), body condition (Juola & Searcy, 2011; Cramer, 2013; Wang et al., 2019) or social status are communicated through the duration, number, ordination or frequency peaks of the syllabic components of the songs and calls (Favaro et al., 2015; Elie & Theunissen, 2018).

Whereas vocal learning is critical for the normal development of song in Passerines, Psittaciformes and Trochiliformes (Wada, 2010; Liu et al., 2013; Logue et al., 2019), in the rest of non-passerines, the non-vocal learners, song appears to develop innately and is mainly genetically fixed (Fujiwara &

Tobari, 2021; Ten, 2021). For that reason, the structure of the vocalizations of non-vocal learners may exhibit, in general, fewer intra-individual variation (Robisson et al., 2010), and is more likely to be genetically correlated with other genotypic and phenotypic traits. This is particularly important in lekking birds, in which males do not provide any sort of parental care or resources for the female and the brood (Shelly, 2018). In these birds, the only benefit females would obtain from mate selection is an improved genetic quality of their offspring (Westcott, 1992; Shelly, 2018). In this context, the use of calls as an honest signalling of genetic quality would be highly selected, and one would expect the existence of consistent individual variation in male calls, correlated with genetic traits (Gil & Gahr, 2002).

One of such lekking species is the Western Capercaillie *Tetrao urogallus*. This is the largest grouse species in Europe and inhabits boreal and temperate forests, predominantly coniferous consisting of *Pinus* sp., *Picea* sp. and *Abies* sp., from southwestern Europe to eastern Siberia (Sirkia et al., 2011). Even though widespread and still with healthy populations in Northern

Europe and Russia, populations in Central and Western Europe have been steadily declining during the 20th century and their viability is seriously compromised in many areas (Jahren et al., 2016; Gonzalez et al., 2016). It exhibits a dispersed lek mating system in which males loosely aggregate to display on particular areas in the forests, which are visited by the female with the sole objective of mating (Castroviejo, 1975). Male calls may have an important role in female choice, which express active preference for males with certain syntax, frequency and duration features on their calls (Liu et al., 2013; Fujiwara & Tobarí, 2021; Gémard et al., 2021). According to this, Laiolo et al., (2011), by relying on registration in the audible range using directional microphones at very close range (ca 15 m), found consistent interindividual variation of Western Capercaillie male calls, which was correlated with habitat quality. Hart et al., (2020), as well, found consistent variation between male calls emitted at very low-frequency (< 20 Hz), which they argued could be used by females to assess male quality. However, while recording low-frequency calls, as in Hart et al., (2020), requires relatively expensive and sophisticated equipment and is limited to a very close range, recording wild birds in the audible range

using cheaper directional equipment is also challenging, because self-microphone noise or the distortion caused by sound attenuation, dispersion, reverberation or ambient noise, impair the quality of the recordings. This is especially so for species such as the Western Capercaillie, which vocalise at frequencies below 4 kHz at low intensity and in forest environments with a lot of sound attenuation (Slabbekorn et al., 2007), which limits the application of conventional equipments to relatively short ranges, as in Laiolo et al., (2011). A potential way to overcome some of these limitations is the use of ambisonic technology (Moreau et al., 2007; Mattioli et al., 2017), which allows picking up the signal coming from all directions over long distances and avoiding the distorting effects of vegetation closure, without loss of signal due to the effect of sound propagation in the forest (Tarrero, 2002; Tarrero et al., 2008). Moreover, if more than one individual is singing at the same time, their corresponding calls can be split from each other in signal pre-processing by virtual superdirective microphones (Farina et al., 2010).

Bioacoustic monitoring allows studying population status of breeding (Buxton & Jones, 2012; Marques et al.,

2021) or migratory birds (Van Doren et al., 2023; Weisshaupt et al., 2024). Bioacoustic index can be developed to reflect changes in the populations that can be associated to environmental changes (Marques et al., 2021; Van Doren et al., 2023). Acoustic data are being used for monitoring species living in remote and forested environments, such as high mountains, where methods other than passive acoustics are difficult to implement (Serrurier et al., 2024; Southwell et al., 2024). This is especially important in the case of endangered and sensitive species such as the Capercaillie (Jahren et al., 2016; Gil et al., 2020), where non-invasive acoustic monitoring, even at the individual scale, can provide detailed information on population decline, identify threats and measure the effectiveness of conservation management (Fagerlund, 2012; Abrahams, 2019; Hart et al., 2020). Beyond the population level, some research has evidenced the possibility of identifying individual animals by their

vocalisations, opening the possibility of applying passive acoustic monitoring techniques to individual monitoring (Kondo et al., 2010; Cheng et al., 2012; Martin et al., 2022). This allows going from monitoring at the population scale (Abrahams, 2019; Braun et al., 2019; Serrurier et al., 2024) to the individual level, recording individual activity patterns, movement and behavior (Marin-Cudraz, 2019; Martin et al., 2022; Favaro et al., 2023), increasing the possibilities to understand the behavioural and demographic processes that underlie population dynamics or species evolutionary changes (Clutton-Brock & Sheldon, 2010; Bocaccio et al., 2023).

The aim of our research was to use the ambisonic technology to record individual male Capercaillie and to investigate whether the recorded calls can be individually differentiated from each other on the basis of the acoustic characteristics of the calls.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Ethic statement

The Western Capercaillie *Tetrao urogallus aquitanicus* is an endangered and declining species in Spain (Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015; Gil et al., 2020) and access to male arenas is strictly

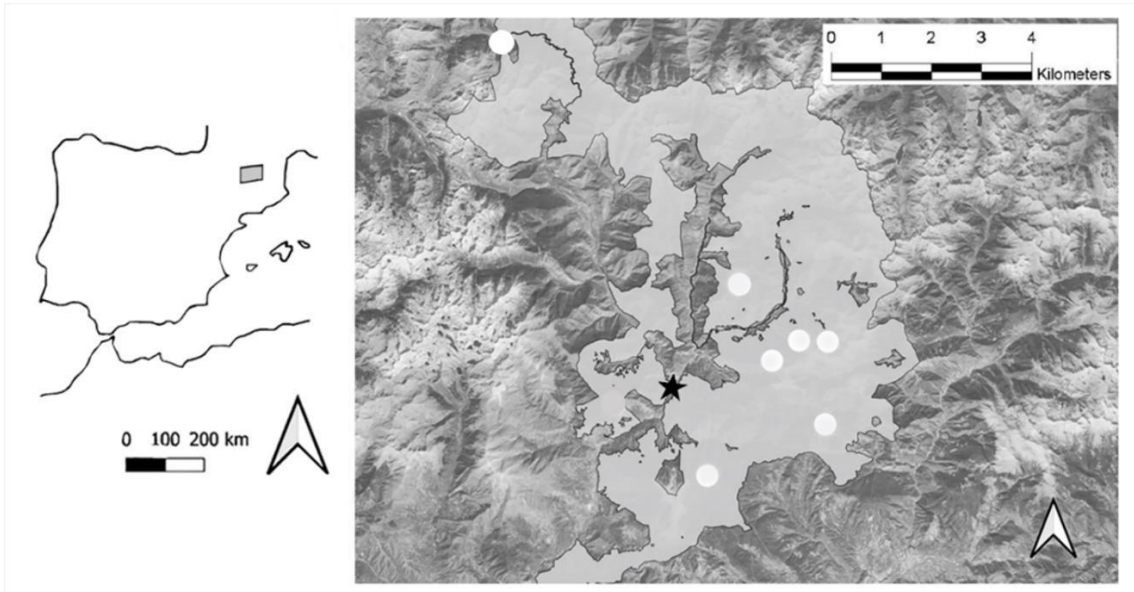
controlled by regional administrations. This study was conducted under permissions from the Generalitat de Catalunya. The study was not invasive and the animals were not handled or disturbed.

### 2.2. Study area

The study was carried out on the Natural Park Alt Pirineu on Spain (Head Park office in Llavorsí, 42° 29' 45.530" N, 1° 12' 36.147" E), which gives refuge to the largest population of Western Capercaillie in the Iberian Peninsula, but which is also subject to a severe decline, from an estimated 150 males in 2005 to only 120 in 2015 (-20%) (Servei de Biodiversitat i Protecció dels Animals, 2015). We selected seven study forest plots of an average size of  $11 \pm 4.1$  hectares (min=6 hectares, max=18 hectares), permanently inhabited by Western Capercaillie, according to the census conducted by the Department of Territory and Sustainability of the Generalitat de Catalunya (Servei de Biodiversitat i Protecció dels Animals, 2015; Figure 1). These plots were 1700-

2300 m above sea level and consisted on mixed forests of *Pinus nigra*, as the dominant species, and *Betula* sp. and *Abies alba* as companion species, with *Vaccinium myrtillus*, *Rhododendron ferrugineum*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Juniperus communis* in the underground (Pèlachs et al., 2009). During the courtship season, adult male Western Capercaillie behaves in a very territorial manner and moves no more than 2 km from its lek area (Hjeljord et al., 2000; Wegge et al., 2009). Because the average nearest-neighbour distance between our plots was  $12 \pm 2.7$  km (min=2 km, max=22 km) and sampling was carried out at the peak of courtship (May), we were fairly confident that the recorded males did not move between our studied

lek sites (Storch, 1997; Wegge et al., 2005).



**Figure 1.** Study area in the Alt Pirineu Natural Park. Circles indicate the location of the seven Western Capercaillie lek sites sampled. The star indicates the village of Llavorsí, where the head office of the natural park is located.

### 2.3. Recording and acoustic analyses

In May 2021, we sampled each plot during a single one-night-session each, to record seven different males on five of them (two males on two plots and one male in three plots). In May 2022 we sampled the two negative plots in the previous year, during six consecutive night-sessions each, and managed to obtain six night-session recordings of two males and five night-session recordings of three males. Recording was conducted between 20:00-23:00 hours and between 5:00-11:00 hours

(official time) from a hide installed on each study plot during the peak of the first fortnight of the breeding season. To minimize disturbance, we entered the hides at 18:30-19:00 hours (1.5 h before the usual display start time) and left it at 12:00 hours, after the end of the display time (Servei de Biodiversitat i Protecció dels Animals, 2015). No recordings were made on rainy or windy days (Budk et al., 2015). We used a Neveaton VR ambisonic microphone connected to a Zoom F6 recorder set to 48 kHz

sampling rate, 32 bits float, of 32 dB of gain and 80 Hz high pass filtered, obtaining signals from birds up to 180 away. A windshield Boya-WS1000 was used to eliminate wind noise. Ambisonic microphones record in a so-called A-format, which has to be converted to B-format before formal analysis of the calls. We did this conversion using the Soundfield plugin on the host software Adobe Audition (Adobe Systems Incorporated, 2003). We also used Adobe Audition to create virtual super-directive microphones to discriminate simultaneous calls coming from different individuals in the lek (Moreau et al., 2006). We analysed each song and manually extracted the values on the spectrogram of the sound using Avisoft-SASLab Pro software (Specht, 2016) set to FFT length 1024, frame size 100%, overlap 87.5%, Hamming window, time resolution 5.8 ms, frequency resolution 22 Hz and sampling rate 22.05 kHz.

The male display call of the Western Capercaillie is formed by a series of preliminary syllables that culminates into the main call, which is formed by a characteristic initial single syllable, the click, followed by a trill (a quick repetition of syllables), which is immediately followed by a characteristic single syllable sounding like pulling the

cork up of the bottle, the cork, that gives rise to the whetting, a sequence of syllables sounding like a scraping noise (Figure 2) (Castroviejo, 1975, Hart et al., 2020). Besides the duration of some vocal components, previous studies have already shown the importance of the fundamental frequency of the cork-pop note (F) in discriminating between individuals (Laiolo et al., 2011; Hart et al., 2020), so here we have also taken this syllable into account. The first syllable of the trill (f) has been used because the following syllables of the trill phase are a "shadow" of the first syllable of the trill phase and have the intensity peaks less marked, not giving as much confidential information as the first one. Contrary to Laiolo et al., (2011), we didn't use the mean of the entire trill phase for this reason. We defined a "sample call" as the sequence of sounds produced from the first individual syllable until the last syllable of the whetting phase. We recorded 90 sample calls of every single male at each night-session.

On each sample call, we measured the following acoustic variables on the spectrogram and on the amplitude spectrum. Figure 2):

- 1) Call duration (D): seconds from the start of the syllable Click till the

start of the last syllable of the whetting phase.

2) The duration of the trill phase (T): seconds from the start of the first syllable of the trill till the start of the last syllable of the trill.

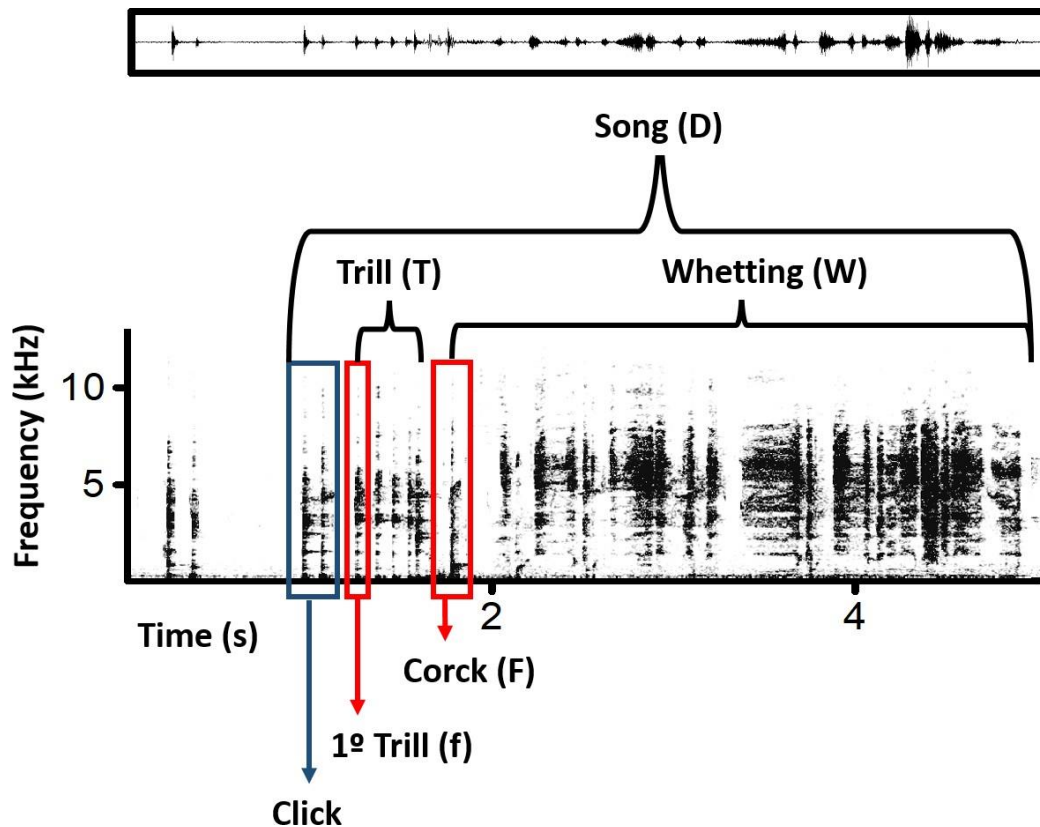
3) The duration of whetting (W): seconds from the start of the syllable cork till the start of the last syllable of the whetting phase.

4) The fundamental frequency of the first syllable of the trill (f) on hertz (Hz); which is the frequency at which we find the first peak of highest intensity when looking at the amplitude spectrum of the spectrogram

5) The fundamental frequency of the cork-pop note (F) on Hz; which is the frequency at which we find the first peak of highest intensity when looking at the amplitude spectrum of the spectrogram

Each syllable is a pulse in the spectrogram. Its beginning was defined by a peak amplitude profile measured in the amplitude frequency domain from the amplitude spectrum. The duration of each sound component was measured on the time domain of the spectrogram in seconds (s) (Hart et al. 2020).





**Figure 2.** The spectrogram of the Western Capercaillie song showing the four phases: Click, Trill, Cork and Whetting. The variables measured are: D: Song duration in seconds; f: fundamental frequency of the first component of the Trill phase on hertz; F: fundamental frequency of the cork-pop note on hertz; T: duration of the Trill phase in seconds and W: duration of whetting in seconds. The start of each phase or component was defined by the peak in the amplitude spectrum.

## 2.4. Statistical analysis

Median mean and minimum-maximum range were computed for all variables. Most variables show some heterodasticity between birds and also some extreme point. Therefore, differences of each variable between individual birds were tested by means of non-parametric Kruskal-Wallis test and

Dunn's post-hoc test with Holm's p-adjustment method for pairwise comparisons. We used a supervised cluster analysis to find out whether it is possible to classify the different calls we have obtained according to the male that produced them. We compared two well-known methods of supervised cluster

analysis, the k-nearest neighbour algorithm (K-NN) and quadratic discriminant analysis (QDA) (Starzacher & Rinner 2009).

K-NN is a non-parametric method where no data distribution is assumed. For the implementation of k-NN, the min-max normalization of variables has been used so that they all take values between 0 and 1, and Euclidean distance has been used. Each test sample observation is classified into the most common group among the closest K neighbours of training data. This K value must be specified by the user and depends on the problem and the data. In this sense, the values of K have been varied from 1 to 30 and the optimum has been obtained for K=2.

The QDA supervised cluster analysis assumes that the variables of each group are distributed according to a multivariate normal distribution where the mean and matrix of covariances can be different between groups. The probabilities of belonging to each group have been considered equiprobable, considering a priori the call of a Capercaillie may come with the same probability of any Capercaillie. Some of the variables do not exhibit variability, especially the cork-pop frequency (Figure 3). This fact arises from the

technology's difficulty in measuring low frequencies accurately. In order to apply QDA, it is necessary to estimate the variance of each variable for each male, and computationally, this value cannot be zero. Therefore, we introduced a negligible white noise (from a normal distribution with mean 0 and deviation 0.01) to enable the analysis. Adding noise to the data makes it more challenging to detect the signal. To evaluate the predictive properties of each method and compare them, an ad hoc cross validation was performed. By aligning the validation process with the specific objectives, we ensure that the model's performance was evaluated in a manner that directly addresses the intended use and requirements. Training data was first created by excluding from the original dataset the sample call of a same-day Capercaillie (session) and the excluded sample calls will become the test data. For one day 90 calls were recorded, so we classified all the songs of the session into the Capercaillie (cluster) where most of the calls were classified. And for the Capercaillie where only one session was recorded, the 90 calls were divided into three groups of 30 calls and proceed in the same way, as if we had three sessions of 30 calls. Thus, in total, 48 pairs of training and test data sets were created (2 Capercaillies have 6

sessions, 3 have 5 sessions and 7 have divided their only session into 3 sub-sessions,  $2 \cdot 6 + 3 \cdot 5 + 7 \cdot 3 = 48$ ). Finally, for each method we evaluated how well the test data were classified, using the percentage of well-classified sessions or sub-sessions. Descriptive analyses were performed using R Statistical Software (v4.0.4; R Core Team, 2021). We performed post-hoc analysis using the R

package "PMCMRplus" (Pohlert, 2023) for identifying significant differences between groups. The Quadratic Discriminant Analysis (QDA) was conducted using the R package "MASS" (Veneables & Ripley, 2013; Ripley, 2024), and the K-Nearest Neighbors (KNN) analysis was implemented using the R package "class" (Veneables & Ripley, 2013; Ripley, 2023).

### 3. Results

The descriptive analysis showed inter-individual variability in the five acoustic variables analyzed (Figure 3, Table 1). Kruskal-Wallis test showed

significant differences among birds in each variable (all five p-values were less than 0.0001).

Individual	Sessions (n°)	D (s)	T (s)	W (s)	f (Hz)	F (Hz)
1	6	3.53 (3.37-3.76)	0.29 (0.23-0.33)	2.92 (2.88-2.96)	1590 (1400-1780)	890 (840-930)
2	6	3.45 (3.33-3.84)	0.31 (0.26-0.40)	2.84 (2.73-2.91)	1590 (1170-1780)	890 (840-930)
3	5	3.58 (3.39-3.58)	0.27 (0.22-0.29)	2.84 (2.83-2.94)	1680 (1590-1780)	930 (840-930)
4	5	3.61 (3.52-3.82)	0.31 (0.29-0.42)	2.98 (2.92-3.07)	1590 (1450-1680)	840 (840-930)

Individual	Sessions (n°)	D (s)	T (s)	W (s)	f (Hz)	F (Hz)
5	5	3.59 (3.45-3.66)	0.32 (0.25-0.41)	2.94 (2.89-2.94)	1590 (1540-1640)	890 (890-930)
6	1	3.63 (3.50-3.90)	0.40 (0.36-0.60)	2.80 (2.70-3.00)	1590 (1540-1640)	810 (810-860)
7	1	3.40 (3.20-3.50)	0.36 (0.20-0.40)	2.56 (2.50-2.70)	1680 (1680-1780)	890 (888-890)
8	1	3.76 (3.40-3.90)	0.42 (0.40-0.49)	2.72 (2.72-2.75)	1680 (1640-1730)	790 (790-790)
9	1	3.50 (3.42-3.70)	0.34 (0.27-0.40)	2.68 (2.66-2.69)	1615 (1540-1640)	840 (838-840)
10	1	3.55 (3.50-3.80)	0.37 (0.37-0.39)	2.70 (2.70-2.70)	1590 (1540-1640)	890 (882-890)
11	1	3.58 (3.40-3.70)	0.43 (0.36-0.46)	2.69 (2.69-2.69)	1590 (1400-1640)	840 (830-840)
12	1	3.42 (3.36-3.53)	0.35 (0.35-0.35)	2.63 (2.63-2.63)	1590 (1540-1640)	890 (890-890)
Total		3.58 (3.20-3.90)	0.31 (0.20-0.60)	2.86 (2.50-3.07)	1590 (1170-1780)	890 (790-930)

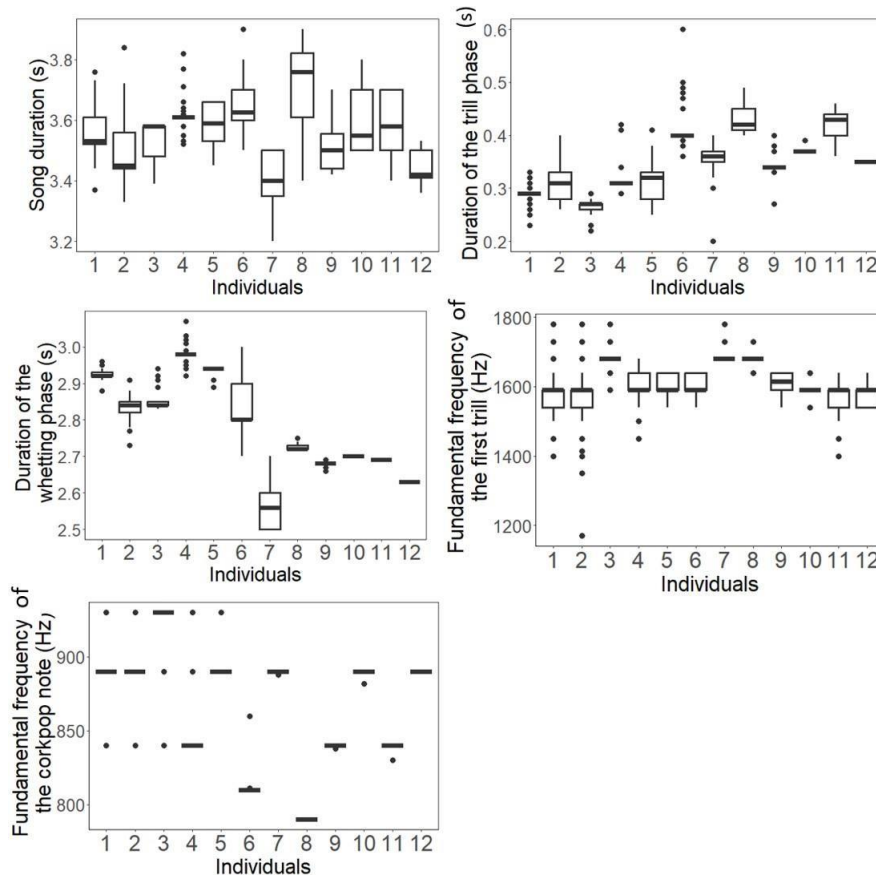
**Table 1.** Descriptive analysis (median and minimum-maximum range) of the calls of the 12 recorded males, and the global corresponding average and standard deviation. Each recording session includes 90 calls. All variables were significantly different between individuals (Kruskall-Wallis test;  $p < 0.0001$ ).

