



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Centro Interdisciplinario de Investigación para el
Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca**

**Maestría en Ciencias en Conservación y
Aprovechamiento de Recursos Naturales
(Biodiversidad Del Neotrópico)**

**Propiedades de transmisión de los cantos y duetos del
Toquí Oaxaqueño (*Melospiza albicollis*) a lo largo de un
gradiente de urbanización**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA:

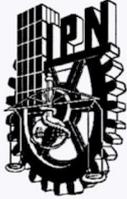
BIOL. EROS SAMUEL MALDONADO BRAVO

DIRECTOR:

DR. JOSÉ ROBERTO SOSA LÓPEZ

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México – Enero 2022

**Propiedades de transmisión de los cantos y duetos del
Toquí Oaxaqueño (*Melozona albicollis*) a lo largo de un
gradiente de Urbanización**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, de del

El Colegio de Profesores de Posgrado de en su Sesión
(Unidad Académica)

No celebrada el día del mes de conoció la solicitud presentada por el alumno:

Apellido Paterno:	Maldonado	Apellido Materno:	Bravo	Nombre (s):	Eros Samuel
-------------------	-----------	-------------------	-------	-------------	-------------

Número de registro:

del Programa Académico de Posgrado:

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Objetivo general del trabajo de tesis:

2.- Se designa como Director de Tesis al profesor:

Director: 2° Director:

No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director de Tesis

Dr. José Roberto Sosa López
Aspirante

2° Director de Tesis (en su caso)

Presidente del Colegio

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

Maldonado Bravo Eros Samuel



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Santa Cruz Xoxocotlán, Oax., siendo las 10:00 horas del día 4 del mes de enero del 2022 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado del: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, unidad Oaxaca (CIIDIR UNIDAD OAXACA) para examinar la tesis titulada:

"Propiedades de la transmisión de los cantos y duetos del Toquí Oaxaqueño (*Melospiza albicollis*) a lo largo de un gradiente de urbanización"

del alumno:

Apellido Paterno:	Maldonado	Apellido Materno:	Bravo	Nombre (s):	Eros Samuel
-------------------	-----------	-------------------	-------	-------------	-------------

Número de registro: B 1 9 0 1 6 6

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 1 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI** **NO** **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*
El 1% de similitud ocurre en la sección de métodos, específicamente relacionado a técnicas y terminos estandarizados.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

El diseño metodológico empleado en la tesis pone a prueba la hipótesis de adaptación acústica usando experimentos para estudiar cómo las propiedades de transmisión de las vocalizaciones (cantos y duetos) de una ave endémica de México son afectadas por el ambiente, en este caso variables asociadas a un gradiente de urbanización, cuyos resultados contribuyen a la teoría correspondiente.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Dr. José Roberto Sosa López
 Director de Tesis
 Nombre completo y firma

Dr. José Antonio Santos Moreno
 Nombre completo y firma

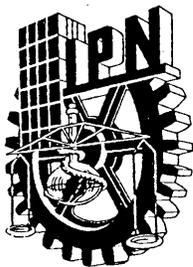
Dr. Aniceto Rodolfo Solano Gómez
 Nombre completo y firma

Dr. Francisco Castellanos León
 Nombre completo y firma

Dra. Edna Leticia González Bernal
 Nombre completo y firma

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez
 Nombre completo y firma

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES
 INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
 CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
 UNIDAD OAXACA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 22 del mes de Diciembre el año 2021, el que suscribe **Maldonado Bravo Eros Samuel** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales** con número de registro **B190166**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. José Roberto Sosa López** y cede los derechos del trabajo intitulado: **“Propiedades de la transmisión de los cantos y duetos del Toquí Oaxaqueño (*Melozone albicollis*) a lo largo de un gradiente de urbanización”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **emaldonadob1800@alumno.ipn.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Maldonado Bravo Eros Samuel

Nombre y firma



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA

Índice general

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
ANTECEDENTES	12
MÉTODOS	15
Área de estudio	15
Diseño del estímulo	17
Diseño experimental	18
Análisis de transmisión de sonido	19
Análisis estadístico	19
DISCUSIÓN	26
CONCLUSIONES	30
LITERATURA CITADA	31

Índice de cuadros

Cuadro 1. Parámetros de nivel de urbanización y municipios seleccionados.....	16
Cuadro 2. Resultados de los modelos lineales mixtos.....	25

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de los municipios seleccionados para el estudio.....	17
Figura 2. Variación de las cuatro medidas de transmisión de sonido a lo largo de un gradiente de urbanización.....	21
Figura 3. Variación de las cuatro medidas de transmisión de sonido con relación a la distancia del transecto a lo largo de un gradiente de urbanización.....	22
Figura 4. Variación de las cuatro medidas de transmisión de sonido con relación al tipo de señal a lo largo de un gradiente de urbanización.....	23
Figura 5. Gráficas de los modelos de interacción.....	24

RESUMEN

Las señales acústicas son una de las principales formas de comunicación que han evolucionado en el reino animal. A pesar de que algunos ambientes tienen condiciones naturales relativamente estables, otros tienen una variedad de presiones de origen antropogénico que promueven constantes cambios. En ambientes con heterogeneidad ambiental la transmisión y percepción del sonido se puede afectar entre emisores y receptores. En respuesta a los cambios en el ambiente, algunas especies modifican sus comportamientos vocales. Específicamente, las aves modifican sus señales acústicas adecuando la frecuencia espectral a la que se emiten las señales o cambiando el tiempo de vocalización. La hipótesis de adaptación acústica, sugiere que los rasgos acústicos de las vocalizaciones se adaptan al entorno para lograr una transmisión óptima. Esta hipótesis ha sido probada utilizando experimentos de transmisión de sonido y factores predictores como estructura del hábitat o ruido antropogénico. Aquí exploramos la influencia de un gradiente de urbanización en relación con el origen de las vocalizaciones y dos tipos de éstas en las propiedades de transmisión del sonido del canto del Toquí Oaxaqueño (*Melospiza albicollis*), un ave endémica de México. Realizamos un experimento de transmisión de sonido utilizando cantos y duetos en 18 territorios a lo largo de un gradiente de urbanización. Estimamos cuatro variables relacionadas con la transmisión de sonido de señales acústicas (relación señal a ruido, proporción de la difuminación de la amplitud y frecuencia en el tiempo, la elongación de los elementos debido a los ecos y el exceso de atenuación) para evaluar la relación entre las propiedades de transmisión de cantos y duetos. En general las propiedades de transmisión de los cantos y duetos del Toquí Oaxaqueño son influenciados por el grado de urbanización, distancia de los transectos y tipo de señal, pero no por el origen del estímulo. Este estudio es el primero en investigar la transmisión de sonido de un ave endémica en diferentes ambientes en México y contribuye a conocer los efectos de la urbanización en el comportamiento vocal de especies de aves endémicas.

Palabras clave: Ecología urbana, Comportamiento, Transmisión de sonido, Ecosistemas Urbanos

ABSTRACT

Acoustic signals are one of the main forms of communication that have evolved in the animal kingdom. Although some environments have relatively stable natural conditions, others have a variety of anthropogenic pressures that promote constant changes. In environments with environmental heterogeneity, the sound transmission and perception could be affected between emitters and receivers. In response to these changes, some species modify their vocal behaviors. Specifically, birds modify their acoustic signals by adjusting the spectral frequency at which the signals are emitted or by changing the temporality of the vocalizations. The acoustic adaptation hypothesis suggests that the acoustic features of the vocalizations adapt to the environment to achieve optimal transmission. This hypothesis has been tested using sound transmission experiments and predictive factors such as habitat structure or anthropogenic noise. Here I explore the influence of an urbanization gradient in relation to the origin of the vocalizations and two types of them on the sound transmission properties of the song of the White Throated Towhee (*Melospiza albicollis*), an endemic bird of Mexico. We conducted a sound transmission experiment using songs and duets in 18 territories along an urbanization gradient. We estimate four variables related to the transmission of sound from acoustic signals (Signal-to-noise ratio, Blur ratio, Tail to signal ratio and Excess of attenuation) to evaluate the relationship between the transmission properties of songs and duets. In general, the transmission properties of the songs and duets of the White Throated Towhee were influenced by the degree of urbanization, distance from the transects and type of signal, but not by the origin of the stimulus. This study is the first to investigate the sound transmission of an endemic bird through an urbanization gradient in Mexico and contribute to understanding the effects of urbanization on the vocal behavior of endemic bird species.

Keywords: *urban ecology, behavior, sound transmission, urban ecosystems*

INTRODUCCIÓN

Las señales acústicas son uno de los principales sistemas de comunicación en el reino animal y están relacionadas con comportamientos involucrados en la supervivencia de los individuos (McGregor, 2005). Las señales acústicas se utilizan en múltiples contextos, los cuales incluyen la defensa del territorio, el cortejo, comunicar la identidad y reconocimiento de especies (Gill, 2007). Similar a otros rasgos biológicos, las señales acústicas están sujetas a procesos evolutivos, que dan forma a la estructura de estas señales a lo largo del tiempo evolutivo (Bradbury y Vehrencamp, 1998). Las señales acústicas también están limitadas por factores que afectan su transmisión y que están relacionadas con el entorno donde viven los animales. En ambientes naturales, los factores limitantes incluyen la estructura del hábitat, así como otros sonidos que pueden enmascarar la señal de interés (por ejemplo, viento, sonidos de otros organismos o ruido antropogénico: Hardt y Benedict, 2021). Sin embargo, obstáculos similares pueden encontrarse en hábitats modificados por los humanos, donde edificios o el ruido urbano son una fuente importante de interferencia para la comunicación acústica en las ciudades en donde los animales habitan (Brumm y Slabbekoorn, 2005; Slabbekoorn y Ripmeester, 2008; Slabbekoorn, 2013; Marín-Gómez et al, 2020).

