MÁSTERES de la UAM

Facultad de Ciencias / 14-15

Ecología

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

excelencia Campus Internacional UAM CSIC+

Efecto del ruido antropogénico sobre la exhibición sexual sonora de los machos de sisón común (*Tetrax tetrax*)

Adrián Barrero Diego

UAM EDICIONES

ÍNDICE.

Introducción..... 1

· Representación del sonido..... 3

Objetivos e hipótesis..... 4

Metodología..... 5

- Especies de estudio..... 5

- Área de Estudio..... 6

- Registro de sonido..... 7

· Caracterización de los datos sonoros..... 7

· Identificación de los machos de sisón común..... 7

· Caracterización del hábitat a escala de paisaje..... 8

- Obtención de las variables..... 8

- Análisis estadísticos..... 10

Resultados..... 12

- Tamaño muestral y enmascaramiento..... 12

- Mapa de ruido..... 12

- Modelo de respuesta poblacional al ruido antrópico..... 13

- Modelo de respuesta individual al ruido antrópico..... 14

Discusión..... 16

Conclusión..... 19

Bibliografía..... 19

Efecto del ruido antropogénico sobre la exhibición sexual sonora de los machos de sisón común (*Tetrax tetrax*)

Adrián Barrero Diego (adrian.barrero@estudiante.uam.es)

Resumen: Se pretende analizar la capacidad de modulación sonora de un ave no canora como el sisón común, ante los efectos del enmascaramiento producido por el ruido antrópico generado por las carreteras, la industria y el tráfico aéreo durante la época de cría. El muestreo se realizó mediante el registro sonoro tanto de los cantos de los machos de sisón como del ruido del entorno en el que habitan, recogidos mediante una grabadora digital y un micrófono direccional. Se analizó la capacidad de modulación del canto de los sisones tanto a nivel poblacional como a nivel individual en función del ruido ambiental y en particular del ruido antrópico en forma de variables sonoras, utilizado un Modelo Lineal General para el estudio poblacional. Para el estudio individual se utilizó un promediado de modelos mixtos, clasificados siguiendo el criterio de información de Akaike, para las variables del momento exacto del canto y las variables inmediatamente anteriores al mismo. La duración y la variación de las frecuencias más altas de transmisión del canto estuvieron significativamente asociadas a la entropía sonora global del momento del canto a nivel poblacional. A nivel individual la duración se vio significativamente asociada a la entropía sonora y a la presión sonora, interpretada como nivel de ruido del entorno en el mismo momento del canto. La variación del ancho de banda de frecuencias sonoras se vio significativamente afectada por la presión sonora y la entropía sonora del momento del canto además de por la frecuencia dominante del ruido del entorno en el momento previo al canto. Estos resultados sugieren que el sisón común en la zona de estudio posee cierta plasticidad en el canto que le permite evitar, el enmascaramiento provocado por el ruido antropogénico.

Palabras clave: Adaptación acústica, enmascaramiento sonoro, flexibilidad del comportamiento, ruido ambiental, sisón común.

Effect of anthropogenic noise on sexual display sound of little bustard males (*Tetrax tetrax*)

Abstract: The aim of this project is to analize the sound modulation capacity of a not songbird such as the little bustard, caused as a result of the masking effects produced by the anthtropogenic noise generated by roadways, industry and air traffic in the area where the research took place during the mating season. Sampling is done using the sound recordings of both little bustards males songs and environmental noise of the habitat; these recordings are collected by a digital recorder and a directional microphone. Capacity modulations of little bustard singing are analyzed in two levels: demographic and individual levels; both depending on the environmental noise and specially on the anthropogenic noise as sound variables. The general linear model (GLM), used for the population study, combined with averaged mixed models classified following the Akaike information criteria are applied on variables belonging to the same moment of singing and on the variables immediately before testing the individual scale. The length and the variation of the highest ridge obtained on the

transmission frequencies were significantly associated with the overall entropy of the singing at the poblational level. At the individual level, the length of the song was significantly associated with the overall entropy and sound pressure level (SPL), played as background noise level. On the other hand, the bandwidth of the sound frequencies was significantly affected by the SPL, the overall entropy and the dominant environmental noise frequency previous to the singing recording. Results suggest that the little bustard in the studied area has a certain song plasticity that allows him to avoid the masking caused by anthropogenic noise.

Key words: Acoustic adaptation, sound masking, behavioral flexibility, environmental noise, Little Bustard.

Agradecimientos: Me gustaría agradecer a mis directores Manuel B. Morales Prieto y Juan Traba Díaz el haberme dado de nuevo la oportunidad de trabajar y aprender con ellos, lo que ha sido un gran placer, dada la entrega, disponibilidad y profesionalidad mostrada en todo momento. También a mi director técnico, Carlos Iglesias Merchán, por la elaboración del mapa de ruido y por el gran trabajo técnico aportado sin el cual este trabajo no habría sido realizado con éxito. A Diego Gil por sus explicaciones metodológicas y por prestarme todo el material de grabación sin el cual no hubiera habido datos. Mención especial en este orden a Rocío Tarjuelo que en todo momento se ha mostrado disponible a la hora de dar consejo y aclarar cualquier duda habiendo sido de grandísima ayuda, ¡gracias Roci!

También agradecer y dar la enhorabuena a los compañeros y compañeras del máster por los buenos momentos pasados y por el compañerismo mostrado en todo momento, tanto fuera como dentro de la universidad, así como por los grandes trabajos realizados. A ver si tenemos suerte a partir de ahora en este mundillo.

Y cómo no a mi familia y amig@s.

Introducción y antecedentes.

La comunicación es una parte constitutiva de la vida y, como tal, tiene lugar a lo largo de la mayor parte de los niveles de organización de los seres vivos, permitiendo el intercambio de señales entre células, órganos o individuos. Esta transmisión de información constituye un elemento esencial para el cumplimiento de las funciones vitales de los organismos animales y es, por tanto, una característica fundamental del comportamiento adaptativo animal (Bradbury y Vehrencamp, 1998; Dall *et al*. 2005). Muchas especies animales, y específicamente de aves, dependen de la comunicación sonora para conseguir completar su ciclo reproductivo mediante la defensa de un territorio, conseguir y conservar una pareja, mantener su estatus jerárquico y el contacto entre grupos sociales, o solicitar el alimento (Collins, 2004), y por tanto pueden verse condicionadas por el ruido ambiental (Brumm y Slabbekoorn, 2005; Kociolek *et al.* 2010).

El ruido antropogénico o generado por la actividad humana se ha incrementado en todo el mundo durante el último siglo (Barber *et al*. 2010; Frisk, 2012) afectando a grandes áreas de hábitat natural (Forman, 2000; Barber *et al*. 2009) y dando lugar a cambios sustanciales en el paisaje acústico tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos (McDonald *et al*. 2006; Watts *et al*. 2007). Debido esta circunstancia, su influencia en la comunicación acústica ha recibido gran interés, con varios estudios apuntando a cómo los animales pueden hacer frente a este nuevo impacto de origen antrópico (Brumm y Slabbekoorn, 2005). La forma más evidente en que el ruido antropogénico puede interferir la comunicación acústica es a través de enmascaramiento (Bradbury y Vehrencamp, 1998; Brumm y Slabbekoorn, 2005; Francis y Barber, 2013), provocando incrementos de costes de eficacia biológica, incluido los relacionados con el apareamiento y defensa del territorio (por ejemplo, Halfwerk *et al*. 2011a; Halfwerk *et al*. 2012; Leonard y Horn, 2012) y el aumento de riesgo de depredación si la detección de la llamada de alarma se ve afectada (Lowry *et al*. 2012). Para que una llamada llegue a su receptor, la señal debe ser detectable en el ruido de fondo. La detectabilidad de esta señal se determina por la relación de señal a ruido (SNR) y el umbral de detección auditiva enmascarado del receptor (Marten y Marler, 1977; Brenowitz, 1982; Dooling, 2004). Así, dentro de una banda de frecuencias, las señales con una SNR por debajo del umbral de detección del receptor se enmascaran.