Post-hoc test showed significant interindividual differences in most of the 66 possible pairwise comparisons on each variable. Specifically, 59 of the 66 pairs are significantly different in the variable D, 53 in T, 47 in f and 49 in F.

Both the K-NN method and the QDA method correctly classified 100% of the sessions or sub-sessions of the test

data (Table 2), meaning that call sessions of previously recorded males can be assigned to the correct individual with almost absolute certainty.

When considering individual calls, these percentages were lower but, in practice, we do not want to classify individual calls but rather a sequence of calls from the same Capercaillie.



**Figure 3.** Box plots showing the median (horizontal line), the Q1 and Q3 quartiles (the box), the maximum and minimum values (vertical lines) and the outliers (points) for the variables characterizing each call. D: song duration (s), T: duration of the trill phase (s), W: duration of whetting (s), f: fundamental frequency of the first component of the trill phase (Hz) and F: fundamental frequency of the cork-pop note (Hz).

**Table 2.** Percentage of sessions or sub-sessions correctly classified by each of the two supervised cluster analysis methods employed (k-NN and QDA, respectively) and minimum and maximum percentage of calls within each session or sub-session correctly classified. For Capercaillies with five or six recording sessions (Capercaillies 1 to 5), % of well-classified sessions are presented. For Capercaillies with a single session (Capercaillies 6 to 12with), this was split into three sub-sessions.

Capercaillie	k-NN			QDA		
	Well-classified sessions or sub-sessions (%)	Min calls correctly classified (%)	Max calls correctly classified (%)	Well-classified sessions or sub-sessions (%)	Min calls correctly classified (%)	Max calls correctly classified (%)
1	100 (6)	84.4	97.8	100 (6)	68.9	78.9
2	100 (6)	80.0	100	100 (6)	72.2	100
3	100 (5)	98.9	100	100 (5)	97.8	100
4	100 (5)	96.7	100	100 (5)	93.3	100
5	100 (5)	86.7	100	100 (5)	88.9	98.9
6	100 (3)	93.3	100	100 (3)	93.3	100
7	100 (3)	90	100	100 (3)	96.7	100
8	100 (3)	100	100	100 (3)	100	100
9	100 (3)	76.7	96.7	100 (3)	76.7	100
10	100 (3)	96.7	100	100 (3)	96.7	100
11	100 (3)	86.7	96.7	100 (3)	83.3	96.7
12	100 (3)	100	100	100 (3)	100	100
Global	100 (48/48)	76.79	100	100 (48/48)	68.9	100

## 4. Discussion

Our results support previous research (Laiolo et al., 2011; Hart et al., 2020) showing that Capercaillie male calls can be individually discriminated by their acoustic characteristics. However, previous research was based either on the low-frequency components of the vocalizations (Hart et al., 2020), which was only possible in captivity and required very expensive equipment logistics (Florkowski et al., 2023; Sagasti et al., 2023; Wilson et al., 2023) or on the use of either shot-gun or omnidirectional microphones, which stop recording and detecting properly the sound as soon as the sound source is not directly pointed (Farina et al., 2010; Farina & Tronchin, 2013) and do not get the entire signal due to the outdoor dispersal and attenuation of sound (Slabbekoorn et al., 2007; Schreiber & Beckenbauer, 2013), limiting the recording of wild birds at very close range (<15m in Laiolo et al., 2011). The ambisonic technology used in this project allowed us to record the audible calls from several males at once, up to 150m (Moreau et al., 2007; Mattioli et al., 2017), avoiding the potential distorting and attenuating problems associated to standard omni-directional

or shotguns microphones when used outdoors (Slabbekoorn et al., 2007).

The supervised cluster analysis showed that individual male Capercaillie recordings so obtained could be individually distinguished from each other on the base of a few acoustic variables. In this work, supervised cluster analysis QDA and the non-parametric K-NN method have been compared, both showing good behaviour by correctly classifying 100% of sessions and sub-sessions. The fact that the results are very similar adds robustness to the final conclusions. The individual discrimination of the calls was possible thanks to the combined effect of its several components. However, future research should analyse in more detail which are the best classification techniques, including not only those implemented in this work but also other methods such as classification trees (Naufal et al., 2023).

We found few or no intra-individual variation in the fundamental frequencies of the sounds, which agrees with the expectation that these frequencies are closely linked to the individual characteristics of each bird, such as body size or the characteristics of

the respiratory system, which are largely genetically determined (Brumm, 2009; Kriesell et al., 2020). The few intra-individual deviation of the values of these variables is considered acoustically normal, since it occurs approximately within the same 1/3 octave frequency (Weiss, 2023). In line with this result, the inter-individual differences found in the post-hoc analysis for the fundamental frequency of the trill and the fundamental frequency of the cork probably convey relevant information about size or other general and genotypic characteristics of the male. This agrees with the results of Laiolo et al., (2011), which found that males singing at lower frequencies (indicative of larger body size) settle in apparently better habitat plots.

However, given the small body size variation that exists between individual grouse (Castroviejo, 1975), no much more inter-individual variation of the fundamental frequencies could be expected in case the number of grouse in our sample was increased (Brumm, 2009; Shelly, 2018). In spite of this, fundamental frequencies by themselves were not the only variables involved in individual discrimination. The ability to emit calls of longer duration and at lower frequencies is associated with larger

birds of higher body condition (Juola & Searcy, 2011), which probably confer them higher capacity for territorial defense and sexual attraction (Benedict & Warning, 2017; Wang et al., 2019). In that way, the duration and frequencies of the call may probably be indicative of male condition and status, conferring a recognisable individual signature that remains constant (Favaro et al., 2015; Hart et al., 2020).

Increasing the number of leks and Capercaillies recorded in the future would probably reduce the percentage of good classification, as there is a greater likelihood that two Capercaillie have more similar songs (Brumm, 2009; Shelly, 2018). This potential problem can be mitigated by weighting the classification probabilities, so that it gives a Capercaillie more likely if the recordings have been obtained in the same lek site and less likely when the lek sites are further away. With QDA analysis this can be incorporated naturally, since the a priori probability of belonging to a cluster (one male Capercaillie selected) can be defined so that it depends on the distance between lek sites (Starzacher & Rinner, 2009). Moreover, including new variables, such as syllabic composition, spectral shape, or time elapsed between song



components of the calls (Mandiwana et al., 2014; Bregman et al., 2016; Templeton, 2016) could also help to optimize correct classifications with larger sampling sizes.

Our results are a first step for the development of techniques allowing to identify different males from their call, that is, to develop an algorithm allowing to assign any Capercaillie call to a previously registered call or as belonging to a previously unregistered male, by using a similar approach as that used by Puig et al., (2016) in the analysis of attribution of texts to different authors. Being able to identify male Western Capercaillie by their calls, at long distances and in closed forest environments, would provide an easy way to monitor the composition and hierarchies of leks year after year (Abrahams, 2019), as well as the movements between leks within the metapopulation (Sachot et al., 2006; Wegge et al., 2009). However, to achieve this objective, future research should also address whether the individual signatures are maintained in successive seasons, which would be key in developing such monitoring programs.

The usual method to estimate population size and trends in Capercaillie

populations are direct lek surveys through observations and listening by people. However, human disturbance may reduce the number of birds actually calling. Moreover, the results may be subject to between-observer biases, and the limited availability of people and funding to conduct the counts often results in the impossibility to survey the whole population (Abrahams, 2019; Baines & Aebischer, 2023). Acoustic monitoring overcomes such limitations, by being a non-invasive, free of between-observer biases, easily standardized and less resource demanding technique. Although Capercaillie GPS tracking can be used to obtain information on the movements of the birds between leks, this is an invasive technique (Wegge et al., 2013; Nicolás et al., 2022) that, given its costs, can be limited to only a few individuals per year. In this context, too, acoustic monitoring, by allowing for the individual identification of birds, appears as a much less invasive and more efficient technique to monitoring not only population size and trends, but also the individual movements and behaviour of the birds (Farina et al., 2010; Mattioli et al., 2017).

## 5. Conclusions

Our study shows that frequency and the duration of the audible vocalization components of Capercaillies, confer discriminatory power between individuals. The inter-individual differences in their call characteristics make up the individual vocal signature which allow to

individually identify and differentiate Western Capercaillie from each other.

This vocal signature is maintained throughout the days, and new recordings can be sorted to the correct individual. This may lead improving the monitoring with passive acoustic recording and management of the species.

## 6. Acknowledgements

Diego Garcia, Oriol Castells, Ivan Alfonso, Javier Montes, Elisenda Montserrat, Ana Vega, Anna Mestre, Blanca Doya, Aleix Lladó, Txell Teruel, Marga and Clara Cortadellas contributed to the fieldwork and data collection. Thanks to the whole team of the Natural Park of Alt Pirineu and Servei de Fauna

i Flora (Generalitat de Catalunya) for the permissions and background of knowledge on field. Meritxell Álvarez and Miriam Masramon gave logistical support during the fieldwork period. Thanks to the technicians and engineers of Neva-ton-Europe, responsible for the manufacture of the ambisonic material.



## CAPÍTOL 2

---

### SOUND AMPLITUDE (DB) OF WESTERN CAPERCAILLIE *TETRAO UROGALLUS* MALE CALLS

---



gallina fera (Emily)  
Foto: arxiu propi

Aquest capítol es basa en l'article::

Jordi. O., Farina, A., Mañosa, S. 2023. Sound amplitude (dB) of male Western Capercaillie *Tetrao urogallus* calls. *Revista Catalana d'Ornitologia* 39: 60–64. DOI: 10.62102/2340-3764.2023.1.8.



**SOUND AMPLITUDE (DB) OF WESTERN CAPERCAILLIE *TETRAO*  
*UROGALLUS* MALE CALLS**

---

## **Abstract**

---

The knowledge of the real amplitude (dB) of sound signals is necessary to calculate the distance of propagation and the distance of detection of these signals, crucial aspects in order to be able to plan bio-acoustic sampling protocols, particularly when endangered species such as the Western Capercaillie are involved. In order to be able to measure the actual emission amplitude of Western Capercaillie *Tetrao urogallus* male calls, we recorded 90 repetitions of the call of a single male by means of a calibrated microphone, located 1 m away from the bird. In this way, we were able to determine for the first time the real amplitude of a calling male Western Capercaillie in the Alt Pyrenees Natural Park, which turned out to be  $67.68 \pm 0.83$  dB. Considering the characteristics of our microphone, this resulted on an average of maximum detection distance of 174.8 m. This information will allow optimizing future bio-acoustic detection and monitoring studies.

**Keywords:** bird communication; bird song amplitude, bio-acoustics.



# 1. Sound amplitude of Capercaillie calls

Since many years ago, bioacoustics is being used as a non-invasive population monitoring method in ornithology (Budk et al., 2015, Abrahams, 2019; Abrahams & Geary, 2020). Bird detection by passive acoustic monitoring allows to improve the management of populations and habitats (Zhong et al., 2020; Verreycken et al., 2021). This is especially so for rare, declining, endangered or otherwise sensitive species, for which the bioacoustics approach can provide a non-invasive method to obtain high-quality and long-term data, critical to enable their conservation (Abrahams, 2019; Abrahams & Geary, 2018). This is the case of the Western Capercaillie *Tetrao urogallus*, a boreal forest European grouse for which management and conservation efforts are being conducted (Sirchia et al., 2011; Gonzalez et al., 2016, Rosenberger et al., 2020). In recent years, passive autonomous acoustic monitoring is being implemented to study Western Capercaillie behavior, status and population dynamics, as well as to improve its conservation management (Abrahams & Denny, 2018; Abrahams, 2019). Western Capercaillie populations in Central and

Western Europe have been declining during the 20th century and its viability is compromised in many areas because of threats such as habitat destruction and predation (Jahren et al., 2016, Gil et al., 2020; García-Rodríguez et al., 2023). It is globally ranked as Least Concern (BirdLife International, 2016, 2024) and as Threatened with extinction in Catalonia (D.O.G.C, 2022). Mating and reproduction are the most sensitive periods of the biological cycle on which the annual population balance depends (Coppes et al., 2021; Strzała et al., 2023). During this periods, male Western Capercaillie aggregate to display on particular forest areas exhibiting a lek mating system (Wegge et al., 2005). The vocalizations emitted by males are key components of this display, not only for sexual selection but for territorial purposes (Laiolo et al. 2011; Coppes et al., 2021), and the characteristics of the calls have been shown to be associated to individual male or territory quality (Laiolo et al., 2011; Hart et al., 2020). Recent research has also shown the potential use of Western Capercaillie calls for population monitoring purposes (Abrahams & Denny, 2018; Abrahams, 2019). These studies showed that male



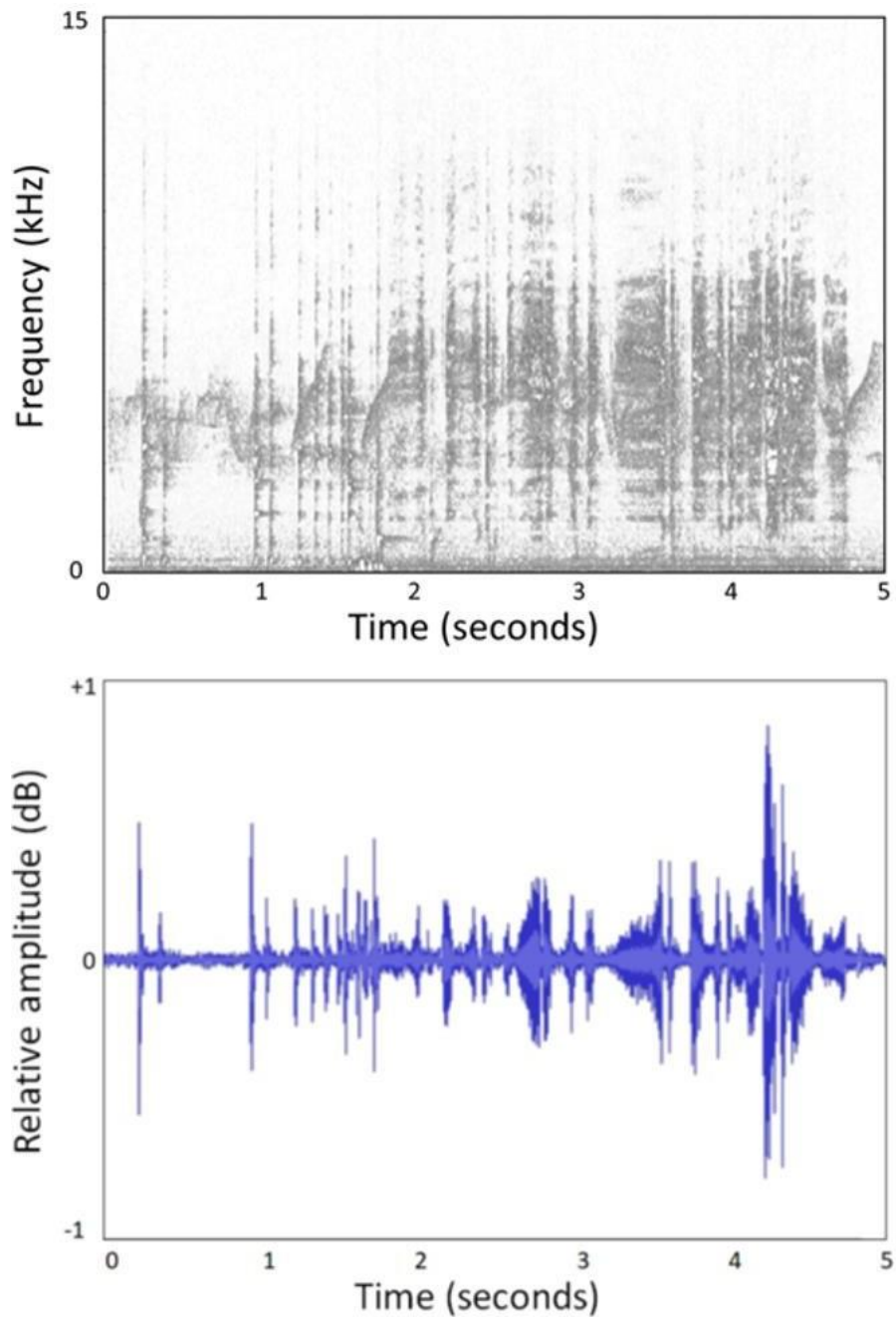
Western Capercaillie calls can be correctly identified by autonomous bioacoustics recorders and that call rates obtained during bioacoustics surveys correlate with the number of birds counted on traditional lek counts. Prior knowledge of the propagation and detection pattern of the calls may help to improve the placement of microphones within a lek, so that a better coverage of the entire sampling area with minimum overlapping can be obtained (Budk et al., 2015; Attenborough & Taherzadeh, 2016; Zhong et al., 2020), allowing a better estimation of the numbers of males within a lek. Outdoors, animal calls suffer attenuation because of meteorological factors (temperature, humidity and wind), forest dendrological characteristics and geometrical divergence (Tarrero et al., 2008; Tipton & Sparrow 2019). For these reasons, in order to perform accurate bio-acoustic experimental monitoring design and evaluation, the real sound amplitude on decibels (dB) of a bird sound should be obtained so that the sound propagation distance and the microphone detection distance can be accounted for (Attenborough & Taherzadeh, 2016; Muhlestein, 2018). However, a calibrated microphone has to be used and the sound source must be within 1 m distance from the microphone (Farina,

2007; Farina & Tronchin, 2013). Due to the complexity that this measurement often entails, only in a very few cases this important reference value has been obtained in wild birds, such as for the White Bellbird *Procnias albus*, the loudest bird ever recorded (125 dB) (Podos & Cohn-Haft, 2019), the Blackbird *Turdus merula*, the Chaffinch *Fringilla coelebs* (Schalz, 2023), or the Radde's Warbler *Phylloscopus schwarzi* (Opaev & Shishkina, 2021). In this research, we aimed to describe for the first time the real amplitude (dB) of male Western Capercaillie calls, as well as to calculate the value of maximum distance of call detection by a given microphone ( $D_2$ ), so that this information can be used to improve the eventual design of automated bioacoustics monitoring within the lek sites.

For this purpose, we recorded a Western Capercaillie male at the Natural Park Alt Pirineu (Spain), an area giving refuge to the largest population of Western Capercaillie in the Iberian Peninsula, although subject to a severe decline from an estimated 150 male in 2005 to 120 in 2015 (Gil et al., 2020). The forest study plot was 1800 m above sea level at Vall de Cardós and consisted on mixed forests of *Pinus nigra* and *Betula* sp. with *Vaccinium myrtillus*,

*Rhododendron ferrugineum*, *Juniperus communis* in the underground. We used a Neveon VR ambisonic microphone previously calibrated, covered with windshield Boya-WS1000, connected to a Zoom F6 recorder set to 48 kHz sampling rate, 32 bits float, of 32 dB of gain and 80 Hz high pass filtered, obtaining signals from birds more than 180 m away. On 15 May 2022, we recorded on a single night up to 90 call repetitions from a Western Capercaillie male signing on the ground at 1m from the hide and microphone. The grouse remained calling at this point for >5minutes, during which the calls were

recorded. We used the Aurora plugin, which operates in LIN (Z), and the A weighting, for analyzing sound pressure and particle velocity signal, on the host software Adobe Audition (Adobe Systems Incorporated, 2003). In that way, we determined that the real call amplitude of that male Western Capercaillie was (average  $\pm$  standard deviation)  $67.68 \pm 0.83$  dB (min= 65.44, max=68.89). The call amplitude (Fig. 1) was observed to be slightly lower when compared to other birds such as Blackbird (80 dB) or the Chaffinch (90 dB) (Opaev & Shishkina, 2021; Schalz, 2023).



**Figure 1.** Spectrogram (A) and oscillogram (B) of a male Western Capercaillie call, showing the variation of frequency (Hz) and amplitude (dB) over time.

The maximum average sound propagation distance ( $D_2$ ) outdoors could be determined following the formula given by Farina & Tronchin (2013) and Attenborough (2014):

$$D_2 = D_1 \cdot 10^{((SPL_1 - SPL_2) / 20)}$$

where  $D_1$  corresponds to the distance from the sound source to the microphone (1 m in our case),  $SPL_1$  corresponds to the real call amplitude (67.68 dB) and  $SPL_2$  is the highest value between background noise and the lowest level of sound detection of the microphone. The background noise was measured 20 times by recording 30 seconds of the ambient sound, just before the male initiated calling (Guidorzi & Garai, 2023), giving a value (average  $\pm$  standard deviation) of  $22.83 \pm 0.71$  dB (min = 21.64, max = 23.85). The lowest level of sound detection of the microphone was 14 dB, as indicated by the manufacture manual. Given these values, the average estimated maximum distance at which this male Western Capercaillie call could have been detected on our study forest by our microphone ( $D_2$ ) was 174.8 m, with a minimum of 120.1 m, considering the lowest call intensity and highest noise conditions and a maximum of 230.4 m considering the highest call intensity and lower noise conditions. The formula we

used to estimate these values contemplates some attenuation factors, such as distance and background noise within the forest (Farina & Tronchin, 2013; Attenborough, 2014). However, other factors such as temperature, humidity or dendrological factors (White & Swearingen, 2004; Tarrero et al., 2008, Tipton & Sparrow, 2019), which were not considered in the calculation, might introduce some variation on the maximum propagation distance. Consideration of all these sources of variation would require an impulsive response analysis (Farina, 2007; Shelley et al., 2013), out of the scope of this preliminary research.