Para evitar o reducir la interferencia los animales han desarrollado estrategias que les permiten minimizar el enmascaramiento o degradación de sus vocalizaciones de dos formas. La primera estrategia consiste en modificar el tiempo de emisión de las vocalizaciones. La evidencia muestra que las comunidades de aves que viven en áreas cercanas a los aeropuertos modifican el tiempo en que emiten sus vocalizaciones al no vocalizar en el momento en que los aviones sobrevuelan la zona, evitando el enmascaramiento de sus señales (Pacheco, 2014; Gil et al. 2015). La segunda estrategia implica cambiar las características espectrales y de tiempo de señales acústicas. Generalmente los animales aumentan los rangos de frecuencia o la duración de las vocalizaciones (Mendoza y Arce-Plata, 2012; León et al. 2014; Pacheco, 2014). La mayoría de los estudios realizados se enfocan en comparar las características de las vocalizaciones y los patrones de tiempo de vocalización con factores antropogénicos, con dos estudios que evalúan experimentalmente sus efectos (Sandoval et al. 2015; Graham et al. 2017). Respecto a la urbanización, cuatro estudios exploran los efectos de la infraestructura urbana sobre las vocalizaciones de aves (Brickley et al. 2012; Lazerte et al. 2015; Lazerte et al. 2017; Phillips et al. 2020).

Los estudios de transmisión de sonido utilizan cuatro parámetros para evaluar el grado de enmascaramiento y degradación de una señal: (1) proporción de la difuminación (Blur ratio), que se refiere a la difusión de amplitud y frecuencia a lo largo del tiempo; (2) elongación de los elementos de la

señal debido a los ecos (Tail to Signal Ratio), que se refiere a la reverberación producida por los ecos; (3) la atenuación del sonido (Excess of attenuation) producido por la distancia de transmisión y el enmascaramiento por otras señales; y (4) la relación señal-ruido (Signal to Noise Ratio), que se refiere a la señal en términos de energía y frecuencia en relación al ruido de fondo, este último, considerado como otra señal acústica (Johnson, 2006). Uno de los primeros estudios que utilizó experimentos de reproducción para contrastar la transmisión de vocalizaciones entre un hábitat natural y otro urbanizado encontró que los cantos de los Juncos de Ojos Oscuros (*Junco hyemalis*) que viven en hábitats urbanizados tenían una mayor reverberación y, en consecuencia, más ecos en comparación con los cantos emitidos por aves en un bosque (Slabbekoorn et al. 2007). De manera similar, los cantos del Carbonero Común (*Parus major*) que viven en entornos urbanos mostraron una mayor degradación que los individuos que viven en áreas rurales (Mockford et al. 2011). Además, los cantos de dos especies de Chickadees (*Poecile atricapillus* y *P. gambeli*) son enmascaradas por el ruido que influye significativamente en la detección de señales acústicas por otras aves de este género, lo que refleja una relación negativa entre la señal de los individuos de este género y el ruido de las zonas urbanas (Lazerte et al. 2015). Finalmente, un estudio reciente con Gorriones Corona Blanca (*Zonotrichia leucophrys*) muestra que la atenuación y reverberación de sus cantos se asocian con altas frecuencias y ancho de banda de las vocalizaciones, en este estudio el ruido antrópico es el principal factor que afecta la comunicación de esta especie (Phillips et al. 2020). Estos estudios sugieren que los cantos emitidos por aves que habitan las ciudades están sometidos a altos grados de enmascaramiento y degradación. Sin embargo, se sabe poco como un gradiente de urbanización puede afectar el enmascaramiento y degradación de las vocalizaciones de las aves urbanas silvestres.

En este estudio exploraré los efectos de un gradiente de urbanización en los cantos y duetos del Toquí Oaxaqueño (*Melospiza albicollis*), una especie de ave endémica del centro de México que habita en matorrales y bosques de pino-encino (Rising, 2009). Sin embargo, esta especie es común en condiciones urbanas (Rising, 2019). Algunas observaciones personales sugieren que esta especie se encuentra asociada a ambientes urbanos anidando en arbustos o árboles dentro de jardines y parques. En particular, evaluaré experimentalmente la transmisión de sonido de las señales acústicas en un gradiente urbano con el objetivo de explorar la hipótesis de adaptación acústica, la cual indica que las características acústicas de las vocalizaciones están determinadas por las propiedades físicas del hábitat (Morton, 1975). En particular, esta hipótesis sugiere que las frecuencias bajas, los tonos puros, los elementos largos y los intervalos entre elementos se transmiten mejor en hábitats de vegetación densa, mientras que las señales con altas frecuencias, un ancho de banda amplio y una duración de intervalo corto entre elementos se

transmiten mejor en lugares abiertos. Se espera que los cantos y duetos de Toquí Oaxaqueños experimenten: (A) una reducción en la relación señal-ruido en hábitats urbanizados altos y muy altos; (B) un aumento la difuminación y alargamiento de la señal conforme aumente el grado de urbanización; y (C) un aumento en la atenuación del sonido al aumentar la distancia en los hábitats con niveles más altos de ruido, densidad de vegetación y número de edificios. Este estudio es el primero en investigar la transmisión de sonido de un ave endémica a través de un gradiente de urbanización lo que ayudará a incrementar nuestro conocimiento sobre los efectos de la urbanización en el comportamiento vocal de especies de aves endémicas.

ANTECEDENTES

Cambios en la estructura y temporalidad de las vocalizaciones

La hipótesis de la adaptación acústica propone que las vocalizaciones de los individuos evolucionan o cambian de acuerdo con el hábitat que habitan (Morton, 1975). Algunos estudios se han centrado en entender estos cambios en lapsos cortos de tiempo debido a los constantes cambios del hábitat. Existen dos formas cómo los individuos se adecuan a este tipo de cambios; (1) a través del cambio en la temporalidad de sus vocalizaciones, que se refiere al momento del día en que vocalizan y (2) el cambio de la estructura de sus vocalizaciones que se refleja en el aumento de las frecuencias o la disposición de los elementos en el canto. Ejemplos de la primera forma de adecuación se han encontrado en aves que cantan en diferentes horas del día para evitar el enmascaramiento producido por el ruido de algunos aeropuertos (Gil et al. 2015). También se ha encontrado en coros del amanecer una tendencia a que su inicio no sea de manera regular, en contraste con algunos sitios conservados en donde si lo es, las características del espacio acústico de algunas ciudades debido principalmente al ruido pueden influir (Marín- Gómez et al. 2020), una situación similar se ha encontrado en la especie *Poecile gambeli* (Lazerte et al. 2017).

Por otro lado, algunos hallazgos sugieren que los cambios constantes en el entorno pueden cambiar la estructura de las vocalizaciones de algunas especies. Algunos de estos hallazgos pueden encontrarse en los estudios realizados con las siguientes especies *Pitangus sulphuratus*, *Parus major*, *Poecile gambeli* y *Sicalis Flaviola*. En donde el efecto del ruido cambió las frecuencias y estructura y disposición de las sílabas de dichas especies (Mockford y Marshall, 2011; Mendoza y Arce-Plata, 2012; León et al. 2014; Lazerte et al. 2017).

Estudios de transmisión de sonido en hábitats conservados

Para comprobar los supuestos de la hipótesis de la adaptación acústica, algunos autores han optado por realizar experimentos de transmisión de sonido, ya que de esta manera pueden controlar variables del ambiente que influyen sobre diversos tipos de vocalizaciones o elementos de éstas. Algunos estudios se han realizado en hábitats conservados o rurales ya que la hipótesis de la adaptación acústica contempla los cambios de las vocalizaciones con base en la estructura del hábitat (por ejemplo, tipo de vegetación). Uno de los primeros estudios se realizó con la especie *Turdus merula*, en donde se midió la degradación de sus cantos respecto a la estructura del bosque caducifolio, en este estudio se encontró que las vocalizaciones de esta especie tienden a degradarse por la estructura de los bosques, sin embargo, las aves buscan vocalizar con diferente tipo de canto y a diferentes alturas para compensar dicha degradación (Dabeelsten et al. 1993). Estudios similares se han realizado en tres tipos de bosque tropical con *Thryophilus rufalbus* en donde las propiedades de transmisión difieren en tres sitios distintos y en donde el sexo también influye en la transmisión de las vocalizaciones (Graham et al. 2017), en el caso de *Melospiza leucotis* en los bordes de un bosque secundario en donde se evalúa la transmisión de cantos y duetos y se cumplen algunas suposiciones de la hipótesis de la adaptación acústica cuando las aves evitan la absorción del sonido cantando a mayor altura, además de hábitat de matorrales en donde se encontró que las características de los cantos cumplen los supuestos de la hipótesis mencionada cuando estos presentan frecuencias bajas y poco ancho de banda (Sandoval et al. 2015; Piza y Sandoval. 2016).

