



Universidad Autónoma de Tlaxcala

Posgrado en Ciencias Biológicas

**Evaluando la capacidad de un suboscino para interrumpir el grupo de canto
en respuesta a ruido urbano repentino: una aproximación experimental**

TESIS

Que para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias Biológicas

Presenta

Isaac Muñoz Santos

Director

Dr. Alejandro A. Ríos Chelén

Tlaxcala, Tlax.

AGOSTO 2022



Universidad Autónoma de Tlaxcala

Posgrado en Ciencias Biológicas

**Evaluando la capacidad de un suboscino para modular el momento de canto
en respuesta a ruido urbano repentino: una aproximación experimental**

TESIS

Que para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias Biológicas

Presenta

Isaac Muñoz Santos

Comité Tutorial

Dr. Alejandro A. Ríos Chelén

Dr. Jorge Vázquez Pérez

Dra. Bibiana Carolina Montoya Loaiza

Tlaxcala, Tlax.

AGOSTO 2022



Universidad Autónoma de Tlaxcala

Posgrado en Ciencias Biológicas

**Evaluando la capacidad de un suboscino para modular el momento de canto
en respuesta a ruido urbano repentino: una aproximación experimental**

TESIS

Que para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias Biológicas

Presenta

Isaac Muñoz Santos

Comité Tutoral

Dr. Alejandro A. Ríos Chelén

Dr. Jorge Vázquez Pérez

Dra. Bibiana Carolina Montoya Loaiza

Financiamiento

Esta investigación fue realizada con una Beca Nacional con clave CVU 1080745 en el Programa de Maestría en Ciencias Biológicas del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta (CTBC) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx) que pertenece al Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Autorización



Universidad Autónoma de Tlaxcala
Centro Tlaxcala Biología de la Conducta (CTBC)
Maestría en Ciencias Biológicas
Proceso: Posgrado CTBC
Registro: Carta Autorización de Impresión de Tesis

Código: 503-RGE-26

Revisión: 03

COORDINACIÓN MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA P R E S E N T E

Los abajo firmantes, miembros del jurado evaluador del proyecto de tesis que **Isaac Muñoz Santos** realiza para la obtención del grado de **Maestro en Ciencias Biológicas**, expresamos que, habiendo revisado la versión final del documento de tesis, damos la aprobación para que ésta sea impresa y defendida en el examen correspondiente. El título que llevará es **“Evaluando la capacidad de un suboscino para modular el momento de canto en respuesta a ruido urbano repentino: una aproximación experimental”**.

Sin otro particular, aprovechamos para enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
TLAXCALA, TLAX., JULIO 12 DE 2022

DRA. BIBIANA CAROLINA MONTOYA LOAIZA

DR. ALEJANDRO ARIEL RÍOS CHELÉN

DRA. PALESTINA GUEVARA FIORE

DRA. MONSERRAT SUÁREZ RODRÍGUEZ

DR. JORGE VÁZQUEZ PÉREZ

Carta de no plagio



Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta
Coordinación de la División de Ciencias Biológicas
Secretaría de Investigación Científica y Posgrado

COMITÉ ACADÉMICO POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Sirva este medio para describir el proceso de revisión de la tesis realizada por el estudiante Isaac Muñoz Santos titulada “Evaluando la capacidad de un subosqino para modular el momento de canto en respuesta a ruido urbano repentino: una aproximación experimental” para optar por su grado de **Maestro en Ciencias Biológicas**.

El documento de la tesis de Isaac Muñoz Santos fue revisado por mí como director de tesis antes de presentarse en cada examen tutorial y, posteriormente a los exámenes tutorales, los miembros de su comité tutorial realizaron también sus respectivas observaciones. De manera que el documento, llevó un proceso de revisión por varios profesores expertos en el tema. En el mes de enero, el documento final de la tesis fue procesado con el programa del Turnitin marcando poco texto con similitudes (2%). Los textos detectados con similitud fueron corregidos por el estudiante. Se volvió a procesar el documento y volvió a marcar 2%, sin embargo, examinando los detalles de la búsqueda se observó que las similitudes están marcadas en algunos pies de figuras, pero dicho texto contiene las respectivas citas que indican de donde fue tomada la información. Otras similitudes se observaron en la sección del índice y la metodología, correspondiendo a lenguaje común por lo que esta similitud no podría ser considerada como plagio.

Por lo anterior, confirmo que **el estudiante no incurrió en ninguna práctica no deseable** en la escritura de la tesis.

Sin más por el momento, reciban atentos saludos.

CORDIALMENTE
Tlaxcala, Tlax., a 4 de julio de 2022

Alejandro Ríos

Agradecimientos

Al programa de Maestría en Ciencias Biológicas del Centro Tlaxcala de Biología de la conducta (CTBC) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx) por permitirme ser parte de ella y afianzar mi objetivo de convertirme en investigador.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la Beca Nacional con clave CVU 1080745 para financiar mis estudios.

A mi director Dr. Alejandro Ríos Chelén por ser guía en el desarrollo de esta investigación, por su amabilidad, su paciencia, sus recomendaciones y su gran calidad humana que siempre me hicieron sentir a gusto y apoyado durante la maestría. Enseñándome no solo de ciencia e investigación, sino también de valores.

A mis tutores Dra. Bibiana Carolina Montoya Loaiza y Dr. Jorge Vázquez Pérez por la dedicación y retroalimentación durante cada revisión del proyecto, que siempre contribuyeron al mejoramiento de mi investigación.

Al personal docente y administrativo del CTBC que siempre se portó amable y con disposición de ayudarme para mi desarrollo en la maestría.

A mi familia, quienes siempre me han apoyado en todas mis decisiones y a quienes espero hacer sentir orgullosos de mis logros.

A todos los mexicanos, que gracias a sus contribuciones miles de jóvenes podemos formarnos como investigadores en instituciones públicas y de calidad.

Resumen

Se ha documentado que algunas aves modifican su conducta vocal al exponerse a ruido urbano; sin embargo, aún no queda claro cuáles son las estrategias que emplean los suboscinos, pues se trata de un suborden de aves con escasa flexibilidad vocal. Observaciones anecdóticas sugieren que el cardenalito (*Pyrocephalus rubinus*), un suboscino que canta en grupos de cantos, interrumpe su grupo de canto en presencia de ruido urbano repentino (RUR). Probamos la hipótesis de que en presencia de RUR, simulando un vehículo automotor que se acerca para después alejarse, el cardenalito interrumpirá su grupo de canto; también probamos si aquellos individuos en territorios más contaminados con luz y ruido tendrían una mejor recuperación del desempeño vocal después de experimentar RUR. Para probar esto, realizamos un experimento utilizando *playbacks* de RUR en machos de vida libre, en los cuales grabamos sus grupos de canto antes de ruido urbano repentino (**ARUR**), durante ruido urbano repentino (**DRUR**) (tratamiento experimental) y posterior a ruido urbano repentino (**PRUR**). Contamos el número de cantos en cada grupo de canto y medimos su duración, además, medimos los niveles de ruido ambiental y de luz artificial nocturna presente en cada territorio. Los machos interrumpen de manera abrupta el grupo de canto en presencia de RUR, independientemente del nivel de luz y ruido presente en cada territorio. Además, la recuperación del desempeño vocal no depende de la luz artificial nocturna y el ruido ambiental en cada territorio. Nuestros resultados sugieren que los cardenalitos del bosque de Chapultepec se han habituado a la presencia de RUR.

Palabras clave: ecosistemas urbanos, mosquero cardenal, *Pyrocephalus rubinus*, playbacks, ruido urbano, luz artificial nocturna.

Tabla de contenido

Financiamiento	i
Autorización	ii
Carta de no plagio.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Resumen	v
Tabla de contenido.....	vi
Introducción.....	1
Comunicación acústica en las aves.....	1
<i>Passeriformes</i> : Oscinos y Suboscinos	2
Ruido urbano y luz artificial nocturna como contaminantes urbanos	3
Cantar en la ciudad y el ruido urbano repentino.....	4
Modelo de estudio	5
Bioacústica.....	6
Antecedentes.....	8
Justificación	11
Hipótesis	12
Predicciones.....	12
Objetivos.....	12
Metodología.....	13
Área de estudio.....	13
Censo	13
Preparación de estímulo experimental.....	14

Diseño experimental	15
Medición de ruido urbano y luz artificial nocturna	17
Análisis acústico	18
Análisis estadístico	19
Resultados.....	20
Interrupción del grupo de canto por RUR	20
Efecto del ruido ambiental y LAN en la recuperación del desempeño del canto.....	24
Efecto del ruido ambiental y LAN en la recuperación de latencia	26
Discusión	28
Conclusiones.....	32
Perspectivas	33
Literatura citada.....	34

Introducción

Comunicación acústica en las aves

La comunicación se puede entender como la transmisión de información entre emisor y receptor a través de un medio (gas, líquido o sólido), esa información puede ser utilizada por el receptor para tomar una decisión. Cuando se trata de comunicación acústica, la información es transmitida a través de señales sonoras. Este tipo de comunicación se presenta principalmente en vertebrados (Chen y Wiens, 2020). De manera general la comunicación acústica facilita funciones vitales, tales como: forrajeo, orientación, defensa anti-predadores, selección de hábitat, entre otras decisiones basadas en información acústica social (Laiolo, 2010). Específicamente en aves, la comunicación acústica es necesaria en una amplia gama de contextos, incluida la selección de pareja, mantenimiento de vínculos, defensa del territorio y comunicación entre padres e hijos (Bradbury y Vehrencamp, 2011).

Dentro de las aves, la comunicación vocal destaca el orden de los *Passeriformes*, también conocidas como aves cantoras o aves de percha, las aves de este orden se comunican vocalmente a través de cantos y llamados. En cuanto a los cantos, suelen ser emitidos por los machos durante la temporada reproductiva, principalmente al amanecer y al atardecer. Los cantos se producen en contextos de cortejo y defensa de territorio pues otorgan información sobre la condición del individuo. Los cantos presentan un patrón claro y se forman por varias notas, además, suelen ser complejos en cuanto a la modulación en frecuencias. Por otro lado, los llamados son emitidos por ambos sexos en diversos contextos, por ejemplo, llamados de alarma, llamados de contacto, llamados de vuelo, etc., *ergo* son emitidos durante todo el año y a lo largo del día. A diferencia de los cantos, los llamados suelen ser cortos y simples, generalmente se componen de una sola nota (fig. 1) (Baxter, 2019).

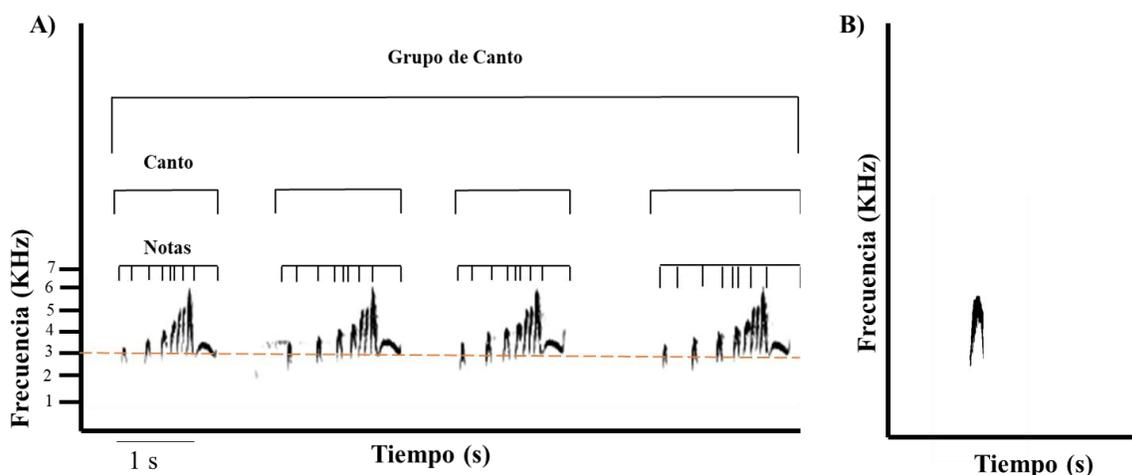


Figura 1.- Estructura de las vocalizaciones en *Pyrocaphalus rubinus* A) estructura y forma del canto que se conforma por notas y grupo de canto conformado por cantos. B) estructura y forma de un llamado de alarma, formado por una sola nota. La línea punteada está fijada en 3 KHz, frecuencia máxima del ruido urbano basal.