Although our study was limited to the measurement of a single male, relatively low inter-individual variability should be expected because of the similar body size between individuals (Laiolo et al., 2011; Li et al., 2018) and call amplitude seem to be related to body size (Brumm, 2009; Favaro et al., 2015). These results may be helpful for the proper design of bio-acoustic sampling protocols, allowing to adjust the number of microphones to the quantity needed to adequately cover a given desired surface, avoiding underestimations of the population. Considering these reference values is also important if we want to

obtain good quality recordings of calls at individual level (Abrahams, 2019; Hart et al., 2020), which may be crucial to obtain accurate population estimates,

## 2. Conclusions

The knowledge of the real amplitude (dB) of the sound signals is necessary to calculate the propagation distance and the detection distance of these signals, crucial aspects to be able to plan bioacoustic sampling protocols, especially when dealing with endangered species such as the capercaillie *Tetrao urogallus*. In order to measure the actual emission amplitude of male capercaillie songs, we recorded 90 repetitions of the song of a single male using a calibrated microphone,

## 3. Acknowledgements

Thanks to the technicians and engineers of Nevaton-Europe, responsible for the manufacture of the ambisonic equipment. The whole team of the

essential for the management of endangered species, such as the Western Capercaillie.

placed at a distance of 1 m from the bird. In this way, we were able to determine for the first time the real amplitude of the song of a male capercaillie in the High Pyrenees Natural Park, which turned out to be  $67.68 \pm 0.83$  dB. Taking into account the characteristics of our microphone, this resulted in an average maximum detection distance of 174.8 m. This information will allow optimizing future bioacoustic detection and monitoring studies.

Natural Park of Alt Pirineu, Servei de Fauna i Flora and the fauna technician Diego Garcia for administrative permits and to facilitate field knowledge.





## CAPÍTOL 3

---

### FOREST SOUND PROPAGATION TO ASSESS HABITAT SELECTION BY WESTERN CAPERCAILLIE *TETRAO* *UROGALLUS*

---



Bosc de pi negre  
Foto: arxiu propi

Aquest capítol es basa en el manuscrit:

Jordi. O., Farina, A., Farina, A., Mañosa, S. 2024. Forest sound propagation and habitat selection in Western Capercaillie (*Tetrao urogallus* L.). En preparació per enviar a *Forest Ecology and Management*.





## CAPÍTOL 3

### FOREST SOUND PROPAGATION AND HABITAT SELECTION IN WESTERN CAPERCAILLIE (*TETRAO UROGALLUS* L.)

---

## Abstract

---

The Western Capercaillie *Tetrao urogallus* uses its call for breeding, territorial and hierarchical purposes. According to the hypothesis of acoustic adaptation, changes in forest structure can produce communication problems that impede the occupation of a forest stand. To investigate whether habitat selection by the Western Capercaillie depends on the characteristics of sound propagation in the territory it occupies, we assessed forest structure and the sound propagation properties of the forest at nine occupied lek sites and eleven deserted lek sites in the Alt Pirineu Natural Park in Catalonia (NE Spain). We found similar values of forest Maturity Index (MI), Human Footprint Index (HFI) or Spatial Integrity Index (SII) in both sorts of stands, although abandoned stands exhibited higher Dominant Tree Height ( $H_0$ ), higher Basal Area (BA), higher Volume of Living Trees (FV) and higher Volume of Dead Trees (FM). Deserted sites exhibited higher values of Background Noise (N) and lower values of scattering of the sound on the vertical and horizontal plane (JLFH and JLFV), resulting in longer reverberation time T20 (s), higher sound pressure level SIGC (dB) and a slower decay curve K due to lower attenuation. This may impair communication of Capercaillie and explain why these sites were abandoned. The sound propagation characteristics of the forest may affect the communication of Capercaillies, creating distortion and masking of the acoustic signal by excessive reverberation and presence of background noise. Therefore, our results suggest that forest management for Capercaillies should not only favor a mature forest structure to provide shelter and food, but also to keep the right acoustic habitat properties to enhance animal communication.

**Keywords:** acoustical parameters; dendrometric variables; ambisonic; forest maturity; *Tetrao urogallus*.



# 1. Introduction

Animals use acoustic communication for territorial, social or reproductive purposes (Wegge et al., 2005; Fujiwara & Tobari, 2021). Although they generate sounds that maximize broadcast range and adopt strategies to improve their sound signal transmission (Boncoraglio & Saino, 2007; Luther & Gentry, 2013; Garcia et al., 2022), there are some sorts of disturbances that impair communication, which may have detrimental impacts on animal populations and communities (Naguib, 2003; Arcangeli et al., 2022; Erbe et al., 2022). According to the principles of soundscape ecology, animal communication takes place in environments with a specific soundscape composed of sounds generated by animals (biophony), sounds of anthropogenic origin (anthropophony) and sounds generated by natural elements, such as wind or rain (geophony) (Pijanowski et al., 2011; Grinfeder et al., 2022). The way animal sounds transmit in such landscapes depends on these different background noises, as well as on the structural characteristics of the habitat (Ey & Fisher, 2009; Ziegler et al., 2011) and meteorological factors (Ehrhardt et al., 2013; Schreiber & Beckenbauer, 2013),

and this has intra- and inter-specific communication consequences (Lohr et al., 2003; Luther & Gentry, 2013).

Sound propagation outdoors suffers attenuation, resulting from geometrical divergence and surface absorption. Moreover, surface scattering, temperature and wind can increase or decrease the intensity of the sound (White & Swearingen, 2004; Tarrero et al., 2008). In birds, vocal learners such as Passerines, Psittaciformes and Trochiliformes, which can easily vary the frequency (Hz), the duration (s), the intensity (dB) or syntax (number and syllabic distribution) of their calls, can potentially change the characteristics of their songs to improve the transmission of their message depending on the surrounding soundscape (Potvin & Mulder, 2013; Pohl et al., 2015; Roca et al., 2016). Most non-passerines, however, the so-called non-vocal learners, are not as capable of modulating their calls (Robisson et al., 2010; Fujiwara & Tobari, 2021), so their communication performance can be seriously impaired in soundscapes that limit sound transmission in some way (Francis et al., 2009; Ríos-Chelén et al., 2012; Diego et al., 2020). These

communication problems may lead to reduced mating and reproductive success (Schroeder et al., 2012) or the abandonment of the habitat (Berger-Tal et al., 2019; Erbe et al., 2022). Despite their limited vocal plasticity, however, some non-vocal learners have evolved to produce sounds that maximizes their song transmission, minimizing attenuation on the environment by means of tracheal and thorax characteristics, as well as its improved aerobic capacity (Robisson et al., 2010; Hart et al., 2020; Fujiwara & Tobari, 2021).

This problem is particularly important for woodland birds. Inside woodland, sound transmission is mostly affected by the dendrological characteristics of the forest, as well as by the background noise (White & Swearingen, 2004; Tarrero et al., 2008; Shelley et al., 2013) producing scattering and absorption (Fang & Ling, 2003; Swearingen & White, 2007; Ehrhardt et al., 2013). To optimize sound propagation, some woodland animals shift the intensity (dB), the frequency (Hz) and the temporal structure (s) of their calls depending on the characteristics of the forest (Boncoraglio & Saino, 2007; Berger-Tal et al., 2019; Boycott et al., 2019). For these reasons, several studies have analyzed how

habitat selection depends on the sound-scattering properties of the environment (Mullet et al., 2017, Garcia et al., 2022). Others, have stressed the need to incorporate the analysis of the acoustical properties of the forest among the objectives of woodland management for species conservation (Chobeau, 2014; Iglesias et al., 2019). This involves managing the forest to favor structures that do not impair sound transmission (Fang & Ling, 2003; Boycott et al., 2019). Some of these studies have analyzed how sound propagation within the forests changes according to its structure (Tarrero, 2008; Muhlestein et al., 2018), as well as the use of forest management for the abatement of background noise (Tyagi et al., 2006; Iglesias et al., 2019).

A good example of a non-learning woodland bird which may subject to all this communication constraints is the Capercaillie (*Tetrao urogallus*). In this species, acoustical communication plays an important role for individual recognition, territorial purposes and mating. Male Capercaillies can generate a call with a low and medium frequency bands, due to its big ribcage, long trachea and optimal aerobic capacity, which has optimal transmission characteristics in the coniferous forest

habitat (Hart et al., 2020; Policht & Hart, 2023). Successful mating and reproductive success depend on courtship based on sounds (Laiolo et al., 2011; Jähren et al., 2016; Hart et al., 2020) and communication problems may lead a negative impact on this endangered species. The acoustic characteristics of Capercaillie male calls has been studied from several points of view, including its potential use for individual identification and monitoring purposes (Abrahams & Denny, 2018; Hart et al., 2020; Jordi et al., 2023). Laiolo et al., (2011) showed that the characteristics of the male vocal display that advertise male quality (low frequencies and rapid song rates) are significantly correlated with high biodiversity values in the forest plots. Although many studies have addressed habitat selection of display forest plots by Capercaillie males (Quevedo et al., 2006; Laiolo et al. 2011; Plachyński et al., 2020), none of them has evaluated whether this selection is determined to some extent by the sound propagation properties of the plot.

The management and conservation of the forest habitat is a key aspect to maintaining the viability of Capercaillie populations (Finne et al., 2000; Quevedo et al., 2006; Sirkiä et al.,

2011). Within our study range, in Catalonia, the Capercaillie is ranked as threatened (D.O.G.C., 2022), and as a species of conservation concern in many other regions (Wegge et al., 2005; Sachot et al., 2006; Jähren et al., 2016). Among other reasons, this is linked to the scarcity of mature forests, its preferred habitat, which still experiences deforestation and degradation (Pakkala et al., 2003; Pèlachs et al., 2009; Palau & Garriga, 2013). Mature forest seams to provide the required needs of food and shelter for Capercaillies (Finne et al., 2000; Lakka & Kouki, 2009; Montané et al., 2016). However, Drozdowski et al., (2011), when comparing deserted and occupied Capercaillie lek sites in North-eastern Poland showed that mature forest were being abandoned in favor of younger stands. This indicates that forest maturity might not be the only variable to consider to ensure the persistence of Capercaillies in a forest stand (Sirkiä et al., 2011). Because previous research has shown that acoustic properties of the habitats may an important variable to account for in habitat selection studies (Naguib, 2003; Iglesias-Merchan et al., 2019; Garcia et al., 2022), in this study we wanted to analyse how habitat occupancy by male Capercaillies might be affected by the sound propagation characteristics of the forest. We

measured the dendrological characteristics of forest plots, as well as their sound propagation profiles, in sites occupied and sites deserted by the Capercaillie. By assessing the dispersion and persistence patterns of sound in the forest by means of acoustic impulse response analysis techniques (Farina,

2007; Shelley et al., 2013; Chobeau, 2014), we aimed to establish whether acoustic criteria are important cues for habitat selection for male Capercaillies and whether these criteria should be incorporated in forest management and planning for the benefit of the conservation of this endangered species.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Ethic statement

The Western Capercaillie *T. u. aquitanicus* is an endangered and declining species in Spain (Servei de Biodiversitat i Protecció dels Animals, 2015; Gil et al., 2020). Access to its habitat is strictly controlled by regional

administrations. This study was conducted under permissions from the Generalitat de Catalunya. The study was non-invasive and the animals were not handled or disturbed in any way.

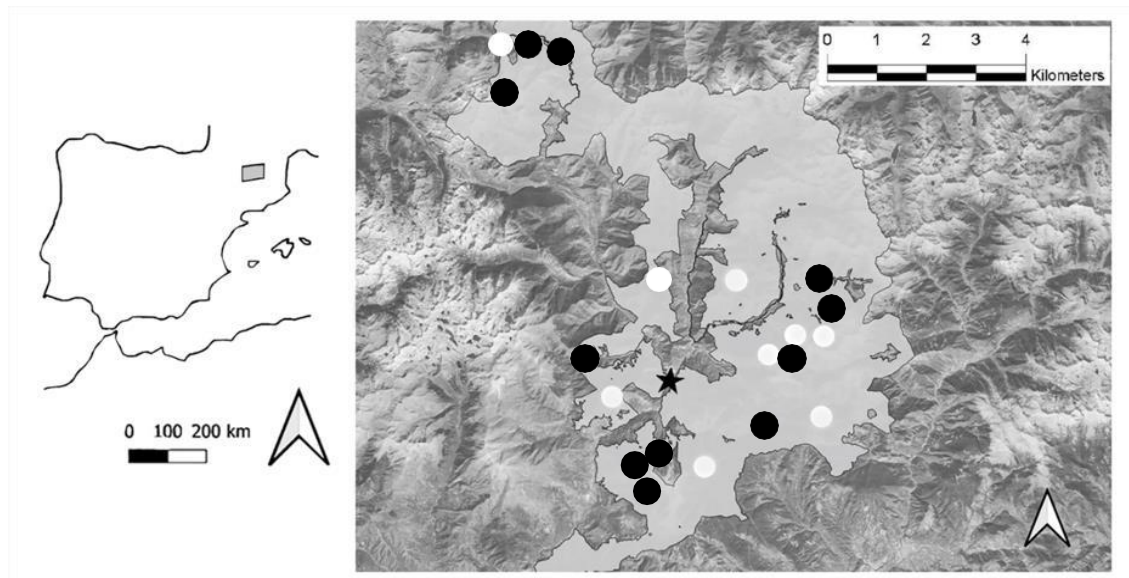
### 2.2. Study area

The study was carried out on the Natural Park *Alt Pirineu*, in Catalonia, NE Spain (Head Park office in Llavorsí, 42° 29' 45.530" N, 1° 12' 36.147" E). This area holds the largest population of Western Capercaillie on the Iberian Peninsula, but its population has declined from an estimate of 150 males in 2005 to 120 in 2015 (Servei de Biodiversitat i Protecció dels Animals,

2015; Gil et al., 2020). We selected 20 forest stands of an average size of  $14 \pm 8$  hectares (min = 5 ha, max = 31.1 ha). Nine of these stands were occupied lek-sites (lek) and eleven were former leks that have been deserted (non-lek) by Capercaillies since the last 10 years (Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015) (Fig. 1). These stands were 1700 and 2300 m above sea level

and consisted on mixed forests dominated by *Pinus nigra*, with *Vaccinium myrtillus*, *Rhododendron*

*ferrugineum*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Juniperus communis* in the underground (Pèlachs et al., 2009).



**Figure 1.** Study area in Natural Park Alt Pirineu. White circles indicate the location of nine Capercaillie lek sites, and the black ones indicate the eleven non-lek sites. The star indicates the village of Llavorsí, where the head office of the natural park is located.

## 2.3 Sampling

At each of the 20 forest stands, we randomly selected three plots for forest structural description separated a minimum of 100 m from each other.

Another three aleatory plots 100 m apart from each other were selected for the forest bio-acoustical description.

### 2.3.1 Forest structural description

To characterize the forest structure of each stand, a series of dendrometric variables were measured and three forest indices were computed,

following the RedBosques protocol (Europarc-España, 2019; Fungobe, 2024) (Table 1). Forest sampling was conducted during the non-breeding



season from June to November in 2020 and 2021. At each stand, we randomly selected three circular plots of 25 m of radius and measured all the dead or alive standing and fallen trees greater than 17.5 cm diameter within each plot. Using a forcepod, we measured tree diameters and with a laser we measured tree heights. The data obtained in each of the three plots for each stand were used to obtain the corresponding average dendrometric values for each stand. For each stand, as well, three indexes (ranging from 0-10 each, Table 1), were also computed following the RedBosqued protocol (Fungobe, 2024). First, the Forest Maturity Index (MA),

which uses the dendrological parameters of each plot to deliver an indication of the maturity of the stand. Secondly, the Human Footprint Index (HFI), which evaluates the human uses on the forest stand in the last 70 years based on evidence of agropastoral or forestry uses and accessibility on each plot. And finally, the Spatial Integrity Index (SII), which characterizes the spatial context in which a stand is located by measuring its size, spatial continuity, connectivity, and border effect. This was automatically calculated introducing the stand polygon on the main application Red Bosques (Fungobe, 2024).

**Table 1.** Forestry indices and dendrometrical variables measured on each study plot following the RedBosques protocol (see methods).

<b>Variable name, acronym and units</b>	<b>Meaning</b>
Maturity Index, MA	Low values correspond less heterogeneous forest due to the less structural and composition complexity reflected by dendrometric values.
Human Footprint Index, HFI	Based on historical data, low values correspond to low trace of human presence, which means less alteration of the forest.

<b>Variable name, acronym and units</b>	<b>Meaning</b>
Spatial Integrity Index, SII	Low values correspond to low spatial integration with the surrounding forest due to the spatial continuity, connectivity, and border effect characteristics.
Dominant tree height, Ho (m)	The average for each stand of the measured values of the tree height using a digital distance meter (laser).
Basal area, BA (m <sup>2</sup> /ha)	It is a forest indicator that measures the degree of spatial occupancy. A high value indicates that the forest is dense and lush and that shaded conditions dominate below the canopy. Is the sum of the normal diameter sections (measured at 1.3 m from the ground) of the feet of all trees of normal diameter greater than or equal to 17.5 cm in each plot expressed in m <sup>2</sup> /ha.
Monumental Trees, MON (n°)	The number of trees that have a diameter (cm) three times greater than their height (cm) /100.
Volume of living trees, VLT (m <sup>3</sup> /ha)	Is used to calculate the indicator the proportion of live wood. Is the sum of the values of the volume of the dead feet expressed in m <sup>3</sup> /ha.
Volume of dead trees, VDT (m <sup>3</sup> /ha)	Is used to calculate the indicator the proportion of dead wood. Is the sum of the values of the volume of the dead feet expressed in m <sup>3</sup> /ha.

### 2.3.2 Forest bio-acoustical description

For the characterization of the sound propagation patterns on each stand a series of acoustic parameters were measured (Table 2). On each sampling of the three selected plots within a stand, we placed a microphone on a central point, at 1.5 m height, from which two transect lines parallel to the terrain contour line departed in opposite directions. On each transect, a wooden clapper stuck at 1.5 m height was used as a 100 dB sound source (Papadakis & Stavroulakis, 2019) containing the octave frequency bands of 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz, which are those that encompass the frequency range of the audible spectrum of sound used by Capercaillie during its communication (Fletcher, 2009; Laiolo et al., 2011; Hart et al., 2020). Five impulse sounds maintaining 30 seconds of silence after each impulse were generated at 10, 20, 40 and 60 m on each of the two transect lines to account for the effect of distance on the sound pressure level (SIGC) and reverberation time (T20) (Farina, 2007; Tarrero et al., 2008; Alarcão & Inácio, 2022). The sound was recorded with the microphone located at the central point, obtaining 120 recorded claps at each forest stand. On that way, for each octave band, eight measurements of each of the acoustical

variables were obtained per plot, except for the attenuation factor K, where only two were obtained (one on each transect line, resulting from the linear regression of sound pressure level SIGC between all the distances at each transect described in the statistical analysis) (Table 2).

We used a Neveaton VR ambisonic microphone, 80 Hz high-pass filtered and covered with a windshield Boya-WS1000 to eliminate wind noise, connected to a Zoom F6 recorder set to 48 kHz, 32 bits float and 32 dB. Ambisonic microphones record in a so-called A-format, which has to be converted to B-format before formal analysis. We did this conversion using the Soundfield plugin on the host software Adobe Audition (Adobe Systems Incorporated, 2003). Despite sound propagation differs between open or closed environments (Tarrero et al., 2008; Schreiber & Beckenbauer, 2013), forest may be perceived as a room computing acoustical parameters according to the ISO-3382:1 standard (Campanini & Farina, 2008; Shelley et al., 2013; Alarcão & Inácio, 2022). Because of that, the acoustical parameters were calculated automatically according to the ISO-3382:1 standard, employing the Aurora

Plugin named “ISO3382 Acoustical Parameters” running inside Adobe Audition 3.0 and by the formula defined at Table 2 (Campanini & Farina, 2008). At a distance of less than 100 m from the sound source and at height less than 5 m above the ground, the effect of air absorption, temperature and wind may

be neglected (Schreiber & Beckenbauer, 2013). For this reason, we were fairly confident that the variability on sound measurements should be directly correlated with the vegetation structure on each stand. Recording was conducted between 08:00-13:00 hours (official time) during July 2022.

**Table 2.** Acoustical parameters measured on each study plot in this study.

<b>Variable name, acronym and units</b>	<b>Meaning</b>
Reverberation time, T20 (s)	Describes de temporal structure of the sound. The time required for a 60 dB decay after a steady sound source is switched off. According to ISO 3382-2 standard, this is obtained by multiplying the time required for the decay between -5 and -25 dB below the steady-state initial level by 3. This is extracted automatically by the Aurora Plugin
Sound pressure level, SIGC (dB)	The sound pressure level (dB) value at each measurement point $L_p(d)$ , extracted automatically by the Aurora Plugin, corrected for each distance $d$ (m) from the source, using the formula: $SIGC = L_p(d) + 20 \cdot \log_{10}(d)$

Attenuation factor, K	K is estimated by performing a linear regression over the 4 data points of each transect, at the 4 measured distances. Defined by the formula $L_p(d) = L_p(1m) - K \cdot \log_{10}(d)$ , where $L_p(d)$ is the sound pressure level (dB) value at each distance, $L_p(1m)$ is the sound pressure level (dB) value at 1m from the sound source and d is the value of each distance (10, 20, 40 and 60m). Two K values were obtained per plot (one for each transect).
Background noise, NOISE (dB)	This parameter measures all sound that is not considered as the study target. The sound pressure level of the natural background noise recorded at each measurement point when there was no extraneous noise caused by the experimenter. This is extracted automatically by the Aurora Plugin.
Lateral horizontal fraction, JLFH (dB)	Defines how much the sound is scattered around in the horizontal. The measure of the ratio between the reflected lateral sound and the omnidirectional sound captured by the sound pressure microphone. This is extracted automatically by the Aurora Plugin.
Lateral vertical fraction, JLFV (dB)	Defines how much the sound is scattered around in the vertical plane. The measure of the ratio between the reflected vertical sound and the omnidirectional sound captured by the sound pressure microphone. This is extracted automatically by the Aurora Plugin.

---

## 2.5. Statistical analysis

Global Mean, standard deviation and the minimum and maximum values were computed for the dendrometric variables, the forest indices and the acoustical parameters for each stand. To test for differences between occupied and deserted stands, non-parametric Kruskal-wallis tests were computed. To describe the behaviour of the sound across all the octaves rank, we plotted the average values for background noise (N), horizontal and vertical lateral fraction (JLFH and JLFV) and the attenuation factor (K) at each octave band for occupied and for deserted sites. We also plotted the distance profiles for reverberation time (T20) and sound pressure level (SIGC), to compare the sound propagation profiles between both groups of sites at each different octave band. The differences between occupied and deserted sites for the reverberation time (T20), sound pressure level (SIGC), attenuation factor (K), background noise level (N), horizontal and vertical lateral

fraction (JLFH and JLFV), at each octave band and at each distance, were tested by means of Generalized Linear Mixed Model (GLMM), assuming a gamma distribution. We considered as fixed categorical factors the occupied/deserted variable (two levels), the distance (four levels) to the microphone and the frequency band (four levels). To account for the spatial correlation and non-independence of the samples, a random factor variable was created to identify the claps belonging to the same point. In order to uncover potential relationships between forest structural parameters and sound propagation parameters at forest scale, we conducted a bivariate Spearman correlation analysis between the average values of the dendrometric variables and the acoustic parameters obtained at each forest stand (n=20). All analyses were performed using R Statistical Software (v4.0.4; R Core Team 2021).