La mayor parte de las zonas afectadas por el ruido antrópico en ecosistemas terrestres se encuentran a lo largo de las principales vías de comunicación, tales como autopistas y

ferrocarriles (Forman, 2000; Barber *et al*. 2009). Una revisión cualitativa de estudios relacionados con los efectos del ruido antropogénico indica una clara relación negativa entre el tráfico en las carreteras y las aves que se reproducen cerca ellas (Reijnen y Foppen, 2006). Los efectos de las carreteras sobre las poblaciones animales son comunes y están bien documentados (Bautista *et al.* 2004; Summers *et al*. 2011). El ruido, con una superposición temporal y espectral de sonidos acústicos relevantes (Brumm y Slabbekoorn, 2005), la luz artificial y el efecto borde de las carreteras (efectos indirectos) son buenos ejemplos. Además, la posibilidad de que los comunicadores pudieran alterar su salida acústica como consecuencia del ruido antropogénico ha sido sugerida por estudios en una variedad de taxones como las aves (Slabbekoorn y Peet, 2003), mamíferos marinos (Parks *et al*. 2011), anuros (Vargas-Salinas, 2013), peces (Picciulin *et al*. 2012), e invertebrados (Lampe *et al*. 2012), destacando a las aves como grupo principal de investigación (Halfwerk *et al*. 2011a; Halfwerk *et al*. 2011b; McLaughlin y Kunc, 2013; Montague *et al*. 2013). El ruido producido por el tráfico en áreas cercanas a las carreteras (normalmente de frecuencia baja, por debajo de 2000 Hz) puede solaparse con ciertas frecuencias de canto de diferentes especies de aves (Goodwin y Shriber, 2011). Esto puede provocar que las especies afectadas por el ruido modifiquen su comportamiento, por ejemplo, con una variación del canto hacia tonos más agudos (Wood y Yezerinac, 2006), repitiendo las estrofas más veces, aumentando la intensidad del canto o modificando las horas de mayor actividad cantora para no hacerlas coincidir con los picos de ruido (Fuller *et al.* 2007). Estos cambios en el comportamiento cantor, cuya finalidad es que la señal emitida sea captada por el receptor adecuado, pueden afectar directamente al estado físico del animal, al éxito reproductivo y, más a largo plazo a la eficacia biológica o *fitness* de los individuos (Chappell *et al.* 1995; Garamszegi *et al.* 2006).

La sensibilidad que cada especie muestra ante las perturbaciones producidas por el ruido difiere con el tipo de ruido al que se expone, el cual varía en amplitud, frecuencia, patrón temporal y duración (Barber *et al.* 2009). La duración es un factor particularmente importante, ya que las respuestas a ruidos crónicos o eventos aislados son muy diferentes tanto en la severidad como en el tipo de respuesta. Por ejemplo, sonidos aislados causarán sobresaltos con efectos inmediatos, mientras que ruidos crónicos pueden inducir estrés fisiológico y alterar las interacciones sociales (Blickley *et al.* 2011). No obstante, la mayoría de los estudios existentes hasta ahora han sido realizados en especies que poseen más de un tipo de canto, y pueden modificar sus registros (Brumm y Slater, 2006) pero, existe poca información sobre especies no canoras.

En el presente estudio se analiza el posible efecto del ruido antropogénico sobre la exhibición sexual sonora de los machos de sisón común (*Tetrax tetrax, Linneo (1758)*). Ésta es una especie no canora en la que los machos se organizan en leks dispersos, defendiendo un territorio de otros machos desde el que realizan series de llamadas acústicas y cierta exhibición o *display* sexual, que consiste en patear el terreno y realizar saltos acompañados de aleteos que producen, un silbido característico (Cramp y Simmons, 1980).

Representación del sonido.

Actualmente se puede realizar una grabación y representar un sonido de muchas formas gracias a las modernas herramientas digitales (Charif *et al*. 2010) que se basan en el registro de las variaciones de la presión sonora a lo largo del tiempo, permitiendo posteriormente, cuantificar las propiedades físicas de las señales acústicas. Las principales representaciones de las ondas sonoras que se utilizan habitualmente en el campo de la bioacústica son el *oscilograma*, el *espectro de frecuencias* y el *espectrograma*.

Figura 1. Espectrograma del canto del sisón común (*Tetrax tetrax*). Fuente: Raven pro 1.5. Realización propia.

En este apartado se detallan brevemente las principales características de una de estas herramientas, el espectrograma, con el fin de facilitar la comprensión de la representación gráfica en el análisis de los cantos de los machos de sisón común. El espectrograma, también llamado sonograma (**Fig. 1)**, muestra la variación de la presión sonora o espectro de sonido a

lo largo del tiempo en una gráfica tridimensional, en la que se representa el tiempo en el eje horizontal, la frecuencia en el eje vertical, y la potencia relativa en un punto concreto de tiempo y frecuencia dentro de una gama de colores (Charif *et al*. 2010), siendo los colores más intensos los valorados con una mayor potencia.

En un espectrograma se pueden observar y medir características espectrales, como las modulaciones de frecuencias. Concretamente, en el espectrograma representado en la **Figura 1** se puede observar cómo el canto del macho del sisón común (en forma de tridente vertical), con una coloración verde, se encuentra claramente solapado por el ruido antrópico de la zona de estudio. La línea de ocultación, situada en las frecuencias más bajas del espectrograma (0-2 kHz, coincidiendo con Goodwin y Shriber, 2011) estaría representando el sonido con más energía, de ahí su color amarillo más intenso. A medida que ascendemos por el rango de frecuencias continúa la línea de solapamiento (2-3 kHz) donde va disminuyendo gradualmente la energía del ruido, posibilitando la transmisión de la energía sonora del canto del sisón en esas frecuencias más elevadas.

Objetivos e hipótesis.

La determinación de la naturaleza y el alcance de las respuestas de los machos de sisón común al ruido dependen de nuestra capacidad para cuantificar determinadas características sonoras del medio ambiente que proviene de diversas fuentes, incluyendo la maquinaria industrial y el transporte. Por lo tanto, y dado que el efecto del ruido sobre una población se puede medir a diferentes niveles, atendiendo al ruido general de la zona de estudio o atendiendo a eventos de ruido concretos que afectan individualmente al canto de cada sisón, ya sea simultáneamente o de forma inmediatamente previa al mismo, se plantean los siguientes objetivos:

- Examinar la respuesta poblacional al ruido general de la zona de estudio.

- Examinar la respuesta individual de los sisones a (a) el ruido ambiental simultáneo al canto y (b) el ruido ambiental inmediatamente anterior, determinando cuál de ellos puede tener una mayor incidencia sobre la respuesta de los machos de sisón común.

Partimos de la hipótesis general de que el ruido antrópico es una perturbación reciente y en aumento con la que no ha convivido la especie en tiempo evolutivo y por lo tanto podemos suponer que la capacidad de adaptación del sisón común al ruido será limitada.