Passeriformes: Oscinos y Suboscinos

El orden *Passeriformes* se compone de tres subórdenes. 1) los oscinos, que contiene el 45% de la diversidad de especies de aves reconocidas a nivel mundial. 2) los suboscinos, donde se encuentra el 15% del total de especies, en su mayoría confinadas a América del Sur. 3) los reyezuelos de Nueva Zelanda, suborden generalmente ignorado pues se conforma de solo dos especies existentes (Baxter, 2019). Las especies oscinas difieren de su grupo hermano, los suboscinos, en una serie de rasgos ecológicos, de historia natural y en la ontogenia del canto (Ríos-Chelén et al., 2012). Estas diferencias se reflejan en distintas capacidades vocales y diferencias en el control de la producción del canto.

Las aves oscinas presentan varios núcleos cerebrales interconectados que conforman el Sistema de Control del Canto (*Song Control System*): la producción del canto está regulada por los núcleos HVC (*High vocal center*) y RA (*Robust nucleus of the Arcopallium*), mientras que los núcleos DLM (*Dorsolateral anterior thalamic nucleus*), LMAN (*Lateral magnocellular nucleus of the nidopallium*) y Área X participan en el aprendizaje del canto. Este circuito también inerva la siringe lo que les permite la modulación de sus cantos (Gahr, 2000). Durante su fase juvenil, los oscinos pasan por un proceso de aprendizaje del canto, en el cual practican y reciben retroalimentación de tutores conespecíficos, esta retroalimentación de varios tutores implica la

posibilidad de que los cantos aprendidos por los juveniles presenten variaciones (interindividuales e interpoblacionales) a través de un proceso denominado evolución cultural (Luther y Baptista, 2010).

En cuanto a los suboscinos, se ha planteado que el desarrollo del canto es innato, pues producen su canto sin necesidad de recibir retroalimentación de tutores conespecíficos (Touchton y cols. 2014). A pesar de la ausencia del aprendizaje del canto, existe variación interindividual e interpoblacional, principalmente asociada a las diferencias genéticas y de hábitat (Lovell y Lein, 2013). Se ha comprobado que, a diferencia de los oscinos, los suboscinos no presentan núcleos cerebrales asociados y conectados en un sistema bien diferenciado (Gahr, 2000), pero sí presentan otros mecanismo de control de canto, como, el control del canto por receptores de andrógenos periféricos en los nervios de la siringe (Fuxjager y cols 2014) y el control mediado por la presión en los sacos aéreos (Amador y cols. 2008).

Ruido urbano y luz artificial nocturna como contaminantes urbanos

La urbanización es una de las principales causas de contaminación a nivel mundial, incluida la contaminación lumínica y acústica (Grimm y cols. 2008). Existe evidencia de alteraciones en aves causadas por ambos tipos de contaminantes. En el caso de la contaminación lumínica, la luz artificial nocturna puede suprimir la producción de melatonina lo que modifica los ciclos circadianos de las aves y su actividad a lo largo del día, en general iniciando sus actividades más temprano y terminándolas más tarde que en condiciones sin contaminación (Dominoni y cols. 2013, 2014, 2015), además de provocar consecuencias fisiológicas que derivan en enfermedades (Grubisic y cols. 2019). En el caso de la contaminación acústica existe evidencia importante sobre el efecto negativo en las aves, pueden revisarse algunas síntesis sobre el tema en Ortega (2012) y Shannon (2016). Por ejemplo, se ha observado que en sitios acústicamente contaminados las aves reducen significativamente el número de crías (Habib y cols. 2007; Halfwerk y cols. 2011). Una posible explicación a esta observación es que el ruido interfiere con el canto de los machos, por lo que las hembras no pueden percibir que los machos son de menor calidad, lo que podría resultar en una deficiencia de aprovisionamiento hacia las crías (Schroeder y cols. 2012).

Cantar en la ciudad y el ruido urbano repentino

Las aves cantoras son particularmente vulnerables al ruido urbano porque gran parte de su comunicación es acústica y se ve comprometida por el ruido externo (Slabbekoorn y Ripmeester, 2008). Sin embargo, algunas aves poseen rasgos que facilitan la comunicación en zonas ruidosas, por ejemplo, algunas aves cantan a un tono más alto en condiciones ruidosas (Bermúdez-Cuamatzin y cols. 2009, 2011; Brumm y Zollinger, 2013), otras pueden modificar la duración de su canto (Cartwright y cols. 2014; Ríos-Chelén y cols. 2013, 2015), cantar con más amplitud (más fuerte) (Brumm y Zollinger, 2011), con más redundancia (Brumm y Slater, 2006), por más tiempo (Díaz y cols. 2011), cambiar el patrón temporal diurno del canto (Cartwright y cols. 2014) o incluso producir cantos con menos entropía (Hanna y cols. 2011). Estos cambios pueden aumentar la probabilidad de que la señal sea percibida por el receptor; sin embargo, estos mecanismos pueden volverse menos útiles a medida que aumentan los niveles de ruido (Nemeth & Brumm, 2010).

La amplitud y producción de ruido varía temporalmente, por ejemplo, en las carreteras el ruido varía según la hora o el día porque depende del tránsito de automóviles. Estos picos repentinos en el ruido urbano producido por autos, los podemos denominar como ruido urbano repentino (RUR), que se caracteriza por ser de corta duración (pocos segundos) y gran amplitud (hasta 90 dB (A)) (Kerner y Rehborn, 1996). Se ha planteado que las aves pueden continuar comunicándose durante periodos de poco ruido, por ejemplo, entre el paso de automóviles. Este ajuste temporal puede ser un mecanismo valioso y poco explorado para comunicarse en áreas ruidosas y con presencia continua de ruido urbano repentino (Proppe y Finch, 2017).

Diversos estudios muestran que en las ciudades algunas aves vocalizan más temprano en el día que sus contrapartes que habitan en lugares con mayores niveles de ruido, posiblemente por una menor intensidad de tráfico antes del amanecer (Arroyo-Solís y cols. 2013). Existen otros efectos en el canto de las aves propiciados por el ruido de automóviles, por ejemplo, los escribanos palustres (*Emberiza schoeniclus*) que habitan al borde de las carreteras mostraron tasas de canto más altas en los días en que los niveles de tráfico eran más bajos (Gross y cols. 2010). Por el contrario, en otra investigación con reyezuelos euroasiáticos (*Troglodytes troglodytes*) no se encontraron ritmos vocales diferentes entre lugares ruidosos y silenciosos

usando ruido antropogénico experimental (Yang y Slabbekoorn, 2014). Estos resultados contrastantes pueden sugerir que no todas las especies de aves evitan el RUR; aun así, concentrar la producción vocal en periodos menos ruidosos; significaría conservar la energía y facilitaría la comunicación (Slabbekoorn y Ripmeester, 2008). Lo anterior, es algo probable para una especie como el cardenalito en la cual se comprobó que no tiene estrategias en frecuencia para sobreponerse al ruido urbano (Ríos-Chelén y cols. 2018). Si bien, ya existen estudios del efecto del ruido de automóviles o del tráfico vehicular en las aves (como los citados en este párrafo), se desconoce hasta qué punto se modifican los patrones vocales en escalas de tiempo cortas (segundos), por eso, en este estudio se evalúa el efecto inmediato de ruido urbano repentino semejando el paso de automóviles.

Modelo de estudio

La mayoría de investigación sobre cómo las aves se adaptan a ambientes ruidosos se ha centrado en el orden de los Passeriformes, principalmente en el suborden de los oscinos, mientras que el suborden de los suboscinos ha sido infraestudiado en este aspecto. Para abonar más al conocimiento bioacústico y la capacidad de los suboscinos para sobreponerse al ruido urbano hemos decidido usar como modelo de estudio al cardenalito (*Pyrocephalus rubinus*). Es un suboscino de la familia Tyranidae, que es ideal para este estudio ya que es un ave abundante, con amplia distribución, que va desde el sudoeste de Estados Unidos hasta norte de Chile, incluyendo poblaciones en México. Además, en la mayor parte de su distribución los individuos son residentes (Ellison y cols. 2009). Es un ave territorial que habita sitios con vegetación abierta, con árboles de baja o alta altura o arbustos dispersos (Taylor y Hanson, 1970), por ello, es común encontrarlos en remanentes de bosques dentro de la ciudad, como parques urbanos.

Tiene un marcado dimorfismo sexual de coloración. El macho posee un plumaje negro y rojo, sumamente llamativo, lo que facilita su detección en campo, mientras que la hembra posee un plumaje estriado, de coloración marrón cenizo, además de un color suave en el bajo vientre: rosa, amarillo o mamey (Ridgely y Tudor, 1994) (fig. 2).

Presenta un canto previamente descrito (Smith 1967) y muy característico que consta de elementos introductorios que varían en número, dos elementos medios, un elemento de alta frecuencia y un elemento terminal (Ríos Chelén y cols. 2005). Cantan en grupos de cantos (en promedio unos 5 cantos por grupo) (Rivera-Cáceres y cols. 2011) (fig. 1). Un grupo de cantos puede definirse como una serie de cantos producidos de forma continua, y espaciados de otro grupo por un espacio de silencio mayor al espacio entre cantos en un grupo.



Figura 2.- Esquema *P. rubinus*, a la izquierda se encuentra la hembra y a la derecha el macho.

Bioacústica

Para este trabajo es necesario conocer aspectos básicos de bioacústica. La bioacústica es un campo multidisciplinario que conjuga la biología y la acústica, siendo esencialmente la investigación de la producción y recepción del sonido biológico, así como los mecanismos de transmisión de información biológica a través de señales sonoras (Tubaro, 1999). Esta área de estudio ha tenido un importante avance durante los últimos 50 años gracias a la creación de medios técnicos capaces de grabar sonidos en la naturaleza (grabadoras y micrófonos), de almacenar (tarjetas de memoria) y analizar los sonidos (software de computadora). Con lo

anterior, los cantos de las aves ahora pueden capturarse en imágenes llamadas espectrogramas, los cuales son una representación visual del sonido donde se muestra la variación en energía (o mejor dicho, el poder de densidad espectral) en los dominios de frecuencia y tiempo.

Los espectrogramas nos permiten explorar visualmente la variación acústica en nuestro sistema de estudio, lo que facilita distinguir diferencias estructurales a pequeñas escalas temporales/espectrales que nuestros oídos no siempre pueden detectar; con ellas los investigadores pueden describir las vocalizaciones de las aves de manera objetiva y así comparar individuos, poblaciones y especies (Baptista y Martínez-Gómez, 2002). Desde esta visión los cantos en las aves se han convertido en importantes herramientas para estudios taxonómicos, de ecología y de biología del comportamiento (Baptista y Gaunt, 1994).

En los espectrogramas se realizan medidas tanto espectrales como temporales. Las medidas que suelen estimarse en el dominio frecuencia son: frecuencia mínima, máxima y pico. Sin embargo, en este trabajo nos enfocaremos en las mediciones en dominio tiempo, es decir realizaremos nuestras mediciones y análisis en el eje x. Algunas características temporales que pueden medirse en los espectrogramas son: Duración del canto(s), Duración de las notas(s), Espacio entre notas(s), Duración del grupo de canto (s), Espacio entre cantos (s), Número de notas y Número de cantos.

Antecedentes

Smith (1967) realiza las primeras descripciones espectrotemporales del canto del cardenalito. Recientemente, se retoma la investigación bioacústica en esta especie con un enfoque cuantitativo. Se ha observado modulación en el canto, específicamente en las características temporales, ya que, el mismo macho canta a mayor tasa y cantos más largos después de iniciada la construcción del nido con respecto a antes de iniciada la construcción (Ríos Chelén y cols. 2005).

En el 2011 un estudio menciona que quizá el aumento en la tasa de canto después de la construcción del nido documentada por Ríos Chelén y cols. (2005) sea un subproducto del aumento del tamaño de grupo de canto, en cuyo caso el atributo relevante será el tamaño del grupo de canto. Además, demuestra que, los cardenalitos son sensibles a cambios en el tamaño de grupo de canto producidos por otros machos, y responden con una mayor proporción de llamados (de manera más agresiva) a aquellos grupos de canto más largos (Rivera-Cáceres y cols. 2011).