Estudios de transmisión de sonido en hábitats urbanos

Relacionado al ambiente urbano podemos mencionar el estudio de Lazerte et al. (2015) quienes sugieren que, en los experimentos realizados en espacios verdes urbanos, el ruido proveniente de la ciudad que se encuentra cercana puede tener un efecto negativo en la conservación de *Poecile gambeli*, debido a posibles problemas con la comunicación entre individuos de esta especie. Algunos otros estudios se han centrado en entender las diferencias en la transmisión de sonido de vocalizaciones de especies de aves que habitan zonas urbanas y rurales (Slabbekoorn et al. 2007; Ripmeester et al. 2010; Mockford et al. 2011; Lazerte et al. 2019). Sin embargo, consideramos que uno de los estudios más completos es el de Phillips et al. (2020) ya que se compara la transmisión de sonido de hábitat urbano y rural de *Zonotrichia leucophrys*, y los cambios en las variables que explican este fenómeno. Este estudio también sugiere que las grabaciones de las vocalizaciones de la especie en ambos entornos cumplen algunos de los supuestos de la adaptación acústica, ya que la estructura del canto en zonas urbanas presenta tonos más puros y

con un ancho de banda más estrecho que en zonas rurales. Aunque en la literatura podemos encontrar estas investigaciones acerca de zonas urbanas y transmisión de sonido, a la fecha no existe algún estudio que analice este fenómeno a través de un gradiente de urbanización.

Justificación

Pocos estudios se han centrado en entender el papel de las especies nativas en ambientes urbanos. El Toquí oaxaqueño al ser una especie nativa endémica a tres estados de México (Guerrero, Puebla y Oaxaca) con gran abundancia en nuestro estado, nos ofrece una oportunidad de estudiar desde diferentes perspectivas las influencias que la modificación de su hábitat, específicamente de la urbanización, tienen sobre sus vocalizaciones. Es por eso que en este trabajo nos centraremos en abordar desde la bioacústica, la influencia de un gradiente urbano en dos tipos de vocalizaciones de esta ave.

Hipótesis

La hipótesis de adaptación acústica sugiere que las características acústicas de las vocalizaciones están determinadas por las propiedades físicas del hábitat, en un sentido amplio, se sabe que las vocalizaciones que evolucionan en un lugar específico tienen cualidades de transmisión de sonido que les permitirá llegar más lejos y cumplir con su función entre los organismos de la misma especie o afines. Aunque dependen básicamente de la estructura del hábitat, estas propiedades también están en función de las características estructurales de las vocalizaciones, ya que sabemos que las vocalizaciones con tonos puros frecuencias más bajas y anchos de banda cortos, viajarán más lejos (Morton, 1975). Aquí sugerimos que los cantos tendrán una mejor transmisión en comparación con los duetos, ya que los cantos presentan anchos de banda menores aunque no necesariamente las frecuencias más bajas (1.2-9.7 kHz en promedio) por otro lado los duetos presentan un ancho de banda más amplio y frecuencias más elevadas (0.9- 10.6 kHz en promedio) . Sin embargo, los cantos de zonas urbanas tendrán una mejor transmisión de sonido que los de zonas rurales, siendo el mismo caso para los duetos; esperamos que conforme aumente el gradiente de urbanización disminuya la relación señal ruido y aumente la proporción de la difuminación, elongación de los elementos y el exceso de atenuación, esto debido a dos factores principales (ruido y estructura del hábitat). Finalmente esperamos que, conforme la distancia crezca, la relación señal ruido disminuirá siendo más evidente en los duetos que en los cantos por las características de las frecuencias y para ambos tipos de vocalizaciones en general, esperamos encontrar que las otras tres variables de

transmisión de sonido aumenten conforme la distancia crece (proporción de la difuminación, elongación de los elementos y exceso de atenuación).

Objetivo general

- Explorar los efectos de un gradiente de urbanización en las propiedades de transmisión de sonido de cantos y duetos de Toquí Oaxaqueño (*Melospiza albicollis*)

Objetivos específicos

- Realizar un monitoreo acústico para la obtención de las vocalizaciones de la especie
- Realizar un experimento de playback con cantos y duetos de Toquí oaxaqueño a través de un gradiente de urbanización
- Estimar las variables asociadas a la transmisión de sonido de cantos y duetos de Toquí Oaxaqueño
- Analizar la relación entre el gradiente urbano y los tipos de vocalizaciones de Toquí Oaxaqueño

MÉTODOS

Área de estudio

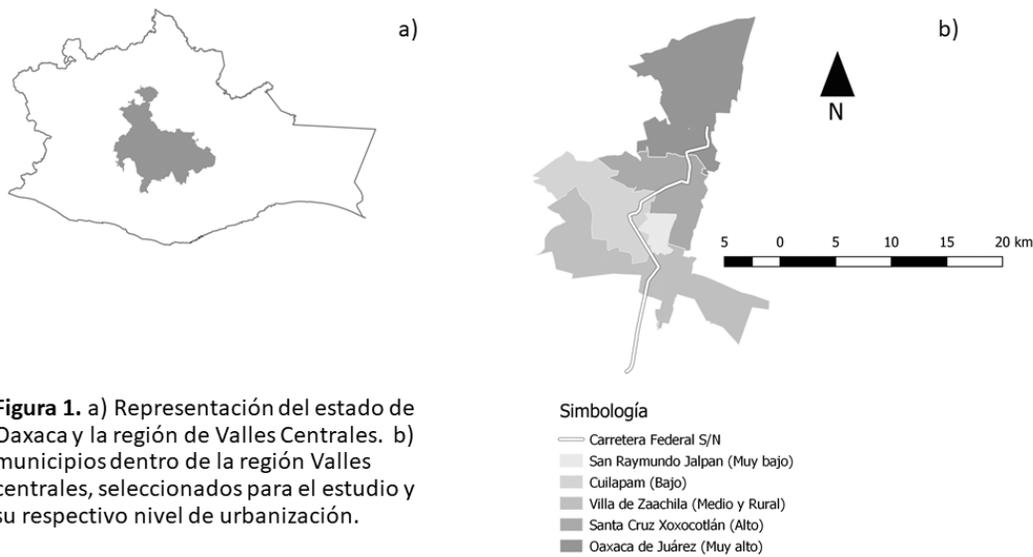
El estudio se realizó en los Valles Centrales del estado de Oaxaca, México; a lo largo de cinco municipios (Oaxaca de Juárez, Santa Cruz Xoxocotlán, Villa de Zaachila, Cuilapam de Guerrero y San Raymundo Jalpan). En 2020, elegí 30 sitios a lo largo de un gradiente de urbanización siguiendo la Carretera Estatal sin número, que va desde la ciudad de Oaxaca hasta Zimatlán de Álvarez. El rango de elevación a lo largo de este transecto fue de 1500 a 1600 m.s.n.m., por lo que las condiciones ambientales fueron similares (es decir, temperatura, precipitación media anual y humedad). Para elegir los sitios, me base en lo propuesto en el programa de ordenamiento ecológico regional del territorio del estado de Oaxaca (POERTEO) en donde se calculó el nivel de urbanización en los cinco municipios a lo largo del transecto, siguiendo el criterio de Unikel (1974) que sugiere estimar los niveles de urbanización con base en los tipos de localidades y rangos de número de habitantes por localidad. Posteriormente se clasificó cada municipio según cinco niveles de urbanización tomando en cuenta lo siguiente.

Cuadro 1. Parámetros de cada nivel de urbanización con base en el POERTEO (2011) y municipios seleccionados

Habitantes por localidad en cada municipio	Nivel de urbanización	Municipio seleccionado
Más de 15 000 en zonas urbanas	Muy alto	Oaxaca de Juárez
Más de 15 000 en zonas mixtas (urbanas y rurales)	Alto	Santa Cruz Xoxocotlán
De 10 000 a 15 000 en zonas mixtas	Medio	Villa de Zaachila
De 5 000 a 10 000 en zonas mixtas	Bajo	Cuilapam de Guerrero
Menos de 5 000 viviendo en zonas rurales	Muy bajo	San Raymundo Jalpan
Áreas geoestadísticas rurales dentro del municipio	Rural	Villa de Zaachila

Además, incluí la categoría rural, que fueron las áreas geoestadísticas rurales dentro del municipio Villa de Zaachila con nula densidad de población en comparación con las otras categorías y donde generalmente se realizan actividades primarias. Esta categoría no está incluida por Unikel (1974) pero la consideramos importante para comparar todos los niveles de urbanización (Cuadro 1).

