

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS – CAMPUS BOTUCATU/SP

**Impactos da estrutura ambiental nas vocalizações de
Troglodytes musculus Naumann, 1823 (Aves,
Troglodytidae)**

Guilherme Sementili Cardoso

Botucatu/SP

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS – CAMPUS BOTUCATU/SP

**Impactos da estrutura ambiental nas vocalizações de
Troglodytes musculus Naumann, 1823 (Aves,
Troglodytidae)**

Guilherme Sementili Cardoso

Tese apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Botucatu como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Biológicas no Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas - Área de Concentração Zoologia.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo José Donatelli

Botucatu/SP

2020

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSEMEIRE APARECIDA VICENTE-CRB 8/5651

Cardoso, Guilherme Sementili.

Impactos da estrutura ambiental nas vocalizações de
Troglodytes musculus Naumann, 1823 (Aves, Troglodytidae) /
Guilherme Sementili Cardoso. - Botucatu, 2020

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências de
Botucatu

Orientador: Reginaldo José Donatelli

Capes: 20404000

1. Aves. 2. Vocalização animal. 3. Comportamento
animal. 4. Urbanização. 5. Ruído. 6. Bioacústica.

Palavras-chave: Bioacústica; Comportamento animal;
Ornitologia; Poluição; Ruído.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), processo nº 134084/2016.

Agradeço à toda a minha família de origem, meu suporte para todos os momentos. Agradeço à minha mãe, a Dona Valentina, pelos dias de carinho e amor, e por todo o auxílio quando eu mais precisei; ao meu pai, Carlos, por todo carinho; e ao Vinícius, meu irmão, por ser companheiro, amigo, orientador, tudo ao mesmo tempo. Agradeço também aos meus tios e tias, e minhas primas, e que sempre deram suporte de todas as maneiras possíveis.

Agradeço também a todos os meus amigos do Laboratório de Ornitologia. Foram momentos muito gratos de coleta, de diversão e de compartilhamentos. Sem eles, dificilmente este trabalho teria sido concluído. Agradeço especialmente aos amigos: Fernanda, Renata, Raphael (Branco), Rafael (Preto), Rafael (Mochila), Raphael (Coxim) e Leonardo. Faço menção honrosa para aquela faz falta, a Ana Luiza (Zi). Mesmo com a distância e o pouco contato, ainda são prazerosas as nossas conversas.

De maneira semelhante, preciso agradecer aos meus amigos de campo. Nestes anos, executei diversas atividades de pesquisa e conservação, sempre na companhia destes mesmos sujeitos: Maffei, Tayar, Fred e Hudson. Foram muitos (e muitos) dias de campo, muitos (e muitos) quilômetros rodados, todos eles prazerosos, mesmo nos dias mais complicados.

Preciso também agradecer à minha família musical. São tantas pessoas maravilhosas que seriam necessárias inúmeras páginas para elencar uma a uma. De maneira especial, agradeço aos amigos do Quarteto Maia: Ana Luisa, Beatriz e Eder. A companhia de vocês tornou meus dias mais alegres. De modo especial, agradeço também aos regentes, maestros e amigos, Irandi e Paulo Maia (e também à querida Cristiane). A toda esta grande família musical, sou extremamente grato por todas as experiências magníficas e gratificantes. Cada fim de semana, cada apresentação, cada ensaio e cada vivência musical foi importante na minha formação músico e como ser humano.

Também preciso agradecer aos amigos que a vida (e a faculdade me trouxeram) e que ficaram no meu coração: Junia, Sakai, Lucas, Dante e Marquinhos. Todos vocês são lindos e especiais, cada um à sua maneira. O convívio com vocês é aquilo que me dá alegria e força. Aos amigos, agradeço a todos os que já passaram, aos que estão e aos que virão.

De modo especial, agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Reginaldo José Donatelli. Ele sempre acreditou em meu potencial desde a graduação e me forneceu todos os subsídios necessários para desenvolver esta linha de pesquisa, tão nova e fascinante, que é a Bioacústica. Além disso, ele me orientou e “ocidentou”, e permitiu que eu conhecesse novos mundos, tanto dentro da pesquisa quanto fora dela. Fora isso, todas as oportunidades, recursos e caminhos dentro da pesquisa foram pavimentados pelo trabalho dele, e permitiu o meu desenvolvimento como cientista e como pessoa. Sempre foi chefe e amigo, companheiro e supervisor, tudo ao mesmo tempo.