En cuanto al estudio sobre cómo el ruido urbano afecta a esta especie, se ha encontrado que los machos que viven en zonas más ruidosas presentan cantos más largos que aquellos que viven en zonas con menos ruido (Ríos-Chelén y cols. 2013). Además, cantan con más elementos introductorios a medida que se acerca el amanecer, cuando los niveles de ruido son más altos, aunque este cambio en el canto parece estar más asociado con la hora del día que con el aumento del ruido (Ríos-Chelén y cols. 2013).

Ríos-Chelén y cols. (2018) hicieron un experimento que buscó probar la flexibilidad vocal inmediata inducida por ruido urbano, encontrando que, los machos no modifican el número de elementos del canto, ni la frecuencia del canto de manera inmediata en presencia de ruido urbano. Por lo que interpretan sus resultados como una falta de evidencia de la flexibilidad vocal inducida por el ruido urbano en los parámetros de frecuencia y en la longitud del canto. Pese a no encontrar flexibilidad vocal, en sus resultados se observa que al parecer eventos de ruido repentinos interrumpen el grupo de canto (fig. 3). Estos picos de señal repentinos en el ruido urbano producido por autos, los podemos denominar ruido urbano repentino (RUR), que se caracteriza por ser de corta duración (pocos segundos) y gran amplitud (hasta 90 dB (A)).

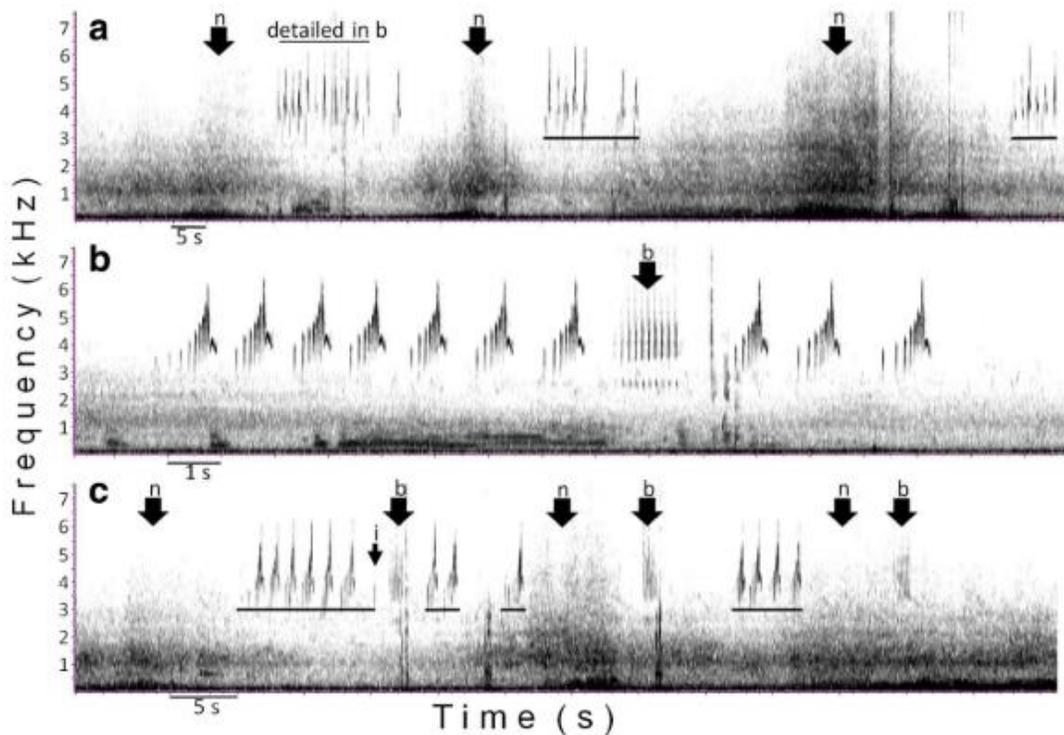


Figura 3.- Ejemplo de cómo el ruido urbano repentino (a)(c) y las vocalizaciones de otras aves (b) podrían interrumpir el grupo de canto de *P. rubinus*. Las flechas negras marcan ruido repentino. Modificado de Ríos-Chelén y cols. (2018).

La luz artificial nocturna (LAN) también parece jugar un papel importante en la modulación del canto. Recientemente se encontró que los machos no producían cantos más largos con ruido urbano, pero sí produjeron cantos más largos y cantaron a mayor tasa en sitios con mayores niveles de luz. Los autores sugieren que lo anterior podría deberse a una menor producción de melatonina en zonas más iluminadas, lo que podría resultar en machos más activos (Nakamura-García y Ríos-Chelén, 2021). También se ha observado que, el mosquero cardenal empieza a cantar el coro del amanecer más temprano cuando sus territorios presentan LAN (MacGregor-Fors y cols. 2011).

No es claro si el ruido urbano y la LAN afectan la estructura del canto en la misma medida e independientemente o si lo hacen en interacción, por lo cual consideraremos ambos tipos de contaminantes en este estudio.

Finalmente, se ha sugerido que, aves ubicadas en áreas ruidosas se habitúan al ruido urbano. En un estudio similar al nuestro, donde reprodujeron simulaciones de ruido de construcción al chipe de cachetes amarillos (*Setophaga chrysoparia*), los investigadores encontraron que, los individuos ubicados en áreas más cercanas a una carretera (más ruidosas) interrumpieron el canto cuando se les reprodujo la simulación. Por el contrario los individuos que viven en zonas más alejadas continuaban cantando aún con la reproducción del ruido (Lackey y cols. 2012), esto sugiere que la interrupción podría suceder solo en los individuos que habitan territorios ruidosos.

Justificación

Derivado del acelerado proceso de urbanización, la fauna silvestre cada vez está más expuesta a contaminantes urbanos, como el ruido urbano. Los estudios respecto al efecto del ruido urbano en la comunicación animal cobran una inmensa importancia, ya que es uno de los contaminantes más comunes, por ejemplo, el ruido de los automóviles. Existen grupos con limitada capacidad para modificar sus cantos, como es el caso de los suboscinos. Sin embargo, algunos suboscinos han sido capaces de colonizar ambientes urbanos, como es el caso del cardenalito. Una investigación sobre la estrategia o estrategias que usa esta especie para seguirse comunicando a pesar del ruido nos brindaría información clave para entender los efectos ecológicos y evolutivos del ruido urbano en las aves.

Hipótesis

El RUR afecta negativamente el desempeño vocal de los cardenalitos.

Estímulos de origen antropogénico como RUR y LAN afectan negativamente la recuperación vocal de los cardenalitos.

Predicciones

En presencia de RUR el número de cantos por grupo y la duración del grupo de canto disminuirán.

En sitios más ruidosos e iluminados los cardenalitos tendrán una mayor proporción de recuperación del canto y una menor proporción de latencia (ver en Métodos; Análisis acústico) que en sitios menos ruidosos e iluminados.

Objetivos

Evaluar si la presencia de RUR interrumpe de manera inmediata el grupo de canto en el mosquero cardenal.

Analizar si el RA y la LAN intervienen en la recuperación del desempeño del canto después de experimentar RUR.

Metodología

Área de estudio

Este trabajo se realizó en la segunda sección del bosque de Chapultepec (19°12'1"N, 99°33'37"O). El bosque está conformado por áreas arboladas naturales e inducidas; es el parque urbano más grande en la ciudad de México y área metropolitana. Además, es un sitio de gran importancia social, cultural, recreativa y ambiental (Benavides Meza y Fernández Grandizo, 2012). El clima se clasifica como templado subhúmedo con lluvias en verano y temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, con poca oscilación anual entre las temperaturas medias del mes más frío y del mes más caliente (entre 5 °C y 7 °C), con precipitación abundante en la estación lluviosa (700 a 1100 mm) y lluvia escasa en invierno (menor de 5%) (CONABIO, 1998).

Censo

Antes de realizar el experimento, durante marzo del 2021 se realizó un censo poblacional para determinar cuántos machos reproductivos eran susceptibles de ser grabados, encontrando un total de 27 machos adultos. Además, realicé un mapa de los territorios para establecer una estrategia de muestreo que impidiera grabar individuos vecinos el mismo día o en días consecutivos (fig. 4). Los machos no se anillaron, se reconocieron únicamente por el árbol donde cantaban en la madrugada, esta técnica de reconocimiento es adecuada para esta especie por su conducta territorial (Ríos-Chelén y cols. 2005, 2013, 2018).

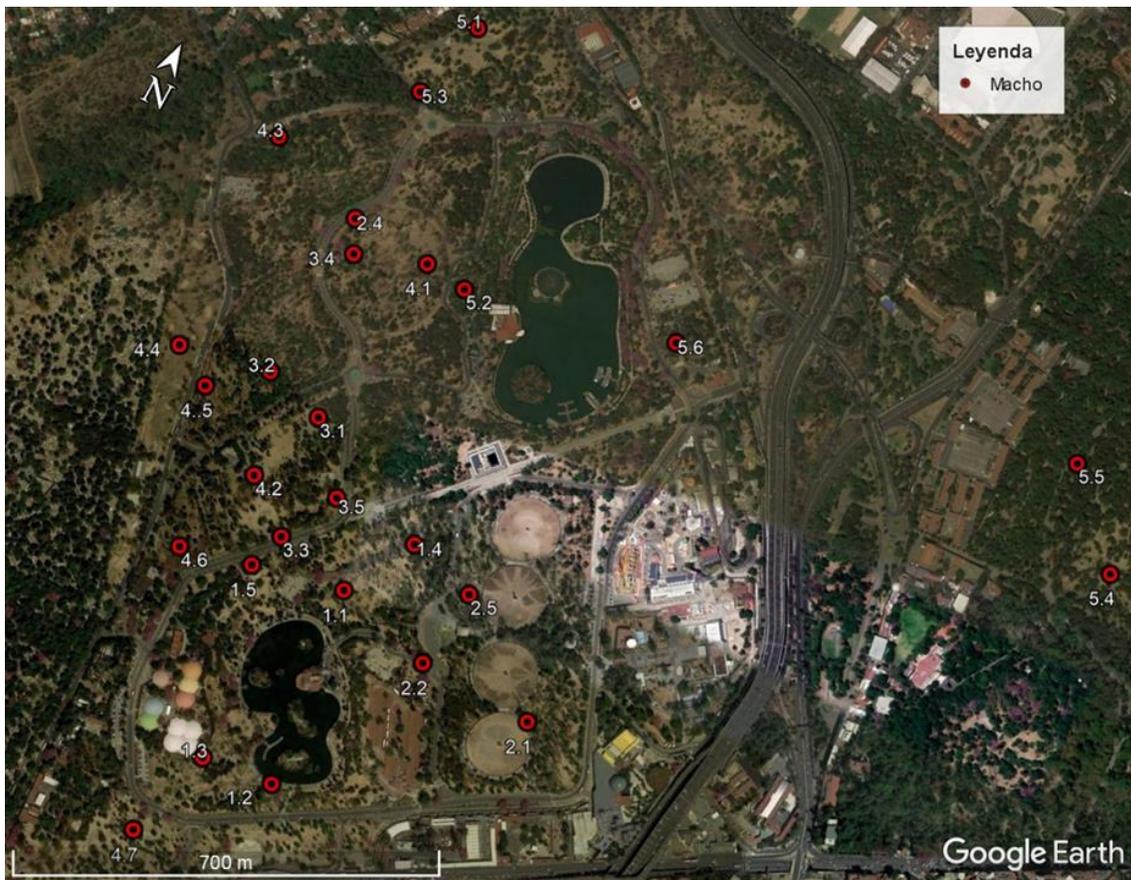


Figura 4.- Cardenalitos machos adultos dentro del bosque de Chapultepec. Su carácter territorial hace que se encuentren en la zona rodeando los puntos marcados. Cada punto rojo representa un macho distinto y el número indica el ID del playback que se le aplicó.