### 3. Results

No significant differences were detected in the Maturity Index (MI), the Spatial Integrity Index (SII) or the

Human Footprint Index (HFI) between occupied and deserted sites (Table 3).

**Table 3.** Average  $\pm$  standard deviation (min and max) for the LIFE-Redbosques protocol forestry indexes for occupied and deserted stands.

Forestry indices	Occupied N=9	Deserted N= 11	Kruskal-Wallis test
<b>Maturity</b>	5.13 $\pm$ 0.80 (2.8-5.4)	5.60 $\pm$ 1.55 (5.6-8.2)	$\chi^2 = 1.481$ df = 1 p-value = 0.22
<b>Human Footprint</b>	3.03 $\pm$ 0.39 (1.4-3.9)	2.74 $\pm$ 1.19 (1.7-4.7)	$\chi^2=0.032567$ df = 1 p-value = 0.85
<b>Spatial Integrity</b>	4.93 $\pm$ 1.98 (1.4-6.8)	5.27 $\pm$ 2.25 (1.6-9.6)	$\chi^2 = 0.14595$ df = 1 p-value = 0.70

However, deserted sites had significantly higher Dominant Tree Height (Ho), higher Basal Area (BA), higher Volume of Living Trees (FV) and higher Volume of Dead Trees (FM) as

compared to occupied sites. Deserted sites also had significantly higher levels of Background Noise (N), both globally and for each of the octaves analyzed (Table 4 and Table 5, and Fig. 5).

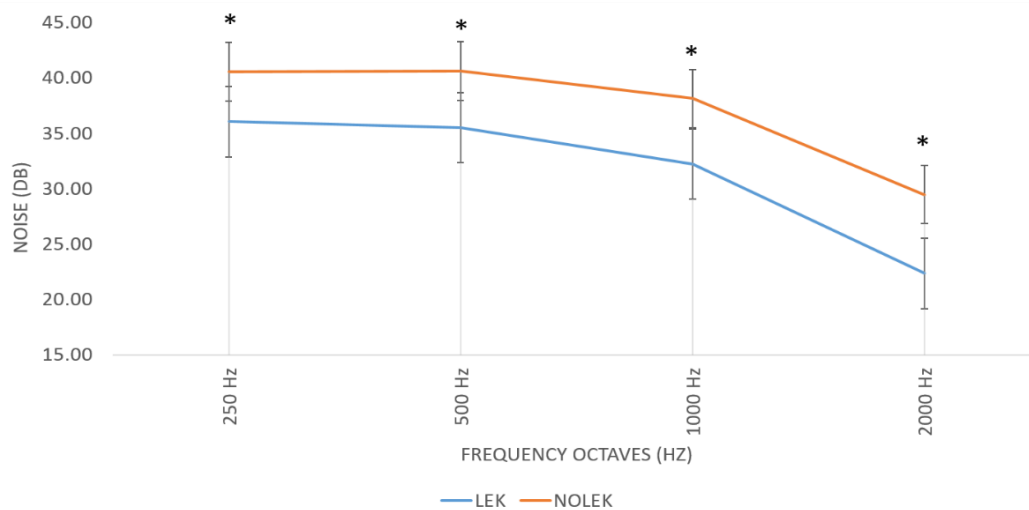
**Table 4.** Average  $\pm$  standard deviation (min and max) of the dendrometric variables for occupied and deserted sites.

	<b>Occupied</b>	<b>Deserted</b>	<b>Kruskall-Wallis test</b>
	<b>N=9</b>	<b>N= 11</b>	
<b>Dominant tree height (m)</b>	13 $\pm$ 3 (9-18)	18 $\pm$ 3 (13-26)	$\chi^2= 13.062$ , df = 1, p-value <0.001
<b>Basal area (m<sup>2</sup>/ha)</b>	19.58 $\pm$ 10.98 (5.31-58.09)	37.54 $\pm$ 10.55 (16.20-60.73)	$\chi^2= 9.9408$ , df = 1, p-value = 0.001
<b>Monumental Trees (n<sup>o</sup>)</b>	46 $\pm$ 44 (0-128)	27 $\pm$ 24 (0-83)	$\chi^2= 1.5738$ , df = 1, p-value = 0.209
<b>Volume of living trees (m<sup>3</sup>/ha)</b>	109.07 $\pm$ 56.95 (22.82-204.60)	281.06 $\pm$ 87.09 (83.65-448)	$\chi^2= 13.023$ , df = 1, p-value <0.001
<b>Volume of dead trees (m<sup>3</sup>/ha)</b>	34.37 $\pm$ 26.81 (0.87.50)	113.87 $\pm$ 68.66 (12.10-277.56)	$\chi^2= 8.1169$ , df = 1, p-value = 0.004



**Table 5.** Average  $\pm$  standard deviation (min and max) of the acoustical parameters in occupied and deserted sites.

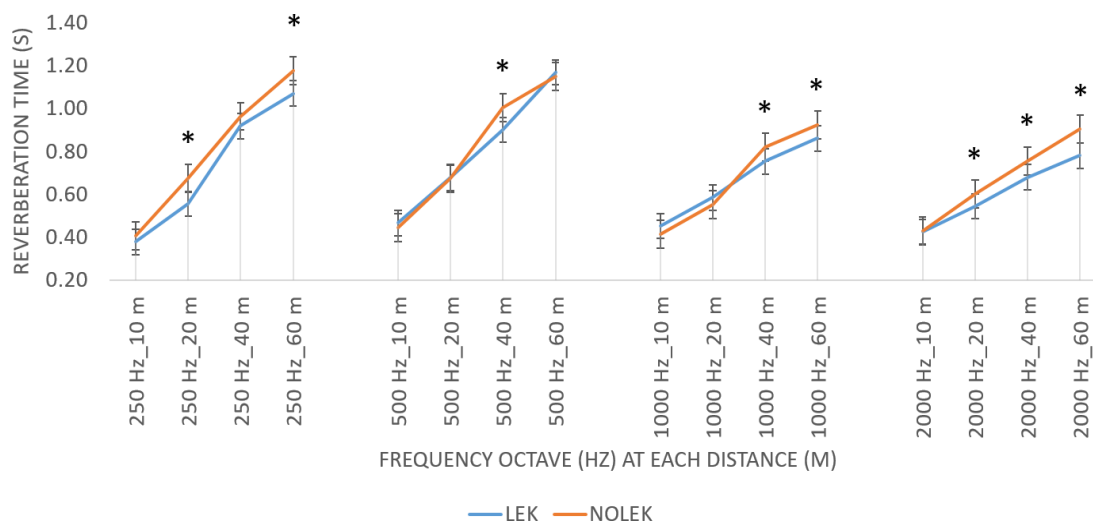
	<b>Occupied</b>	<b>Deserted</b>	<b>Kruskall-Wallis test</b>
	<b>N=9</b>	<b>N=11</b>	
<b>Reverberation time (s)</b>	0.72 $\pm$ 0.09 (0.53-0.82)	0.74 $\pm$ 0.07 (0.65-0.85)	$\chi^2 = 0.11688$ , df = 1, p-value = 0.732
<b>Sound pressure level (dB)</b>	113.79 $\pm$ 2.55 (108.89-117.60)	114.36 $\pm$ 1.05 (113.02-115.95)	$\chi^2 = 0.070707$ , df = 1, p-value = 0.790
<b>Distance attenuation factor</b>	25.98 $\pm$ 2.02 (22.89-28.64)	24.51 $\pm$ 3.76 (19.35-30.75)	$\chi^2 = 0.90188$ , df = 1, p-value = 0.342
<b>Background noise (dB)</b>	31.53 $\pm$ 3.61 (26.59-37.30)	37.19 $\pm$ 5.57 (29.60-46.85)	$\chi^2 = 5.3694$ , df = 1, p-value = 0.020
<b>Lateral horizontal fraction (dB)</b>	0.08 $\pm$ 0.2 (0.03-0.41)	0.07 $\pm$ 0.19 (0.02-0.54)	$\chi^2 = 2.9221$ , df = 1, p-value = 0.087
<b>Lateral vertical fraction (dB)</b>	0.17 $\pm$ 0.06 (0.09-0.28)	0.16 $\pm$ 0.05 (0.06-0.23)	$\chi^2 = 0.001443$ , df = 1, p-value = 0.969



**Figure 5.** Comparison of Background Noise (db) at difference frequencies between lek sites and non-lek sites. Significant differences ( $P < 0.05$ ) between lek and non-lek sites are indicated by \*.

Reverberation time (T20) increased with distance to the sound source and decreased for each octave band. Deserted sites had significantly

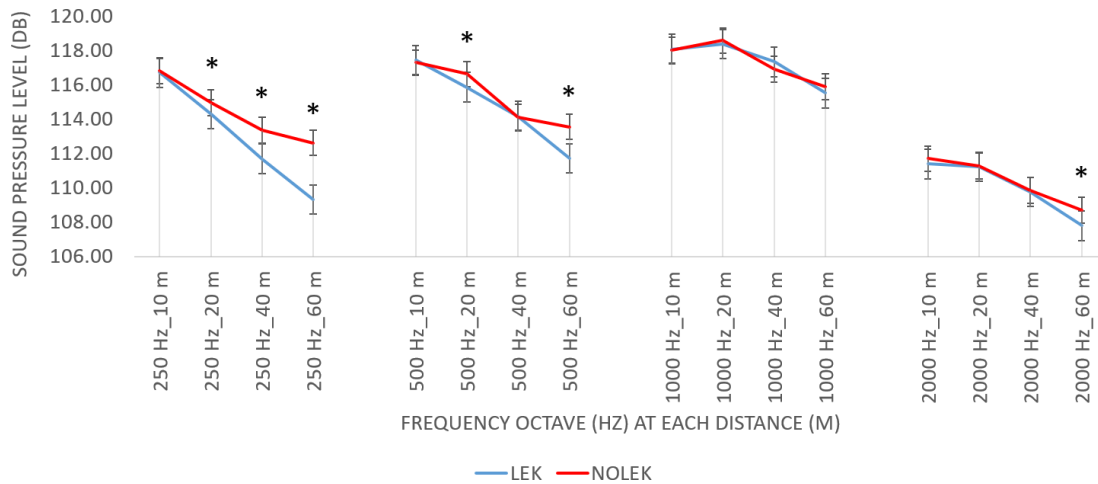
higher Reverberation time at all frequency octaves between 20 m and 60 m (Fig. 2).



**Figure 2.** Means  $\pm$  sd of Reverberation Time T20 (s) values at different distances (10 m, 20 m, 40 m and 60 m) and octave bands for lek sites and non-lek sites. Significant ( $P < 0.05$ ) differences between lek and non-lek sites are indicated by \*.

Sound Pressure Level (SIGC) values decreased with distance and remained similar between octaves (Fig. 3). Deserted sites had significant higher

Sound Pressure Level (SIGC) at all frequency octaves, except at 1000 kHz between 20 m and 60 m.

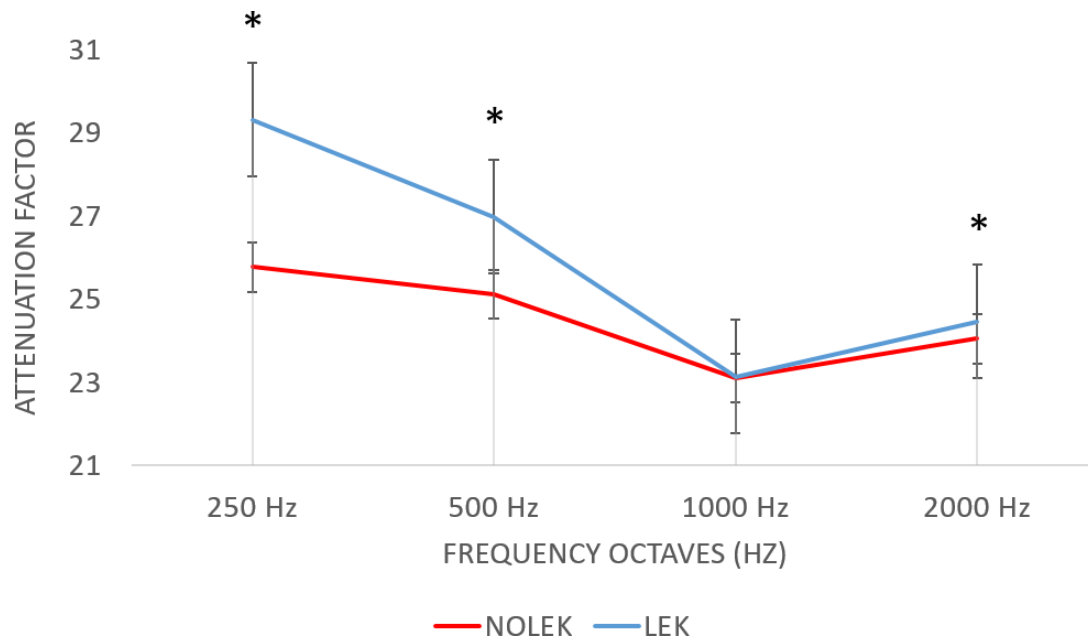


**Figure 3.** Means  $\pm$  sd of Sound Pressure Level SIGC (dB) values at different distances (10 m, 20 m, 40 m and 60 m) and octave bands for lek sites and non-lek sites.

Significant ( $P < 0.05$ ) differences between lek and non-lek sites are indicated by \* .

The Attenuation Factor (K) were lower on deserted sites than in occupied sites at all frequencies, excepting at 1000 KHz. This means that these frequencies

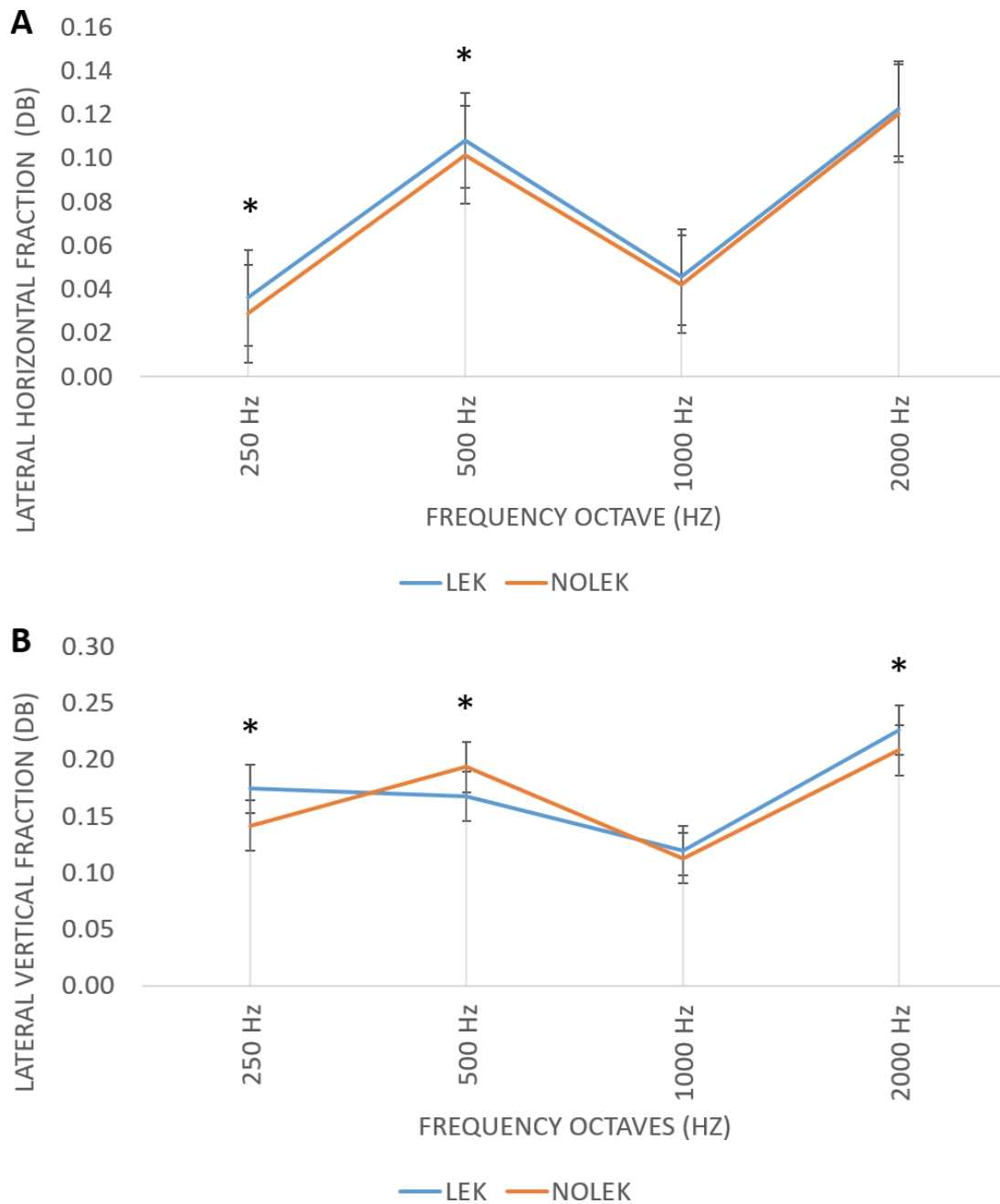
were attenuated more gradually, persisting for longer in deserted sites than in occupied sites (Fig. 4).



**Figure 4.** Means  $\pm$  sd of Attenuation Factor K values for lek sites and non-lek sites at each octave band. Significant differences ( $P < 0,05$ ) between lek and non-lek sites are indicated by \* .

Both groups of sites showed different sound propagation profiles of the Lateral Fraction in horizontal (JLFH) and vertical (JLFV) plane. At deserted sites, the lateral Fraction in the horizontal plane (JLFH) showed

significantly lower values at 250 Hz and 500 Hz, and the Lateral Fraction in vertical plane (JLFV) showed significantly lower values at 250 Hz and 2000 Hz but significant higher values at 500 Hz (Fig. 6).



**Figure 6.** Means of the Lateral Horizontal Fraction (A) and Lateral Vertical Fraction (B) values (dB) for lek sites and non-lek sites at each octave band.

The Background noise (N) was significantly and positively correlated with the Dominant Tree Height (Ho), the Volume of Living Trees (FV) and the Volume of Dead Trees (FM) of the

stands, while the Attenuation Factor (K) was significantly negatively correlated with the volume of Dead Trees (FM) of the stands (Table 6).

**Table 6.** Pearson correlation coefficients (r) between the acoustical parameter and the dendrometric variables of the 20 stands. Significant correlations ( $p < 0.05$ ) are shown in bold.

	Dominant tree height (m)	Basal area (m <sup>2</sup> /ha)	Volume of living trees	Monumental Trees (n)	Volume of dead trees (m <sup>3</sup> /ha)
Reverberation time (s)	0.14	0.001	0.20	-0.009	0.10
Sound pressure level (dB)	0	0.076	0.001	0.11	0.056
Distance attenuation factor	0.13	-0.14	0.04	-0.26	<b>-0.40</b>
Background noise (dB)	<b>0.39</b>	0.15	<b>0.41</b>	0.002	<b>0.68</b>
Lateral horizontal fraction (dB)	0.001	-0.16	0.001	-0.18	-0.11
Lateral vertical fraction (dB)	0.001	-0.15	-0.15	-0.02	-0.22

## 4. Discussion

According to the acoustic adaptation hypothesis, animals that use sound in their communication should try to maximize their sound broadcast range (Boncoraglio & Saino, 2007; Mullet et al., 2017) and avoid occupying sites with

non-optimal sound propagation (Lohr et al., 2003; Naguib, 2003; Luther & Gentry, 2013). In a context of population reduction, our results suggest that areas deserted by male Capercaillies exhibit certain acoustic characteristics that may

impair the correct transmission and discrimination of their calls.

Previous habitat studies conducted on Capercaillies in the Pyrenees indicate that coniferous forest, with *Pinus uncinata* as the dominant tree species and *Pinus sylvestris* or *Abies alba* as accompanying species, are the main habitat for Capercaillies (Palau & Garriga, 2013; Sabaté et al., 2023). The occurrence of different phases of the silvogenetic cycle, gives those forest an irregular and heterogeneous structure, alternating clearings with denser forest, which contributes to the development of the understory (Canut et al., 2011; Sirkiä et al., 2011; Sabaté et al., 2023). At the stand scale, Capercaillie prefers mature, structurally diverse forests characterized by canopy gaps with *Vaccinium myrtillus* and *Rhododendron ferrugineum* on the undergrowth (Sitzia et al., 2019; Sabaté et al., 2023; Hancock et al., 2023) and the presence of dead trees. Dead and large live trees are used as shelters, roosts and display sites (Sirkiä et al., 2011; Sabaté et al., 2023; Plachiyski et al., 2020). The presence of Capercaillie is associated to the presence of other forest specialist, so that it is considered as an umbrella species (Pakkala et al., 2003).

We found that deserted sites did not have higher values of Human

Presence Index (HFI) or Fragmentation Index (SII) as compared to occupied sites, so desertion of these plots could not be attributed to human disturbance or landscape effects, and should most probably be associated to the internal characteristics of the stands. Our results showed that both, deserted and occupied sites showed similar maturity indices. However, in spite of being similarly mature, deserted sites were structurally different from occupied sites, featuring higher values of Dominant Tree Height (Ho), higher Basal Area (BA), higher Volume of Living Trees (FV) and higher Volume of Dead Trees (FM) than occupied sites. All in all, these indicates mature forest that have probably developed a secondary layer of trees in the undergrowth, which is consistent with the results of Drozdowski et al., (2011) when comparing deserted and occupied Capercaillie lek sites in North-eastern Poland. However, the reason why these undergrowth forest stands are less suitable to grouse remains unexplained. Several non-exclusive factors might be on the play. A possible but so far a non-explored factor could be changes in the acoustic properties of the stand, that may impair communication. Our findings are consistent with this possibility. The global shape of the sound propagation in our stands between

the 125 Hz-2 KHz octaves was the expected from a coniferous heterogeneous forest (Tarrero et al., 2008; Muhlestein et al., 2018; EUROPARC-España, 2019; FUNGOBE, 2024). However, slight differences were detected between lek and deserted sites. Background Noise (N) was higher in abandoned stands. Any sound emitted by a bird would be masked by background noise when there is a difference of less than 25 dB between them (Fang & Ling, 2003; Lohr et al., 2003; Berger-Tal et al., 2019). As male Capercaillies call at less than 68-70 dB (Laiolo et al., 2011; Hart et al., 2020; Jordi et al., 2023), background noise levels over 33-35 dB, as those found on average on deserted sites, may already impair communications. Moreover, reverberation time (T20) and Sound Pressure Level (SIGC) were higher in abandoned sites, while attenuation Factor (K), Vertical Lateral Fraction (JLFV) and Horizontal Lateral Fraction (JLFH) showed lower values. These indicates that in deserted sites the sound was less attenuated and scattered, persisting for longer, which would be the cause for more background noise, due to a boost effect of the vegetation structure (Slabbekoorn et al., 2002; Swearingen & White, 2007; Luther & Gentry, 2013). Interestingly, the most relevant

differences were detected on the lower frequency octave bands which, is consistent with the results of Hart et al. (2020), who found the importance of low frequency sound in the communication of Capercaillies. However, because our profiles did not include the low frequencies analysed by Hart et al (2020), future research is needed to see whether the differences between deserted and occupied sites persists on this lower infrasound band.