Metodología.

Especie de estudio.

El Sisón común (**Fig. 2**), es un ave esteparia con distribución paleártica (Cramp y Simmons, 1980) que actualmente está sufriendo fuertes reducciones tanto poblacionales como en su rango de distribución (Goriup, 1994; Del Hoyo *et al*. 2006) y está clasificado como especie vulnerable a nivel europeo (Birdlife International, 2004; IUCN, 2012). Es un ave mediana, de unos 40-45cm de altura, 100-115cm de envergadura y un peso que varía entre los 740-910g en machos y 700-750g en hembras presentando un dimorfismo sexual tanto en tamaño como en plumaje. Estas diferencias de plumaje se hacen patentes durante la época de reproducción, cuando los machos lucen un llamativo cuello negro con un collar blanco en forma de uve. La base del cuello es blanca y por debajo queda delimitada por una banda negra muy conspicua que resalta sobre el blanco del plumaje de las partes inferiores (Cramp y Simmons, 1980).

Su hábitat principal son zonas agrarias con cultivos cerealistas extensivos, aunque puede encontrarse en zonas de estepa natural y zonas de pastos (Cramp y Simmons, 1980; Martínez, 1994; Salamolard y Moreau, 1999; Wolff *et al*. 2001; Morales *et al.* 2005). Presenta un sistema de emparejamiento poligínico de tipo *lek* disperso, en el cual los machos defienden territorios fijos más o menos agregados (Jiguet *et al.* 2000; Jiguet, 2001), los cuales comienzan a ser ocupados a finales de marzo y comienzos de abril, aunque hay diferencias entre poblaciones (Cramp y Simmons, 1980).

Figura 2. *Macho de sisón común. Fotografía propia*.

Área de estudio.

El área de estudio está situada en el sureste de la Comunidad de Madrid, en el municipio de Campo Real (40º 19’ N, 3º 18’ W, 800 m.s.n.m., 1600 ha), una zona con un elevado mosaicismo paisajístico, ya que está dominada en un alto porcentaje por los cultivos de cereal, dando lugar a una alternancia de cultivos, labrados y barbechos, aunque también podemos encontrar otros hábitats como cultivos de leguminosas, eriales y viñedos.

Este paisaje cerealista sitúa al sureste del casco urbano y se encuentra rodeado por varias carreteras que comunican los municipios de Campo Real con Valdilecha y la urbanización Eurovillas (M-209, M-220, M-221, M-224 y M-229) (**Fig.3**). Además, esta zona presenta cierta actividad industrial, encontrándose un polígono industrial en la zona oeste y una cantera y una planta de extracción de áridos en la parte sur-este del área de estudio. Además, la zona de estudio presenta un de elevado tránsito aéreo al encontrarse en el pasillo de aproximación para aterrizaje al aeropuerto de Barajas.

Esta zona está catalogada como Área Importante para Conservación de las Aves (IBA nº 75) y en ella el sisón comparte hábitat con otras especies de aves esteparias con interés de conservación como el alcaraván común (*Burhinus oedicnemus,* Linneo 1758), la avutarda común (*Otis tarda,* Linneo 1758) o el cernícalo primilla (*Falco naumanni,* Fleischer 1818), poniéndose de manifiesto su relevancia para este grupo de aves (Traba *et al.* 2007).

Figura 3. Vista aérea del área de estudio (polígono sombreado en rojo) encuadrada entre las carreteras M-209, M-220, M-221, M-224 y M-229 que comunican Campo Real con los municipios cercanos. El área delimitada por la línea roja discontinua corresponde con el ámbito del territorio para el cual se han calculado los niveles de inmisión sonora en los modelos de ruido desarrollados. (GeoEye, Google earth).

Registro del sonido.

El trabajo de campo se llevó a cabo entre el 15 de abril y el 30 de mayo de 2014, periodo de mayor dedicación de los animales a la actividad de exhibición nupcial. Además y evitando trabajar en días lluviosos o con mucho viento, el periodo de mediciones se restringió a la franja horaria comprendida entre las 7:00 y las 10:00 de la mañana, período de máxima actividad para los machos de esta especie (Cramp y Simmons, 1980).

Caracterización de los datos sonoros.

Para la obtención de las variables de sonido (**Tabla 1)**, se realizó una búsqueda en coche de los sisones por la zona de estudio, realizando paradas regulares para la localización auditiva y/o visual de los machos en sus territorios. Una vez localizado el individuo, desde la menor distancia posible que evitara la interferencia con el comportamiento del animal, durante 20 minutos se realizó un registro sonoro completo (ruido ambiental y canto del ave) con un micrófono direccional dirigido hacia el sisón, lo que permitió evitar el solapamiento de dos cantos al mismo tiempo y aseguró unas buenas condiciones de grabación. Todos los sonidos/ruidos fueron registrados en una grabadora digital.

Se anotó el momento temporal en que se produjeron todos los eventos de ruido ambiental durante los 20 minutos de grabación. Así quedó registrado e identificado cada canto del sisón, además del paso de los vehículos que circulaban por carretera, los ruidos de los aviones que transcurrieron por el espacio aéreo que abarca la zona de estudio, así como el canto de otros individuos de sisón cercanos al que se estaba grabando.

Identificación de los machos de sisón común.

Se realizó, con la ayuda de un telescopio, una individualización de todos los machos siguiendo el método basado en patrones de plumaje de Arroyo y Bretagnolle (1999) (**Fig. 4)**, para no confundir a los diferentes machos de la zona de estudio en la toma de datos de días posteriores.

Figura 4. Caracteres de plumaje usados en la individualización de machos de Sisón Común. a) anchura relativa de las bandas pectorales blanca y negra: (1) la negra más ancha que la blanca; (2) anchura equivalente; (3) la blanca más ancha que la negra; (b) simetría del collar blanco en «V»: (1) simétrico; (2) asimétrico en la izquierda; (3) asimétrico en la derecha; c) patrón de la garganta: (1) pálida; (2) en forma de U; (3) oscura; d) continuidad de la banda blanca en la nuca: (1) continua; (2) ligeramente discontinua; (3) claramente discontinua; e) motas oscuras en el dorso: (1) ausentes; (2) pequeñas; (3) numerosas y grandes. (Arroyo y Bretagnolle, 1999).

Caracterización del hábitat a escala de paisaje.

Sobre el terreno, con la ayuda de un mapa catastral de la zona de muestreo, se anotaron todos y cada uno de los tipos de sustrato agrario correspondientes a cada parcela, siendo clasificadas según su uso: “cereal”, si el terreno se encontraba sembrado, con el cereal visible y ya crecido; “labrado”, cuando su estado era de recién arado, con la tierra levantada y terrones bien visibles; “barbechos”, para las zonas en descanso, tanto barbechos nuevos como rastrojos y “barbechos viejos y eriales”, para las zonas en un estado de reposo más prolongado, los eriales y zonas matorralizadas. Así mismo, se clasificó el resto de parcelas como “zonas improductivas” (zonas urbanas, edificaciones, graveras, etc.), “viñedos” y “otros”.

Obtención de las variables.