Preparación de estímulo experimental

Se tomaron 5 perfiles de ruido de aproximadamente 10 min de duración en avenidas circundantes al parque de Chapultepec. Los perfiles de ruido se realizaron en los siguientes puntos: 1) Avenida Constituyentes (19°24'33.12"N, 99°11'54.14"O), 2) Avenida de los compositores (19°24'31.09"N, 99°11'58.93"O), 3) Avenida Observatorio (19°24'13.40"N, 99°11'38.41"O), 4) Boulevard Adolfo López Mateos (19°24'16.81"N, 99°11'32.92"O), 5) Calle Victoriano Zepeda (19°24'18.63"N, 99°11'34.85"O).

Dentro de cada perfil de ruido buscamos secciones de 7 segundos de duración, que fueran homogéneas, es decir que no hubiera picos de ruido como cláxones, silbidos u otros ruidos intermitentes. También consideramos que no hubiera presencia de sonidos producidos por

personas o animales, principalmente por otras aves, para que no afectara nuestro experimento. Una vez encontrados 7 segundos de ruido que cumplieran con nuestros criterios, fueron recortados y exportados en el programa Raven Pro V1.6. Se Obtuvieron un total de 28 estímulos diferentes, que fueron nombrados según el perfil de ruido de donde se obtuvieron y consecutivamente por cómo fueron obtenidos. A cada estímulo se le dio un tratamiento acústico en el programa Audacity v. 2.0.5, en el cual fueron normalizados a 0dB y se les dio un efecto de *fade in* (2s) y *fade out* (2s) para simular de manera más realista el paso de un automóvil.

Diseño experimental

Planteé un diseño experimental de medidas repetidas a un total de 27 machos. Cada uno fue grabado en tres momentos de manera consecutiva, en una misma grabación. Los momentos fueron los siguientes: a) primer grupo de canto antes de ruido urbano repentino ARUR (antes del estímulo), b) durante ruido urbano repentino DRUR (tratamiento experimental), el cual tuvo una duración de 7 segundos y se realizó mediante un *playback* enfocado a solapar el segundo grupo de canto y c) tercer grupo de canto, posterior a ruido urbano repentino PRUR (después del estímulo), en el cual ya no se reprodujo el estímulo (fig. 5).

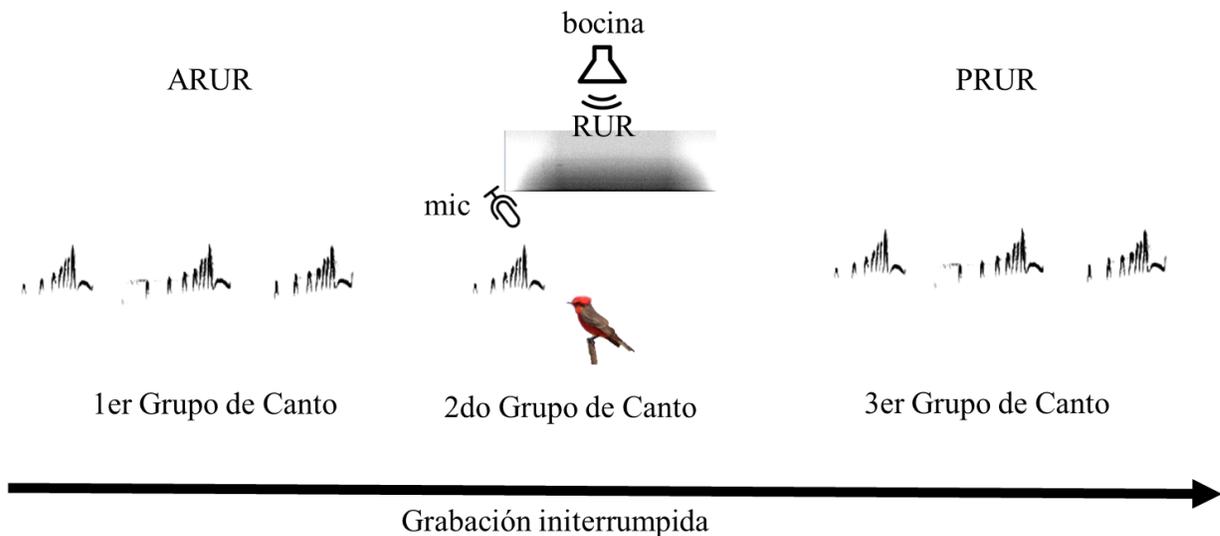


Figura 5.- Diseño experimental de medidas repetidas. Cada prueba consistió en la aplicación y grabación de 3 tratamientos consecutivos a cada uno de los machos. El micrófono se mantuvo grabando desde antes de iniciar el ARUR y se mantuvo encendido hasta terminar el PRUR. El RUR experimental solo se reprodujo durante el tratamiento experimental.

Para reproducir el estímulo experimental (RUR) utilizamos una Bocina Steren pre amplificada (BAF-1555BT 15" y 3,000 W PMPO) conectada vía bluetooth a un celular (Huawei, P30 Lite) que contenía los archivos de audio para reproducir. Los archivos de ruido para el tratamiento DRUR se calibraron en un rango de 74 a 81dB (A) medidos a una distancia aproximada de 10 m. Los cardenalitos en la segunda sección del bosque de Chapultepec están expuestos a estos niveles de ruido, ya que antes de cada prueba registramos el nivel de ruido en algunos territorios, registrando picos de ruido de hasta 85 dB.

Todas las pruebas se llevaron a cabo por las mismas dos personas, de lunes a viernes antes y durante el coro del amanecer (05:20-06:30 hrs.), cuando los mosqueros cardenales cantan en grupos de canto. Colocamos la bocina en el suelo, apuntándolo hacia el macho focal, a una distancia aproximada de 10 m. Una persona se posicionaba detrás de la bocina cuidando que la bocina estuviera encendida y con el volumen óptimo para cada archivo de sonido (calibrado previamente, ver arriba), atento con el celular para reproducir el *playback* inmediatamente después de que el macho iniciara el segundo grupo de canto. La otra persona, se mantenía delante y ligeramente a un lado de la bocina con la grabación abierta y sin pausar apuntando el micrófono (ver abajo) directamente al macho focal. Durante toda la prueba (tratamientos ADRUR, DRUR y PRUR), los cantos del individuo focal se grabaron con un micrófono tipo *shotgun* Sennheiser K6 / ME67 conectado a una grabadora digital Marantz (PMD660, frecuencia de muestreo de 44 kHz, precisión de 16 bits). En ocho de 27 machos (29.6%) el solapamiento del ruido experimental ocurrió en el primer canto; en 16 (59.3%) ocurrió en el segundo; en tres (11.1%) ocurrió en el tercero.

Para verificar que el tratamiento experimental aumentó el nivel de ruido respecto al ruido ambiental, medí el nivel de ruido producido por la bocina a la distancia aproximada a la cual grabamos al individuo de la prueba. Los niveles de ruido fueron significativamente más altos cuando reprodujimos nuestros archivos DRUR que antes y después del experimento (media \pm SE: Antes 55.25 ± 4.92 dB (A), DRUR 73.39 ± 3.65 dB (A), Después: 54.86 ± 4.56 dB (A), ANOVA de medidas repetidas (función ezANOVA en R): $F = 342.4$, $gl = 52$, $P < 0,001$; prueba post-hoc para comparaciones múltiples (función pairwise.t.test en R): DRUR vs ARUR y PRUR, $P < 0.05$; ARUR frente a PRUR, $P > 0.05$) (fig. 6)

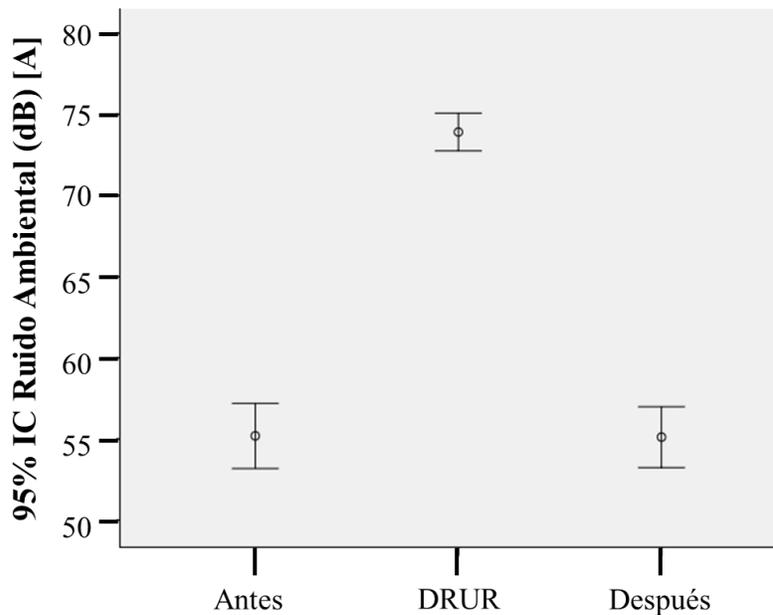


Figura 6.- Nivel de ruido antes, durante (DRUR) y después de realizar el experimento. El nivel de ruido aumento significativamente durante el tratamiento experimental DRUR (P<0.05).

Medición de ruido urbano y luz artificial nocturna

Antes y después de cada prueba medimos los niveles de ruido ambiental en el territorio del macho focal. En ambos casos los niveles de ruido se midieron cada 10 segundos durante dos minutos, utilizando un decibelímetro digital (Steren HER-403, Rango: 30-130 dB, resolución: 0.1 dB) (fig. 7 a). En todos los casos se promediaron las mediciones para cada territorio y se obtuvo un ruido ambiental promedio de cada territorio.

Las mediciones de intensidad de luz artificial en cada uno de los territorios se realizaron de forma asincrónica respecto a las grabaciones, ya que las mediciones de luz artificial nocturna se realizaron durante la fase de luna nueva, para que las mediciones fueran efectivamente una aproximación al nivel de luz artificial nocturna y no de luz nocturna en general (que incluye la luz lunar). Las mediciones se realizaron durante la noche del 10 de junio y las madrugadas del 11 de junio, 10 de julio y 9 de agosto del 2021. Se realizaron con el instrumento Unihedron Sky Quality Meter (SQM) (fig. 7 b), las unidades de lectura del instrumento son LQM-L mag/arcsec², decidimos usar el sistema básico internacional y convertir las mediciones a

candelas con la siguiente formula, obtenida de la página oficial del producto (<http://www.unihedron.com/projects/darksky/>): [valor en cd/m^2] = $10.8 \times 104 \times 10^{\wedge} (-0.4 * [\text{valor en mag/arcsec}^2])$).



Figura 7.- Dispositivos empleados para medir los niveles de contaminación acústica y lumínica en los territorios de *P. rubinus*. A) decibelímetro digital Stereon HER-403 y B) UniHedron Sky Quality Meter (SQM).

Análisis acústico

Visualizamos las grabaciones obtenidas en espectrogramas en Raven Pro, v. 1.6 (www.birds.cornell.edu/raven, ventana de Hann, superposición 50%, DFT: 512, resolución de frecuencia 86.1 Hz, resolución de tiempo 5.8 ms). Para evaluar si la presencia de RUR interrumpe el grupo de canto, conté el número de cantos por grupo, así como el número de elementos por cada canto. También, con ayuda del oscilograma medí la duración de cada grupo de canto (s), de la misma manera medí el espacio entre grupos de canto (s) para obtener la latencia. Todas las medidas fueron tomadas para los 27 machos del estudio, en los tres tratamientos.

En cuanto al segundo objetivo, para medir la recuperación del desempeño vocal consideré dos variables. La primera variable fue **“Proporción de recuperación del canto”**; para cada individuo dividí el número de cantos producidos en el segundo control (PRUR) entre el número de cantos producidos en el primer control (ARUR). Una proporción = 1 equivale a que el macho realizó el mismo número de cantos antes y después de experimentar RUR, < 1 a que redujo el número de cantos y > 1 a que aumentó el número de cantos. La segunda variable fue **“Proporción de latencia”**; la obtuve dividiendo la “latencia 2” (tiempo transcurrido entre el

final del segundo grupo de canto y el inicio del tercero) entre la “latencia 1” (tiempo transcurrido entre el final del primer grupo de canto y el inicio del segundo). Una proporción = 1 equivale a que el macho tardo el mismo tiempo en volver a cantar antes y después de RUR, < 1 a que tardo menos tiempo en volver a cantar después de RUR y > 1 a que tardo más tiempo en volver a cantar después de RUR.