Dentro de los municipios, los sitios de muestreo y su categoría seleccionados a lo largo del gradiente fueron: (A) Muy alto nivel; Museo Infantil Oaxaqueño ($17^{\circ} 04'03.7''$ N, $96^{\circ} 44'13.1''$ W) y Estacionamiento del Fortín ($17^{\circ} 04'14.4''$ N, $96^{\circ} 43'45.6''$ W) en el municipio de Oaxaca de Juárez; (B) Alto: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional IPN, Unidad Oaxaca en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán; (C) Medio: Unidad Deportiva del municipio Villa de Zaachila ($16^{\circ} 56'53.6''$ N, $96^{\circ} 44'34.1''$ W); (D) Baja: parches de vegetación y terrenos de construcción ubicados en la calle Camino Carretero ($16^{\circ} 58'48.5''$ N, $96^{\circ} 46'10.7''$ W) y calle Hermenegildo Galeana ($16^{\circ} 58'57.7''$ N, $96^{\circ} 46'15.9''$ W) dentro del municipio de Cuilapam de Guerrero; (E) Muy bajo: en la Iglesia en Ruinas ($16^{\circ} 58'25''$ N, $96^{\circ} 44'57.8''$ W) y calle Plutarco Elias Calles ($16^{\circ} 58'08.7''$ N, $96^{\circ} 45'25.6''$ W) dentro de unicipio de San Raymundo Jalpan; Rural: en la Planta tratadora de agua en el municipio de Villa de Zaachila ($16^{\circ} 55'33.4''$ N, $96^{\circ} 44'54''$ W) (Figura 1).



Diseño del estímulo

Realicé un monitoreo para el Toquí Oaxaqueño durante la temporada de reproducción de mayo a junio de 2020, cuando la actividad vocal en la mayoría de las aves neotropicales alcanza su pico (Gill, 2007). Obtuve registros focales diarios omitiendo los días domingo de 06:00 a 11:00 horas, que se considera el período más activo para la mayoría de las aves y para el género *Melozone* (Sandoval et al, 2013). Las grabaciones se realizaron utilizando una grabadora digital (Tascam; mod. DR-70D) conectada a un micrófono omnidireccional (Sennheiser; mod. ME62) montado en una parábola (Telinga; mod. V2 plegable). Todas las grabaciones se realizaron en formato WAV, a una frecuencia de muestreo de 24 bits y 44 kHz.

Para crear los estímulos, elegí las grabaciones de mejor calidad con una alta relación señal/ruido y donde la señal de interés no se traslapara con el ruido de fondo. Seleccioné tres tipos de cantos y tres tipos de duetos de diferentes territorios en sitios rurales y tres tipos de cantos y tres tipos de duetos de diferentes territorios en áreas altamente urbanizadas. Con las vocalizaciones elegidas, generé estímulos para cuatro tratamientos: (1) tres tipos de cantos pertenecientes a machos que viven en sitios rurales, (2) tres tipos de duetos pertenecientes a parejas que viven en sitios rurales, (3) tres tipos de cantos pertenecientes a machos que viven en sitios altamente urbanizados, y (4) tres tipos de duetos pertenecientes a parejas que viven en sitios altamente urbanizados. Nombré aleatoriamente cada estímulo para evitar cualquier sesgo al evaluar las variables de transmisión. Para la selección de los cantos

y duetos en las grabaciones utilizamos un Software Syrinx (versión 1.0.0.1). Para estandarizar y mejorar la calidad de las grabaciones de estímulos, se aplicó un filtro de paso alto que variaba de 0.9 kHz a 2 kHz y un filtro de paso bajo que variaba de 8 kHz a 12 kHz, dependiendo de los valores de frecuencia de las vocalizaciones utilizadas para los estímulos, todas las vocalizaciones fueron normalizadas a -1 dB. Durante el experimento cada canto y dueto se repitió cinco veces, con un silencio inicial de 5 segundos y un silencio intermedio de 1.5 segundos entre vocalizaciones –lo que permitirá tomar medidas de transmisión de sonido (Sabaniti et al, 2011) el archivo generado se guardó en formato WAV. Los estímulos se crearon utilizando el software Adobe Audition v.3.0 (Adobe Systems, San José, CA, EE. UU.).

Diseño experimental

Para comparar las diferencias en la transmisión del sonido a lo largo del gradiente de urbanización, llevé a cabo los experimentos de transmisión en tres territorios del Toqui Oaxaqueño localizados dentro de cada categoría de urbanización. En cada territorio, reproduje los cuatro tratamientos. Repetí cada tratamiento cinco veces para asegurarnos de que al menos tres de ellos no tuviera ruidos superpuestos. Los experimentos dentro de los territorios de Toqui Oaxaqueño los realicé entre las 06:00 y las 11:00 horas; hora del día en la que la actividad de las aves alcanza su punto máximo, con el fin de simular las condiciones normales de transmisión (Sandoval et al, 2015). Para el experimento utilicé una bocina con control remoto (FoxPro; mod. Crossfire) para transmitir los estímulos y una grabadora digital (Fostex, modelo DC-R302) conectada a un micrófono omnidireccional de alta definición (Sennheiser; mod. MKH8020) y a un preamplificador de micrófono (Sound Devices; mod. MP-1; rango de frecuencia de respuesta 10 Hz-20 kHz). El preamplificador de micrófono permitió cambiar la ganancia en dB para grabar el sonido para los transectos de mayor distancia (16 y 32 m), conociendo el incremento en la energía de la grabación. Las grabaciones de reproducción se guardaron en formatos WAV, a 16 bits y 44,1 kHz. Todos los estímulos se reprodujeron a -80 dB de presión sonora (SPL) medidos a 1 m de distancia, utilizando un sonómetro calibrado (Extech; mod. 407730; calibrador de nivel sonoro Tekcoplus; Mod. SLTK- 885B).

Dentro de cada territorio coloqué la bocina y el micrófono a una altura de cuatro metros, que suele ser la altura a la que vocalizan los Toquís Oaxaqueños (observaciones personales). Coloqué la bocina en el centro del territorio –definido como la percha en la que las aves dan sus primeros cantos durante el coro del amanecer–, mientras que el micrófono y la grabadora digital se colocaron a 4, 8, 16 y 32 metros de distancia, cada transecto en una dirección diferente. Las cuatro distancias de los transectos fueron elegidas con el objetivo de calcular la atenuación de la señal estándar entendiéndose como 6dB por el

doble de la distancia y también, por la separación que suele existir entre los individuos de una pareja (4 a 20 m aproximadamente). Las distancias de reproducción de los estímulos se determinaron con base a mis observaciones en campo durante el período de monitoreo, las cuales sugieren que los territorios de las aves tienen un diámetro aproximado de 50 m (similar a otras especies del género *Melospiza*; Sandoval et al, 2015). Dentro de cada territorio, la dirección para cada distancia –4, 8, 16 y 32 m– se calculó aleatoriamente en función de las condiciones del territorio (algunos de estos sitios suelen tener espacios restringidos por ser propiedades privadas o debido a las condiciones de vegetación).

Previo a los experimentos, realicé un control de reproducción que consistió en reproducir los cuatro tratamientos del estímulo en campo abierto siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, con la única diferencia de que los tratamientos control se realizaron a una sola distancia verticalmente (1 metro), hacerlo de esta forma permite que el sonido no encuentre obstáculos durante su transmisión y sea distorsionada. El tratamiento de control me permitió estandarizar todas las mediciones comparándolas con la medición obtenida de todos los demás tratamientos.

Análisis de transmisión de sonido

Analicé las grabaciones de transmisión de sonido comparándolas con el control de todas las vocalizaciones incluidas en el experimento; tres cantos y tres duetos (rural y urbanizado). Seleccioné grabaciones con una alta relación señal/ruido y ninguna otra señal superpuesta a la señal de interés. Para cada vocalización medí las siguientes variables: relación señal-ruido, difuminación de la amplitud y frecuencia en el tiempo, elongación de los elementos debido a los ecos y exceso de atenuación. Las variables de transmisión del sonido se calcularon mediante el software SIGPRO (versión 3.2.1; Pedersen, 1998).

Análisis estadístico

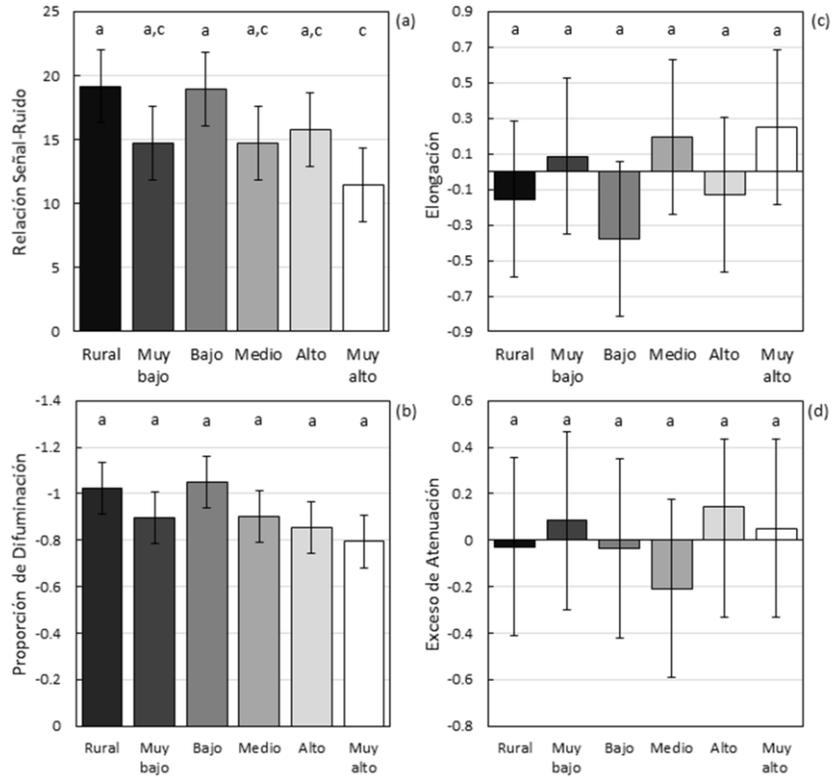
Para analizar la influencia de entornos urbanos sobre las propiedades de transmisión de los cantos y duetos del Toquí Oaxaqueño usé cuatro Modelos Lineales Mixtos (MLM). Incluí grado de urbanización (seis niveles: rural, muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto), origen del estímulo (dos niveles dependiendo si las vocalizaciones provenían de aves grabadas en zonas rurales o urbanización alta), distancia del transecto (cuatro niveles, correspondientes a las cuatro distancias entre la bocina y el micrófono) y tipo de señal (dos niveles: cantos vs. duetos) como factores fijos, mientras que las medidas de transmisión y degradación (relación señal-ruido; proporción de la difuminación; elongación de los elementos; exceso de atenuación) fueron utilizadas como variables dependientes dentro de los modelos. La identidad del