Las grabaciones de los machos de sisón común fueron analizadas con el programa Raven Pro 1.5 (The Cornell Lab of Ornithology, Itha-ca, NY, USA), empleando en la transformación de los registros (frecuencia de muestreo de 48.000 Hz, tamaño de la ventana 512, tiempo de resolución 0.05 s, resolución de frecuencia 93.75 Hz, ventana Hann, solape 50%, suavizado encendido). Con dicho programa se obtuvieron los sonogramas del canto de cada macho, los cuales permiten evaluar, a través de selecciones directas, una amplia gama de características sonoras del canto, además de la huella sonora y el ruido ambiental provocado por el paso de

los vehículos, aviones e industria que serían utilizadas como variables para los modelos estadísticos (**Tabla 1**).

De acuerdo con los objetivos planteados en este trabajo, las variables de ruido ambiental se midieron a dos escalas distintas: 1) a nivel poblacional se registraron las características sonoras del ruido global en un ancho de banda de 0 a 8 kHz de frecuencia para cada grabación y durante los 20 minutos. La selección de los 8 kHz como frecuencia máxima se debió a que por encima de esa frecuencia de trasmisión no variaron las características sonoras del ambiente; 2) a nivel individual se registraron las características sonoras del momento exacto del canto del sisón (Inst.) y las características sonoras de los dos segundos previos al canto (Ant.), ambos en el mismo ancho de banda mencionado.

Además se construyó un mapa de ruido de la zona de estudio, a partir de los datos de Martínez (2013), basado en el cálculo de los niveles de presión sonora sobre una malla de puntos receptores homogéneamente distribuidos sobre el terreno (a una altura media de 1 m sobre el nivel del suelo). Para ello se elaboró un modelo de ruido de la zona de estudio utilizando el programa Predictor Type 7810, versión 8.13 (Bruel y Kjaer, 2011) específicamente diseñado para el cálculo y predicción de niveles de ruido ambiental. Este programa permite la predicción y modelización de los niveles de presión sonora en el entorno de diferentes fuentes sonoras, utilizando el método nacional de cálculo francés «NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTULCPC-CSTB)», recomendado para la evaluación del ruido del tráfico rodado por la Directiva Europea 2002/49/CE (sobre evaluación y gestión del ruido ambiental) y también en su oportuna trasposición al ordenamiento jurídico español (Real Decreto 1513/2005).

Las fuentes sonoras consideradas en este proyecto corresponden con las carreteras citadas anteriormente (M-209, M-220, M-221, M-224 y M-229), una planta de extracción de áridos situada en el cuadrante SE del área de estudio (**Fig. 1**), así como los aviones que sobrevuelen del área de estudio.

Tabla 1. Variables respuesta y explicativas introducidas en los análisis estadísticos con el significado ecológico de cada una de ellas. El significado de las unidades de medida es C/Sg: número de cantos dividido entre el tiempo de grabación en segundos; Sg: Segundos; HZ: hercios; dB: decibelios. Incluye también el código de las abreviaturas de las variables.

Variable		Descripción	Unidades	Código
Respuesta	Tasa de canto	Número de cantos/tiempo de grabación	C/Sg	TC
	Duración del canto	Duración del canto del sisón	Sg	DC
	Frecuencias altas del canto	La frecuencia límite superior a la que se trasmite el sonido	Hz	FAC
	Frecuencia dominante del canto	La frecuencia que divide la selección[1] en dos intervalos de frecuencia de igual energía	Hz	FDC
Explicativa	Entropía global del ruido	Heterogeneidad/variabilidad del ruido en términos de energía. Los valores más altos de entropía corresponden a un mayor desorden en el sonido	dB	EG_R
	Presión sonora del ruido	Nivel de ruido o energía que transmiten o transportan las ondas sonoras	dB	PS_R
	Frecuencia dominante del ruido	La frecuencia que divide la selección en dos intervalos de frecuencia de igual energía	Hz	FD_R
	Mapa de ruido	Niveles de presión sonora en el entorno de diferentes fuentes sonoras	dB	MR

1. Recuadro de frecuencia-tiempo que forma una selección del espectrograma donde se miden los valores de sonido que conformarán las variables.

<u>Análisis estadísticos</u>.

En un primer paso y con el fin de evitar la colinealidad entre variables en los modelos, se calcularon correlaciones de Pearson, excluyendo una de las variables de la pareja con coeficiente mayor o igual a 0.7 (Tabachnick y Fidell, 1996). Las variables sonoras se transformaron logarítmicamente ($x' = \log(x + 1)$) y las de composición de hábitat (sustratos) mediante el arcoseno (($x' = \text{arcsen}(x + 1)$), para cumplir con los requerimientos de normalidad y homocedasticidad (Siegel y Morgan, 1996).

Se realizó un Modelo Lineal General (MLG) por pasos hacia adelante con cada una de las variables comportamentales y sonoras descriptoras del canto de los sisones como variables respuesta y las variables sonoras del entorno como variables explicativas, para evaluar la respuesta, a nivel poblacional, de los sisones en función del ruido general de la zona.

Con el objetivo de diferenciar en qué momento el ruido antrópico está influyendo mayormente en el canto individual de cada sisón (momento instantáneo y momento inmediatamente anterior), se llevó a cabo un procedimiento de construcción de Modelos Lineales Generales Mixtos (GLMM) con las variables sonoras y comportamentales de cada canto individual como variables respuesta y las variables sonoras del ambiente de cada momento como variables explicativas, usando la identidad de cada individuo como factor aleatorio. Los modelos resultantes fueron clasificados siguiendo el criterio de información de Akaike corregido para muestras pequeñas (AICc), según el cual el modelo más plausible es que contiene el valor más bajo de AICc (Burnham y Anderson, 2002). Para cada modelo se calculó su peso de Akaike (wi), que representa la probabilidad relativa de que el modelo I sea el mejor entre los considerados, y las diferencias de AICc (Δi), calculadas como (AICci – AICcmin). Los modelos con un ΔAICc $\leq$ 2 se ajustan substancialmente a los datos y son similares en apoyo empírico al mejor modelo (Burnham y Anderson, 2002). En aquellos casos en que la selección de modelos en función de su AICc no aportó un único modelo en el intervalo de ΔAICc $\leq$ 2, se implementó un promediado de modelos combinando aquellos dentro del citado intervalo. Para este subconjunto de modelos, se calcularon los estimadores promediados de los predictores, sus errores estándar incondicionales (EEI) y la importancia relativa de cada variable en el modelo final promediado. En este caso, se consideró que el efecto de las variables era consistente y significativo si el intervalo de confianza (IC) al 95 % de su estimador (estimador $\pm$ $t_{0,05}$ x EEI) excluía el valor 0 (Burnham y Anderson, 2002). Los errores estándar incondicionales fueron calculados empleando la formula revisada por Burnham y Anderson (2004).

Se construyó un primer GLMM utilizando las características sonoras instantáneas del ambiente (las que se producen en el momento exacto del canto) como variables predictoras. En un segundo GLMM se utilizaron las características sonoras inmediatamente anteriores al canto del sisón, medidas en un rango anterior de 2 segundos. Con las variables predictoras incluidas en cada uno de estos dos modelos se realizó un último promediado para evaluar qué momento (instantáneo o inmediato previo) tenía más peso en la respuesta individual del sisón.

Las transformaciones logarítmicas, los análisis de correlación y los GLM han sido realizados con el programa SPSS Statistics 19 (SPSS Inc., 2010); los GLMM y sus promediado de modelos se realizaron utilizando el software estadístico R (R Development Core Team 2014), con los paquetes “Lme4” (Bates *et al*. 2014) y “Mumin” (Burnham y Anderson, 2002).

Resultados.

Tamaño muestral y enmascaramiento.