Although our study did not demonstrate that the acoustic characteristics of the sites are actually a relevant factor determining desertion, it shows that the acoustic peculiarities of deserted sites may impair acoustic communication. Male Capercaillie voice is composed by a rapidly repeated elements with a modulated broadband frequency pattern, resulting in a signal more susceptible to be degraded during transmission in the forest (Naguib, 2003; Policht & Hart, 2023; Jordi et al., 2023). Because of this, excess background noise, sound pressure level and reverberation time due to the boost of the forest may lead to the distortion of the message (Slabbekoorn et al., 2002; Naguib, 2003; Swearingen & White, 2007; Barrero et al., 2020; Erbe et al., 2022). These changes are associated to differences in the forest structure of the



stands, probably as a result of the development of a secondary undergrowth layer of trees in deserted sites. However, this additional layer may not only modify the acoustic properties of the forest, but also may impair visibility within the stand (Schwendtner et al., 2005) or the amount of *Vaccinium*

*myrtillus* as a fruit and shelter provider (Montané et al., 2016). Both are also relevant factors which can determine the persistence of the Capercaillie on the sites. Further research is needed to disentangle the relative importance of all these factors in determining the desertion of previously occupied stands.

## 6. Conclusions

Our study shows that deserted forest, exhibit similar maturity, human footprint or spatial integrity than occupied sites, but slightly different structure than occupied lek sites and that this is associated to differences in sound propagation. We have seen that areas that have been deserted show higher levels of noise and reverberation of the sound, which may impair communication. By showing that deserted leks feature different acoustic characteristics than undeserted leks, our study highlights the need of considering acoustic criteria to the comprehension of the habitat needs of Capercaillies and in the management of their habitats for

conservation. Our study shows that forest management for Capercaillie must promote not only a heterogeneous and mature forest structure for the Capercaillie to feed and protect itself (Sirkiä et al. 2011; Montané et al., 2016; Sabaté et al., 2023), but also an open undergrowth structure, in agreement with previous findings of Drozdowski et al. (2021). We showed here that this might be related to enhance acoustic communication, although further studies are needed to disentangle the relative importance of this and other factors in determining the desertion of previously occupied stands.

## 6. Acknowledgements

Many thanks to Gisela Riba, Neus Campi, Clara Cortadellas, Albert Magnet, Claudia Pérez, Javier Ballesteros, Ana Vegas, and Blanca Martí, who contributed to the fieldwork and data collection. The whole team of the Natural Park of Alt Pirineu and

Servei de Fauna i Flora. Meritxell Álvarez and Miriam Masramon gave logistical support during the fieldwork period. Thanks are also due to the technicians and engineers of Neva-ton-Europe, responsible for the manufacture of the ambisonic material.



# DISCUSSIÓ



Petjades de baralla de mascles de gall fer. Foto: arxiu propi



---

## Discussió

---

Gràcies als avantatges que ens proporciona la bioacústica, hem pogut fer un pas més en la caracterització del cant i en el coneixement de factors relacionats amb el paisatge sonor que condicionen la selecció de l'hàbitat del gall fer, a Catalunya com a representació d'una de les espècies del gènere *Tetrao* en l'àmbit dels boscos boreals al Pirineu català (Sirkia et al., 2011; Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015).

En el capítol 1 d'aquesta tesi hem pogut caracteritzar i classificar individualment les vocalitzacions de mascles de gall fer gravats en el seu entorn natural com són els boscos alpins de pi negre, tot analitzant l'espectre audible de la seva veu. En el capítol 2 per primer cop hem pogut conèixer l'amplitud real (dB) de les seves vocalitzacions, fet que ens ha permès calcular la distància de propagació i la distància de detecció de la seva veu. Els resultats d'aquest capítol juntament amb els del capítol anterior, permetran millorar no solament el monitoratge a escala individual d'aquesta espècie, sinó que la seva aplicació es pot estendre a altres espècies en qualsevol mena d'entorn terrestre. Així mateix, en el capítol 3 hem estudiat les característiques de propagació sonora en els boscos ocupats i abandonats per gall fer tenint en compte els característics estructurals del bosc. Els nostres resultats podrien indicar que aquesta espècie en regressió abandona abans aquelles zones forestals amb determinades característiques acústiques que poden ser perjudicials per a la seva comunicació.

En el capítol 1 hem trobat diferències entre mascles de gall fer en les duracions i característiques freqüencials dels components de l'espectre audible de la seva veu. Això coincideix amb resultats d'altres estudis (Laiolo et al., 2011; Hart et al., 2020) on també es van trobar diferències entre individus en alguns dels components de les frases de la veu del gall fer. Alguns estudis demostren que les característiques de les vocalitzacions estan relacionades amb les característiques individuals de cada ocell, com la mida corporal o el sistema respiratori (Brumm, 2009; Kriesell et al., 2020). Laiolo et al. (2011) i Juola & Searcy (2011) van veure que la capacitat d'emetre sons de llarga durada amb freqüències baixes s'associa amb ocells de mides corporals grans. Això també coincideix amb els resultats d'altres estudis que demostren que la durada i les freqüències del cant estan

relacionades amb la mida corporal dels mascles, així com la seva capacitat d'atracció sexual i defensa territorial (Benedict & Warning, 2017; Wang et al., 2019). Les diferències interindividuals trobades en la seva veu ens han permès en aquest capítol classificar favorablement cada veu a cada individu considerant conjuntament els components freqüencials i temporals. La capacitat discriminatòria interindividual de l'efecte conjunt de les característiques freqüencials i temporals de la veu del gall fer també va quedar palesa en els estudis de Hart et al. (2020) i Policht & Hart (2023). Així doncs, aquestes característiques de la veu dels animals confereixen en conjunt una signatura individual recognoscible que pot ser d'utilitat en el monitoratge bioacústic (Garcia et al., 2022; Favaro et al., 2015; Marin-Cudraz et al., 2019). La majoria d'estudis de bioacústica aplicada al monitoratge estan focalitzats en l'anàlisi de sons harmònics, en canvi, aproximadament el 4% s'han centrat en l'estudi dels sons no harmònics que són els que generen algunes famílies d'animals com *Tetraonidae*, *Spheniscidae*, *Otididae* i *Anserinae* (Policht et al., 2023). Els sons harmònics generats per ocells, mamífers i amfibis, estan proporcionalment relacionats amb la freqüència fonamental de la seva vocalització i conformen la seva signatura vocal individual (Dooling et al., 2002; Araya-Salas, 2012; Gémard et al., 2021). Les vocalitzacions de sons no harmònics semblen no ser tan freqüents en el món animal, però aquests també contenen característiques pròpies de cada individu (Araya-Salas, 2012; Policht et al., 2023). Això coincideix amb els nostres resultats, juntament amb els resultats trobats en altres estudis com els de Hart et al. (2020) i Policht & Hart (2023) amb gall fer o Marin-Cudraz et al. (2019) i Baciadonna et al. (2021) amb la perdiu blanca i els pingüins africans respectivament, on es demostra que els sons no harmònics confereixen una signatura vocal pròpia que es pot fer servir per al monitoratge bioacústica a escala individual.

Malgrat les aportacions dels estudis de Laiolo et al. (2011), Hart et al. (2020) i Policht & Hart (2023) on identifiquen diferències entre individus de gall fer en alguns dels components de la seva veu, aquests treballs presentaven algunes limitacions principalment relacionades amb el fet d'utilitzar micròfons "pistola" també coneguts com a "shotgun" com en el cas de l'estudi de Laiolo et al. (2011) i micròfons omnidireccionals com en el cas dels estudis de Hart et al. (2020) i Policht & Hart (2023). En entorns oberts amb menys atenuació i amb animals menys mòbils, els micròfons "pistola" poden proporcionar un bon resultat de gravació i posterior anàlisi. Aquest seria el cas de la caracterització a escala individual que van fer Marin-Cudraz et al. (2019) i Baciadonna et

al. (2021) amb la perdiu blanca i els pingüins africans respectivament. Però en entorns tancats com els boscos, el so s'atenua i distorsiona més que en entorns oberts per efecte de la vegetació (White & Swearingen, 2004; Tarrero et al., 2008). Això fa que es requereixi una distància de gravació curta de menys de 20 m per intentar salvar les limitacions que generen la dispersió i atenuació del so en boscos (Tyagi et al., 2006; Slabbekoorn et al., 2007; Tarrero et al., 2008; Laiolo et al., 2011). Però en l'entorn natural, apropar-nos massa a fauna sensible a la presència humana com és el cas del gall fer pot comportar problemes que comprometin encara més el seu estat poblacional ja en perill d'extinció (Decret 172/2022; Nicolás et al., 2022). D'altra banda, els micròfons "pistola" tenen el limitant de deixar de gravar el so en la seva totalitat tan bon punt es deixa d'apuntar directament la font sonora (Farina & Ayalon, 2003; Farina & Tronchin, 2013). Aquest fet queda agreujat si l'animal es mou i emet sons no harmònics de baixa intensitat i de banda ampla, elements repetitius ràpids com en el cas del gall fer, que són més atenuats en entorns tancats com els boscos (Naguib, 2003; Jordi et al., 2023; Policht & Hart, 2023). Així mateix, els micròfons omnidireccionals, com els dels estudis de Hart et al. (2020) i Policht & Hart (2023), capten el so diana però també molt més soroll provinent de totes les direccions que no en el cas dels micròfons "pistola", fet que altera la qualitat de la gravació. La manca de qualitat del senyal acústic gravat pot acabar alterant la utilitat final de l'anàlisi bioacústic donat que ens pot generar errors en la caracterització individual (Carvalho & Gomes, 2022).

La tecnologia ambisònica ajuda a cobrir aquestes limitacions, ja que a diferència dels micròfons pistola, aquest recull el senyal acústic provinent de totes les direccions. El micròfon ambisonic també capta el so des de llargues distàncies i sense excés de soroll de fons, a diferència del que passaria amb els micròfons omnidireccionals (Moreau et al., 2007; Mattioli et al., 2017). En aquest capítol hem fet ús de la tecnologia acústica ambisònica per obtenir gravacions simultànies de diferents individus a llarga distància i en l'entorn natural on es troben. La posterior separació d'aquestes gravacions ha sigut possible gràcies als micròfons superdirectius virtuals que permeten una selecció de so molt més acurada que la proporcionada per un micròfon "pistola" (Farina & Tronchin, 2013; Sagasti et al., 2023). Tot això ha permès l'anàlisi de l'espectre audible de la veu del gall fer per tal d'aconseguir una discriminació i classificació acurada. La bona qualitat del senyal obtingut amb aquesta tecnologia i en aquest tipus d'entorns, permet treballar-hi per obtenir una caracterització amb els mínims errors i un posterior disseny



d'identificadors automàtics (Carvalho & Gomes, 2022). Tot això permet establir protocols de mostreig amb acústica passiva que proporcionin la informació necessària que ajudi a complementar els estudis de gestió i conservació d'espècies en perill com és el cas del gall fer (Jordi et al., 2023; Sabaté et al., 2023).

L'anàlisi d'infrasons de Hart et al. (2020) també ha proporcionat informació valuosa que permet caracteritzar individualment els mascles de gall fer. Però l'anàlisi d'infrasons comporta també una logística cara i complexa (Hart et al., 2020; Wilson et al., 2023). Caldria que es desenvolupés més la tecnologia ambisònica en la detecció dels infrasons per poder fer-ho servir en entorns atenuants i dispersius del so com són els boscos.

Malgrat que existeixen estudis de bioacústica aplicada al monitoratge d'espècies (Schreiber & Beckenbauer, 2013; Sebastián-González & Hart, 2017; Abrahams, 2019), només en uns pocs casos es coneix l'amplitud real (dB) del so dels animals. Aquests són aspectes crucials per poder millorar la planificació del mostreig bioacústica que en molts casos es fan servir en espècies sensibles i en perill com el gall fer (Abrahams & Denny, 2018; Abrahams, 2019). En el capítol 2 d'aquesta tesi, mitjançant l'anàlisi de les gravacions obtingudes d'un mascle, hem determinat que el gall fer canta a menys de 70 dB. Això el situa a una intensitat de cant propera, tot i que inferior, a alguns dels pocs ocells dels quals se'n coneix aquest valor. Alguns d'ells són la merla *Turdus merula*, el pinsà comú *Fringilla coelebs* (Schalz, 2023) i el mosquiter de Schwarz *Phylloscopus schwarzi* (Opaev & Shishkina, 2021), que canten a uns 90 dB. Aquest valor ens ha permès calcular la distància de propagació i detecció del so segons el micròfon empleat en aquest entorn. El càlcul de la distància de propagació i detecció del so en funció del valor real d'amplitud sonora permet planificar un disseny de mostreig acústic que cobreixi tota la superfície d'estudi i detecti els sons sense superposicions entre micròfons (Budk et al., 2015; Baciadonna et al., 2021).

La dificultat de gravar individus en llibertat i a una distància molt curta sense molestar es el motiu pel qual en pocs casos es pot determinar aquest valor d'amplitud (Podos & Cohn-Haft, 2019; Opaev & Shishkina, 2021; Schalz, 2023). Aquest factor també ens ha limitat a nosaltres, donat que només un gall es va apropar suficient a la tenda camuflada per a gravar-lo a la distància necessària per obtenir aquest valor. Malgrat l'esforç que suposa, s'haurien de gravar alguns individus més en llibertat a una distància curta sense que notin la nostra presència per tal d'obtenir més informació sobre aquest

valor. Un cop obtingut aquest valor, el podem fer servir per dissenyar mostrejos amb acústica passiva més acurats pel seguiment de poblacions i la detecció de presència a escala d'individu.

Altres estudis previs han posat de manifest que hi ha factors relacionats amb les propietats acústiques de l'entorn que influeixen en la presència i selecció d'habitat per part de les espècies (Naguib, 2003; Iglesias-Merchan et al., 2019; Garcia et al., 2022). Fins ara s'han fet molts esforços de gestió forestal per a la conservació del gall fer (Pèlach et al., 2009; Palau & Garriga, 2013; Gil et al., 2020) però en aquests treballs no s'han tingut en compte les característiques acústiques de l'entorn i com aquestes poden influir en la selecció d'habitat d'aquesta espècie. En el capítol 3 d'aquesta tesi hem obtingut resultats que indiquen que els rodals abandonats per aquesta espècie en regressió presenten característiques estructurals i acústiques diferents de les que presenten els rodals on es manté. Hipotetitzem que això podria estar relacionat, entre altres factors, amb un empitjorament de l'entorn per a la comunicació sonora. Això coincideix amb la hipòtesi de l'adaptació acústica, on s'exposa que els animals utilitzen l'acústica en la seva supervivència diària, maximitzant el rang de difusió del so (Boncoraglio & Saino, 2007; Mullet et al., 2017) i evitant ocupar llocs amb característiques de propagació de so no òptima per la seva comunicació (Lohr et al., 2003; Luther & Gentry, 2013). Els nostres resultats mostren que els llocs que el gall fer ha abandonat exhibeixen valors més alts de soroll de fons i poca dispersió del so, esdevenint en temps de reverberació de so llargs, més nivell de pressió sonora i baixa atenuació. La propagació i persistència del so ve determinada per l'estructura de l'hàbitat on es troba i les característiques del senyal acústic (Naguib, 2003; Tarrero et al., 2008). Així doncs, podem trobar més reverberació en entorns amb moltes superfícies com els boscos (Naguib, 2003, Tarrero et al., 2008; Swearingen & White, 2007).

Els sons amb característiques de banda estreta i freqüència modulada més baixa es poden beneficiar de l'efecte potenciador de transmissió que genera la reverberació (Slabbekoorn et al., 2002; Nemeth et al., 2006). Tanmateix, els sons que es troben en la mateixa banda de freqüència com és el cas dels sons de banda ampla i amb més modulació, pateixen més degradació durant la seva propagació a causa de la reverberació (Richards & Wiley, 1980, Wiley & Richards, 1982; Naguib, 2003). La Hipòtesi d'Adaptació Acústica suggereix que els ocells que ocupen ambients tancats com els boscos, emeten vocalitzacions de banda estreta amb freqüència modulada més baixa que

els que ocupen espais més oberts com els prats per tal de minimitzar la degradació durant la propagació sonora (Richards & Wiley, 1980, Wiley & Richards, 1982). Malgrat això, alguns ocells com el gall fer que viuen en boscos, tenen la veu amb característiques sonores de freqüència modulada i banda ampla (Naguib, 2023; Policht & Hart, 2023). Per això hem trobat zones amb característiques forestals que generen una "pitjor" propagació acústica que pot ser un factor distorcionador del so del gall fer, impedit que el seu missatge es transmeti correctament i provocant l'abandonament d'aquestes zones. (Slabbekoorn et al., 2002; Nemeth et al., 2006; Naguib, 2023). La reverberació també fa augmentar el soroll de fons degut a la persistència d'aquest a l'entorn (Slabbekoorn et al., 2002; Swearingen & White, 2007; Luther & Gentry, 2013). Al seu torn, el so s'emmarca amb el soroll de fons quan hi ha una diferència d'aproximadament 25 dB o menys entre ells (Fang & Ling, 2003; Lohr et al., 2003; Berger-Tal et al., 2019). Per aquest motiu, els alts valors de soroll de fons poden ser un altre de les raons que en dificulten o impedeixen l'ocupació d'aquesta zona per part del gall fer, que canta a menys de 70 dB (Jordi et al., 2023).

Molts dels treballs de conservació de les espècies estan basats en la informació que els proporciona el cens de les seves poblacions com és el cas del gall fer (Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals, 2015; BirdLife International, 2016; Abrahams, 2019). Els mètodes tradicionals de cens de les espècies han estat basats en observacions i escoltes in situ per part de persones. Aquest fet que produeix un biaix en els resultats per culpa de les pertorbacions que genera la presència humana sobre l'espècie, a les limitacions de les capacitats d'escolta i observació de cada persona, així com a la impossibilitat conseqüent de cobrir tota la zona de mostreig (Abrahams, 2019; Baines & Aebischer, 2023). El monitoratge amb bioacústica passiva cobreix aquestes limitacions gràcies a la baixa capacitat invasiva que suposa col·locar gravadores autònomes en llocs estratègics que recullin dades acústiques durant llargs períodes de temps i cobrint més superfície de mostreig (Holmes et al., 2014; Campos-Cerqueira & Aide, 2016). La combinació del mostreig amb bioacústica passiva i la utilització dels classificadors automàtics de sons han aportat també un avenç en el seguiment de fauna gràcies a la capacitat d'ambdós de registrar i classificar grans quantitats de dades (Berman et al., 2019; Stowell, 2022; Nolan et al., 2023). En aquest sentit, el "deep learning" ha jugat també un paper important en la creació de classificadors automàtics de sons que són la base de molts programes de reconeixement automàtic (Kahl et al., 2020; Stowell, 2022). Perquè aquests

models de "deep learning" efectuïn una bona detecció i classificació de sons nous, necessiten ser "entrenats" amb diversos arxius de so existents que se'ls proporciona previament (Lapp et al., 2023). Malgrat que existeixen models de "deep learning" que poden ser entrenats amb pocs arxius de so perquè funcionin correctament (Nolasco et al., 2022), tots han de ser arxius de bona qualitat sense sons superposats (Nolasco et al., 2022; Ghani et al., 2023; Lapp et al., 2023). Aquest fet que moltes vegades és un limitant degut la simultaneïtat en la que molts cops canten els animals i a l'atenuació del so que generen alguns entorns (Mattioli et al., 2017; Lapp et al., 2023).

Tal com hem mencionat anteriorment, la tecnologia ambisònica ens permet poder obtenir sons de bona qualitat des de llargues distàncies també en ambients molt atenuants com són els boscos i separar la font de so de la resta de sons mitjançant micròfons superdirectius virtuals (Moreau et al., 2007; Mattioli et al., 2017; Sagasti et al., 2023). És per això que per futurs estudis de monitoratge amb bioacústica passiva és recomanable la utilització de gravadores ambisòniques per obtenir els sons diana que ens permetin entrenar sistemes de reconeixement automàtic inclús a escala d'individu com hem pogut fer en aquesta tesi. Actualment, la limitació que té l'ambisònica és la inexistència de gravadores autònomes amb micròfon ambisònic incorporat que ens permeti gravar durant llargs períodes de temps sense la necessitat d'estar in situ personalment. Però aquesta limitació es pot afrontar calculant la distància de gravació per qualsevol altre tipus de gravadora i micròfon segons les característiques del senyal acústic, tal com hem mencionat en el capítol 2. D'aquesta manera acabarem obtenint també senyals acústics de bona qualitat que ens permetin incorporar-los a sistemes d'identificació i classificació bioacústics automàtics.

Tal com hem vist, en la gestió de la biodiversitat no només és important obtenir una estructura forestal heterogènia que cobreixi les necessitats tròfiques i de protecció (Schwendtner et al., 2005; Montané et al., 2016; Sabaté et al., 2023) sinó que també en potenciï la propagació sonora (White & Swearingen, 2004; Tyagi et al., 2006; Iglesias-Merchan et al., 2019). Aquest fet queda reflectit en els nostres resultats, on la permanència de gall fer es dona en zones de bosc amb millors característiques acústiques malgrat que tant en zones amb presència com en zones desocupades es mostren característiques òptimes d'estructura forestal, com poden ser la maduresa i la integritat espacial (Pakkala et al., 2003; Drozdowski et al., 2011; Fungobe, 2024). Mitjançant la gestió forestal es poden mantenir els mateixos graus de maduresa i integritat espacial amb diferents

combinacions de valors dendromètrics d'estructura forestal (Baiges et al., 2020; Fungobe, 2024). Per tant, és necessari tenir en compte l'obtenció d'una estructura dendromètrica que no tan sols esdevingui en un bosc amb elevada maduresa i integritat espacial, sinó també un entorn de propagació acústica òptima per la comunicació animal (Naguib, 2003; Nemeth et al., 2006; Iglesias-Merchan et al., 2019). És per tot això que es fa palesa la necessitat de què els treballs de conservació de les espècies diana, com és en aquest cas el gall fer, incloguin criteris acústics en la gestió dels seus habitats per beneficiar-ne la propagació del so, la comunicació acústica del qual juga un paper important en certs moments del seu cicle vital (Laiolo et al., 2011; Hart et al., 2020). En el cas del gall fer, es coneix que l'hàbitat que li és propici en totes les etapes del seu cicle vital consisteix en un bosc amb heterogeneïtat d'edats i mides d'arbres, amb fusta morta i sotabosc que els proporciona aliment i refugi contra depredadors (Canut et al., 2011; Montané et al., 2016). Així i tot, en aquesta tesi hem vist que aquests no són els únics factors que en poden determinar la presència en una zona de bosc sinó que les característiques acústiques de l'entorn també exerceixen la seva influència. Tot i les dificultats que suposa el modelatge de propagació acústica d'un entorn natural (Tarrero et al., 2008; Schreiber & Beckenbauer, 2013; Muhlestein et al., 2018) en aquesta tesi hem pogut veure que hi ha variables acústiques que són relativament fàcils de mesurar i ens donen informació rellevant sobre la caracterització acústica d'un entorn.