territorio fue incluida como un efecto aleatorio. Para los cuatro análisis, examiné los efectos principales y seis interacciones de segundo orden. Para evaluar si las diferencias entre los promedios fueron significativas usé pruebas *post hoc* de Sidak. Los residuales para la variable relación señal-ruido cumplieron con los supuestos del análisis. Por el contrario, los residuales para elongación de los elementos, exceso de atenuación y proporción de difuminación no presentaron una distribución normal por lo que transformé estas variables usando la transformación Log10 para elongación de los elementos (Quinn y Keough, 2002) y la transformación de dos pasos para exceso de atenuación y proporción de difuminación (Templeton, 2011). Las transformaciones generaron una distribución normal para elongación de los elementos, mientras que las dos últimas variables se aproximaron a una distribución normal. Sin embargo, los Modelos Lineales Mixtos son robustos a desviaciones de normalidad (Schielzeth, 2020).

RESULTADOS

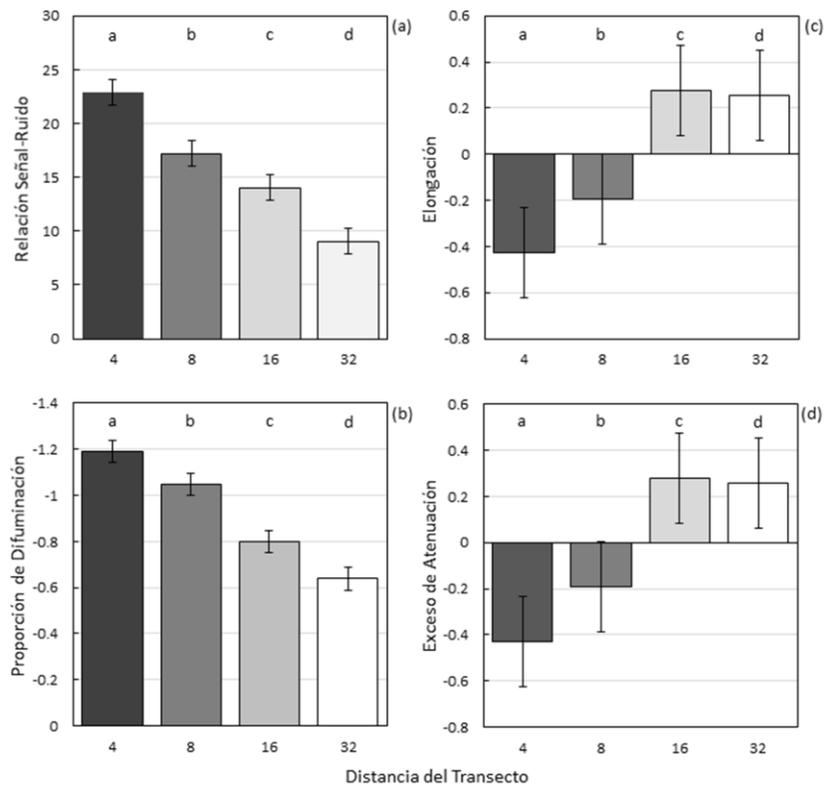
En general, las propiedades de transmisión de los cantos y duetos del Toquí Oaxaqueño son influenciados por el grado de urbanización, distancia de los transectos y tipo de señal, pero no por el origen del estímulo. Específicamente, el grado de urbanización tuvo un efecto significativo en la relación señal-ruido y en la proporción de difuminación, pues los valores de estas variables fueron menores en sitios rurales y aumentaron con el grado de urbanización. El grado de urbanización no afectó de manera significativa la elongación y exceso de atenuación de los cantos y duetos (ver abajo; Cuadro 2, Fig. 2). La distancia del transecto tuvo un efecto significativo en las cuatro variables de transmisión del sonido, encontrando que la relación señal-ruido disminuyó conforme aumentó la distancia del transecto y por otro lado, la proporción de difuminación, elongación y exceso de atenuación aumentaron con la distancia del transecto (Cuadro 2, Fig. 3). El tipo de señal tuvo un efecto significativo en la relación señal-ruido y en la proporción de difuminación, ya que los cantos presentaron valores mayores en relación con los duetos, pero los cantos y duetos no difirieron significativamente en la elongación y exceso de atenuación (Cuadro 2, Fig. 4).

Figura 2. Variación de las cuatro medidas de transmisión de sonido de cantos y duetos de Toquí Oaxaqueño a lo largo de un gradiente de urbanización, en los Valles Centrales, Oaxaca: (a) Relación señal-ruido; (b) Proporción de la difuminación; (c) Elongación; (d) Exceso de atenuación. Las barras fueron generadas a partir de los valores de predicción para el modelo con un intervalo de confianza del 95 %. Las barras con la misma letra indica que no hay diferencias entre categorías de urbanización.



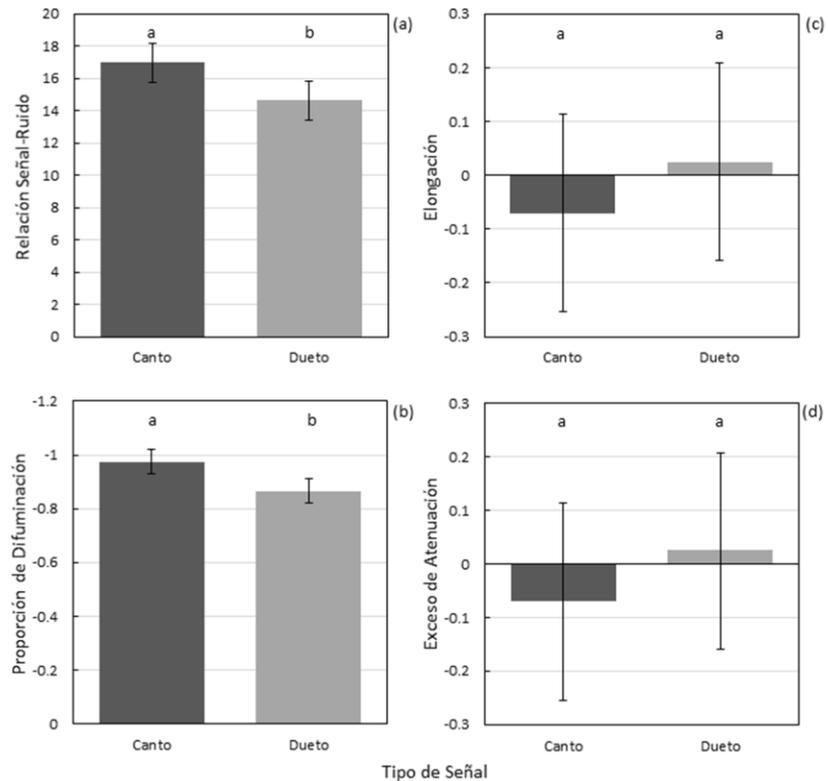
Respecto de los modelos de interacción los resultados revelaron que, en general, los modelos grado de urbanización*distancia del transecto, grado de urbanización*tipo de señal, origen del estímulo*tipo de señal y distancia del transecto*tipo de señal, tuvieron efectos sobre las variables de transmisión de sonido. Específicamente, el modelo grado de urbanización*distancia del transecto tuvo efectos para las cuatro variables de transmisión de sonido. Esto explicaría que la relación señal-ruido disminuye cuando hay una mayor distancia y grado de urbanización. Por lo que respecta a la proporción de la difuminación y elongación, éstas se incrementan conforme el grado de urbanización y la distancia aumentan. En el caso del exceso de atenuación, esta también tendrá un aumento cuando el grado de urbanización y la distancia aumenten (Cuadro 2, Fig. 4).

Figura 3. Variación de las cuatro medidas de transmisión de sonido de cantos y duetos de Toquí Oaxaqueño con relación a la distancia del transecto a lo largo de un gradiente de urbanización en la región Valles Centrales, Oaxaca: (a) Relación señal- ruido; (b) Proporción de la difuminación; (c) Elongación; (d) Exceso de atenuación. Las barras fueron generadas a partir de los valores de predicción para el modelo con un intervalo de confianza al 95%. Las barras con la misma letra indica que no hay diferencias en las distancias del transecto.