El conteo final de las grabaciones realizadas en la zona de estudio proporcionó un total de 26 individuos diferentes localizados y registrados, con 500 minutos de grabación y 1575 cantos registrados y analizados.

Todos y cada uno de los cantos de los machos de sisón registrados en la zona de estudio se encontraban en mayor o menor medida enmascarados por el ruido antrópico presente en el momento de la grabación **(Fig. 5)**.

Figura 5. Variación de menor (izquierda) a mayor (derecha) enmascaramiento de tres cantos de sisón común. Las bandas de enmascaramiento y ocultación varían en función del tránsito de las carreteras o el tránsito aéreo de la zona de estudio llegando a dificultar la correcta transmisión de los cantos. La flecha señala la localización de los cantos en los tres recuadros: Fuente: Raven pro 1.5. Realización propia.

Mapa de ruido.

Las observaciones de tráfico revelaron velocidades medias en su mayoría superiores a los límites legales establecidos para las carreteras estudiadas, variando entre los 55 km/h en las zonas urbanas hasta los 108 km/h en los tramos que atraviesa en el área de estudio. Así mismo, en todos los tramos se observó una mayor proporción de vehículos ligeros que pesados, sin ser por ello el dato de éstos últimos desestimable. Todas las carreteras

presentaron picos de máximo tráfico de vehículos ligeros entre las 6-10 h y 18-21 h, coincidiendo con los periodos de desplazamiento entre las viviendas y las zonas de trabajo, y con los picos de actividad de las aves. El flujo de vehículos pesados presentó máximos entre las 7-15 h, coincidiendo con las horas principales de trabajo de la cantera y los polígonos industriales aledaños al área de estudio.

El mapa de ruido (**Fig. 6**) muestra niveles de ruido medios, altos o muy altos para la mayor parte de la zona de estudio, a excepción de una pequeña zona en el cuadrante SE correspondiente a una hondonada.

Figura 6: Mapa de ruido del área de estudio correspondiente al período de 7 a 10h. Fuente: Martínez, 2013.

<u>Modelo de respuesta poblacional al ruido antrópico</u>.

La población de sisones del área de estudio mostró cierta capacidad de modulación del canto respecto al ruido ambiental. Concrétamente los modelos para la duración del canto y las frecuencias altas resultaron significativos. Los porcentajes de varianza explicados por los

modelos fueron un 15,2% para la duración del canto y un 29,6% para las frecuencias más altas del canto del sisón (**Tabla 2**).

Tabla 2. Resultados de los MLG (usando regresión por pasos hacia adelante) con las variables comportamentales de los sisones como variables respuesta.

	Función	**F**	***p***	**R^2**
Duración_canto	MLG	5,489	0,028	15,2
Frec_altas_canto	MLG	11,505	0,002	29,6

En los dos modelos, la única variable que resultó significativa fue la entropía sonora global, que influyó de manera positiva en las variables comportamentales de los sisones (**Tabla 3**).

Tabla 3: Resultados explicativos de los MLG (usando regresión por pasos hacia adelante) con las variables comportamentales de los sisones como variables respuesta. La única variable significativa es la entropía global.

	Variable predictora aceptada	β	**Error típico**	***p***
Duración_canto	Entropía global	0,786	0,335	0,028
Frec_altas_canto	Entropía global	5,040	1,486	0,002

<u>Modelo de respuesta individual al ruido antrópico</u>.

De los 16 GLMMs generados con la duración del canto como variable respuesta, tres presentaron un $\Delta AICc \leq 2$ (**Tabla 4**), lo que indica que el procedimiento de promediado de modelos fue apropiado.

Las variables que tuvieron mayores efectos sobre la duración del canto están relacionadas con los factores sonoros del momento instantáneo al canto del sisón. Así tanto la presión sonora instantánea como la entropía global instantánea poseen un efecto positivo sobre la duración del canto y los pesos de ambas variables se ven representados en un 1.00, apareciendo éstas en todos los modelos generados.

Tabla 4. Resultados del análisis de los promediados de modelos para la duración y las frecuencias altas del canto del sisón común. Para cada modelo con ΔAICc≤2, su AICC, ΔAICc, peso Akaike (wi) y variables incluidas (indicados con X) indicando su significación de acuerdo con el criterio de intervalo de confianza indicado en el apartado de métodos, obedeciendo a si el IC, basado en el EEI, incluye o no el cero. También se indica el coeficiente de cada variable significativa y el error estándar incondicional (EEI).

Variable respuesta	Modelo	PS_R Inst.	EG_R Inst.	FA_R Inst.	FD_R Inst.	EG_R Ant.	PS_R Ant.	FD_R Ant.	AICc	ΔAICc	w_i	R^2	*df*
Duración	1	X	X						- 15297,28	0,00	0,54	0,36	5
	2	X	X			X			- 15295,75	1,53	0,25	0,36	6
	3	X	X					X	- 15295,31	1,97	0,20	0,36	6
Coeficiente		1.374e-02	5.919e-03										
EEI		2.041e-03	1.275e-03			4.226e-04		2.018e-04					
Significación		Si	Si			No		No					
Frecuencias altas del canto	1	X	X					X	-5305.9	0,00	1	0.84	6
Coeficientes		0.85523	0.24612					-0.04449					
EEI		0.053330	0.033703					0.01037					
Significación		Si	Si					Si					

Ver Tabla 1 y la nota a la Tabla 3 para las definiciones de abreviaturas y símbolos.

De los 8 modelos generados con las frecuencias altas del canto como variables respuesta, solo uno presentó un ΔAICc ≤ 2, por lo que el procedimiento del promediado de modelos no fue necesario en este caso, resultando un ΔAICc del modelo escogido con respecto al segundo modelo de 16,34 puntos. Los resultados de dicho modelo se muestran en la **Tabla 4**.

Dos de las variables con mayor efecto sobre las frecuencias más altas del canto del sisón, la entropía global y la energía global, estuvieron relacionadas de manera positiva con el momento instantáneo del mismo. La tercera variable que entró en el modelo, frecuencia dominante, estuvo relacionada, de manera negativa, con el momento anterior al canto del sisón. Todas ellas aparecieron en todos los modelos por lo que su importancia fue de 1.00.

Discusión.

Este trabajo es uno de los primeros realizados en España que analiza el comportamiento de un ave no canora frente al enmascaramiento producido por el ruido antropogénico, proporcionando información relevante acerca de la respuesta ofrecida por los machos de sisón común, tanto a nivel poblacional como a nivel individual, frente a uno de los factores ambientales que ejerce mayor presión sobre las señales acústicas: el ruido ambiental (Ryan y Brenowitz, 1985). La comprensión de este proceso también tiene implicaciones importantes para la conservación de la especie, ya que nos permite evaluar cómo se ajustan estas aves al desarrollo antrópico en sus zonas de cría.

El mapa de ruido utilizado en este estudio revela unos niveles de ruido por encima de los típicamente correspondientes con zonas naturales con estas características (Martínez, 2013). Estos niveles pueden variar según las comunidades o las zonas naturales donde se analicen, pero numerosos trabajos coinciden en niveles en torno a 40 dB para pastizales o zonas agrícolas (Forman *et al.* 2002; Barber *et al.* 2009; Blickley *et al.* 2011). Por tanto, toda la zona de estudio se encuentra sometida a un nivel de perturbación sonora elevado.