E por último, o mais importante. Agradeço à Natacha (e também aos meus filhos peludos: Kaoru, Yuri, Nutti, Bast, Francisco, Milk e Pã). Agradeço por tudo. Por compartilhar todos os momentos, os bons e os ruins. Por ter sido a melhor coisa que me aconteceu nestes anos (e em todos da minha vida). Por estar disponível e disposta, e por me amar desta maneira tão peculiar e tão linda. Por me deixar entrar na sua vida, em todos os seus detalhes. Por ser o meu suporte mesmo nas horas mais obscuras. Por permitir que estes meses se tornassem anos. Enfim, obrigado por ser tão você.

Acordai, corações adormecidos
Que o Deus do Amor vos chama.
Neste primeiro dia de Maio,
As aves farão maravilhas
Para vos retirar do desânimo.
Desentupam vossas orelhas
E vós sereis tocados pela alegria
Pois a estação será boa

Le chant des oyseaulx, *Clement Janecquin*

Resumo

O canal sonoro é um dos principais meios de comunicação animal. Como o som se propaga pelo ambiente, qualquer onda sonora é passível de ser alterada pelas condições do ambiente onde o emissor se insere. Determinadas características da estrutura do ambiente podem alterar a capacidade de um sinal ser detectado, como cobertura vegetal, condições climáticas, turbulência aérea, entre outros. Assim, o ambiente pode exercer uma pressão seletiva na estrutura do sinal sonoro, fazendo com que os indivíduos alterem as características de seus sinais para maximizar a propagação do som em determinados ambientes. No contexto atual, a urbanização crescente vem modificando as condições naturais das paisagens sonoras, fazendo com que a estrutura acústica do ambiente também se modifique. Juntamente com a urbanização, a descaracterização das paisagens naturais diminui a cobertura vegetal, cria anomalias térmicas e aumenta o ruído ambiental, tornando o ambiente acústico muito distinto das condições originais. Assim sendo, a urbanização configura-se como um obstáculo importante para a comunicação sonora, principalmente em grupos animais que utilizam o som como mediador de suas atividades biológicas, como as aves. Por isso, faz-se necessário que haja um conhecimento de como o ambiente urbano afeta a estrutura vocal das populações animais que vivem inseridas em tal ambiente. Deste modo, o objetivo desta tese é verificar as possíveis variações vocais entre duas populações disjuntas de *Troglodytes musculus*, buscando relacionar estas variações à estrutura abiótica do ambiente. Foram analisadas as vocalizações de machos isolados que estavam vocalizando espontaneamente de poleiros expostos em ambientes abertos, evitando que as vocalizações fossem afetadas pela cobertura vegetal, pelas interações sociais e por objetos artificiais. Foram computados três parâmetros importantes dentro das emissões vocais da espécie: a amplitude sonora, a estrutura espectral e a complexidade sonora. Os índices obtidos pelos três parâmetros foram relacionados com a estrutura ambiental e com parâmetros morfométricos dos indivíduos. Por meio destas análises, observa-se que existe uma divergência vocal entre as duas populações. Esta divergência é influenciada principalmente pela absorção atmosférica do som e pelo ruído ambiental originado do tráfego de veículos. De modo geral, a intensidade e a frequência sonora tendem a aumentar com o ruído e com a absorção sonora. Isto indica que a estrutura abiótica do hábitat exerce uma pressão sobre as vocalizações da espécie, fazendo com que a expressão vocal seja adaptada para as condições ambientais em que o indivíduo se insere.

Palavras-chave: adaptação acústica, ecoacústica, drive sensorial, condições climáticas, ruído antropogênico.

Abstract

The sound channel is one of the main media of animal communication. As sound travels through the environment, any sound wave can be altered by the conditions of the environment in which the emitter is inserted. Certain features of the environmental structure can alter the ability of signal discrimination, such as vegetation cover, weather conditions, and air turbulence, among others. Thus, the environment might exert selective pressure on the sound signal structure, causing alterations on features of the signals to maximize sound propagation in certain environments. In the current context, increasing urbanization has been changing the natural conditions of soundscapes, causing the acoustic structure of the environment to change as well. Along with urbanization, the vegetation cover is reduced, thermal anomalies are created and environmental noise is increased, making the acoustic environment very different from the original conditions. Thus, urbanization is an important obstacle for sound communication, especially in animal groups that use sound as a mediator of their biological activities, such as birds. Therefore, it is necessary to have a knowledge of how the urban environment affects the vocal structure of living animal populations inserted in such environment. Thus, the objective of this thesis is to verify the possible vocal variations between two disjoint populations of *Troglodytes musculus*, seeking to relate these variations to the abiotic structure of the environment. The vocalizations of isolated males that were spontaneously vocalizing from perches exposed in open environments were analyzed, preventing the vocalizations from being affected by vegetation cover, social interactions and artificial objects. Three important parameters within the vocal emissions of the species were computed: amplitude, spectral structure and sound complexity. The indices obtained by the three parameters were related to the environmental structure and morphometric parameters of the individuals. Through these analyzes, I observed the existence of vocal divergence between the two populations. This divergence is mainly influenced by atmospheric sound absorption and environmental noise from traffic. In general, sound intensity and frequency tend to increase with noise and sound absorption. This indicates that the abiotic structure of the habitat puts pressure on the vocalizations of the species, causing the vocal expression to be adapted to the environmental conditions in which the individual is inserted.