El modelo de interacción grado urbanización*tipo señal solo tuvo efectos significativos en la variable relación señal-ruido, esto explicaría que los cantos tendrán mejores características de transmisión en contraste con los duetos cuando el grado de urbanización aumenta. Por lo tanto, la cantidad de esta variable es mayor en cantos que en los duetos en todos los grados de urbanización. Sin embargo, este modelo no tuvo efectos significativos sobre las otras tres variables; proporción de la difuminación, elongación y exceso de atenuación (Cuadro 2, Fig. 4).

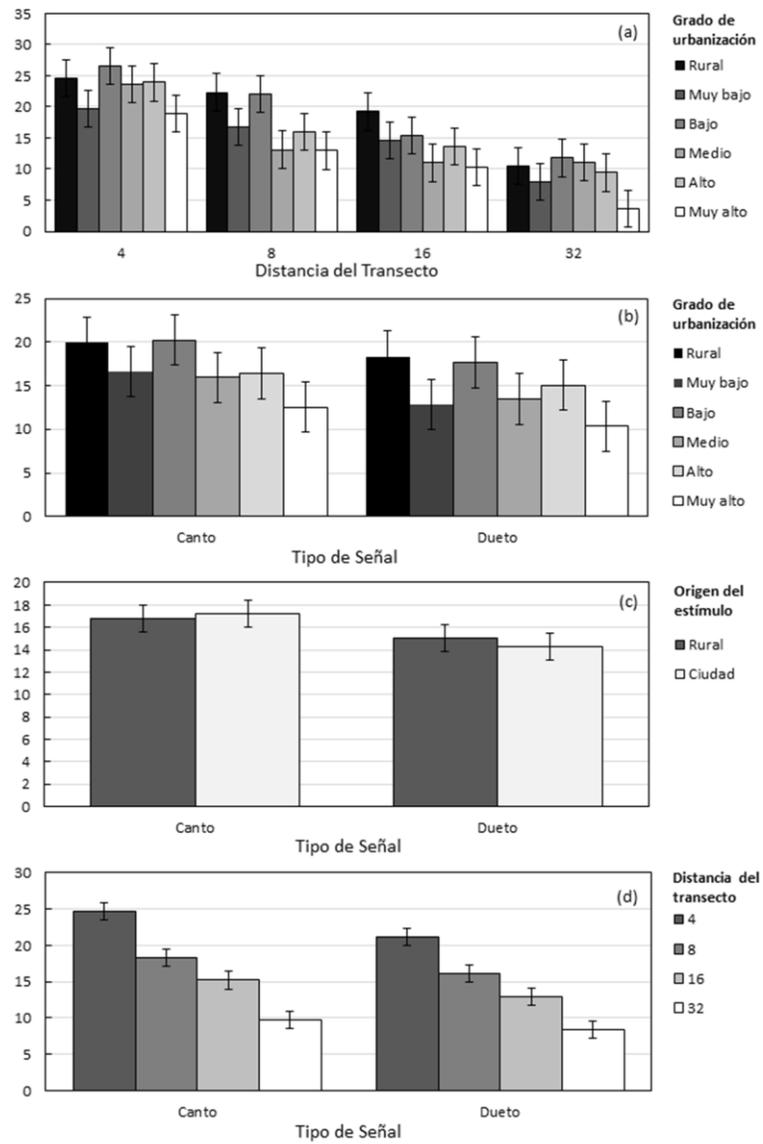
Figura 4. Variación de las cuatro medidas de transmisión de sonido con relación al tipo de señal del Toquí Oaxaqueño (Canto vs Duetto) a lo largo de un gradiente de urbanización en la región Valles Centrales, Oaxaca: (a) Relación señal-ruido; (b) Proporción de la difuminación; (c) Elongación; (d) Exceso de atenuación. Las barras fueron generadas a partir de los valores de predicción para el modelo. Las letras sobre las barras indican diferencias significativas de las pruebas *post hoc* para cada tipo de señal. Las barras con la misma letra indica que no hay diferencias entre los tipos de señal.



El modelo origen estímulo*tipo señal al igual que el anterior solo tuvo efectos significativos para la relación señal-ruido. Esto explicará por qué los cantos de zonas urbanas presentan mayor relación señal-ruido que los cantos de zonas rurales, el caso es similar para los duetos de zonas urbanas con relación al de zonas rurales (Cuadro 2, Figura 4). Finalmente, el modelo distancia transecto*tipo Señal solo tuvo efectos significativos para la variable relación señal-ruido, lo que sugiere que los cantos tendrán mayor señal-ruido conforme la distancia aumenta, mientras que los duetos presentarán menor señal-ruido en relación con los cantos cuando la distancia aumenta (Cuadro 2, Fig. 5).

El efecto fijo origen del estímulo y dos interacciones, grado de urbanización*origen del estímulo y origen del estímulo*distancia transecto, no fueron significativos en ninguna de las cuatro variables de transmisión del sonido (Cuadro 2).

Figura 5. Gráficas de los modelos de interacción con significancia para variables de transmisión de sonido de cantos y duetos de Toquí Oaxaqueño en los Valles centrales de Oaxaca: (a) Grado de urbanización*Distancia; (b) Grado de urbanización*Tipo de señal; (c) Origen del estímulo*Tipo de señal y (d) Distancia*Tipo de señal.



Cuadro 2. Efectos principales e interacciones de segundo orden de los efectos fijos dentro de los modelos lineales mixtos, con relación a cuatro variables de transmisión del sonido.

Modelo	Relación señal-ruido			Proporción de la difuminación			Elongación			Exceso de atenuación		
	df	F	<i>p</i>	df	F	<i>p</i>	df	F	<i>p</i>	df	F	<i>p</i>
Grado de urbanización	12	4.92	0.011	12	3.70	0.029	12	1.43	0.282	12	0.49	0.779
Origen del estímulo	809	0.49	0.483	809	2.47	0.117	809	0.01	0.905	808	1.07	0.301
Distancia del transecto	809	592.69	<0.001	809	436.61	<0.001	809	41.25	<0.001	808	1165.3 4	<0.001
Tipo de señal (cantos vs. dueto)	809	96.54	<0.001	809	84.45	<0.001	809	3.04	0.082	808	3.11	0.078
Grado de urbanización*Origen del estímulo	809	1.84	0.103	809	1.50	0.188	809	0.16	0.976	808	1.39	0.226
Grado urbanización*Distancia transecto	809	11.24	<0.001	809	14.50	<0.001	809	4.90	<0.001	808	23.97	<0.001
Grado urbanización*Tipo señal	809	2.28	0.045	809	0.68	0.636	809	0.90	0.477	808	0.84	0.525
Origen estímulo*Distancia transecto	809	0.29	0.831	809	0.94	0.422	809	1.31	0.270	808	1.33	0.265
Origen estímulo*Tipo señal	809	6.69	0.010	809	1.27	0.261	809	0.53	0.466	808	0.88	0.347
Distancia transecto*Tipo señal	809	3.45	0.016	809	3.02	0.029	809	1.71	0.164	808	1.71	0.163

DISCUSIÓN

A través de un experimento de playback, probamos en un gradiente de urbanización la transmisión de sonido de los cantos y duetos de Toquí Oaxaqueño, provenientes de dos zonas diferentes de urbanización (rural vs. urbana). Después de analizar los efectos principales del grado de urbanización, origen del estímulo, distancia del transecto, tipo de señal y sus interacciones de segundo orden, encontramos que para las cuatro variables que caracterizan la transmisión y degradación del sonido (relación señal-ruido, proporción de difuminación, elongación de los elementos y exceso de atenuación), solo la distancia de los transectos y la interacción grado de urbanización*distancia de transecto presentó diferencias significativas. Por otro lado, solo un modelo cuyo efecto principal fue grado de urbanización, resultó con diferencias significativas para dos variables de transmisión de sonido (relación señal-ruido y proporción de la difuminación). En el caso de los modelos de interacción grado de urbanización*tipo de señal, origen del estímulo*tipo de señal y la distancia transecto*tipo de señal, estos resultaron significativos para una sola variable que explica la transmisión de sonido (relación señal-ruido). El resto de los modelos propuestos no resultaron con diferencias significativas, lo que sugiere que el efecto principal del origen del estímulo (rural vs urbano) y las interacciones del resto de los modelos que involucran este factor (grado de urbanización*origen del estímulo y origen del estímulo*distancia del transecto) no tienen influencia sobre las variables de transmisión de sonido. La distancia y el grado de urbanización podrían estar afectando en diferente grado cada tipo de vocalizaciones (cantos y duetos). Sin embargo, necesitamos más evidencia de las variables que componen estos factores (ejemplo los edificios o superficies reflectantes dentro de un gradiente de urbanización) para saber específicamente la influencia de estas variables en aquellas que miden la transmisión de sonido.