Los espectrogramas de los cantos de sisón común analizados muestran cómo el ruido antrópico dominante en la zona de estudio es un ruido intermitente cuyo nivel de energía se encuentra entre los 0-2 kHz, enmascarando la fracción de bajas frecuencias de la totalidad de los cantos de sisón registrados. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio sugieren que tanto el comportamiento como el propio canto del sisón, son lo suficientemente plásticos como para, a través de un aumento de la duración del canto, o bien a través de una variación de las frecuencias máximas de emisión sonora, reducir este impacto de enmascaramiento

(aumentando el SNR), tal como se ha descrito en otras especies de aves (Slabbekoorn y Peet, 2003, Brumm, 2004b, Fernández-Juricic *et al*. 2005; Wood y Yezerinac, 2006).

Los dos modelos poblacionales mostraron una influencia significativa de variables relacionadas con la heterogeneidad del ruido, concretamente la entropía global (con efecto positivo) para explicar la plasticidad del canto del sisón y su variación. Esto sugiere que los sisones para combatir este aumento en la variación sonora de niveles altos estarían alargando la duración del canto y/o aumentando su rango más elevado de frecuencias de trasmisión. Esto se podría explicar como un intento de los sisones de aumentar su SNR con el fin de mejorar la comunicación, lo que representaría un caso del denominado "efecto Lombard" (Rabin y Greene, 2002; Warren *et al*. 2006). Este efecto es una tendencia involuntaria a aumentar el esfuerzo vocal cuando se produce un aumento de ruido para mejorar la audibilidad de su voz, incluyendo, además de la intensidad, otras características acústicas como el emplazamiento, la velocidad y la duración de las sílabas del sonido (Lane y Tranel, 1971), lo que parece estar taxonómicamente generalizado en aves y mamíferos (Brumm y Slabbekoorn, 2005) y puede ser el mecanismo más común para aumentar la SNR de ruido urbano (Patricelli y Blickley, 2006).

El caso concreto del aumento de la duración del canto, siendo el sisón un ave no canora y, por lo tanto, entendiendo la estructura de su canto como una única sílaba, ha sido registrado en otros estudios de aves que viven en áreas con alto ruido natural, demostrándose que el aumento de la repetición y la duración del canto amplía la capacidad de los individuos para ser detectados (Brumm y Slabbekoorn, 2005; Warren *et al*. 2006). Además de en las aves, el incremento de la duración de las vocalizaciones se ha observado en otros taxones como las orcas (*Orcinus orca*), que aumentan la duración de sus vocalizaciones en presencia de ruido de los barcos (Foote *et al*. 2004). Respecto al uso de la frecuencia de canto, se está acumulando evidencia de una dependencia clara entre la variación de la frecuencia y el ruido, siendo éste un fenómeno geográfico y taxonómicamente generalizado en las aves. El vínculo entre el uso de la frecuencia del canto y el ruido ambiental a nivel de población se ha descrito en aves canoras como el carbonero común (*Parus major* Linnaeus, 1758) (Slabbekoorn y den Boer-Visser, 2006), y el mirlo común (*Turdus merula* Linnaeus, 1758) (Ripmeester *et al*. 2009).

Los resultados sobre la respuesta individual de los sisones, además de mostrar una influencia significativa de variables relacionadas con la heterogeneidad del ruido, indican la importancia

de variables de nivel energético y temporales. En primer lugar, la duración de los diferentes cantos del sisón estaría siendo aumentada en función de dos parámetros: la entropía sonora y la presión sonora, ambos relacionados con el momento instantáneo del canto. Esto sugiere que el sisón realiza una modificación en aumento de la estructura de su canto, en el momento en el que el ruido ambiental se vuelve más intenso con objeto de evitar el solapamiento, lo que estaría de nuevo relacionado con el "efecto Lombard" (Rabin y Greene, 2002; Warren *et al*. 2006). En segundo lugar la variación de las frecuencias sonoras del canto del sisón en este caso se estaría viendo influenciada por varios momentos temporales. En el momento instantáneo del canto estaría influyendo, de manera positiva, la entropía global del entorno y la presión sonora mientras que del momento previo parece influir, de manera negativa, la frecuencia dominante del ruido. Esto sugiere que los sisones cuando se encuentran en un momento de ruido muy heterogéneo, tienden a aumentar su frecuencia sonora, pero cuando la energía sonora de este ruido se concentra en niveles más altos de lo habitual (mayores niveles de ruido) tienden a no subir tanto sus frecuencias máximas de trasmisión.

En función de cuál sea la frecuencia dominante del ruido previo al canto será o no necesario mantener unas frecuencias de canto elevadas, ya que si la frecuencia dominante del ruido se mantiene en frecuencias altas, el sisón intentaría bajar su frecuencia de canto más elevada para trasmitir de manera más eficiente el sonido y aumentar la SNR (Patricelli y Blickley, 2006). Esta variación del rango de frecuencia es fundamental para la comprensión de si el ruido puede enmascarar las señales, es decir, la superposición de frecuencias (Francis y Barber, 2013). Esto parece apoyar una relación causal entre el ruido ambiental y la frecuencia de canto usada en aves no canoras ya demostrada en aves canoras en Halfwerf y Slabbekoorn (2009) donde, experimentalmente, demuestran que el carbonero común responde a unas condiciones de ruido cambiantes a través de cierta flexibilidad en su comportamiento a corto plazo, explicando el uso de diferentes frecuencias en el canto de estas aves urbanas. Todo ello sugiere un ajuste, también a corto plazo, de la vocalización del canto del sisón a través de una modeulación temporal de las características del sonido, como la frecuencia, la estructura temporal y el tiempo del canto (Brumm y Slabbekoorn 2005, Warren *et al*. 2006, Madera y Yezerinac 2006).

El cambio en las frecuencias altas de los cantos para eludir al enmascaramiento producido por el ruido antrópico puede imponer costes energéticos (Lambrechts, 1996). Los beneficios netos del ajuste de la frecuencia se pueden reducir aún más por el exceso de atenuación, ya que las

frecuencias más altas no se propagan tan eficazmente como las frecuencias bajas, especialmente a través de los entornos antropizados (Warren *et al*. 2006) por lo que no podemos asegurar que en los sisones, un aumento en la frecuencia de lugar a un aumento neto en el área de detección del canto (Brumm y Slabbekoorn, 2005; Leader *et al*. 2005). La sensibilidad auditiva de cada especie está a menudo estrechamente sintonizada con las frecuencias usadas en la comunicación (Okanoya y Dooling, 1988) y, por lo tanto, también puede haber un equilibrio entre la maximización de la eficacia de la transmisión del ruido y la eficacia de la percepción por los receptores (Wood y Yezerinac, 2006).

Conclusión.

Este trabajo ha demostrado experimentalmente que el sisón común, una especie no canora, responde a niveles de ruido elevados con una relativa flexibilidad del canto a corto plazo tanto a nivel poblacional como a nivel individual. La flexibilidad del canto ante la perturbación sonora ha sido descrita en especies de aves canoras de entornos antropizados, pero apenas había sido estudiada en aves no canoras. La comunicación acústica juega un papel central en la selección sexual y la integración social en numerosas especies de aves. El hecho de que los sisones consigan modificar sus cantos en ambientes ruidosos, podría constituir un síntoma de adaptación a ambientes altamente antropizados y en proceso de urbanización que se hacen cada vez más ruidosos. El presente trabajo abre, pues, una línea de investigación nueva en esta especie y en el tipo de ambientes que ocupa, la cual debería evaluar, en última instancia, el efecto de la perturbación sonora en la eficacia biológica de los individuos, lo que, a su vez, redundaría en una más eficaz gestión y conservación de sus poblaciones.