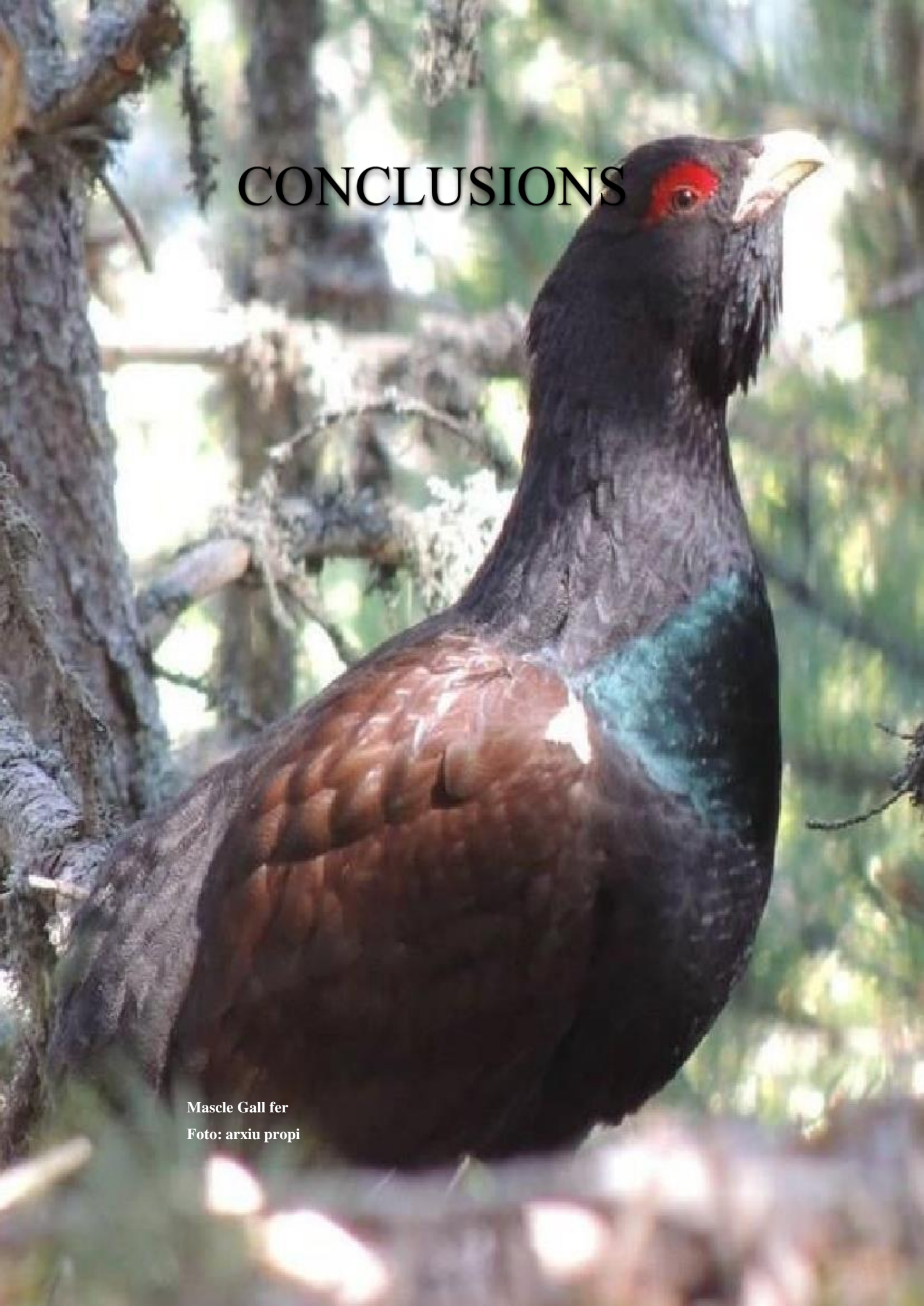
Per tant, en futurs estudis de conservació es podrien mirar els paràmetres de temps de reverberació, el soroll de fons, la dispersió del so, l'atenuació i el nivell de pressió sonora en boscos on es vulgui fer una gestió forestal en benefici del gall fer. D'aquesta manera també es pot crear una llibreria que contingui una base de dades més extensa sobre diferents estructures forestals beneficioses pel gall fer amb les seves característiques acústiques associades i veure en quins valors es troben els òptims per la seva presència. Així mateix, en futurs estudis també podríem avaluar l'índex de biodiversitat potencial (Baiges et al., 2020) dels boscos per tal de veure si la presència d'altres animals també es pot veure afectada per les característiques acústiques de l'entorn, tal com hem vist que passa amb el gall fer en les zones on l'hem estudiat.

Amb aquesta hem volgut aprofundir en l'exploració dels beneficis de l'ús de l'ecoacústica en la gestió i conservació de la biodiversitat, tot posant de manifest els avenços possibles, no només en la millora del monitoratge, sinó també en l'establiment de criteris per la gestió i la conservació dels hàbitats.





# CONCLUSIONS



Masle Gall fer  
Foto: arxiu propi





---

## Conclusions

---

En aquest estudi hem pogut avaluar que les característiques temporals i espectrals dels components del rang de freqüències audibles del cant dels mascles de gall fer els confereix una signatura vocal pròpia que en permet la distinció entre individus. El valor de la freqüència (Hz) on es troba el primer pic de més intensitat sonora de la síl·laba “Corck” i de la primera síl·laba del “Trill”, així com la durada dels components del cant “Song”, “Trill” i el “Whetting”, ens han permès classificar correctament el 100% dels cants als mascles pertinents. Això podrà ajudar en els estudis de monitoratge bioacústic a escala d'individu en aquesta espècie.

En el nostre estudi també hem determinat que el valor d'amplitud real (dB) de l'espectre audible del cant d'un dels mascles de gall fer és de  $67.68 \pm 0.83$  dB. Amb això hem calculat que 174.8 m és el valor de la distància mitjana de propagació i detecció del seu so amb el micròfon que hem fet servir en aquest estudi. El coneixement del valor d'amplitud real del seu cant, en permetrà calcular la distància de detecció amb qualsevol altre tipus de micròfon i d'aquesta manera es podrà millorar la planificació de futurs protocols de mostreig bioacústica.

Finalment, en aquest estudi també hem demostrat que als boscos on ja no trobem gall fer tenen una estructura forestal i de propagació sonora diferent dels boscos amb presència de gall fer, tot i que ambdós tinguin una maduresa forestal similar. Hem vist que les zones sense gall fer mostren majors nivells de soroll, reverberació i persistència del so. Aquestes característiques acústiques poden dificultar la seva comunicació i ser un dels motius pels quals el gall fer les ha deixat d'ocupar. Amb aquesta informació es podran incorporar criteris acústics en la gestió forestal en benefici de la gestió d'aquesta espècie.





# REFERÈNCIES

- Abrahams, C., & Denny, M.J.H. 2018. A first test of unattended, acoustic recorders for monitoring Capercaillie *Tetrao urogallus* lekking activity. *Bird Study*. 65:2, 197–207.
- Abrahams, C. 2019. Comparison between lek counts and bioacoustic recording for monitoring Western Capercaillie (*Tetrao urogallus* L.). *J. Ornithol.* 160, 685–697.
- Abrahams, C., & Geary, M. 2020. Combining bioacoustics and occupancy modelling for improved monitoring of rare breeding bird populations. *Ecol. Indic.* 112, 106131.
- Adobe Systems Incorporated. 2003. Adobe Audition (13.0.6). Windows. California: Adobe Inc.
- Alarcão, D., & Inácio, O. 2022. Determination of room acoustic parameters using spherical beamforming – The example of Lisbon’s Garrett Hall. *Applied Acoustics*. 192.
- Alonso, C., Martí, A., Novello, Y., Albert, G. 2023. Els arbres singulars del Parc Natural de l'Alt Pirineu: estudi i proposta d'educació ambiental.
- Ameztegui, A., Coll, L., Brotons, L., Ninot, J. 2016. Land-use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain tree line in the Pyrenees. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 632–641.
- Andrew, B., & Chad, W. 26-28 August 2019. Microphones: How they work and how to choose which one is right for you. In: NOISE-CON. San Diego, CA.

- Araya-Salas, M. 2012. Is birdsong music? Evaluating harmonic intervals in songs of a Neotropical songbird. *Anim. Behav.* 84, 309–313.
- Arcangeli, G., Lulli, L. G., Traversini, V., De Sio, S., Cannizzaro, E., Galea, R. P., & Mucci, N. 2022. Neurobehavioral Alterations from Noise Exposure in Animals: A Systematic Review. *IJERPH.* 20(1), 591.
- Attenborough, K. 2014. *Sound Propagation in the Atmosphere.* Springer Handbook of Acoustics.
- Attenborough, K., & Taherzadeh, S. 2016. Sound propagation through forests and tree belts. *Proc. Meet. Acoust.* 38(1), 114–125.
- Baciadonna, L., Solvi, C., La Cava, S., Pilenga, C., Gamba, M., Favaro, L. 2021. Cross-modal individual recognition in the African penguin and the effect of partnership. *Proceedings. Biol. sci.* 288(1960), 20211463.
- Baiges, T., Beltrán, M., Mundet, R. 2020. Criteris i models silvícoles per integrar la biodiversitat a la gestió forestal: projecte Life BIORGEST.
- Baines, D., & Aebischer, N. 2023. Estimating capercaillie *Tetrao urogallus* population size in Scotland from annual leks and counts of broods over the period 2010–2020. *Wildl. Biol* 2023 (3).
- Barber, J.R., Crooks, K.R., Fristrup, K.M. 2010. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends Ecol. Evol.* 25, 180–189.
- Barrero, A., Llusia, D., Traba, J., Iglesias-Merchan, C., Morales, M.B. 2020. Vocal Response to Traffic Noise in a Non-Passerine Bird: The Little Bustard *Tetrax tetrax*. *Ardeola* 68(1),143–162. <https://doi.org/10.13157/arla.68.1.2021.ra8>
- Basora Roca, X., Romero-Lengua, J., Sabaté i Rotés, X., Sagues Marco, M. 2010. La valorización del patrimonio forestal como recurso ecoturístico en zonas de

- montaña: el caso del Mig Pallars y el Parque Natural del Alt Pirineu (Pirineo de Lérida, Cataluña). *Ager*. 9,31–62.
- Becker, F., Shabangu, F., Gridley, T., Wittmer, H., Marsland, S. 2022. Sounding out a continent: seven decades of bioacoustics research in Africa. *Bioacoustics*. 31, 1–22.
- Buxton, R.T., Agnihotri, S., Robin, V.V., Goel, A., Balakrishnan, R. 2018. Acoustic indices as rapid indicators of avian diversity in different land-use types in an Indian biodiversity hotspot. *JEA*. 2(1),1–17.
- Beltran, O., & Vaccaro, I. 2011. Especies invasoras vs. protegidas: Políticas de fauna en Los Pirineos. *Avá* 19, 00.
- Benedict, L., & Warning, N. 2017. Rock Wrens preferentially use song types that improve long distance signal transmission during natural singing bouts. *Journal of Avian Biol.* 48, 1254–1262.
- Berger-Tal, O., Wong, B. B. M., Candolin, U., Barber, J. R. 2019. What evidence exists on the effects of anthropogenic noise on acoustic communication in animals? A systematic map protocol. *Environ. Evid.* 8(S1).
- Bermant, P. C., Bronstein, M. M., Wood, R. J., Gero, S., Gruber, D. F. 2019. Deep machine learning techniques for the detection and classification of sperm whale bioacoustics. *Sci. Rep.* 9(1), 12588.
- Bermúdez-Cuamatzin, E., Delamore, Z., Verbeek, L. 2020. Variation in diurnal patterns of singing activity between urban and rural great tits. *Front Ecol Evol.* 8, 24.
- Bernadàs, P., Vinyes, M., Preixats, A., Rubí, J. 2023. Estudi dels arbres monumentals de la Vall d'Àneu del Parc Natural de l'Alt Pirineu.

- Bertet, S., Daniel, J., Parizet, E., Warusfel, O. 2013. Investigation on Localisation Accuracy for First and Higher Order Ambisonics Reproduced Sound Sources. *Acta Acust United Acust.* 99, 642 – 657.
- BirdLife International. 2016. *Tetrao urogallus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T22679487A85942729. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-3.RLTS.T22679487A85942729.en>. Accessed on 10 January 2024.
- BirdLife International. 2024. Species factsheet: *Tetrao urogallus*. Downloaded from <http://datazone.birdlife.org/species/factsheet/western-capercaillie-tetrao-urogallus> Accessed on 10 January 2024.
- Blickley, J.L., & Patricelli, G.L. 2010. Impacts of anthropogenic noise on wildlife: research priorities for the development of standards and mitigation. *J. Int. Wildl. Law Policy* 13, 274–292.
- Bocaccio, H., Domínguez, M., Mahler, B., Reboreda, J., Mindlin, G. 2023. Identification of dialects and individuals of globally threatened Yellow Cardinals using neural networks. *bioRxiv*.
- Bolin, K. 2009. Prediction method for wind-induced vegetation noise. *Acta Acust United Acust.* 95, 607–619.
- Boncoraglio, G., & Saino, N. 2007. Habitat structure and the evolution of bird song: a meta-analysis of the evidence for the acoustic adaptation hypothesis. *Funct Ecol.* 21(1), 134–142.
- Bormpoudakis, D., Sueur, J., Pantis, J. D. 2013. Spatial heterogeneity of ambient sound at the habitat type level: Ecological implications and applications. *Landsc. Ecol.* 28, 495–506.
- Boycott, T. J., Gao, J., Gall, M. D. 2019. Deer browsing alters sound propagation in temperate deciduous forests. *PloS one.* 14(2), e0211569.

- Braun, C., Taylor, W., Ebbert, S., Spitler, L. 2019. Monitoring Rock Ptarmigan (*Lagopus muta*) populations in the Western Aleutian Islands, Alaska. *Can. Field-Nat* 133: 49.
- Bregman, M. R., Patel, A. D., Gentner, T. Q. 2016. Songbirds use spectral shape, not pitch, for sound pattern recognition. *PNAS* 113(6), 1666–1671.
- Brown, T. J., & Handford, P. 2000. Sound design for vocalizations: quality in the woods, consistency in the fields. *Condor* 102, 81–92.
- Brumm, H., & Slabbekoorn, H. 2005. Acoustic communication in noise. *Adv. Stud. Behav.* 35, 151–209.
- Brumm, H., Slater, P.J.B. 2006. Ambient noise, motor fatigue, and serial redundancy in chaffinch song. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 60, 475–481.
- Brumm, H. 2009. Song amplitude and body size in birds. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 63, 1157.
- Budk, M., Wojas, L., Osiejuk, T. S. 2015. Is it possible to acoustically identify individuals within a population?. *J. Ornithol.* 156, 481–488.
- Buxton, R.,T, Lendrum, P.E., Crooks, K.R., Wittemyer, G. 2018. Pairing camera traps and acoustic recorders to monitor the ecological impact of human disturbance. *Glob. Ecol. Conserv.*16:e00493.
- Buxton, R., & Jones, I. 2012. Measuring nocturnal seabird activity and status using acoustic recording devices: Applications for island restoration. *J. Field Ornithol* 83: 47–60.
- Campanini, S., & Farina, A. 2008. A new Audacity feature: room objective acustical parameters calculation module.



- Campos-Cerqueira, M., & Aide, T.M. 2016. Improving distribution data of threatened species by combining acoustic monitoring and occupancy modelling. *MEE*. 7, 1340–1348.
- Camprodon, J., Campión, D., Martínez-Vidal, R., Onrubia, A., Robles, H., Romero, J.L. y Senosian, A. 2007. Estatus, selección del hábitat i conservació de los pícidos ibéricos. *Conservación de la biodiversidad, fauna vertebrada y gestión forestal*. Edicions U. Barcelona. s.n, 391–434.
- Camprodon, J., Salvanyà, J. y Soler-Zurita, J., 2008. The Abundance and Suitability of Tree Cavities and Their Impact on Hole-Nesting Bird Populations in Beech Forests of NE Iberian Peninsula. *Acta Ornithologica*. 43,17–31.
- Canut, J., García-Ferré, D., Afonso, I. 2011. Manual de conservación y manejo del hábitat del urogallo pirenaico. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Serie manuales de gestión de especies amenazadas. Madrid.
- Cardoso, G.C., & Atwell, J.W. 2011. On the relation between loudness and the increased song frequency of urban birds.— *Anim. Behav.* 82, 831–836.
- Caro, T. 2003. Umbrella species: critique and lessons from EastAfrica. *Anim. Conserv.* 6, 171–181.
- Carvalho, S., & Gomes, E. 2022. Automatic Classification of Bird Sounds: Using MFCC and Mel Spectrogram Features with Deep Learning. *Vietnam J. Comput. Sci.* 10.
- Castroviejo, J. 1975. El urogallo en España. *Monografías de la Estación Biológica de Doñana*, 3. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. 84: 546.
- Chan, A. A. Y., Giraldo-Perez, P., Smith, S., and Blumstein, D. T. 2010. Anthropogenic noise effects risk assessment and attention: the distracted prey hypothesis. *Biol. Lett.* 6, 458–461.

- Cheng, J., Xie, B., Lin, C., Ji, L. 2012. A comparative study in birds: Call-type-independent species and individual recognition using four machine-learning methods and two acoustic features. *Bioacoustics-the International Journal of Animal Sound and Its Recording - Bioacoustics* 21: 1-15.
- Chobeau, P. 2014. Modeling of sound propagation in forests using the Transmission Line Matrix method: Study of multiple scattering and ground effects related to forests. *Acoustics*. Université du Maine.
- Chronister, L., Rhinehart, T., Kitzes, J. 2023. When birds sing at the same pitch, they avoid singing at the same time. *Ibis* 165.
- Chua, P., Lammers, Y., Menoni, E., Ekrem, T., Bohmann, K., Boessenkool, S., Alsos, I. 2021. Molecular dietary analyses of western capercaillies (*Tetrao urogallus*) reveal a diverse diet. *eDNA*. 3.
- Clutton-Brock, T., & Sheldon, B. 2010. Individuals and populations: The role of long-term, individual-based studies of animals in ecology and evolutionary biology. *TREE* 25: 562-73.
- Colangelo, M., Camarero, J. J., Gazol, A., Piovesan, G., Borghetti, M., Baliva, M., Gentilesca, T., Rita, A., Schettino, A., & Ripullone, F. 2021. Mediterranean old-growth forests exhibit resistance to climate warming. *Sci. Total Environ.* 801, 149684.
- Collier, K., Parsons, S., Czenze, Z. 2022. Thermal energetics of male courtship song in a lek-breeding bat. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 76, 36.
- Collins, S. 2004. Vocal fighting and flirting: The functions of birdsong.
- Coppes, J., Kämmerle, J., Schroth, K. E., Braunisch, V., Suchant, R. 2021. Weather conditions explain reproductive success and advancement of the breeding season in Western Capercaillie (*Tetrao urogallus*). *Ibis*. 163.

- Cramer E. R. 2013. Physically challenging song traits, male quality, and reproductive success in house wrens. *PloS one* 8(3).
- Danescu, A., U. Kohnle, J. Bauhus, J., Sohn, A., Albrecht, T. 2018. Stability of tree increment in relation to episodic drought in uneven-structured, mixed stands in southwestern Germany. *For. Ecol. Manag.* 415–416, 148–159.
- Decret 194/2003. De declaració del Parc Natural de l'Alt Pirineu. 1 d'agost del 2003. DOGC. No. 3943.
- Decret 172/2022. Catàleg de fauna salvatge autòctona amenaçada i de mesures de protecció i de conservació de la fauna salvatge autòctona protegida. 20 de setembre del 2022. DOGC. núm. 8758.
- Deichmann, J. L., Hernandez-Serna, A., Campos-Cerqueira, M., Aide, T. M. 2017. Soundscape analysis and acoustic monitoring document impacts of natural gas exploration on biodiversity in a tropical forest. *Ecol. Indic.* 74, 39–48.
- Deppisch, T., & Frank, C. May 2020. Recording first-order Ambisonics with a differential array of two dual-diaphragm microphones. 148th Conference on Audio Engineering Society Convention. Virtual Vienna.
- Di, G.Q., Lin, Q.L., Li, Z.G., Kang, J. 2014. Annoyance and activity disturbance induced by high-speed railway and conventional railway noise: a contrastive case study. *Environ Health.* 13,12.
- Diego, A., Llusia, D., Traba, J., Iglesias Merchan, C., Morales, M. 2020. Vocal Response to Traffic Noise in a Non-Passerine Bird: The Little Bustard *Tetrax tetrax*. *Ardeola.* 68.
- Dooling, R. J., Leek, M. R., Gleich, O., Dent, M. L. 2002. Auditory temporal resolution in birds: discrimination of harmonic complexes. *JASA.* 112, 748e759.