Keywords: acoustic adaptation, ecoacoustics, sensory drive, climatic conditions, anthropogenic noise.

Lista de Figuras

Figura 1. Indivíduo de <i>Troglodytes musculus</i> capturado durante a pesquisa.	24
Figura 2. Mapa de distribuição dos indivíduos amostrados, onde cada círculo corresponde a um indivíduo. Os círculos vermelhos correspondem aos indivíduos próximos à rodovia, enquanto os azuis correspondem aos indivíduos distantes. As linhas cinzentas representam as duas rodovias (SP-300 e SP-225). Fonte: Google Earth Engine, 2020.....	44
Figura 3. Variação nos níveis de ruído e amplitude vocal entre os grupos próximo e distante de <i>Troglodytes musculus</i>	48
Figura 4. Relações lineares entre a amplitude sonora de <i>Troglodytes musculus</i> e a absorção sonora (esquerda) e o ruído ambiental (direita). As linhas pretas representam a regressão linear para cada modelo parcial.....	49
Figura 5. Espectrogramas de frequência (direita) e oscilogramas (esquerda) dos arquivos vocais analisados. Estão discriminados exemplos de vocalizações de indivíduos situados próximos da rodovia (A03) e distantes (B20).....	64
Figura 6. Espectros de amplitude dos arquivos vocais analisados. Estão discriminados exemplos de vocalizações de indivíduos situados próximos da rodovia (A03) e distantes (B20). As áreas coloridas (azul e vermelha) representam os limites da vocalização dentro do espectro. Os círculos representam as frequências de pico para cada vocalização. A área acinzentada no gráfico da esquerda representa as bandas de ruído antropogênico.	64
Figura 7. Distribuição das variáveis preditoras nos dois grupos (próximo e distante).....	67
Figura 8. Distribuição das variáveis vocais nos dois grupos (próximo e distante).....	69
Figura 9. Regressões lineares múltiplas entre os preditores e as variáveis vocais. Cada quadrado representa um indivíduo dos grupos próximo e distante da rodovia. As variáveis foram plotadas com os valores preditos padronizados, que estão descritos no eixo X. Também estão descritos a natureza positiva ou negativa dos preditores. As linha pretas representam a linha de regressão para cada modelo.....	71
Figura 10. Ordenação multidimensional não-métrica das características vocais de <i>T. musculus</i> . Os polígonos delimitam os contornos multivariados para cada grupo (próximo e distante). Os quatro eixos representam a ordenação dos preditores de variação (ruído, atenuação, PC de tamanho corporal e massa corporal). Os dados demonstram uma boa aderência ao modelo proposto (estresse = 0,148).	72
Figura 11. Espectrogramas de frequência dos arquivos sonoros avaliados. Estão exemplificados duas vocalizações pertencentes a cada um dos grupos: próximo (A03) e distante (B20) da rodovia. Nota-se que ambas apresentam as seções introdutória e terminal.	90
Figura 12. Regressões lineares múltiplas entre os preditores (ruído, absorção sonora e massa corporal) e as variáveis de complexidade vocal. Cada quadrado representa um indivíduo pertencente a um dos grupos. Plotei as variáveis junto com os valores preditos padronizados para o conjunto de preditores (descritos abaixo do eixo X). A natureza da relação (positiva ou negativa) está discriminada juntamente com cada preditor. A linha preta representa a linha de regressão para cada modelo.	92
Figura 13. Curvas de rarefação da diversidade silábica dos grupos próximo e distante da rodovia. Os quadrados representam os valores observados para cada grupo, enquanto a linha pontilhadas representam a extrapolação dos dados	93
Figura 14. Ordenação multidimensional não-métrica (nMDS) das características sintáticas analisadas. Os quatro eixos representam os preditores de variação vocal (absorção, ruído, CP de tamanho corporal e massa). Os polígonos delimitam os limites alcançados pelas amostras em cada um dos grupos (próximo e distante).....	93