Grado de urbanización

De acuerdo con la hipótesis de la adaptación acústica, las características de las vocalizaciones de los individuos se transmiten de mejor manera en el lugar donde ellos se desarrollan (Morton, 1975). En general se sabe que los elementos de bajas frecuencias y tonos puros tendrán una mejor transmisión en zonas con vegetación muy densa, a diferencia de los elementos que tengan frecuencias más altas y modulaciones dentro de los cantos (Morton, 1975; Wiley y Richards, 1978). Sin embargo, sabemos poco del papel que la urbanización puede jugar en la transmisión del sonido de diferentes tipos de vocalizaciones. De acuerdo con nuestros resultados, encontramos que el grado de la urbanización por sí

solo tiene efecto en dos de las variables de transmisión de sonido para los cantos y duetos del Toqui Oaxaqueño, la relación señal-ruido y la proporción de la difuminación. Algunos factores que podrían estar explicando los efectos en estas dos variables son la estructura que tiene el hábitat en donde la vegetación o las estructuras urbanas, además de la superficie del suelo, pueden tener influencia para transmitir el sonido (Dabelsteen et al, 1993; Sandoval et al, 2015). La cantidad de ruido de las ciudades también puede jugar un papel fundamental, ya que es uno de los principales factores que afectan la transmisión de sonido (Slabbekoorn y Ripmeester, 2008; Dominoni et al, 2020) y, con relación a nuestros resultados puede explicar la disminución de la relación señal-ruido conforme aumenta el grado de urbanización (rural- muy urbanizado). No parece haber estudios que muestren esta tendencia en un gradiente de urbanización. Sabemos que en zonas urbanas la relación señal-ruido disminuye debido al efecto negativo del ruido en las vocalizaciones (Lazerte et al, 2015) por lo que algunas aves modifican la estructura del canto o los patrones de vocalización para tener una comunicación más efectiva (Slabbekoorn, 2013; Lazerte et al, 2017). En el caso de la proporción de la difuminación nuestro modelo sugiere que esta aumenta conforme el grado de urbanización; aunque no conocemos estudios que relacionen esto con un gradiente de urbanización, se sabe que algunos factores propician que el sonido se difumine más fácilmente, ejemplo el ruido de fondo o algunas variables climáticas (viento, humedad y temperatura). Un análisis con relación a variables de este tipo podría ayudar a entender las influencias que tienen para nuestro estudio.

Por otro lado, cuando dos factores interactúan como en el caso del grado de urbanización y la distancia, los resultados muestran que hay una influencia sobre las cuatro variables de transmisión de sonido. En este sentido, si hablamos de la relación señal-ruido podemos pensar que esta disminuirá conforme aumenta la distancia independientemente de la intensidad con la que las vocalizaciones se efectúan (80 dB en promedio). Sumado a esto debemos considerar que conforme el grado de urbanización aumenta, el ruido también podría hacerlo como se ha visto en otras investigaciones (Lazerte et al 2015; Laerte et al 2017; Phillips et al 2020). Esto significa que la disminución de la relación señal-ruido será aún más evidente en zonas con alta urbanización, precisamente debido al ruido, y conforme aumenta la distancia. La proporción de la difuminación al igual que la relación señal-ruido podría verse favorecida por la urbanización, sumado a la distancia la proporción de la difuminación podría ser más evidente debido a la degradación del sonido conforme la distancia es más grande. En el caso particular de la elongación de los elementos, esperábamos encontrar que en sitios más urbanizados hubiese mayor elongación de los elementos debido a los ecos que crearían las superficies reflectantes del sonido, tal y como se han encontrado en otros estudios (Warren et al, 2006; Mockford et al, 2011). Sin embargo, algunos sitios en

donde se realizó el experimento de transmisión de sonido, que en su mayoría eran zonas parecidas en estructura del hábitat, no se pudo discernir con facilidad las diferencias en esta variable conforme la urbanización aumenta; modelar algunas variables específicas de estructura del hábitat (vegetación y estructuras presentes en el sitio) nos ayudarían entender específicamente como varía la proporción de la difuminación y todas las variables de transmisión de sonido.

Se sabe que los cantos podrían tener mejores propiedades de transmisión debido a sus características estructurales; frecuencias menos altas y tonos más puros en comparación con los duetos, esto también concuerda con las sugerencias de transmisión de sonido de la hipótesis de la adaptación acústica (Morton, 1975). Las evidencias respecto a los experimentos en zonas urbanas sugieren que los cantos o elementos con estas características, de las especies estudiadas, se transmiten más fácilmente en zonas urbanas (Lazerte et al 2015; Lazerte et al 2017). En el presente estudio sabemos que por los menos los cantos tienen rangos de frecuencias menos amplios que los duetos (Cantos: 0.9 a 10.4 kHz vs Duetos: 0.8 a 12 kHz); esto podría sugerir que por lo menos en la variable relación señal-ruido que resulto significativa, la señal resulta más fuerte con relación a los duetos conforme el grado de urbanización aumenta, propiciando una mejor transmisión de este tipo de vocalizaciones.

Tipo de Señal

Las aves suelen vocalizar de diferente forma, dentro de su repertorio podemos clasificar estas vocalizaciones en cantos, llamados y duetos (Gill, 2007). Nuestro estudio se centró en saber las diferencias que había en la transmisión de sonido de cantos y duetos a lo largo del gradiente de urbanización. Los resultados sugieren que el tipo de señal tuvo efecto en la relación señal ruido y proporción de la difuminación. Respecto a la relación señal-ruido, se sugiere que los cantos tendrán una mejor transmisión debido a mayor presión sonora con relación a los duetos, probablemente por las características estructurales de los cantos (frecuencias más bajas y tonos más puros) (Morton, 1975). Sin embargo, también la difuminación será más evidente en cantos que en duetos. Respecto a otros estudios en donde se evalúa el tipo de señal a través de la transmisión de sonido, Sandoval et al, (2015) encontraron que el tipo de señal solo era significativo para la elongación de los elementos (en este caso los cantos presentan mayor elongación de los elementos que los duetos), por lo que no podríamos contrastar nuestros hallazgos con otros estudios cuando se trata de relación señal-ruido y proporción de la difuminación.

Una situación similar la podemos encontrar cuando el tipo de señal interactúa con la distancia. Nuestros resultados muestran que para esta interacción solo tiene efectos significativos la relación señal-ruido, las predicciones que podemos hacer para este modelo es que, a medida que la distancia crece, la presión sonora de los cantos será mayor con respecto a los duetos. A la fecha solo hemos encontrado un estudio que relacione ambos factores y sus los resultados sugieren que la interacción solo tiene efectos significativos sobre la elongación de los elementos, probablemente debido a la estructura del hábitat (bosque tropical). Sin embargo, aquí se sugiere que ambos tipos de señal (cantos y duetos) viajan a distancias muy similares (Sandoval et al, 2015). Algunas otras investigaciones solo realizan los experimentos con cantos y elementos de este o llamados, encontrando que los elementos de frecuencias más bajas viajan a mayor distancia (Piza y Sandoval et al, 2016; Graham et al, 2017; Vargas-Castro et al, 2017), aunque estas investigaciones no han sido realizadas en zonas urbanas.

Por otro lado, nuestros resultados también sugieren que la relación señal-ruido tiene diferencias cuando el origen del estímulo y el tipo de señal interactúan. Podemos interpretar esta relación pensando que los cantos y duetos de zonas urbanas tendrán una mayor presión sonora en comparación con los cantos y duetos de zonas rurales. Algunos estudios han encontrado una situación parecida pero no en zonas urbanas, tal es el caso de Graham et al (2017) en bosque tropical, donde para los elementos de los cantos de machos y hembras el origen de la población tuvo un efecto significativo para relación señal-ruido (machos), en comparación con las hembras en donde tres de las medidas de transmisión de sonido resultaron significativas (proporción de la difuminación, elongación de los elementos y exceso de atenuación). Sin embargo, no existen más estudios que hayan modelado la relación del origen del estímulo con el tipo de señal. Una aproximación a nuestros hallazgos en este sentido podrían encontrarse en los estudios de Mockford y Marshall (2009), en donde se encontró que los miembros de la especie *Parus major* reaccionaban a sonidos de altas frecuencias con un origen en zonas con un gran ruido de fondo como pueden ser zonas urbanas; Ripmeester et al (2010) encontró una divergencia en la temporalidad y en la frecuencia de los cantos de *Turdus merula* provenientes de zonas urbanas y rurales; finalmente otra aproximación es el estudio realizado por Lazerte et al (2019), en donde aunque no se midieron las variables de transmisión de sonido, se pusieron a prueba individuos de *Poecile gambeli* que identificaron más rápidamente los cantos provenientes de zonas urbanas vs. zonas rurales y se determinó que existe más probabilidad de reconocer los cantos de las áreas urbanas vs. rurales. En resumen, algunos de los hallazgos encontrados en estos estudios con relación al nuestro pueden deberse a que las señales de origen urbano pueden tener una mayor presión sonora reflejada en la relación señal ruido.