Análisis estadístico

Para evaluar si el RUR interrumpe el grupo de canto, analizamos nuestros datos con estimaciones de ecuación generalizadas (GEE), un tipo de Modelo Lineal Generalizado que permite el uso de medidas repetidas (Liang y Zeger 1986), y que no hace suposiciones a priori sobre la distribución de datos (Pan 2001). Usamos GEE para evaluar los posibles vínculos entre nuestras variables independientes (es decir, tratamiento, luz artificial nocturna y ruido ambiental) y nuestras variables dependientes. En los 27 machos se grabaron sus cantos en tres tratamientos distintos (ARUR, DRUR y PRUR; ver arriba diseño experimental), por lo que declaramos al individuo como un factor repetido. Elegimos el modelo con menor valor de cuasi-verosimilitud bajo el criterio del modelo de independencia (QICC). Asumimos una distribución normal con enlace identidad. Los análisis fueron realizados en el software IBM SPSS Statistics ver. 25.

Para determinar si el ruido ambiental y la luz artificial nocturna intervienen en la recuperación del desempeño del canto después de experimentar RUR se realizaron regresiones lineales múltiples. Considerando como variables dependientes la proporción de recuperación del canto y proporción de latencia, y como variables independientes el ruido ambiental (RA) y la luz artificial nocturna (LAN). Primero se confirmó la normalidad en la distribución de los residuales mediante la prueba de Shapiro-Wilk. La variable “proporción de latencia” no presentó distribución normal (0.72, $gl=26$, $P<0.05$), por lo que la variable fue transformada con logaritmo base 10, de esta manera sus residuales sí presentaron normalidad, \log Proporción de latencia (0.97, $gl=26$, $P>0.05$). Los residuales de la otra variable dependiente “proporción de recuperación del canto” fueron normales sin necesidad de transformar los datos (0.96, $gl=26$, $P>0.05$).

Resultados

Interrupción del grupo de canto por RUR

Las variables dependientes (duración del grupo de canto y número de cantos por grupo) se correlacionaron positivamente (Correlación de Spearman: $n=27$, $r=0.672$, $P<0.05$) (fig. 8), por lo que los análisis se ejecutaron usando solo la variable dependiente “duración del grupo de canto”. Mientras que, en las variables independientes la luz artificial nocturna y el ruido ambiental no se correlacionaron (Correlación de Pearson: $n=27$, $r=0.104$, $P=0.606$) (fig. 9). La variación en la duración del grupo de canto se asoció negativamente con el tratamiento, específicamente con la presencia de RUR, el ruido ambiental tuvo una tendencia positiva no significativa, por lo que no se descarta, pero no es concluyente que tenga un efecto (Tabla 1; Tabla 2). Los machos cantaron grupos de canto más cortos durante el tratamiento experimental (DRUR) que durante los tratamientos control (ARUR y PRUR) (prueba post-hoc para comparaciones múltiples: DRUR vs ARUR y PRUR, $P<0.05$; ARUR vs a PRUR, $P>0.05$) (Fig. 10). La variación en la duración del grupo de canto no se asocia significativamente con el nivel de ruido ambiental (fig. 11) ni con el nivel de la luz artificial nocturna (fig. 12) (Tabla 1, 2).

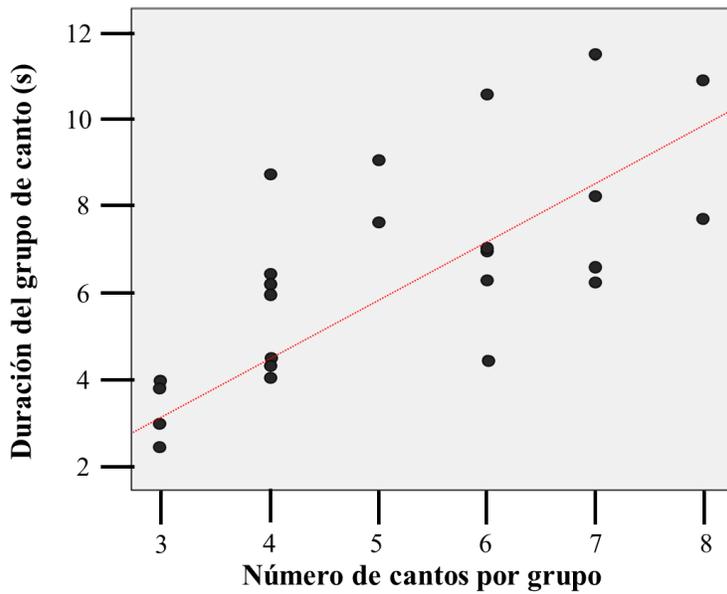


Figura 8.- La duración del grupo de canto tiene una fuerte correlación positiva con el número de cantos por grupo ($r=0.86$, $P<0.05$).

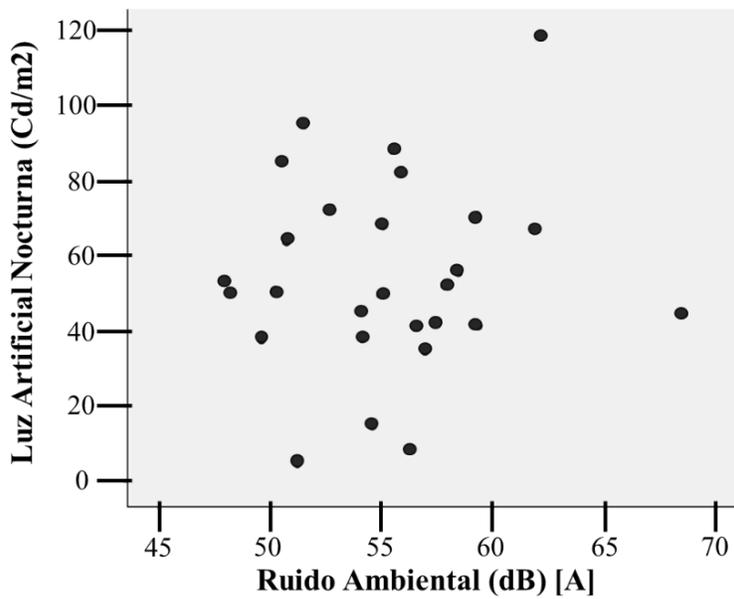


Figura 9.- La Luz Artificial Nocturna y el Ruido Ambiental presente en cada territorio no se correlacionaron ($r=0.104$, $P>0.05$).

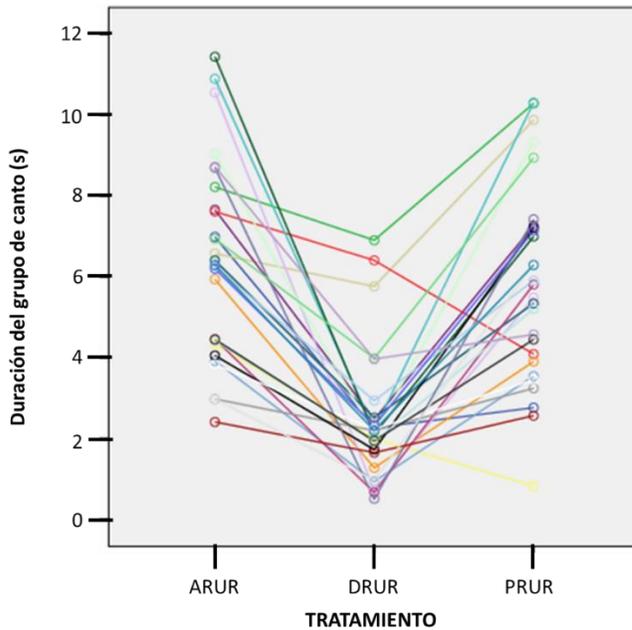


Figura 10.- La duración del grupo de canto fue menor durante el tratamiento experimental donde los machos fueron expuestos a ruido urbano repentino (DRUR) que antes (ARUR) y después (PRUR) de DRUR. Cada línea que conecta tres puntos representa a un individuo.

Tabla 1.- Efectos del modelo a partir de ecuaciones de estimación generalizadas. Variable dependiente, duración del grupo de canto. Grados de libertad 1 en todos los parámetros excepto tratamiento con 2.

Modelos alternativos	Parámetro	Wald's X^2	P	QICC
1 Intersección + Tratamiento + RA	Intersección	.153	.696	378.444
	Tratamiento	72.733	.000	
	RA	3.019	.082	
2 Intersección + Tratamiento + RA + LAN	Intersección	.185	.667	378.735
	Tratamiento	72.733	.000	
	RA	3.095	.079	
	LAN	.217	.641	
3 Intersección + Tratamiento + LAN	Intersección	35.324	.000	397.10
	Tratamiento	72.733	.000	
	LAN	.291	.590	
4 Intersección + Tratamiento	Intersección	230.670	.000	398.927
	Tratamiento	72.733	.000	

Tabla 2.- Estimaciones de parámetros en los modelos representados en la Tabla 1.

Modelo	Parámetro	β	95% Wald's confidence interval	<i>P</i>
1	Tratamiento=ARU	.508	-.381 - 1.397	.262
	Tratamiento=DRU	-3.393	-4.313 - -2.474	.000
	Tratamiento=PRU	0 ^a		
2	RA	.114	-.015 - .244	.082
	Tratamiento=ARU	.508	-.381 - 1.397	.262
	Tratamiento=DRU	-3.393	-4.313 - -2.474	.000
	Tratamiento=PRU	0 ^a		
3	LAN	.006	-.018 - .030	.641
	Tratamiento=ARU	.508	-.381 - 1.397	.262
	Tratamiento=DRU	-3.393	-4.313 - -2.474	.000
	Tratamiento=PRU	0 ^a		
	LAN	.008	-.021 - .036	.590
4	Tratamiento=ARU	.508	-.381 - 1.397	.262
	Tratamiento=DRU	-3.393	-4.313 - -2.474	.000
	Tratamiento=PRU	0 ^a		

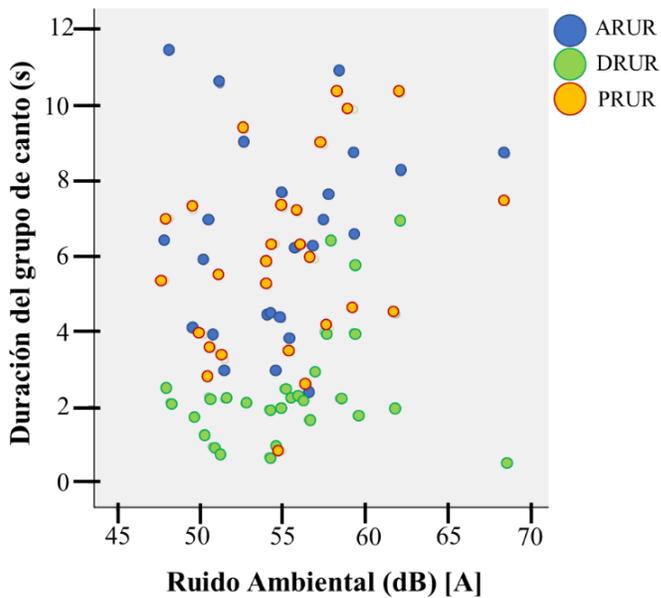


Figura 11.- La duración del grupo de canto no se relaciona con el nivel de ruido presente en cada territorio. Los puntos azules corresponden al tratamiento ARUR, los verdes a DRUR y los amarillos al PRUR.

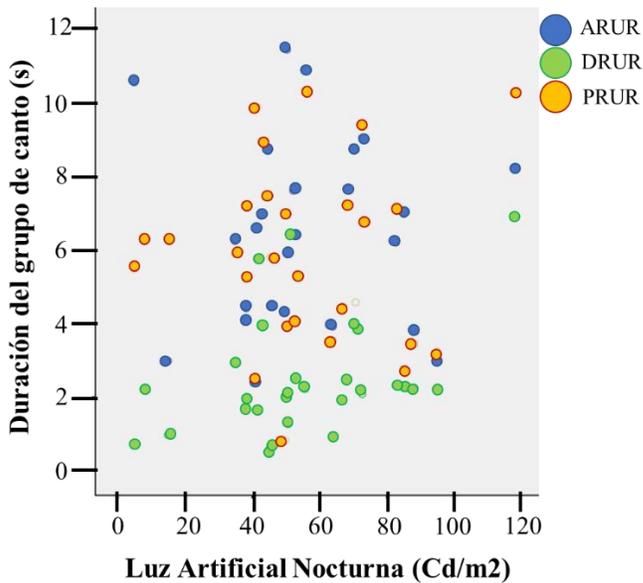


Figura 12.- La duración del grupo de canto no se relaciona con el nivel de luz artificial nocturna presente en cada territorio. Los puntos azules corresponden al tratamiento ARUR, los verdes a DRUR y los grises al PRUR.