Bibliografía.

Arroyo, B. y Bretagnolle, V. 1999. Field identification of individual little bustard Tetrax tetrax males using plumage patterns. *Ardea*, **46(1)**:53-60.

Barber, J.R., Crooks, K.R. y Fristrup, K.M. 2009. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology & Evolution*, **25**:180-189.

Barber, J.R, Crooks, K.R y Fristrup, K.M. 2010. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends Ecology Evolution*, ***25***:180–189.

Bates, D., Maechler, M., Bolker, B.M., y Walker, S. 2014. "lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4." ArXiv e-print; submitted to *Journal of Statistical Software*, http://arxiv.org/abs/1406.5823.

Bautista, L.M., García, J.T., Calmaestra, R.G., Palacín, C., Martín, C.A., Morales, M.B., Bonal, R. y Viñuela, J. 2004. Effect of weekend road traffic on the use of space by raptors. *Conservation Biology*, **18(3)**:726-732.

Bayne, E., Habib, L. y Boutin, S. 2008. Impacts of chronic anthropogenic noise from energysector activity on abundance of songbirds in the boreal forest. *Conservation Biology*, **22**:1186-1193.

BirdLife International, 2004. Birds in Europe II. *BirdLife International*, Cambridge.

Blickley, J.L., Blackwood, D. y Patricelli, G.L. 2011. Experimentar evidence for the effects of chronic anthropogenic noise on abundance of greater sage-grouse at leks. *Conservation Biology*, **26(3)**:461-471.

Bradbury, J.W. y Vehrencamp S.L. 1998. *Principles of animal communication*. Sinauer Associates, Sunderland, 917 pp.

Brenowitz, E.A. 1982. The active space of Red-winged Blackbird song. *Journal of Comparative Physiology*, **147**:511‑522.

Brüel, Kjær. 2011. Technical documentation predictor type 7810. Version 8.13. User manual. Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. Naerum, DK.

Brumm, H. 2004. The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. Journal of Animal Ecology 73:434‑440.

Brumm, H., y Slabbekoorn, H. 2005. Acoustic communication in noise. *Advances in the Study of Behaviour*, **35**:151-209.

Brumm, H. y Slater, P.J.B. 2006. Ambient noise, motor fatigue and serial redundancy in chaffinch song. *Behavioural Ecology and Sociobiology*, **60**:475-481.

Burnham, K.P. y Anderson, D.R. 2002. Model selection and multimodel inference: a practice information-theoretic approach. Springer, New York.

Burnham, K. P. y Anderson, D. R. 2004. Multimodel inference - understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research* **33(2)**:261-304.

Chappell, M.A., Zuk, M., Kwan, T.H. y Johnsen, T.S. 1995. Energy cost of an avian vocal display: crowing in red junglefowl. *Animal behavior*, **49**:255-257.

Collins, S. 2004. Vocal fighting and flirting: the functions of birdsong. Pages 39-79 in P. Marler and H. Slabbekoorn, editors. *Nature's music: the science of birdsong*. Academic Press/Elsevier, San Diego, California, USA.

Charif, R.A., Waack, A.M y Strickman, L.M. 2010. *Raven Pro 1.4 User's Manual*. Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY.

Cramp, S., y Simmons, K.E.L. (Eds.). 1980. *The Birds of the Western Paleartic, Vol. II*. Oxford University Press, Oxford.

Dall, S.R., Giraldeau, L.A., Olsson, O., McNamara, J M. y Stephens D.W. 2005. Information and its use by animals in evolutionary ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, **20**: 187–193.

Del Hoyo, J., Elliott, A. y Sargatal, J. 2006. *Handbook of the birds of the World*. (Eds.), Hoatzin to Auks, Vol. 3. Lynx Edicions, Barcelona.

Dooling, R.F. 2004. Audition: Can birds hear everything they sing? Pages 178‑205 *in Nature´s Music* (P. Marler and H. Slabbekoorn, Eds.). Elsevier Academic, London.

Fernández-Juricic, E., Poston, R., De Collibus, K., Morgan, T., Bastian, B., Martin, C., Jones, K. y Treminio, R. 2005. Microhabitat selection and singing behavior pa_ erns of male

House Finches (*Carpodacus mexicanus*) in urban parks in a heavily urbanized landscape in the western U.S. *Urban Habitats,* **3**:49‑69.

Foote, A.D., Osborne, R.W. y Hoelzei, A.R. 2004. Whale-call response to masking boat noise. *Nature* 428:910.

Forman, R.T.T. 2000. Estimate of the area affected ecologically by the road systemin the United States. *Conservation Biology*, **14**: 31–35.

Forman, R.T.T., Reineking, B. y hersperger, A.M. 2002. Road traffic and nearby grassland bird patterns in a suburbanizing landscape. *Environmental Management*, **29**: 782‑800.

Francis, C.D. y Barber, J.R. 2013. A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority. *Frontiers in Ecology and the Environment*. **11**:305–313.

Francis, C.D., Ortega, C.P. y Cruz, A. 2009. Noise pollution changes avian communities and species interactions. *Current Biology,* **19**:415-419.

Francis, C., Ortega, C. y Cruz, A. 2011. Vocal frequency change reflects different responses to anthropogenic noise in two suboscine tyrant flycatchers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **278**:2025–2031.

Frisk, G.V. 2012. Noiseonomics: the relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific Reports* . **2**:437.

Fuller, R.A., Warren, P.H. y Gaston, K.J. 2007. Daytime noise predicts nocturnal singing in urban robins. *Biology Letters,* **3**:368-370.

Garamszegi, L.Z., Moreno, J. y Møller, A.P. 2006. Avian song complexity is associated with high field metabolic rate. *Evolutionary Ecology Research,* **8**:75-90.

Goodwin S.E. y Shriver W.G. 2011. Effects of traffic noise on occupancy patterns of forest birds. *Conservation Biology,* **25**:406-411.

Goriup, P. 1994. Little Bustard Tetrax tetrax. In: Tucker, G.M., Heath, M.F. (Eds.), *Birds in Europe: their Conservation Status*. BirdLife International, Cambridge, pp. 236–237. 10

Habib, L., Bayne, E.M. y Boutin, S. 2007. Chronic industrial noise affects pairing success and age structure of ovenbirds Seiurus aurocapilla. *Journal of Applied Ecology*, **44**:176–184.

Halfwerk, W., Bot, S., Buikx, J., van der Velde, M., Komdeur, J., ten Cate, C. y Slabbekoorn, H. 2011a. Low frequency songs lose their potency in noisy urban condition. *Proceedings of the National Academy of Science,* **180(35)**:14549-14554.

Halfwerk W, Bot, S. y Slabbekoorn, H. 2012. Male great tit song perch selection in response to noise-dependent female feedback. *Functional Ecology*. **26**:1339–1347.

Halfwerk W. y Slabbekoorn, H. 2009. A behavioural mechanism explaining noise-dependent frequency use in urban birdsong. *Animal Behaviour*. **78**:1301–1307.

Halfwerk W, Holleman LJM, Lessells CM, Slabbekoorn H. 2011b. Negative impact of traffic noise on avian reproductive success. *Journal of Applied Ecology*. **28**:210–219.

IUCN. 2012. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2012.2. <www.iucnredlist.org>. Downloaded on 27 May 2015.