CONCLUSIONES

Esta investigación sugiere que el gradiente urbano tiene influencia diferente sobre cuatro variables que explican la transmisión de sonido de cantos y duetos de Toquí Oaxaqueño. Debido a que algunos modelos no resultaron significativos, no todos los supuestos de la hipótesis de la adaptación acústica se cumplen en nuestro estudio. Principalmente la relación señal ruido y el exceso de atenuación se comportaron como esperábamos durante el experimento, la primera al decrecer conforme se aumenta la distancia en todos los niveles de urbanización y para el segundo caso al haber un decremento en la potencia de la señal al aumentar la distancia, es fue un patrón para los modelos que resultaron significativos utilizando solo efectos principales de los factores, como también, para las interacciones de segundo. Sin embargo, no ocurrió de igual forma con la proporción de la difuminación y en muchos casos la elongación de los elementos y el exceso de atenuación no resultaron significativos para estos modelos. Algunas de las consideraciones para mejorar nuestro estudio con relación a la hipótesis de la adaptación acústica, son contrastar los efectos significativos sobre las variables de transmisión de sonido con relación a la estructura del hábitat y el ruido antrópico. Un análisis posterior con los datos actuales sería incluir las variables de estructura del hábitat y ruido antrópico en un segundo análisis, que podría mejorar nuestro entendimiento sobre la transmisión de sonido en cantos y duetos de Toquí Oaxaqueño.

LITERATURA CITADA

- Bradbury, J. W., y Vehrencamp, S. L. 1998. Principles of animal communication. Sunderland, MA: Sinauer Associates
- Brickley, J. L., Blackwood, D. y Patricelli G, L. 2012. Experimental Evidence for the Effects of Chronic Anthropogenic Noise on Abundance of Greater Sage-Grouse at Leks. *Conservation Biology* 26 (3): 461-471
- Brumm, H., y Slabbekoorn, H. 2005. Acoustic communication in noise. *Advances in the Study of Behavior* 35: 151-209
- Dabelsteen, T., Larsen, O. N., y Pedersen, S. B. 1993. Habitat-induced degradation of sound signals: Quantifying the effects of communication sounds and bird location on blur ratio, excess attenuation, and signal-to-noise ratio in blackbird song. *The Journal of the Acoustical Society of America* 93(4): 2206-2220
- Dominoni, D. M., Halfwerk, W., Baird, E., Buxton, R. T., Fernández-Juricic, E., Fristrup, K. M., ... y Barber, J. R. 2020. Why conservation biology can benefit from sensory ecology. *Nature Ecology & Evolution* 4(4): 502-511
- Gaytán, B. L., Sorroza P., C., Valdivia, L., R., Alvarado, J., A. M., Jiménez, M., Y. L., García, G., E. L., Vásquez L., C., Gaytán, B., D., Rubio, M., Corres, S., P. 2011. Caracterización del Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del Territorio del Estado de Oaxaca Componente Social. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Autonoma Benito Juárez de Oaxaca. Oaxaca de Juárez, Oaxaca. 277 p.
- Gil, D., Honarmand, M., Pascual, J., Pérez- Mena, E. y Macías, G, C. 2015. Birds living near airports advance their dawn chorus and reduce overlap with aircraft noise. *Behavioral Ecology* 26 (2): 435- 443
- Gill, F. B. 2007. Ornithology, 3rd edition. W.H. Freeman and Company, New York, NY, USA
- Graham, B. A., Sandoval, L., Dabelsteen, T., y Mennill, D. J. 2017. A test of the Acoustic Adaptation Hypothesis in three types of tropical forest: degradation of male and female Rufous-and-white Wren songs. *Bioacoustics* 26(1): 37-61

- Hardt, B., y Benedict, L. 2021. Can you hear me now? A review of signal transmission and experimental evidence for the acoustic adaptation hypothesis. *Bioacoustics* 30(6): 716-742
- Johnson, D. H. 2006. Signal-to-noise ratio. *Scholarpedia* 1(12): 2088
- LaZerte, S. E., Otter, K. A., y Slabbekoorn, H. 2015. Relative effects of ambient noise and habitat openness on signal transfer for chickadee vocalizations in rural and urban greenspaces. *Bioacoustics* 24(3): 233-252
- LaZerte, S. E., Otter, K. A., y Slabbekoorn, H. 2017. Mountain chickadees adjust songs, calls and chorus composition with increasing ambient and experimental anthropogenic noise. *Urban Ecosystem* 20(5): 989-1000
- LaZerte, S. E., Slabbekoorn, H., y Otter, K. A. 2019. A field test of the audibility of urban versus rural songs in mountain chickadees. *Ethology* 125(8): 516-525
- Leon, E., Beltzer, A. y Quiroga, M. 2014. El jilguero dorado (*Sicalis flaveola*) modifica las estructuras de sus vocalizaciones para adaptarse a hábitats urbanos. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85 (2): 546- 552
- Marín-Gómez, O. H., Dáttilo, W., Sosa-López, J. R., Santiago-Alarcon, D., y MacGregor-Fors, I. 2020. Where has the city choir gone? Loss of the temporal structure of bird dawn choruses in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 194, 103665
- McGregor, P. K. Ed. 2005. *Animal communication networks*. Cambridge University Press
- Mendoza, A., M., y Arce- Plata M., I. 2012. Aproximación Al Impacto De La Perturbación Urbana En Las Vocalizaciones De Pitangus Sulphuratus (*Tyrannidae*) En Santiago De Cali, Valle Del Cauca (Colombia). *Lenguaje* 16: 19-29
- Mockford, E. J., y Marshall, R. C. 2009. Effects of urban noise on song and response behaviour in great tits. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276(1669): 2979-2985
- Mockford, E., J., Marshall, R., C. y Dabelsteen, T. 2011. Degradation of Rural and Urban Great Tit Song: Testing Transmission Efficiency. *PLoS ONE* 6 (12): e28242
- Morton, E. S. 1975. Ecological sources of selection on avian sounds. *The American Naturalist* 109(965): 17-34

- Pacheco, V, G, F. 2014. Adaptación acústica en el canto de las especies de aves neotropicales *Cyclarhis gujanensis* e *Hylophilus flavipes* y sus densidades poblacionales en la zona de vida bosque seco tropical en el departamento del Tolima. Facultad de ciencias, Universidad del Tolima. Colombia
- Pedersen, S.B. 1998. Preliminary operational manual for signal processor SigPro. Centre of Sound Communication, Odense University, Odense
- Phillips, J. N., Rochefort, C., Lipshutz, S., Derryberry, G. E., Luther, D., y Derryberry, E. P. 2020. Increased attenuation and reverberation are associated with lower maximum frequencies and narrow bandwidth of bird songs in cities. *Journal of Ornithology* 161(2): 593-608
- Piza, P., y Sandoval, L. 2016. The differences in transmission properties of two bird calls show relation to their specific functions. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140(6): 4271-4275
- Quinn, G. P., y M. J. Keough 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Rising, J. 2019. White-throated Towhee (*Melospiza albicollis*). En: del Hoyo, J., Elliott, A., Sargatal, J., Christie, D.A. y de Juana, E. (eds.). *Handbook of the Birds of the World Alive*. Lynx Ediciones, Barcelona. (recuperado de: <https://www.hbw.com/node/62017> on 14 June 2019)
- Ripmeester, E. A., Mulder, M., y Slabbekoorn, H. 2010. Habitat-dependent acoustic divergence affects playback response in urban and forest populations of the European blackbird. *Behavioral Ecology* 21(4): 876-883
- Sabatini, V., Ruiz-Miranda, C. R., y Dabelsteen, T. 2011. Degradation characteristics of Golden Lion Tamarin *Leontopithecus rosalia* two-phrase long calls: implications for call detection and ranging in the evergreen forest. *Bioacoustics* 20(2): 137-158
- Sandoval, L., Méndez, C., y Menill D, J. 2013. Different vocal signals, but not prior experience, influence heterospecific from conspecific discrimination. *Animal Behaviour* 85:907-915
- Sandoval, L., Dabelsteen, T., y Mennill, D. J. 2015. Transmission characteristics of solo songs and duets in a neotropical thicket habitat specialist bird. *Bioacoustics* 24(3): 289-306
- Schielzeth, H., Dingemanse, N. J., Nakagawa, S., Westneat, D. F., Alagüe, H., Teplitsky, C., ... y Araya-Ajoy, Y. G. 2020. Robustness of linear mixed-effects models to violations of distributional assumptions. *Methods in Ecology and Evolution* 11(9): 1141-1152

- Slabbekoorn, H., Yeh, P. y Hunt, K. 2007. Sound Transmission and Song Divergence: A Comparison of Urban and Forest Acoustics. *The Condor* 109(1): 67-78
- Slabbekoorn, H., y Ripmeester, E. A. P. 2008. Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. *Molecular ecology* 17(1): 72-83
- Slabbekoorn, H. 2013. Songs of the city: noise-dependent spectral plasticity in the acoustic phenotype of urban birds. *Animal Behaviour* 85(5): 1089-1099
- Templeton, G. F. 2011. A two-step approach for transforming continuous variables to normal: implications and recommendations for IS research. *Communications of the Association for Information Systems* 28(1): 4
- Unikel, L., Ruiz Chiapetto, C., & Garza, G. (1976). El desarrollo urbano de México: diagnóstico e implicaciones futuras.
- Vargas-Castro, L. E., Sandoval, L., y Searcy, W. A. 2017. Eavesdropping avoidance and sound propagation: the acoustic structure of soft song. *Animal behaviour* 134: 113-121
- Wiley, R. H., y Richards, D. G. 1978. Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: implications for the evolution of animal vocalizations. *Behavioral ecology and sociobiology* 3(1): 69-94
- Warren, P. S., Katti, M., Ermann, M., y Brazel, A. 2006. Urban bioacoustics: it's not just noise. *Animal behaviour*, 71(3): 491-502