Efecto del ruido ambiental y LAN en la recuperación del desempeño del canto

Se ajustaron dos modelos de regresión lineal múltiple para predecir un posible efecto del RA y LAN sobre las variables dependientes, proporción de recuperación del canto y proporción de recuperación de latencia. Ambas variables dependientes no se correlacionaron entre sí (Correlación de Pearson: $n=27$, $r=-0.015$, $P>0.05$) (fig. 13). En el caso de la proporción de recuperación del canto, la ecuación de la regresión no fue estadísticamente significativa ($F_{2,24}=0.259$, $P=0.774$). Además, el valor de la R^2 fue de .021, lo que indica que solamente el 2.1% del cambio en la proporción de recuperación es explicada por el modelo que contiene al RA y la LAN. Concluyendo que la recuperación del desempeño del canto no depende de los niveles de RA (fig. 14) ni de LAN (fig. 15) presentes en cada territorio. La ecuación de regresión fue $Y=0.450+(.010(RA))+(-.001(LAN))$, donde la proporción de recuperación aumento .010 por cada unidad de dB en el RA y disminuyo .001 por cada unidad de LAN.

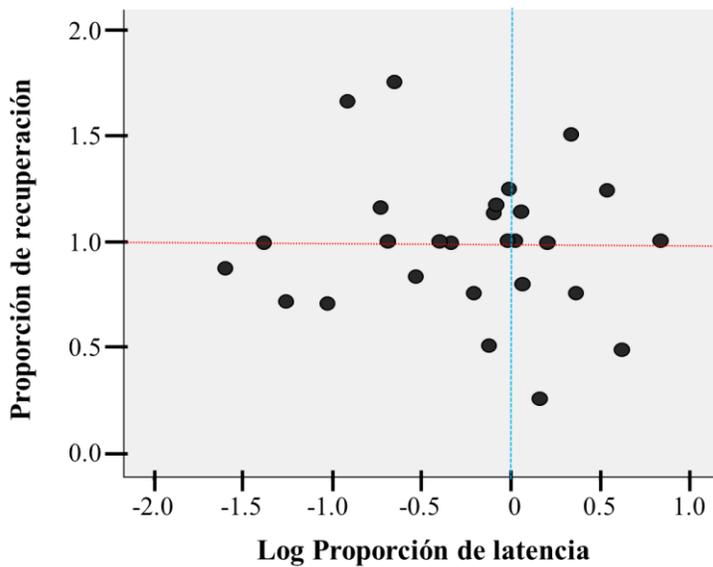


Figura 13.- La proporción de recuperación no se correlaciona con la proporción de latencia (\log_{10}). La línea punteada roja representa la proporción de recuperación 1, punto donde realizaron el mismo número de cantos antes y después de RUR. La línea punteada azul representa la proporción de latencia 0 (\log_{10}) que representa el 1, el punto donde la latencia de DRUR a PRUR fue la misma que de ARUR a DRUR. ($r = -0.015$, $P > 0.05$).

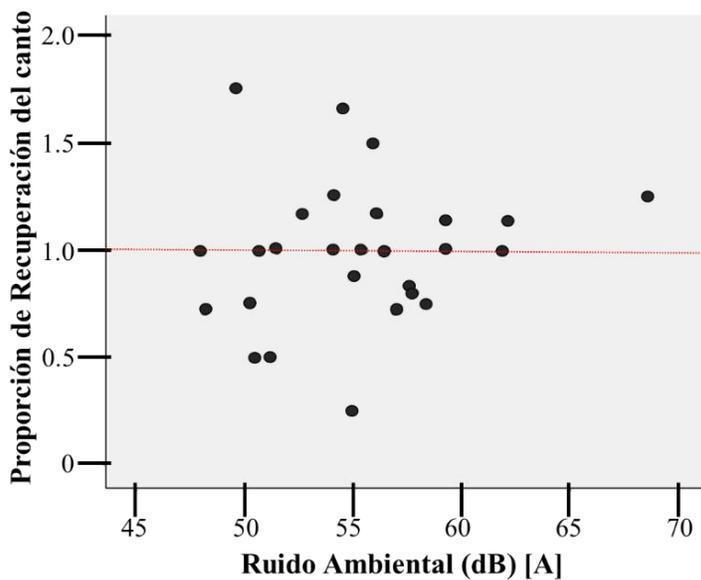


Figura 14.- La proporción de recuperación del canto, no depende del ruido ambiental presente en cada territorio. La línea roja representa una proporción= 1 equivale a que el macho realizó el mismo número de cantos antes y después de experimentar RUR, < 1 a que redujo el número de cantos y > 1 a que aumentó el número de cantos.

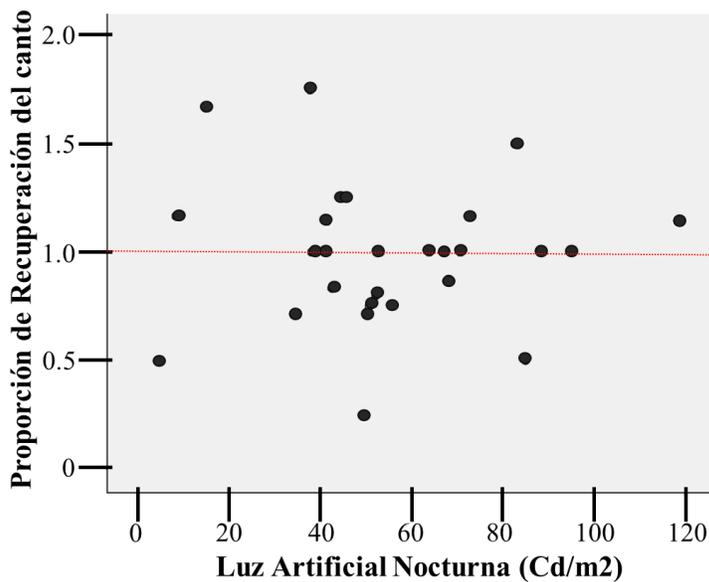


Figura 15.- La proporción de recuperación del canto, no depende del nivel de luz artificial nocturna presente en cada territorio. La línea roja representa una proporción= 1 equivale a que el macho realizó el mismo número de cantos antes y después de experimentar RUR, < 1 a que redujo el número de cantos y > 1 a que aumentó el número de cantos.

Efecto del ruido ambiental y LAN en la recuperación de latencia

En el caso de la proporción de recuperación de latencia, la ecuación de la regresión tampoco fue estadísticamente significativa ($F_{(2,24)}=0.675$, $P= .519$). El valor de la $R^2=$ fue de .053, lo que indica que solamente el 5.3% del cambio en la proporción de recuperación es explicada por el modelo que contiene al RA (fig. 16) y la LAN (fig. 17). La ecuación de regresión fue de $y=-1.689+(.023(RA)) +(-.003(LAN))$, donde la proporción de recuperación de latencia aumenta .023 unidades por cada unidad de dB y disminuye .003 unidades por cada unidad de LAN.

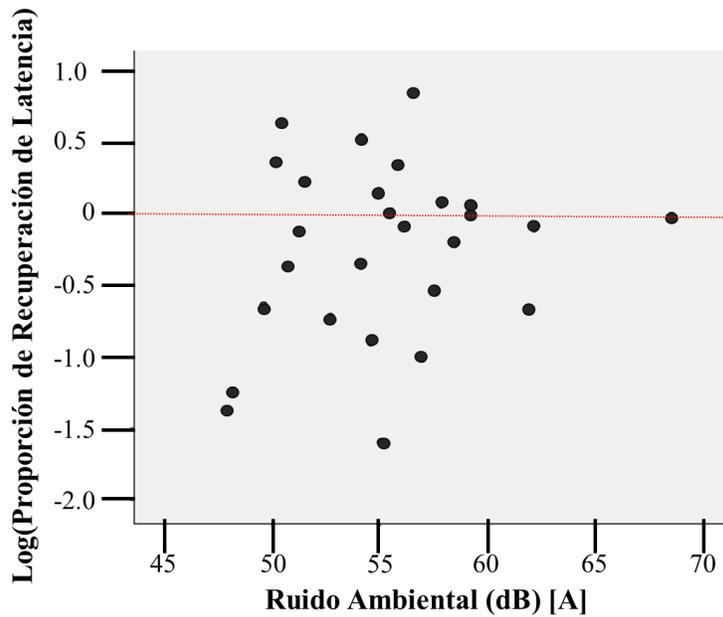


Figura 16.- La proporción de recuperación de latencia no depende del ruido ambiental presente en cada territorio. La línea roja representa una proporción= 1 equivale a que el macho realizó el mismo número de cantos antes y después de experimentar RUR, < 1 a que redujo el número de cantos y > 1 a que aumentó el número de cantos.

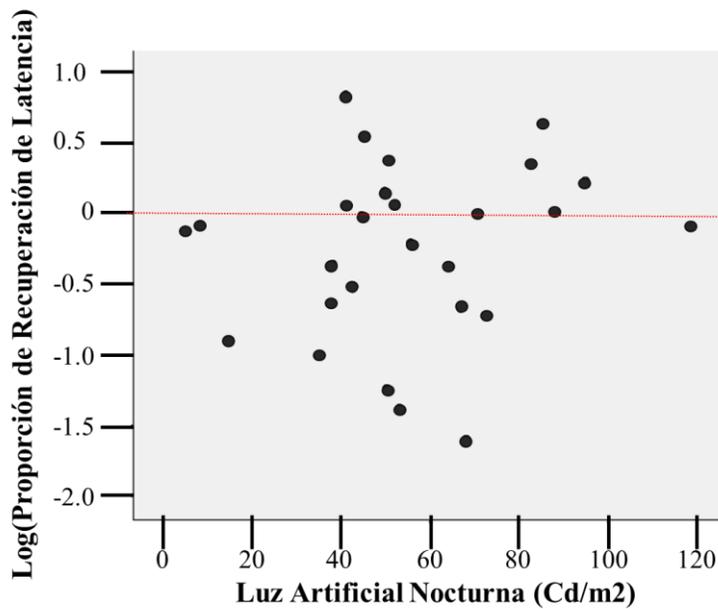


Figura 17.- La proporción de recuperación de latencia no depende del nivel de luz artificial nocturna presente en cada territorio. La línea roja representa una proporción= 1 equivale a que el macho realizó el mismo número de cantos antes y después de experimentar RUR, < 1 a que redujo el número de cantos y > 1 a que aumentó el número de cantos.

Discusión

Los resultados de este trabajo muestran que ante RUR el cardenalito interrumpe el grupo de canto -deja de cantar- (fig. 18). Lo anterior tiene coherencia con lo descrito hasta ahora en esta especie, que al parecer no es capaz de realizar modificaciones en los parámetros de frecuencia para sobreponerse al ruido urbano (Ríos-Chelén y cols. 2018), pero sí pueden realizar modificaciones temporales; entre ellas, realizar cantos más largos en territorios más ruidosos (Ríos-Chelén y cols. 2013), cambiar la hora a la que cantan, cantando más temprano en lugares con alto nivel de urbanización (Sánchez-González y cols. 2021) y la que ahora proponemos, interrumpir el grupo de canto en presencia de RUR.

Interrumpir el grupo de canto en presencia de RUR podría ser una estrategia específica para hacer frente al ruido y persistir en condiciones acústicamente desafiantes en aquellas especies con escasa flexibilidad vocal en la frecuencia del canto. Además, esta interrupción podría ser una respuesta adaptativa anterior a la existencia del ruido urbano, se sabe que varias especies cambian el ritmo vocal en relación con otros sonidos bióticos (Brumm y Zollinger, 2013). Por ejemplo, un primate, el tití cabeciblanco (*Saguinus oedipus*) modifica la duración, el tiempo y la amplitud de sus llamados para evitar interferencias acústicas con señales de ruido repentinas (Egnor y cols. 2007). Sin embargo, esta estrategia no está presente en todas las aves, en el reyezuelo euroasiático (*Troglodytes troglodytes*) los machos cantaron de forma continua a pesar de las fluctuaciones de RU donde se presentaba señales de ruido repentino experimental en forma de ruido blanco (Yang y Slabbekoorn, 2014); mientras que, en otro estudio de Proppe y Finch (2017) solo cuatro de las 19 especies estudiadas alteraron sus ritmos vocales para vocalizar entre los espacios de silencios en el ruido.