- Dominoni, D., Greif, S., Nemeth, E., Brumm, H. 2016. Airport noise predicts song timing of European birds. *Ecol. Evol.* 6.
- Drever, M. C. K. H., Aitken, A. R., Norris, K. Martin, K. 2008. Woodpeckers as reliable indicators of bird richness, forest health and harvest. *Biol. Conserv.* 141, 624–634.
- Drozdowski, S., Zawadzka, D., Zawadzki, G., Studnicki, M., Brzeziecki, B. 2021. Mature stand developmental stage has ceased to constitute the most suitable habitat for the capercaillie in the Augustów Forest, Poland. *Ecosyst.* 8, 1–14.
- Duarte, M., Sousa-Lima, R., Young, R., Farina, A., Vasconcelos, M., Rodrigues, M., Pieretti, N. 2015. The impact of noise from open-cast mining on Atlantic forest biophony. *Biol Conserv.* 191,623–631.
- Dubois, A., & Martens, J. 1984. A case of possible vocal convergence between frogs and a bird in Himalayan torrents. *J. Ornithol.* 125, 455–463.
- Ehrhardt, L., Cheinet, S., Juvé, D., Blanc-Benon, P. 2013. Evaluating a linearized Euler equations model for strong turbulence effects on sound propagation. *JASA.* 133, 1922–1933.
- Elie, J.E., & Theunissen, F.E. 2018. Zebra finches identify individuals using vocal signatures unique to each call type. *Nat Commun* 9: 4026.
- Ellinger, N., & Hodl, W. 2003. Habitat acoustics of a neotropical lowland rainforest. *Bioacoustics* 13, 297–321.
- Erbe, C., Dent, M. L., Gannon, W. L., McCauley, R. N., Römer, H., Southall, B. L., Stansbury, A. L., Stoeger, A. S., & Thomas, J. A. 2022. The Effects of Noise on Animals. In Springer eBooks, pp. 459–506.
- Europarc-España. 2018. Manual 13. Las áreas protegidas en el contexto del cambio global: incorporación de la adaptación al cambio climático en la planificación y

- gestión. Segunda edición, revisada y ampliada Ed. Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para los espacios naturales. Madrid. 168 pp.
- Europarc-España. 2019. Manual de campo para la identificación de rodales maduros de referencia. Fase I: Prospección de rodales. Ed. Fundación González Bernáldez, Madrid. Proyecto LIFE Redcapacita\_2015. Deliverable B3.1.29 pp.
- Europarc-España. 2020 Manual 14. Bosques maduros mediterráneos: características y criterios de gestión en áreas protegidas. Ed. Fundación Fernando González Bernáldez, Madrid.
- Ey,E., & Fischer, J. 2009. The “Acoustic Adaptation hypothesis”- a review of the evidence from birds, anurans and mammals. *Bioacoustics* 19, 21–48.
- Fagerlund, S. 2012. Acoustic monitoring of capercaillie courting display. 19th International Congress on Sound and Vibration 2012, ICSV 2012. 2: 1681–1688.
- Fang, C.F., & Ling, D.L. 2003. Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landsc. Urban Plan.* 63, 187–195.
- Farina, A. 2007. Advancements in Impulse Response Measurements by Sine Sweeps. *J. Audio Eng. Soc.* 122.
- Farina, A. 2018. Ecoacoustics: A Quantitative Approach to Investigate the Ecological Role of Environmental Sounds. *Mathematics.* 7, 21.
- Farina, A., & Ayalon, R. 26-28 June 2003. Recording concert hall acoustics for posterity. 24th AES Conference on Multichannel Audio, Banff, Canada.
- Farina, A., Capra, A., Chiesi,L., Scopece, L. 8 Oct 2010 A spherical microphone array for synthesizing virtual directive microphones in live broadcasting and in poswt production. 40th AES international Conference, Tokyo, Japan.
- Farina, A., & Gage, S.H. 2017. *Ecoacoustics: the ecological role of sounds.* Wiley, Hoboken.

- Farina, A., & Tronchin, L. 2005. Measurements and reproduction of spatial sound characteristics of auditoria. *Acoust.* 26, 193–199.
- Farina, A., & Tronchin, L. 2013. 3D Sound Characterisation in Theatres Employing Microphone Arrays. *Acta. Acust. United. Acust.* 1, 118–125.
- Farina, A., Pieretti, N., Tognari, E., Lombardi, A. 2016. The application of the Acoustic complexity indices (ACI) to Ecoacoustic event detection and identification (EEDI) modeling. *Biosem.* 9, 227–246.
- Farina, A., Mullet, T.C., Bazarbayeva, T.A., Tazhibayeva, T., Bulatova, D., Li, P. 2021. Perspectives on the Ecological Role of Geophysical Sounds. *Front. Ecol. Evol.* 9,748398.
- Farina, A., Righini, R., Fuller, S., Li, P., Pavan, G. 2021b. Acoustic complexity indices reveal the acoustic communities of the old-growth Mediterranean forest of Sasso Fratino Integral Natural Reserve (Central Italy). *Ecol. Indic.* 120,106927.
- Farji-Brener, A.G., Dalton, M.C., Balza, U., Curtis, A., Lemus-Domínguez, I., Fernandez-Hilario, R., Cáceres-Levi, D. 2018. Working in the rain? Why leaf-cutting ants stop foraging when it's raining. *Insect Soc.* 65, 233–239.
- Favaro, L., Gamba, M., Alfieri, C., Pessani, D., McElligott, A. 2015. Vocal individuality cues in the African penguin (*Spheniscus demersus*): a source-filter theory approach. *Sci Rep.* 5, 17255.
- Flaquer, C., Torre, I., Arrizabalaga, A. 2007. Selección de refugios, gestión forestal y conservación de los quirópteros forestales. 469-488, In: Camprodon, J., Plana, E. (Eds.). *Conservación de la biodiversidad, fauna vertebrada y gestión forestal.* Edicions de la Universitat de Barcelona -Centre Tecnològic Forestal de Catalunya.
- Fletcher, N.H. 2009. The Variety of Information Transfer in Animal Sonic Communication: Review from a Physics Perspective. *Entropy.* 11, 888–906.

- Florkowski, M. R., Hamer, S. A., Yorzinski, J. L. 2023. Brief exposure to captivity in a songbird is associated with reduced diversity and altered composition of the gut microbiome. *FEMS Microbiol. Ecol.* 99 (9).
- Fiedler, C., Friederici, E. P., Petruncio, M., Denton, C., Hacker, W. D., 2007. Managing for old growth in frequentfire landscapes. *Ecol. Soc.* 12(2), 20.
- Finne, M., Wegge, P., Eliassen, S., Odden, M. 2000. Daytime roosting and habitat preference of capercaillie *Tetrao urogallus* males in spring - the importance of forest structure in relation to anti-predator behaviour. *Wild. Biol.* 6.
- Fornoff, F., Klein, A., Blüthgen, N., Staab, M. 2019. Tree diversity increases robustness of multi-trophic interactions. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci.* 286 (898).
- Fox, E. J. S., Roberts, D., Bennamoun, M. 2008. Call-independent individual identification in birds. *Bioacoustics* 18(1), 51–67.
- Francis, C.D., Ortega, C.P., Cruz, A. 2009. Noise pollution changes avian communities and species interactions. *Curr Biol.* 19,1415–1419.
- Francis, C.D., Kleist, N.J., Ortega, C.P., Cruz, A. 2012. Noise pollution alters ecological services: enhanced pollination and disrupted seed dispersal. *Proc R Soc B: Biol Sci.* 279,2727–2735.
- Francis, C.D., Newman, P., Taff, B.D. 2017. Acoustic environments matter: synergistic benefits to humans and ecological communities. *J Environ Manag.* 203,245–254.
- Franklin J.F., Spies T.A., Pelt R. Van, et al. 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *For. Ecol. Manage.*155(1-3), 399–423.
- Fujiwara, H., Tobari, Y. 2021. Courtship vocalizations in nonsongbirds: Auditory and neuroendocrine mechanisms in intersexual communication. *Neuroendocrine Regulation of Animal Vocalization* 10, 327–334.

- Fungobe. 2024. Manual de evaluación de la naturalidad de rodales de referencia. Herramienta REDBOSQUES. Fase II: Identificación mediante parcelas. Fundación Fernando González Bernáldez, Madrid.
- García-Rodríguez, A., Herrero-García, G., García, M.G., Esgueva, Á., Balsera, R., Oleaga, A., Fernández, D., Amado, J., Royo, L., García-Iglesias, M., Balseiro, A. 2023. Mortality Causes in Captive Cantabrian capercaillie (*Tetrao urogallus cantabricus*) in Spain. *Animals*. 13,1255.
- Garcia, A., Manser, M., Watson, S. K., Kyabulima, S., Radford, A. N., Cant, M. A., Garcia, M. 2022. Testing the acoustic adaptation hypothesis with vocalizations from three mongoose species. *Anim. Behav.* 187, 71–95.
- Gasc, A., Anso, J., Sueur, J., Jourdan, H., Desutter-Grandcolas, L. 2018. Cricket calling communities as an indicator of the invasive ant *Wasmannia auropunctata* in an insular biodiversity hotspot. *Biol. Invasions*. 20, 1099–1111.
- Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A., Schepaschenko, D. 2015. Boreal forest health and global change. *Science*.349(6250),819–22.
- Geipel, I., Smeekes, M.J., Halfwerk, W.,Page, R.A. 2019. Noise as an informational cue for decision making: the sound of rain delays bat emergence. *J Exp Biol*. 222, jeb192005.
- Gémard, C., Aubin,T., Reboud, E., Bonadonna, F. 2021. Call rate, fundamental frequency, and syntax determine male-call attractiveness in blue petrels *Halobaena caerulea*. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 75, 1007.
- Gerzon., M. 1975. Recording concert hall acoustics for posterity. *JAES*. 23, 569–571.
- Ghani, B., Denton, T., Kahl, S., Klinck, H. 2023. Global birdsong embeddings enable superior transfer learning for bioacoustic classification. *Sci. Rep.* 13.



- Gibb, R., Browning, E., Glover-Kapfer, P., Jones, K.E. 2018. Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods Ecol Evol.* 10,169–185.
- Gil, D., & Gahr, M. 2002. The honesty of bird song: Multiple constraints for multiple traits. *Trends Ecol. Evol* 17,133–141.
- Gil, J., Gómez-Serrano, M., López-López, P. 2020. Population Decline of the Capercaillie *Tetrao urogallus aquitanicus* in the Central Pyrenees. *Ardeola* 67, 285.
- Girón, S., Galindo, M., Zamarreño, T. 2008. Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar–Gothic churches. *JSV.* 315, 1125–1142.
- Gonzalez, M., Garcia-Tejero, S., Wengert, E., Fuertes, B. 2016. Severe decline in Cantabrian Capercaillie *Tetrao urogallus cantabricus* habitat use after construction of a wind farm. *Bird Conserv. Int* 26(2), 256–261.
- Goodwin, S.E., & Shriver, W.G. 2011. Effects of traffic noise on occupancy patterns of forest birds. *Conserv. Biol.* 25, 406–411.
- Grant, P., & Grant, R. 2010. Darwin’s finches diverge when a new species enters the community. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 20156–20163.
- Grinfeder, E., Hauptert, S., Ducrettet, M., Barlet, Juliet., Reynet, M., Sèbe, F., Sueur, J. 2022. Soundscape dynamics of a cold protected forest: dominance of aircraft noise. *Landsc. Ecol.* 37, 567–582.
- Gross, K., Pasinelli, G. Kunc, H.P. 2010. Behavioral plasticity allows short-term adjustment to a novel environment. *Am. Nat.* 176, 456–464.
- Guidorzi, P., & Garai, M. 2023. Repeatability of the European Standardized Method for Measuring Sound Reflection and Sound Insulation of Noise Barriers. *Environments* 10, 139.

- Gustafsson, L., Baker, J., Bauhus, W., Beese, A., Brodie, J., Kouki, D. Lindenmayer, et al. 2012. Retention forestry to maintain multifunctional forests: A world perspective. *BioScience* 62, 633–645.
- Habib, L., Bayne, E. M., and Boutin, S. 2007. Chronic industrial noise affects pairing success and age structure of ovenbirds *Seiurus aurocapilla*. *J. Appl. Ecol.* 44, 176–184.
- Halfwerk, W., & Slabbekoorn, H. 2009. A behavioural mechanism explaining noisedependent frequency use in urban birdsong. *Anim. Behav.* 78, 1301–1307.
- Hanache, P., Spataro, T., Firmat, C., Boyer, N., Fonseca, P., Medoc, V. 2020. Noise-induced reduction in the attack rate of a planktivorous freshwater fish revealed by functional response analysis. *Freshw Biol.* 65,75–85.
- Hancock, M., Gullett, P., Golder, P., Marshall, G., Cowie, N. 2023. Emulating natural disturbances with trial management in Scotland: effects of burning, mowing and cattle on habitat measures important for Capercaillie *Tetrao urogallus*. *Eur. J. For. Res.* 142, 1–17.
- Hansen, P. 1979. Vocal learning: Its role in adapting sound structures to long-distance propagation, and a hypothesis on its evolution. *Anim. Behav.* 27, 1270–1271.
- Harmon, M., Ferrell, J., Franklin, F. 1990. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests. *Science.* 247, 699–702.
- Hart, V., Policht, R., Jandák, V., Brothánek, M., Burda, H. 2020. Low frequencies in the display vocalization of the Western Capercaillie (*Tetrao urogallus*). *PeerJ* 8, 9189.
- Hart, P.J., Ibanez, T., Paxton, K., Tredinnick, G., Sebastian-Gonzalez, E., Tanimoto Johnson, A. 2021. Timing is everything: Acoustic niche partitioning in two tropical wet Forest bird communities. *Front. Ecol. Evol.* 9, 687

- Hjeljord, O., Wegge, P., Rolstad, J., Ivanova, M., Beshkarev, A. 2000. Spring-summer movements of male capercaillie Western Capercaillie: A test of the 'landscape mosaic' hypothesis. *Wildlife Biol.* 6, 251–256.
- Höglund, J., & Alatalo, R. V. 1995. *Leks*. Princeton University Press. Princeton.
- Hold, C., Pulkki, V., Politis, A., McCormack, L. 2023. Compression of Higher-Order Ambisonic Signals Using Directional Audio Coding. *IEEE/ACM Transactions on Audio Speech and Language Processing*. 1-15.
- Holmes, S.B., McIlwrick, K.A. & Venier, L.A. 2014. Using automated sound recording and analysis to detect bird species at risk in southwestern Ontario woodlands. *Wildl. Soc. Bull.* 38, 591–598.
- Homel, K., Pavlushchick, T., Nikiforov, M., Valnisty, A. 2022. Genetic structure and diversity of the capercaillie (*Tetrao urogallus*) population in Belarus in the context of delineation of two subspecies: major and pleskei. *Geo&Bio* 22: 113–128.
- Hong-Seok, Y., Jian, K., Chris, C., Timothy, R., Dick, B. 2013. Quantifying scattered sound energy from a single tree by means of reverberation time. *J. Acoust. Soc. Am.* 134, 264–74.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* 22, 415–427.
- Iglesias-Merchan, C., Ortiz-Urbina, E., Ezquerro, M., Diaz-Balteiro, L. 2019. Incorporating acoustic objectives into Forest Management Planning when sensitive bird species are relevant. *PeerJ* 7, e6922.
- International Organization for Standardization [ISO]. 2012. ISO 3382-3:2012. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 3: Open plan offices.

- International Organization for Standardization [ISO]. 2024. ISO 9613-2:2024. Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors.
- Ipinza, R., Barros, S., Asquet, C., Torres, J., Filgueira, P. 2023. Manejo forestal sustentable y biodiversidad. *Ciencia & Investigación Forestal*. 55–75.
- Jahren, T., Storaas, T., Willebrand, T., Fosslund, M.P. 2016. Declining reproductive output in capercaillie and blackgrouse – 16 countries and 80 years. *Anim. Biol* 66, 363–400.
- Johnson, J.B., Lees, J.M., Yepes, H. 2006. Volcanic eruptions, lightning, and a waterfall: differentiating the menagerie of infrasound in the Ecuadorian jungle. *Geophys Res Lett*. 33, L06308.
- Jordi. O., Farina, A., Mañosa, S. 2023. Sound amplitude (dB) of male Western Capercaillie *Tetrao urogallus* calls. *RCO*. 39, 60–64.
- Jouventin, P., Aubin, T. 2002. Acoustic systems are adapted to breeding ecologies: individual recognition in nesting penguins. *Anim. Behav.* 64, 747–757.
- Juana, E., & Kirwan, G.M. 2012. Western Capercaillie (*Tetrao urogallus*). In: del Hoyo, J., Elliott, A., Sargatal, J., Christie, D.A. and de Juana, E. (eds), *Handbook of the Birds of the World Alive*, Lynx Edicions, Barcelona.
- Juola, F., & Searcy, W. 2011. Vocalizations reveal body condition and are associated with visual display traits in great frigatebirds (*Fregata minor*). *Behav. Ecol. Sociobiol* 65, 2297–2303.
- Kahl, S., Clapp, M., Hopping, W., Goëau, H., Planqué, R., Vellinga, W.-P., Joly, A. 2020. Overview of BirdCLEF 2020: Bird sound recognition in complex acoustic environments. CLEF: Conference and Labs of the Evaluation.

- Kobayashi, H.H., et al. 2018. A real-time streaming and detection system for bio-acoustic ecological studies after the fukushima accident. In: Joly, A., Vrochidis, S., Karatzas, K., Karppinen, A., Bonnet, P. (eds.) *Multimedia Tools and Applications for Environmental & Biodiversity Informatics*. MSA, pp. 53–66. Springer, Cham.
- Kondo, N., Izawa, Ei-Ichi., Watanabe, S. 2010. Perceptual mechanism for vocal individual recognition in jungle crows (*Corvus macrorhynchos*): Contact call signature and discrimination. *Behaviour* 147: 1051-72.
- Kriesell, H.J., Le Bohec, C., Cerwenka, A.F. 2020. Vocal tract anatomy of king penguins: morphological traits of two-voiced sound production. *Front. Zool.* 17 (1), 1–11.
- Krause, B. L. 1993. The niche hypothesis. *Soundscape Newsl.* 6,6-10.
- Laiolo, P., Bañuelos, M.J., Blanco-Fontao, B., García, M., Gutiérrez, G. 2011. Mechanisms Underlying the Bioindicator Notion: Spatial Association between Individual Sexual Performance and Community Diversity. *PLoS ONE* 6(7), e22724.
- Lakka, J., & Kouki, J. 2009. Patterns of field layer invertebrates in successional stages of managed boreal forest: Implications for the declining Capercaillie *Tetrao urogallus* L. population. *Forest Ecology and Management*. *Forest. Ecol. Manage.* 257, 600–607.
- Lapp, S., Rhinehart, T., Freeland-Haynes, L., Khilnani, J., Syunkova, A., Kitzes, J. 2023. OpenSoundscape: An open-source bioacoustics analysis package for Python. *MEE*. 14.
- Ley 12/1985. De Espacios Naturales. 13 de junio de 1985. BOE. No. 166.

- Lengagne, T., & Slater, P.J.B. 2002. The effects of rain on acoustic communication: tawny owls have good reason for calling less in wet weather. *Proc. Roy. Soc. Lond. B: Biol.* 269, 2121–2125.
- Li, Z., Clarke, J., Eliason, C., Stidham, T., Deng, T., Zhou, Z. 2018. Vocal specialization through tracheal elongation in an extinct Miocene pheasant from China. *Sci. Rep.* 8.
- Lieser, M., Berthold, P., Manley, G. 2006. Infrasound in the flutter jumps of the capercaillie (*Tetrao urogallus*): Apparently a physical by-product. *J. Ornithol.* 147, 507–509.
- Liu, Wc., Wada, K., Jarvis, E. 2013. Rudimentary substrates for vocal learning in a suboscine. *Nat Commun.* 4, 2082.
- Logue, D., Sheppard, J., Walton, B., Brinkman, B., Medina, O. 2019. An analysis of avian vocal performance at the note and song levels. *Bioacoustics* 2, 709–730.
- Lohr, B., Wright, T.F., Dooling, R.J. 2003. Detection and discrimination of natural calls in masking noise by birds: estimating the active space of a signal. *Anim. Behav.* 65, 763–777.
- Luther, D., & Wiley, R.H. 2009. Production and perception of communicatory signals in a noisy environment. *Biol. Lett.* 5, 183–187.
- Luther, D., & Derryberry, E. 2012. Birdsongs keep pace with city life: changes in song over time in an urban songbird affects communication. *Anim. Behav.* 83, 1059–1066.
- Luther, D., & Gentry, K. 2013. Sources of Background Noise and Their Influence on Vertebrate Acoustic Communication. *Behaviour* 150, 1045–1068.
- Lyu, N., & Sun, Y-H. 2014. Predicting threat of climate change to the Chinese grouse on the Qinghai Tibet plateau. *Wildl Biol.* 20(2),73–82.

- Madge, S., & McGowan, P. 2002. Pheasants, partridges and grouse: including buttonquails, sandgrouse and allies. Christopher Helm, London.
- Mallarach, J.M., Montserrat, J., Vila, J. 2013. Reptes per preservar els boscos madurs a Catalunya. II Jornades sobre boscos madurs. Santa Coloma de Farners, 2013. Institució Catalana d'Història Natural.
- Mandiwana, T., Bowie, R., Hausberger, M., Henry, L., Crowe, T. 2014. Taxonomic and phylogenetic utility of variation in advertising calls of francolins and spurfowls (Galliformes: *Phasianidae*). *Afr. Zool* 49, 54–82.
- Marin-Cudraz, T., Muffat-Joly, B., Novoa, C., Aubry, P., Desmet, J., Mahamoud-Issa, M., Nicolè, F., Niekerk, M., Mathevon, N., Sèbe, F. 2019. Acoustic monitoring of rock ptarmigan: A multi-year comparison with point-count protocol. *Ecol. Indic.* 101, 710–719.
- Mariné, R. y Dalmau, J. 2000. Uso del hábitat por el mochuelo boreal en andorra (pirineo oriental) durante el periodo reproductor. *Ardeola*. 47, 29–36.
- Marques, T.A., Thomas, L., Martin, S., Mellinger, D.K., Ward, J.A., Moretti, D.J., Harris, D.V., Tyack, P.L. 2012. Estimating animal population density using passive acoustics. *Biol. Rev. Cambridge Philos. Soc* 88: 287–309.
- Martin, K., Adam, O., Obin, N., Dufour, V. 2022. Rookognise: Acoustic detection and identification of individual rooks in field recordings using multi-task neural networks. *Ecol. Inform* 72.
- Mattioli, T., Farina, A., Armelloni, E., Hameau, P., Díaz Andreu, M. 2017. Echoing landscapes: Echolocation and the placement of rock art in the Central Mediterranean. *J. Archaeol. Sci* 83, 12–25.

- MCPFE. 2007. State of Europe's forests 2007. The MCPFE report on sustainable forest management in Europe. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe MCPFE Liaison Unit Warsaw, Poland.
- Memet, E., Farrell, B., Mahadevan, L. 2022. An allometric prior enhances acoustic niche partitioning signal. *J. R. Soc. Interface.* 19.
- Montserrat, J. 2013. Estat de conservació dels boscos madurs de Catalunya. *L'Atzavara* 22, 73–78.
- Montané, F., Guixé, D., Camprodon, J. 2016. Canopy cover and understory composition determine abundance of *Vaccinium myrtillus* L., a key plant for capercaillie (*Tetrao urogallus*), in subalpine forests in the Pyrenees. *Plant Ecol. Divers.* 9(2), 187–198.
- Moreau, S., Daniel, J., Bertet, S. 2006. 3D Sound Field Recording with Higher Order Ambisonics – Objective Measurements and Validation of a 4th order Spherical Microphone. Paper presented at Audio Engineering Society 120th Convention, Paris, France.
- Morton, E. S. 1975. Ecological sources of selection on avian sounds. *Am. Nat.* 209, 17–34.
- Muhlestein, M. B., Ostashov, V. E., Wilson, D. K., Albert, D. G. 2018. Acoustic pulse propagation in forests. *JASA.* 143(2), 968.
- Mullet, T.C., Farina, A., Gage, S.H. 2017. The Acoustic Habitat Hypothesis: An Ecoacoustics Perspective on Species Habitat Selection. *Biosemitotics.* 10, 319–336.
- Naguib, M. 2003. Reverberation of rapid and slow trills: Implications for signal adaptations to long-range communication. *JASA.* 113, 1749–56.