Jiguet, F., Arroyo, B., y Bretagnolle, V. 2000. Lek mating systems: a case study in the Little Bustard Tetrax tetrax. *Behavioural proceses*. **51**:63-82.

Jiguet, F. y Bretagnolle, V. 2001. Courtship behaviour in a lekking species: individual variations and settlement tactics in male little bustard. *Behavioural Processes*, **55**:107-118.

Kociolek, A.V., Clevenger, A.P., Clair, C.C. St., y Proppe, D.S. 2010. Efects of roads networks on Bird populations. *Conservation Biology*, vol. 25, **2**:241-249.

Lambrechts, M.M. 1996. Organization of birdsong and constraints on performance. Pages 305‑320 *in* Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds (D. E. Kroodsma and E. H. Miller, Eds.). Cornell University Press, Ithaca, New York.

Lampe, U., Schmoll, T., Franzke, A. y Reinhold K. 2012. Staying tuned: grasshoppers from noisy roadside habitats produce courtship signals with elevated frequency components. *Functional Ecology*, **26**:1348–1354.

Lane, H. y Tranel, B. 1971. The lombard sign and de role of hearing in speech. *Journal of Speech, Language and heraring research* Vol. 14, 677-709. doi: 10.1044 / jshr.1404.677.

Leader, N., Wright, J. y Yom-Tov, Y. 2005. Acoustic properties of two urban song dialects in the Orange-tufted Sunbird (*Nectarinia osea*). *Auk* **122**:231‑245.

Leonard ML, Horn AG. 2012. Ambient noise increases missed detections in nestling birds. *Biology Letters*, **8**:530–532.

Lowry, H., Lill, A. y Wong, B.B.M. 2012. How noisy does a noisy miner have to be? Amplitude adjustments of alarm calls in an avian urban 'adapter'. *PLoS One*. **7**:e29960.

Marten, K. y Marler, P. 1977. Sound transmission and its signifi cance for animal vocalization. I. Temperate habitats. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, **2**:271‑290.

Martinez, C., 1994. Habitat selection by the Little Bustard Tetrax tetrax in cultivated areas of central Spain. *Biological Conservation*, **67**:125–128.

Martínez, I; Morales, M. B; Delgado, M. P y Traba, J. 2013. Influencia del ruido producido por el tráfico en el comportamiento reproductivo de machos de sisón común. Tesis de Máster, departamento de ecología terrestre. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid.

McDonald, M.A., Hildebrand, J.A. y Wiggins, S.M. 2006. Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal of the Acoustical Society of America*, **120**:711–718.

McLaughlin, K.E. y Kunc, H.P. 2013. Experimentally increased noise levels change spatial and singing behaviour. *Biology Letters*. **9**:20120771.

Montague, M.J., Danek-Gontard, M. y Kunc, H.P. 2013. Phenotypic plasticity affects the response of a sexually selected trait to anthropogenic noise. *Behavioral Ecology*, **24**:343–348.

Morales, M.B., García, J.T., y Arroyo, B.E., 2005. Can landscape composition changes predict spatial and annual variation of little bustard male abundance? *Animal Conservation*, **8:**167-174.

Okanoya, K. y Dooling, R.F. 1988. Hearing in the Swamp Sparrow, *Melospiza georgiana*, and the Song Sparrow, *Melospiza melodia*. *Animal Behaviour*, **36**:726‑732.

Parks, S.E., Johnson, M., Nowacek, D. y Tyack, P.L. 2011. Individual right whales call louder in increased environmental noise. *Biology Letters*, **7**:33–35.

Patricelli. G.L. y Blickley, J.L. 2006. Avian communication in urban noise: causes and consequences of vocal adjustment. *The American Ornithologists Union*, **123**(3):639‑649.

Picciulin, M., Sebastianutto, L., Codarin, A., Calcagno, G. y Ferrero, E.A. 2012. Brown meagre vocalization rate increases during repetitive boat noise exposures: a possible case of vocal compensation. *Journal of the Acoustical Society of America*. **132**:3118–3124.

R Development Core Team. 2014. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. http://www.rproject.org/

Rabin, L.A. y Greene, C.M. 2002. Changes to acoustic communication systems in human-altered environments. *Journal of Comparative Psychology*, **116**:137‑141.

Raven Pro: Interactive Sound Analysis Software (Version 1.5) [Computer software] (2014). Ithaca, NY: The Cornell Lab of Ornithology. Available from http://www.birds.cornell.edu/raven.

Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental. Publicado en: «BOE» núm. 301, de 17 de diciembre de 2005, pág. 41356-41363.

Reijnen, R. y Foppen, R. 2006. Impact of road traffic on breeding bird populations. In: Davenport J, Davenport JL (eds). *The ecology of transportation: managing mobility for the environment*. Springer, Dordrecht, pp 255–274.

Ripmeester, E.A.P., Kok, J., van Rijssel, J. y Slabbekoorn, H. 2009. Habitatrelated birdsong divergence: an integrated study on the influence of territory density and ambient noise. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, doi:10.1007/ s00265-009-0857-8.

Ryan, M.J. yBrenorwitz, E.A. 1985. The role of body size, phylogeny, and ambient noise in the evolution of bird song. *American Naturalist*, **126**:87‑100.

Salamolard, M. y Moreau, C., 1999. Habitat selection by Little Bustard Tetrax tetrax in a cultivated area of France. *Bird Study*, **46**:25-33.

Siegel, A. F. y Morgan, C. J. 1996. Statistics and data analysis, 2nd edn. Wiley, New York.

Slabbekoorn, H. y den Boer-Visser, A. 2006. Cities change the songs of birds. *Current Biology*, **16**, 2326–2331.

SPSS Inc. 2010. IBM SPSS Statistics 19, Chicago, IL.

Tabachnick, B. y Fidell, L. 1996. Using multivariate statistics. Harper Collins, New York.

Slabbekoorn, H. y Peet, M. 2003. Birds sing at a higher pitch in urban noise. *Nature*. 424:267.

Summers, P.D., Cunnington, G.M., y Fahrig, L. 2011. Are the negative effects of roads on breeding birds caused by traffic noise? *Journal of Applied Ecology*. British Ecological Society.

Vargas-Salinas F, Amezquita A. 2013. Traffic noise correlates with calling time but not spatial distribution in the threatened poison frog *Andinobates bombetes*. *Behaviour*. **150**:569–584.

Warren, P.S., Katti, M., Ermann, M. y Brazel, A. 2006. Urban bioacoustics: It’s not just noise. *Animal Behaviour*, **71**:491‑502.

Watts, R.D., Compton, R.W., McCammon, J.H., Rich, C.L., Wright, S.M., Owens, T. y Ouren, D.S. 2007. Roadless space of the conterminous United States. *Science*. **316**:736–738.

Wolff, A., Paul, J.P., Martin, J.L., y Bretagnolle, V., 2001. The benefits of extensive agriculture to birds: the case of the little bustard. *Journal of Applied Ecology*. **38**:963-975.

Wood, W.E., y S.M. Yezerinac. 2006. Song Sparrow (*Melospiza melodia*) song varies with urban noise. *The Auk,* **123**:650-659.

Máster de Ecología

17/Junio/2015

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

Trabajo Fin de Máster

Efecto del ruido antropogénico sobre la exhibición sexual sonora de los machos de sisón común (*Tetrax tetrax*)

Realizado por:

Adrián Barrero Diego

Directores académicos

Manuel B. Morales Prieto y Juan Traba Díaz.

Director técnico

Carlos Iglesias Merchán.