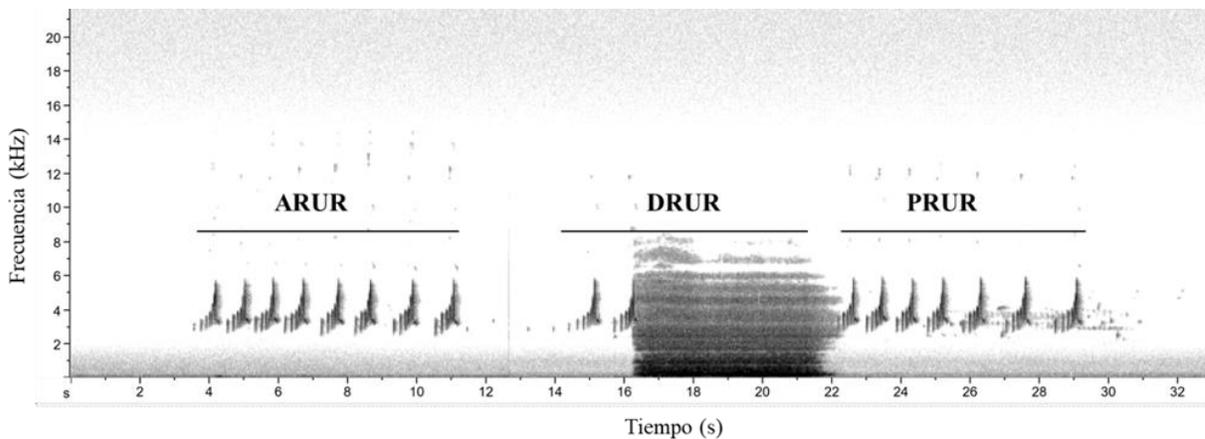


Figura 18.- Espectrogramas obtenidos de la grabación de uno de los machos del experimento. Se observa la interrupción del grupo de canto durante el tratamiento experimental (DRUR), mientras que antes del experimento (ARUR) y después del experimento (PRUR), cantó prácticamente igual. Esta respuesta fue común y se observó en la mayoría de las pruebas.

En el caso de nuestra especie de estudio se ha discutido si el ruido urbano enmascara el canto, ya que los cantos del cardenalito teóricamente no deberían ser enmascarados en gran medida, pues tienen un tono relativamente alto (frecuencia mínima media del canto: 2923 Hz (Ríos-Chelén y cols. 2013, 2018)) (fig. 1); sin embargo, el RUR experimental que hemos usado rebasa los 3000 Hz y enmascara hasta cierto punto los cantos de esta ave (fig. 19). Esto abre la pregunta de si los cardenalitos interrumpen su grupo de canto ante un aumento súbito de ruido debido a que este enmascara parte de las frecuencias del canto (en cuyo caso la interrupción del canto podría ser una estrategia para hacer más eficiente la comunicación en condiciones de ruido) o si dejan de cantar simplemente porque el estímulo sonoro es un perturbador de la conducta, independiente de una disminución en la eficiencia de transmisión del canto.

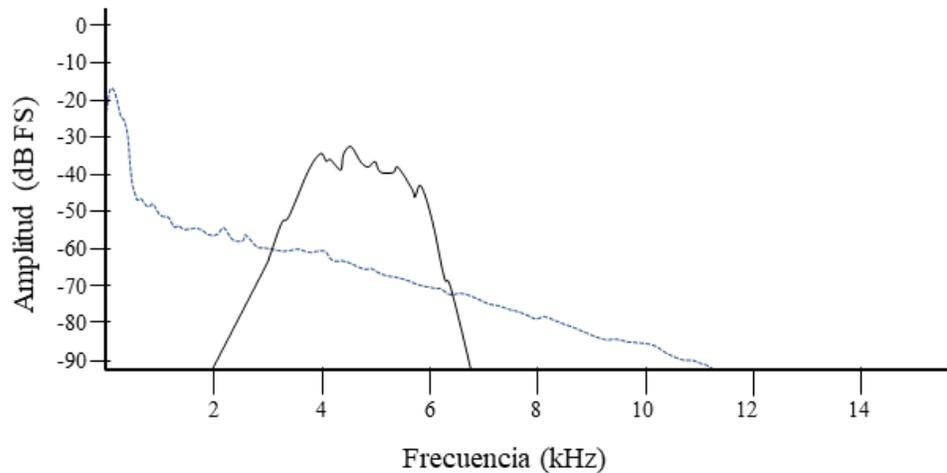


Figura 19.- Espectro de poder del solapamiento de nuestro estímulo de RUR con el canto del cardenalito. La línea negra continua representa el canto del cardenalito, mientras que la línea azul punteada representa la simulación de RUR.

La plasticidad vocal en suboscinos cuyo canto es innato (Kroodsma, 1984), se ha relacionado con cambios en la hora del inicio del amanecer (Sánchez-González y cols. 2021) a interacciones sociales (Araya-Ajoy y cols. 2009), entre otros. Solo Gentry y cols. (2018) han atribuido los cambios inmediatos en la tonalidad del canto del pewee de madera oriental (*Contopus virens*) con las fluctuaciones de ruido urbano, aunque su aproximación fue correlativa y no experimental. En nuestro caso, la interrupción del grupo de canto es la primera “estrategia” confirmada de manera experimental en un suboscino que muestra flexibilidad vocal para lidiar con ruido urbano; sin embargo, es imperativo determinar si se trata de una conducta que aumenta la probabilidad de detección o más bien de una respuesta conductual a un factor estresante.

Las implicaciones de interrumpir el grupo de canto podrían ser muy importantes, sobre todo en la interacción macho-macho. Sabemos por lo reportado por Rivera-Cáceres y cols. (2011) que los machos discriminan diferentes tamaños de grupo y responden más fuertes (con más llamados) ante grupos grandes que pequeños, por lo que el tamaño del grupo de canto podría ser una señal de la calidad individual o señalar la habilidad competitiva; ambas ideas requieren investigación. Una constante interrupción del grupo de canto podría disminuir la dominancia o territorio de un macho, ya que, otros machos podrían interpretar estos grupos de canto cortos o interrumpidos como un macho poco competitivo, aunque esto deberá ser probado más adelante.

Se esperaba que la recuperación del desempeño vocal dependiera de la luz artificial nocturna [LAN], ruido ambiental [RA] (o ambas). Encontramos que la recuperación del desempeño, medida como proporción de recuperación del canto y proporción de latencia, no depende de ninguna de las dos variables explicativas consideradas. Sospechamos que otras variables no consideradas podrían explicar dichas diferencias. Por ejemplo, se ha demostrado que esta especie presenta distintas tasas de canto según la fase lunar, aumentando la tasa del canto y cantando con más elementos durante las noches de luna llena en comparación con las noches de luna nueva (Nakamura-García y Ríos-Chelén, 2021). También, el número de vecinos (Ríos Chelén y cols. 2005) y la presencia de intrusos (Rivera-Cáceres y cols. 2011) pueden afectar la conducta vocal. La presencia de personas u otros organismos durante las pruebas, la humedad y temperatura, son variables que no han sido evaluadas en esta especie, pero se sabe que algunas de ellas pueden tener efecto en la actividad vocal de otras especies de aves (Francis y Blickley, 2012; Ortega, 2012). Estas y otras variables deberán evaluarse en futuros experimentos ahora que se sabe que sí hay un efecto del RUR.

Conclusiones

Los cardenalitos del bosque de Chapultepec se han habituado al ruido urbano repentino, ante el cuál interrumpen de manera abrupta el grupo de canto, pero se recuperan inmediatamente, regresando a su estado basal una vez que este desaparece. No encontramos evidencia de que dicha recuperación dependiera del RU o la LAN presentes en cada territorio. Este no es el primer trabajo que aborda experimentalmente el impacto del ruido urbano en la flexibilidad vocal de un suboscino (Ríos-Chelén y cols. 2018), pero sí es el primer trabajo experimental que busca evaluar el efecto del RUR en la conducta vocal de un suboscino. El grupo de canto y el RUR, o ruido intermitente, son aspectos que rara vez se toman en cuenta en los estudios del efecto de ruido urbano en aves. El RUR es un estímulo común y abundante en zonas urbanas a las que muchos organismos están expuestos; es también un estímulo que, a medida que las ciudades se siguen expandiendo, probablemente seguirá aumentando. Entender las consecuencias de este será prioritario. Alentamos a los investigadores a considerar el RUR en estudios futuros.

Perspectivas

El siguiente paso en el estudio del efecto del ruido urbano repentino en los cardenalitos será responder si la conducta de interrumpir el grupo de canto se debe a que este ruido enmascara parte de las frecuencias del canto o si dejan de cantar simplemente porque el estímulo sonoro es un perturbador de la conducta. Este experimento podría realizarse repitiendo nuestra metodología, pero usando un estímulo sintético que no solape de ninguna manera las frecuencias del canto del cardenalito (<2 KHz).

Las investigaciones futuras deberán tomar en cuenta una mayor cantidad de variables como la temperatura, la fase lunar, el número de vecinos y distancia a la carretera, ya que, en nuestro caso, la luz artificial nocturna y el ruido urbano ambiental no explicaron el porqué de las diferencias en la proporción de recuperación del desempeño vocal.

En este sentido, también podrían realizarse capturas de los organismos en futuros estudios para evaluar si los niveles de melatonina u otras hormonas asociadas a la actividad vocal son las causantes de las diferencias mencionadas en el párrafo anterior.

Finalmente, la metodología experimental planteada resultó exitosa en cuanto a la grabación de los organismos, por lo que creemos que puede ser replicada para otras aves que canten en grupos de canto, para lo cual solo deberían tomar las precauciones o cambios necesarios, como, reproducir el playback a una amplitud adecuada (coherente con el sitio de estudio), grabar durante momentos de alta actividad vocal y conocer el comportamiento social del ave para saber si la presencia de humanos podría estar modificando el canto.

Literatura citada

- Amador, A., Goller, F., & Mindlin, G. B. (2008). Frequency modulation during song in a suboscine does not require vocal muscles. *Journal of Neurophysiology*, *99*(5), 2383–2389. <https://doi.org/10.1152/jn.01002.2007>
- Araya-Ajoy, Y. men, Chaves-Campos, J., Kalko, E. K. V., & DeWoody, J. A. (2009). High-pitched notes during vocal contests signal genetic diversity in ocellated antbirds. *PLoS ONE*, *4*(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008137>
- Arroyo-Solís, A., Castillo, J. M., Figueroa, E., López-Sánchez, J. L., & Slabbekoorn, H. (2013). Experimental evidence for an impact of anthropogenic noise on dawn chorus timing in urban birds. *Journal of Avian Biology*, *44*(3), 288–296. <https://doi.org/10.1111/j.1600-048X.2012.05796.x>
- Baptista, L. F., & Gaunt, S. L. L. (1994). Advances in studies of avian sound communication. *Condor*, *96*(3), 817–830. <https://doi.org/10.2307/1369489>
- Baptista, Luis F., & Martínez Gómez, J. E. (2002). La investigación bioacústica de las aves del Archipiélago de Revillagigedo: un reporte de avance. *Huitzil. Revista Mexicana de Ornitología.*, *3*(2), 33–41. <https://doi.org/10.28947/hrmo.2002.3.2.14>
- Baxter, C. (2019). Bird Species. In *Birds of Kangaroo Island*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvpb3vwx.12>
- Benavides Meza, H. M., & Fernández Grandizo, D. Y. (2012). Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera Bosques*, *18*(2), 51–71. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.182352>
- Bermúdez-Cuamatzin, E., Ríos-Chelén, A. A., Gil, D., & Garcia, C. M. (2011). Experimental evidence for real-time song frequency shift in response to urban noise in a passerine bird. *Biology Letters*, *7*(1), 36–38. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2010.0437>
- Bermúdez-Cuamatzin, E., Ríos-Chelén, A. A., Gil, D., & Garcia, C. M. Í. (2009). Strategies of song adaptation to urban noise in the house finch: Syllable pitch plasticity or differential syllable use? *Behaviour*, *146*(9), 1269–1286. <https://doi.org/10.1163/156853909X423104>