- Narbutt, M., Skoglund, J., Allen, A., Chinen, M., Barry, D., Hines, A. 2020. AMBIQUAL: Towards a Quality Metric for Headphone Rendered Compressed Ambisonic Spatial Audio. *Appl Sci.* 10, 3188.
- Naufal, H., Efendi, A., Sumarminingsih, E. 2023. Bayesian Additive Regression Trees for Classification of Unbalanced Class of Credit Collectability Data. *Asian J. Probab. Stat* 23, 16–27.
- Nicolás Francisco, O., Afonso Jordana, I., Garcia Ferré, D., Roig Simón, J., Ewbank, A. C., Margalida, A., Sacristán, I., Foulché, K., Ménoni, E., Sacristán, C. 2022. Sedation of Wild Pyrenean Capercaillie (*Tetrao urogallus aquitanicus*) Using Intramuscular Midazolam. *Animals* 12(14), 1773.
- Nemeth, E., Dabelsteen, T., Pedersen, S.B., Winkler, H. 2006. Rainforests as concert halls for birds: are reverberations improving sound transmission of long song elements? *J. Acoust. Soc. Am.* 119, 620.
- Nolan, V., Scott, C., Yeiser, J. M., Wilhite, N., Howell, P. E., Ingram, D., Martin, J. A. 2023. The development of a convolutional neural network for the automatic detection of northern bobwhite *Colinus virginianus* covey calls. *Remote Sens. Ecol. Con.* 9(1), 46–61.
- Nolasco, I., Singh, S., Vidaña-Vila, E., Grout, E., Morford, J., Emmerson, M., Jensens, F., Whitehead, H., Kiskin, I., Strandburg-Peshkin, A., Gill, L., Pamula, H., Lostanlen, V., Morfi, V., Stowell, D. 2022. Few-shot bioacoustic event detection at the DCASE 2022 challenge.
- Odom, K. J., Slaght, J. C., Gutierrez, R. J. 2013. Distinctiveness in the Territorial Calls of Great Horned Owls within and among Years. *JRR.* 47, 21–30.
- Oliva-Vidal, P. 2022. Avian scavengers in a changing world: a multidisciplinary conservation approach in the Pyrenees. PhD Thesis. Universitat de Lleida, Spain.

- Opaev, A., & Shishkina, E. 2021. Song amplitude and population density in two sympatric warblers, *Phylloscopus schwarzi* and *P. fuscatus*. *Bioacoustics*. 30: 272–283.
- Ortolani, F., Uncini, A. 2016. A new approach to acoustic beamforming from virtual microphones based on ambisonics for adaptive noise cancelling. IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine.
- Pakkala, T., Pellikka, J., Lindén, H. 2003. Capercaillie *Tetrao urogallus* - A good candidate for an umbrella species in taiga forests. *Wildl. Biol.* 9.
- Palau, J., & Garriga, M. 2013. Inventory and conservation of old-growth forests in the Alt Pirineu Natural Park. Ed. Institució Catalana d'Història Natural. 137–145. Barcelona.
- Papadakis, N., & Stavroulakis, G. 2019. Review of Acoustic Sources Alternatives to a Dodecahedron Speaker. *Appl. Sci.* 9, 3705.
- Pavan, G., Favaretto, A., Bovelacci, B., Scaravelli, D., Macchio, S., Glotin, H. 2015. Bioacustica e ecoacustica applicate al monitoraggio e alla gestione ambientale - Bioacoustics and ecoacoustics applied to environmental monitoring and management. *RIA*. 39, 68–74.
- Pavan, G. 2017. Fundamentals of soundscape conservation. In: Farina A, Gage SH (eds) *Ecoacoustics. The ecological role of sound*. Wiley, Hoboken 235–258.
- Pavlović, D., Mijic, M., Kurtovic, H. 2008. A simple impulse sound source for measurements in room acoustics. *Appl. Acoust.* 69, 378–383.
- Paxton, K., Sebastián-González, E., Hite, J., Crampton, L., Kuhn, D., Hart, P. 2019. Loss of cultural song diversity and the convergence of songs in a declining Hawaiian forest bird community. *R. Soc. Open Sci.* 6.

- Pèlachs, A., Tersa, J., Soriano, J.M., Molina, D., Cunill Artigas, R. 2009. Changes in Pyrenean woodlands as a result of the intensity of human exploitation: 2,000 years of metallurgy in Vallferrera, northeast Iberian Peninsula. *Veg. Hist. Archaeobot.* 18,403–416.
- Penar, W., Magiera, A., Klocek, C. 2020. Applications of bioacoustics in animal ecology. *Ecol. Complex.* 43, e100847.
- Pijanowski, B. C., Farina, A., Gage, S. H., Dumyahn, S. L., Krause, B. 2011. What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landsc. Ecol.* 26, 1213–1232.
- Pijanowski, B., Villanueva-Rivera, L., Dumyahn, S., Farina, A., Krause, B., Napoletano, B., Gage, S., Pieretti, N. 2011. Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *BioScience* 61, 203–2016.
- Pilliod, D., Jeffries, M., Arkle, R., Olson, D. 2020. Reptiles Under the Conservation Umbrella of the Greater Sage-Grouse. *J. Wildl. Manage.* 84.
- Plachiyski, D., Popgeorgiev, G., Avramov, S., Kornilev, Y. 2020. Habitat Selection of "Mad Cocks" of the Western Capercaillies *Tetrao urogallus* (Galliformes: *Phasianidae*) from the Fringe of the Range: A Case Study from Rila Mts. (Bulgaria). 12, 155–169.
- Podos, J., & Cohn-Haft, M. 2019. Extremely loud mating songs at close range in white bellbirds. *Curr. Biol.* 29.
- Pohl, N. U., Klump, G. M., Langemann, U. 2015. Effects of signal features and background noise on distance cue discrimination by a songbird. *J. exp. biol.* 218(Pt 7), 1006–1015.
- Pohlert, T. 2023. PMCMRplus: Calculate pairwise multiple comparisons of mean rank sums extended. R package version 1.9.10.

- Policht, R., Hart, V. 2023. Individual and Geographic Variation in Non-Harmonic Phases of Male Capercaillie (*Tetrao urogallus*) Song. *Animals*. 13, 765.
- Potapov, P., Yaroshenko, A., Turubanova, S., Dubinin, M., Laestadius, L., Thies, C., Aksenov, D., Egorov, A., Yesipova, Y., Glushkov, I. 2008. Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing. *Ecol Soci*.13(2), 51.
- Potvin, D.A., & Mulder, R.A. 2013. Immediate, independent adjustment of call pitch and amplitude in response to varying background noise by silvereyes (*Zosterops laterallis*). *Behav Ecol*. 24,1363–8.
- Priyadarshani, N., Castro, I., Marsland, S. 2018. The impact of environmental factors in birdsong acquisition using automated recorders. *Ecol Evol*. 8, 5016–5033.
- Průchová, A., Jaška, P., Linhart, P. 2017. Cues to individual identity in songs of songbirds: testing general song characteristics in Chiffchaffs *Phylloscopus collybita*. *J. Ornithol*. 158, 911–924.
- Puig X., Font, M., Ginebra, J. 2016. A Unified Approach to Authorship Attribution and Verification. *Am Stat*. 70,3, 232–242.
- Pulkki, V., & Hirvonen, T. 2005. Localization of virtual sources in multichannel audio reproduction. *Speech and Audio Processing, IEEE Trans*. 13, 105 – 119.
- Quevedo, M., Bañuelos, M.J., Sáez, O., Obeso, J. 2006. Habitat selection by Cantabrian Capercaillie *Tetrao urogallus cantabricus* at the edge of the species' distribution. *Wildlife Biol*. 12, 267– 276.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rebbeck, M., Corrick, R., Eagleston, B., Stainton, C. 2001. Recognition of individual European Nigtjars *Caprimulgus europaeus* from their song. *Ibis* 143,468– 475.

- Richards, D. G., & R. H. Wiley. 1980. Reverberations and amplitude fluctuations in the propagation of sound in a forest: implications for animal communication. *Am. Nat.* 115: 381–399.
- Ríos-Chelén, A.A., Salaberria, C., Barbosa, I., Macías García, C., Gil, D. 2012. The learning advantage: bird species that learn their song show a tighter adjustment of song to noisy environments than those that do not learn. *J. Evol. Biol.* 25(11), 2171–2180.
- Ripley, B. 2023. *Class: Functions for classification*. R package version 7.3-22.
- Ripley, B. 2024. *MASS: support functions and datasets for Venables and Ripley's MASS*. R package version 7.3-60.0.1. R Core Team. 2021. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Robisson, P., Aubin, T., Bremond, J.C. 2010. Individuality in the Voice of the Emperor Penguin *Aptenodytes forsteri*: Adaptation to a Noisy Environment. *J. Ethol.* 94, 279–290.
- Robinson, J. M., Breed, M. F., Abrahams, C. 2023. The sound of restored soil: Measuring soil biodiversity in a forest restoration chronosequence with ecoacoustics.
- Roca, I.T., Desrochers, L., Giacomazzo, M., Bertolo, A., Bolduc, P., Deschesnes, R. 2016. Shifting song frequencies in response to anthropogenic noise: a meta-analysis on birds and anurans. *Behav Ecol.* 27,1269–74.
- Rochat, J.L., & Reiter, D. 2016. Highway traffic noise. *Acoust Today.* 12,38–47.
- Rognan, C.B., Szewczak, J.M. & Morrison, M.L. 2012. Autonomous recording of Great Gray Owls in the Sierra Nevada. *Northwestern Naturalist* 93, 138–144.
- Rosenberger, J., Kowalczyk, A., Łukaszewicz, E., & Strzała, T. 2020. Female-Male and Female-Female Social Interactions of Captive Kept Capercaillie (*Tetrao*

- Urogallus*) and Its Consequences in Planning Breeding Programs. *Animals* 10(4), 583.
- Ross, S. W., O'Connell, D. P., Deichmann, J. L., Desjonquères, C., Gasc, A., Phillips, J. N., Sethi, S. S., Wood, C. M., Burivalova, Z. 2023. Passive acoustic monitoring provides a fresh perspective on fundamental ecological questions. *Funct. Ecol.*
- Sabaté, J., Schwendtner, O., Barnard Belenguer, B., Río, R., Martínez, J., Tena, A., Cárcamo, S., Diaz Solaz, R., Martinez Zunzarren, N. 2023. Diseño de actuaciones de restauración de hábitat de urogallo (*Tetrao urogallus*) en el Pirineo aragonés. Un proyecto piloto basado en nuevas tecnologías. 87, 98–113.
- Sachot, S., Perrin, N., Neet, C. 2006. Viability and Management of an Endangered Capercaillie (*Tetrao urogallus*) Metapopulation in the Jura Mountains, Western Switzerland. *Biodivers Conserv.* 15, 2017–2032.
- Sagasti, A., Pietrzak, A., Martin, R., Eguinoa, R. 2023. Localization of sound sources in binaural reproduction of first and third order ambisonics. *Vib. Phys. Syst.* 33.
- Sarasa, M. 2023. Looking for white feathers in male western capercaillies *Tetrao urogallus*. *Arx. misc. zool.* 21, 39–47.
- Scarpelli, M. D. A., Ribeiro, M. C., Teixeira, F. Z., Young, R. H., Teixeira, C. V. L. 2020. Gaps in terrestrial soundscape research: It's time to focus on tropical wildlife. *Sci.Total Environ.* 707, 135403.
- Schafer, R.M. 1977. *The tuning of the world*. Knopf, New York.
- Schalz, S. 2023. Wild Carrion Crows (*Corvus corone*) Autonomously Respond to Speech but Show No Difference in Their Response to a Local and a Foreign Language. *Anim. Behav. Cognit.* 10.
- Schreiber, L., & Beckenbauer, T. 2013. Sound Propagation Outdoors. *Handbook of Engineering Acoustics*. 125-.

- Schoeman, R. P., Erbe, C., Pavan, G., Righini, R., Thomas, J. A. 2022. Analysis of Soundscapes as an Ecological Tool. En Springer eBooks 217–267.
- Schroeder, J., Nakagawa, S., Cleasby, I.R., Burke, T. 2012. Passerine birds breeding under chronic noise experience reduced fitness. PLoS ONE 7,e39200.
- Schwendtner, O., Recalde, I., Alcalde, J. T., Gómez, J., Cárcamo, S. 2005. Importancia de los árboles senescentes y la madera muerta en la gestión de los bosques naturales. In: S.E.C.F.-Gobierno de Aragón (Eds.). Actas 4º Congreso Forestal Español. CD-Rom. Imprenta Repes, S.C.146. Zaragoza.
- Sebastián-González, E., & Hart, P. E. 2017. Birdsong meme diversity in a habitat landscape depends on landscape and species characteristics. *Oikos* 126, 1511-1521.
- Serrurier, A., Zdroik, P., Isler, R., Kornienko, T., Peris Morente, E., Sattler, T., Pradervand, J. 2024. Mountain is calling – decrypting the vocal phenology of an alpine bird species using passive acoustic monitoring. *Ibis*.
- Servei de Biodiversitat i Protecció dels animals. 2015. Direcció General de Polítiques Ambientals. Departament de Territori i Sostenibilitat. Resultats dels censos de cantaders de Gall fer a Catalunya.
- Shannon, G., McKenna, M. F., Angeloni, L. M., Crooks, K. R., Fristrup, K. M., Brown, E., Warner, K. A., Nelson, M. D., White, C., Briggs, J., McFarland, S., Wittemyer, G. 2016. A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. *Biol. rev. biol.* 91(4), 982–1005.
- Shelly T. E. 2018. Sexual Selection on Leks: A Fruit Fly Primer. *J. Insect Sci.* 18, 9.
- Shelley, S., Benedict, M., Damian, T. Chadwick, A. 02-05 Sep 2013. B-Format Acoustic Impulse Response Measurement and Analysis In the Forest at Koli National Park,

- Finland. In: Proceedings of the 16th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx13). 16th International Conference on Digital Audio Effects.
- Sirkiä, S., Nikula, A., Helle, P., Lindén, H., Norrdahl, K., Suorsa, P., Valkeajärvi, P. 2011. Contemporary mature forest cover does not explain the persistence of Capercaillie (*Tetrao urogallus*) lekking areas in Finland. *Orn Fenn.* 88, 208–216.
- Sirkiä, S., Helle, P., Lindén, H., Nikula, A., Norrdahl, K., Suorsa, P., Valkeajärvi, P. 2011. Persistence of Capercaillie (*Tetrao urogallus*) lekking areas depends on forest cover and fine-grain fragmentation of boreal forest landscapes. *Ornis Fenn.* 88, 14–29.
- Sitzia, T., Campagnaro, T., Dainese, M., Dallabrida, F., Mattedi, S., Portaccio, A. 2019. Altitudinal Shift of *Tetrao urogallus* in an Alpine Natura 2000 Site: Implications for Habitat Restoration. *Appl. Sci.* 9, 1164.
- Slabbekoorn, H., Eilers, J., Smith, T. 2002. The Benefits of Reverberations: Birdsong and Sound Transmission. *Condor* 104, 564–573.
- Slabbekoorn, H., Yeh, P., Hunt, K. 2007. Sound transmission and song divergence: A comparison of urban and forest acoustics. *Condor* 109 (1), 67–78.
- Snaddon, J., Petrokofsky, G., Jepson, P., Willis, K.J. 2013. Biodiversity technologies: tools as change agents. *Biol. Lett.* 9(1), 20121029.
- Snow, B. 2008. Lek behaviour and breeding of Guy's Hermit Hummingbird *Phaethornis guy*. *Ibis.* 116, 278 - 297.
- Song, K., Gao, B., Halvarsson, P. 2021. Demographic history and divergence of sibling grouse species inferred from whole genome sequencing reveal past effects of climate change. *BMC Ecol Evo.* 21,194.



- Soriano, J.M., Tulla, A. 2002. El repoblament del Pirineu Català: diseg o realitat?.  
Mètode: Revista de difusió de la investigació de la Universitat de València, ISSN 1133-3987, N°. 36, 2002.
- Soulé, M. E. 1985. What Is Conservation Biology? *BioScience* 35(11), 727–734.
- Southwell, D., Smart, A., Merson, S., Selwood, K., Macgregor, N. 2024. Using power analysis and spatial prioritization to evaluate the design of a forest bird monitoring programme. *Oryx* 1: 10.
- Specht, R. 2016. Avisoft-SASLab Pro version 5.2.15 .Sound analysis and synthesis laboratory software for MS-Windows. Berlin: Avisoft Bioacoustics.
- Starzacher, A. & Rinner, B. 2009. Evaluating KNN, LDA and QDA classification for embedded online feature fusion. International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, Sydney, NSW, Australia.
- Storch, I. 1997. Male territoriality, female range use, and spatial organisation of capercaillie *Tetrao urogallus* leks. *Wildlife Biol.* 3(3-4), 149–161.
- Storch, I. 2007. Grouse: Status Survey and Conservation Action Plan 2006–2010. Gland, Switzerland: IUCN and Fordingbridge, UK: World Pheasant Association. 114p.
- Stowell, D. 2022. Computational bioacoustics with deep learning: A review and roadmap. *PeerJ* 10, e13152.
- Strzała, T., Kowalczyk, A., Rosenberger, J., Frąszczak, M., Lukaszewicz, E. 2023. Relationship between semen quality and level of heterozygosity on the model of endangered population of Western capercaillie. *Reprod. Domest. Anim.* 58.
- Suter, W., Graf, R. F., Hess, R. 2002. Capercaillie (*Tetrao urogallus*) and avian biodiversity: testing the umbrella–species concept. *Conserv. Biol.* 16(3), 778–788.

- Swearingen, E., & White, J. 2007. Influence of scattering, atmospheric refraction, and ground effect on sound propagation through a pine forest. *ss.* 113–119.
- Tarrero, A. 2002. Propagación del sonido en bosques. Análisis comparativo de las medidas insitu, en laboratorio y de los valores predichos por un modelo. Universidad de Valladolid.
- Tarrero, A.I., Martín, M.A., González, J., Machimbarrena, M., Jacobsen, F. 2008. Sound propagation in forests: A comparison of experimental results and values predicted by the Nord 2000 model. *Appl. Acoust.* 69, 662–671.
- Templeton, C.N. 2016. Name that tune: Melodic recognition by songbirds. *Learn Behav.* 44, 305–306.
- Ten, C. 2021. Re-evaluating vocal production learning in non-oscine birds. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Proc. Biol. Sci.* 376, 1836.
- Tibbetts, E., & Dale, J. 2007. Individual recognition: it is good to be different. *Trends Ecol Evol.* 22,529–537.
- Tipton, N., & Sparrow, V. 2019. An outdoor sound propagation model in concert with geographic information system software. *J. Acoust. Soc. Am.* 145, 1903–1903.
- Tobias, J. A., Planqué, R., Cram, D. L., Seddon, N. 2014. Species interactions and the structure of complex communication networks. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 1020–1025.
- Tripovich, J.S., Hall-Aspland, S., Charrier, I., Arnould, J.P.Y. 2012. The behavioural response of Australian fur seals to motor boat noise. *PLoS One* 7,e37228.
- Tyagi, V., Kumar, K., Jain, V. 2006. A study of the spectral characteristics of traffic noise attenuation by vegetation belts in Delhi. *Appl. Acoust.* 67, 926–935.

- Van Doren, B., Farnsworth, A., Stone, K., Osterhaus, D., Drucker, J., Horn, V. 2023. Nighthawk: Acoustic monitoring of nocturnal bird migration in the Americas. MEE 15.
- Venables, W. & Ripley, B. 2013. Modern applied statistics with S-PLUS. Springer Science & Business Media.
- Verreycken, E., Simon, R., Quirk-Royal, B., Daems, W., Barber, J., Steckel, J. 2021. Bio-acoustic tracking and localization using heterogeneous, scalable microphone arrays. Commun. Biol. 4, 1275.
- Verreycken, E., Simon, R., Quirk-Royal, B., Daems, W., Barber, J., Steckel, J. 2021. Bio-acoustic tracking and localization using heterogeneous, scalable microphone arrays. Commun. Biol. 4: 1275.
- Wada, H. 2010. The Development of Birdsong. Nat. Sci. Educ. 3(10), 86.
- Wang, J., Liu, J., Zhang, Z. 2019. Male condition corrected with song features in Dusky Warblers (*Phylloscopus fuscatus*). Avian Res. 10, 18.
- Wegge, P., Eliassen, S., Finne, M., Odden, M. 2005. Social interactions among Capercaillie *Tetrao urogallus* males outside the lek during spring. Ornis Fenn. 82, 147–154.
- Wegge, P. Finne, M., Rolstad, J. 2009. Gps Satellite Telemetry Provides New Insight into Capercaillie *Tetrao urogallus* Brood Movements. Wildlife Biol. 13, 87–94.
- Wegge, P., Rolstad, J., Storaunet, K. 2013. On the spatial relationship of males on "exploded" leks: The case of Capercaillie grouse *Tetrao urogallus* examined by GPS satellite telemetry. Orn. Fenn 90: 222–235.
- Weiss, Z. 2023. Tuning the octave bands: A history of dividing the spectrum for acoustical measurements in the 20th century. JASA. 153, 183–183.

- Weisshaupt, N., Saari, J., Koistinen, J. 2024. Evaluating the potential of bioacoustics in avian migration research by citizen science and weather radar observations. *PLoS ONE*. 19.
- Westcott, D. 1992. Inter- and intra-sexual selection: the role of song in a lek mating system. *Anim. Behav.* 44, 695–703.
- White, M., & Swearingen, M. 2004. Sound propagation through a forest: a predictive model. Construction Engineering Research Laboratory PO Box 9005 Champaign, IL 61826–9005.
- Wilcox, B. A. 1984. "In situ conservation of genetic resources: Determinants of minimum area requirements." In *National Parks, Conservation and Development, Proceedings of the World Congress on National Parks*. J.A. McNeely and K.R. Miller, Smithsonian Institution Press, pp. 18–30.
- Wiley, R. H., & D. G. Richards. 1982. Adaptations for acoustic communication in birds: sound transmission and signal detection. Pp. 131–181 in Kroodsma, D. E., E. H. Miller, & H. Ouellet (eds.). *Acoustic communication in birds*. Volume.
- Wilson, T., Petrin, C., Elbing, B. 2023. Infrasound and Low-Audible Acoustic Detections from a Long-Term Microphone Array Deployment in Oklahoma. *Remote Sens* 15. 1455.
- Wolfenden, A.D., Slabbekoorn, H., Kluk, K., Kort, S.R. 2019. Aircraft sound exposure leads to song frequency decline and elevated aggression in wild chiffchaffs. *J Anim Ecol.* 88,1720–1731.
- Wolff, F. 2021. *Porqué la música?*. Gong.
- Zhong, M., Taylor, R., Christey, D., Palkovitz, S., Bates, N., Dodhia, R., Lavista Ferres, J. 2020. Bioacoustics and machine learning for automated avian species monitoring in global biodiversity hotspots. *JASA*. 148, 2442–2442.

Zeni, T., Haider, M., Vallant, S., Lentner, R., Steiner, F., Schlick-Steiner, B. 2023.

Towards a standardised set of data analyses for long-term genetic monitoring of grouse using non-invasive sampling: a case study on western capercaillie.

*Conserv. Genet.* 25: 1–12.

Ziegler, L., Arim, M., Narinsc, P.M. 2011. Linking amphibian call structure to the

environment: the interplay between phenotypic flexibility and individual

attributes. *Behav. Ecol.* 22,520–526.