- Bradbury, J. W., & Vehrencamp, S. L. (2011). *Principles of animal communication* (2nd ed.). Sinauer Associates.
- Brumm, H., & Slater, P. J. B. (2006). Ambient noise , motor fatigue , and serial redundancy in chaffinch song. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, *60*, 475–481. <https://doi.org/10.1007/s00265-006-0188-y>
- Brumm, H., & Zollinger, A. (2011). The evolution of the Lombard effect: 100 years of psychoacoustic research. *Behaviour*, *148*(11–13), 1173–1198. <https://doi.org/10.1163/000579511X605759>
- Brumm, H., & Zollinger, S. A. (2013). Avian Vocal Production in Noise. In H. Brumm (Ed.), *Animal Communication and Noise* (2nd ed., pp. 187–227). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41494-7_7
- Cartwright, L. A., Taylor, D. R., Wilson, D. R., & Chow-Fraser, P. (2014). Urban noise affects song structure and daily patterns of song production in Red-winged Blackbirds (*Agelaius phoeniceus*). *Urban Ecosystems*, *17*(2), 561–572. <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0318-z>
- Chen, Z., & Wiens, J. J. (2020). The origins of acoustic communication in vertebrates. *Nature Communications*, *11*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14356-3>
- Díaz, M., Parra, A., & Gallardo, C. (2011). Serins respond to anthropogenic noise by increasing vocal activity. *Beha*, *October 2010*, 332–336. <https://doi.org/10.1093/beheco/arq210>
- Dominoni, D. M., Helm, B., Lehmann, M., Dowse, H. B., & Partecke, J. (2013). Clocks for the city: Circadian differences between forest and city songbirds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *280*(1763). <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0593>
- Dominoni, Davide M., Carmona-Wagner, E. O., Hofmann, M., Kranstauber, B., & Partecke, J. (2014). Individual-based measurements of light intensity provide new insights into the effects of artificial light at night on daily rhythms of urban-dwelling songbirds. *Journal of Animal Ecology*, *83*(3), 681–692. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12150>

- Dominoni, Davide M., Partecke, J., & Partecke, J. (2015). Does light pollution alter daylength? A test using light loggers on free-ranging european blackbirds (*Turdus merula*). *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667). <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0118>
- Egnor, S. E. R., Wickelgren, J. G., & Hauser, M. D. (2007). Tracking silence: Adjusting vocal production to avoid acoustic interference. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 193(4), 477–483. <https://doi.org/10.1007/s00359-006-0205-7>
- Ellison, K., Wolf, B. O., & Jones, S. L. (2009). *Vermilion flycatcher (Pyrocephalus rubinus)*. Birds of North America Online. Cornell Lab of Ornithology. bna.birds.cornell.edu/bna/species/484
- Francis, C. D., & Blickley, J. L. (2012). Introduction: Research and perspectives on the study of anthropogenic noise and birds. *Ornithological Monographs*, 74(1), 1–5. <https://doi.org/10.1525/om.2012.74.1.1>
- Fuxjager, M. J., Heston, J. B., & Schlinger, B. A. (2014). Peripheral androgen action helps modulate vocal production in a suboscine passerine. *Auk*, 131(3), 327–334. <https://doi.org/10.1642/AUK-13-252.1>
- Gahr, M. (2000). Neural Song Control System of Hummingbirds: Comparison to Swifts, Vocal Learning (Songbirds) and Nonlearning (Suboscines) Passerines, and Vocal Learning (Budgerigars) and Nonlearning (Dove, Owl, Gull, Quail, Chicken) Nonpasserines. *The Journal of Comparative Neurology*, 426(June), 182–196. [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1096-9861\(20001016\)426:2%3C182::AID-CNE2%3E3.0.CO;2-M/full](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1096-9861(20001016)426:2%3C182::AID-CNE2%3E3.0.CO;2-M/full)
- Gentry, K. E., McKenna, M. F., & Luther, D. A. (2018). Evidence of suboscine song plasticity in response to traffic noise fluctuations and temporary road closures. *Bioacoustics*, 27(2), 165–181. <https://doi.org/10.1080/09524622.2017.1303645>
- Grimm, N. B., Foster, D., Groffman, P., Grove, J. M., Hopkinson, C. S., Nadelhoffer, K. J.,

- Pataki, D. E., & Peters, D. P. C. (2008). The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(5), 264–272. <https://doi.org/10.1890/070147>
- Gross, K., Pasinelli, G., & Kunc, H. P. (2010). Behavioral plasticity allows short-term adjustment to a novel environment. *American Naturalist*, 176(4), 456–464. <https://doi.org/10.1086/655428>
- Grubisic, M., Haim, A., Bhusal, P., Dominoni, D. M., Gabriel, K. M. A., Jechow, A., Kupprat, F., Lerner, A., Marchant, P., Riley, W., Stebelova, K., van Grunsven, R. H. A., Zeman, M., Zubidat, A. E., & Hölker, F. (2019). Light pollution, circadian photoreception, and melatonin in vertebrates. *Sustainability (Switzerland)*, 11(22). <https://doi.org/10.3390/su11226400>
- Habib, L., Bayne, E. M., & Boutin, S. (2007). Chronic industrial noise affects pairing success and age structure of ovenbirds *Seiurus aurocapilla*. *Journal of Applied Ecology*, 44(1), 176–184. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01234.x>
- Halfwerk, W., Holleman, L. J. M., Lessells, C. M., & Slabbekoorn, H. (2011). Negative impact of traffic noise on avian reproductive success. *Journal of Applied Ecology*, 48(1), 210–219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01914.x>
- Hanna, D., Blouin-Demers, G., Wilson, D. R., & Mennill, D. J. (2011). Anthropogenic noise affects song structure in red-winged blackbirds (*Agelaius phoeniceus*). *Journal of Experimental Biology*, 214(21), 3549–3556. <https://doi.org/10.1242/jeb.060194>
- Kerner, B. S., & Rehborn, H. (1996). Experimental properties of complexity in traffic flow. *Physical Review E*, 53(5), 4275–4278. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.53.R4275>
- Kroodsma, D. E. (1984). Songs of the Alder Flycatcher (*Empidonax alnorum*) and Willow Flycatcher (*Empidonax traillii*). *The Auk*, 101(1), 13–24.
- Lackey, M. A., Morrison, M. L., Loman, Z. G., Collier, B. A., & Wilkins, R. N. (2012). Experimental determination of the response of goldencheeked warblers (*Setophaga chrysoparia*) to road construction noise. *Ornithological Monographs*, 74(74), 91–100.

<https://doi.org/10.1525/om.2012.74.1.91>

- Laiolo, P. (2010). The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. *Biological Conservation*, 143(7), 1635–1645. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.03.025>
- Lovell, S. F., & Lein, M. R. (2013). Geographical variation in songs of a suboscine passerine, the Alder Flycatcher (*Empidonax alnorum*). *Wilson Journal of Ornithology*, 125(1), 15–23. <https://doi.org/10.1676/12-087.1>
- Luther, D., & Baptista, L. (2010). Urban noise and the cultural evolution of bird songs. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1680), 469–473. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.1571>
- MacGregor-Fors, I., Blanco-garcía, A., Carlos, A., Maya-elisararrás, E., Mirón, L., Morales-pérez, L., & Perdomo, H. (2011). Relación entre la presencia de luz artificial nocturna y la actividad del mosquero cardenal (*Pyrocephalus rubinus*). *El Canto Del Centzontle*, 2(1), 64–71.
- Nakamura-Garcia, M. T., & Ríos-Chelén, A. A. (2021). More than noise: light, moon phase, and singing behavior in a passerine. *Urban Ecosystems*, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01142-2>
- Nemeth, E., & Brumm, H. (2010). Birds and anthropogenic noise: Are urban songs adaptive? *American Naturalist*, 176(4), 465–475. <https://doi.org/10.1086/656275>
- Ortega, C. P. (2012). Effects of noise pollution on birds: A brief review of our knowledge. *Ornithological Monographs*, 74, 6–22. <https://doi.org/10.1525/om.2012.74.1.6>
- Proppe, D. S., & Finch, E. (2017). Vocalizing during gaps in anthropogenic noise is an uncommon trait for enhancing communication in songbirds. *Journal of Ecoacoustics*, 1(1), 1–1. <https://doi.org/10.22261/jea.tlp6d>
- Ridgely, R. S., & Tudor, G. (1994). *The birds of South America. Volume II. The suboscine passerines*. University of Texas.

- Ríos-Chelén, A. A., Salaberria, C., Barbosa, I., Macías Garcia, 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. *Journal of Evolutionary Biology*, *25*(11), 2171–2180. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2012.02597.x>
- Ríos-Chelén, Alejandro A., Lee, G. C., & Patricelli, G. L. (2015). Anthropogenic noise is associated with changes in acoustic but not visual signals in red-winged blackbirds. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, *69*(7), 1139–1151. <https://doi.org/10.1007/s00265-015-1928-7>
- Ríos-Chelén, Alejandro Ariel. (2004). Flight display Song of the Vermilion Flycatcher. *Wilson Bulletin*, *116*(4), 360–362.
- Ríos-Chelén, Alejandro Ariel, Cuatianquiz-Lima, C., Bautista, A., & Martínez-Gómez, M. (2018). No reliable evidence for immediate noise-induced song flexibility in a suboscine. *Urban Ecosystems*, *21*(1), 15–25. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0690-1>
- Ríos-Chelén, Alejandro Ariel, Quirós-Guerrero, E., Gil, D., & Macías Garcia, C. (2013). Dealing with urban noise: Vermilion flycatchers sing longer songs in noisier territories. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, *67*(1), 145–152. <https://doi.org/10.1007/s00265-012-1434-0>
- Ríos Chelén, A. A., Macías Garcia, C., & Riebel, K. (2005). Variation in the song of a suboscine, the vermilion flycatcher. *Behaviour*, *142*(8), 1121–1138.
- Rivera-Cáceres, K., Macías Garcia, C., Quirós-Guerrero, E., & Ríos-Chelén, A. A. (2011). An Interactive Playback Experiment Shows Song Bout Size Discrimination in the Suboscine Vermilion Flycatcher (*Pyrocephalus rubinus*). *Ethology*, *117*(12), 1120–1127. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.2011.01968.x>
- Sánchez-González, K., Aguirre-Obando, O. A., & Ríos-Chelén, A. A. (2021). Urbanization levels are associated with the start of the dawn chorus in vermilion flycatchers in Colombia. *Ethology Ecology and Evolution*, *33*(4), 377–393. <https://doi.org/10.1080/03949370.2020.1837963>

- Schroeder, J., Nakagawa, S., Cleasby, I. R., & Burke, T. (2012). Passerine birds breeding under chronic noise experience reduced fitness. *PLoS ONE*, 7(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039200>
- Slabbekoorn, H., & Ripmeester, E. A. P. (2008). Birdsong and anthropogenic noise: Implications and applications for conservation. *Molecular Ecology*, 17(1), 72–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03487.x>
- Smith, J. (1967). Displays of the Vermilion Flycatcher (*Pyrocephalus rubinus*). *The Condor*, 69(6), 601–605.
- Taylor, W., & Hanson, H. (1970). Observations on the Breeding Biology of the Vermilion Flycatcher in Arizona. *The Wilson Bulletin*, 82(3), 315–319. <https://doi.org/10.1080/00306525.1969.9634342>
- Touchton, J. M., Seddon, N., & Tobias, J. A. (2014). Captive rearing experiments confirm song development without learning in a tracheophone suboscine bird. *PLoS ONE*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095746>
- Tubaro, P. L. (1999). Bioacústica aplicada a la sistemática , conservación y manejo de poblaciones naturales de aves. *Etología*, 7, 19–32.
- Yang, X. J., & Slabbekoorn, H. (2014). Timing vocal behavior: Lack of temporal overlap avoidance to fluctuating noise levels in singing Eurasian wrens. *Behavioural Processes*, 108, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2014.10.002>