Lista de Tabelas

Tabela 1. Coeficientes extraídos da análise de componente principal utilizado para sintetizar as variáveis de tamanho corporal de (<i>Troglodytes musculus</i>).....	47
Tabela 2. Diferença nas variáveis avaliadas nos indivíduos situados próximo e distante da rodovia de <i>Troglodytes musculus</i> . Os dados de cada variável estão representados por média \pm desvio padrão (n – número de amostras, t – valor do teste t, g.l. – graus de liberdade, p – nível de significância).....	48
Tabela 3. Testes de normalidade (Shapiro-Wilk), homocedasticidade (Levene) e análise de variância (ANOVAs) para cada variável vocal transformada. Os valores que apresentaram diferenças significativas foram destacados ($p < 0,05$).....	68
Tabela 4. Resumo dos modelos de regressão linear para cada variável. Estão descritos apenas os modelos que tiveram significância estatística ($p < 0,05$). Para cada um, está exibido o coeficiente de regressão (r), o coeficiente de determinação (r^2), os graus de liberdade (gl.1 e gl.2), o valor da estatística F e o nível de significância. Também estão exibidos os valores dos coeficientes parciais β e os valores de t para cada preditor.	70
Tabela 6. Variação nos parâmetros vocais analisados. Os valores representam a média \pm desvio padrão para os grupos próximo e distante da rodovia. Também estão exibidos os valores da estatística F , de significância estatística (p) e de variância total em um determinado parâmetro vocal (η^2). Os valores em negrito representam as variáveis que variaram significativamente entre os grupos.....	91
Tabela 7. Modelos de regressão linear para cada variável. Estão exibidos apenas as regressões que apresentaram um nível de significância $p < 0.05$. Além disso, estão discriminados os coeficientes de regressão (r), de determinação (r^2), os valores de F e de significância (p). Além disso, também exibidos os coeficientes parciais β e os valores de t para cada preditor.	91

Sumário

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1. Comunicação sonora	13
1.2. Vocalização de aves	15
1.3. Transmissão sonora no ambiente	17
1.4. Urbanização e transmissão sonora ambiental.....	19
1.4.1. A questão do ruído antropogênico	19
1.4.2. Estrutura acústica do ambiente urbano	22
1.5. Espécie de Estudo.....	24
1.6. Justificativa.....	26
1.7. Objetivos	27
1.7.1. Objetivos Gerais.....	27
1.7.2. Objetivos Específicos.....	28
1.8. Referências	29
2. CAPÍTULO 1 – RUÍDO ANTROPOGÊNICO E ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA DO SOM INDUZEM A VARIAÇÕES NA AMPLITUDE DAS VOCALIZAÇÕES DE <i>Troglodytes musculus</i>	38
2.1. Resumo.....	38
2.2. Abstract	39
2.3. Introdução.....	40
2.4. Material e métodos	42
2.4.1. Seleção dos indivíduos em campo	42
2.4.2. Captura, marcação e morfometria.....	44
2.4.3. Medidas acústicas	45
2.4.4. Análise de dados	46
2.5. Resultados	47
2.6. Discussão.....	49
2.7. Referências	52
3. CAPÍTULO 2 – RUÍDO DO TRÁFEGO E ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA DO SOM AFETAM A ESTRUTURA ACÚSTICA DAS VOCALIZAÇÕES DE <i>Troglodytes musculus</i>	58
3.1. Resumo.....	58
3.2. Abstract	59
3.3. Introdução.....	60
3.4. Material e métodos	62
3.4.1. Seleção, captura e medição dos indivíduos.....	62
3.4.2. Gravação das vocalizações.....	62
3.4.3. Medidas acústicas	63

3.4.4. Tratamento e análise dos dados	65
3.5. Resultados	67
3.6. Discussão.....	72
3.7. Referências	76
4. CAPÍTULO 3 - FATORES AMBIENTAIS INFLUENCIAM NA COMPLEXIDADE SINTÁTICA DAS VOCALIZAÇÕES DE <i>Troglodytes musculus</i>	82
4.1. Resumo.....	82
4.2. Abstract	83
4.3. Introdução.....	84
4.4. Material e métodos	85
4.4.1. Seleção, captura e medição dos indivíduos.....	85
4.4.2. Registro das vocalizações	86
4.4.3. Parâmetros sintáticos.....	86
4.4.4. Estimativa da diversidade silábica	88
4.4.5. Análise dos dados.....	88
4.5. Resultados	89
4.5.1. Composição sintática das vocalizações.....	89
4.5.2. Divergência entre os grupos.....	90
4.6. Discussão.....	94
4.7. Referências	97
CONCLUSÃO.....	104
APÊNDICES.....	105

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Comunicação sonora

A comunicação é uma área extremamente importante dentro do estudo do comportamento animal, já que as interações sociais entre indivíduos são baseadas na troca de informação. Os animais apresentam diversos mecanismos para transmitir mensagens, emitindo sinais que envolvem canais químicos, visuais, acústicos, químicos e elétricos para realizar tal função (ALCOCK, 1989). Para que a comunicação ocorra, um emissor deve codificar uma mensagem em sinal, para que este seja transmitido através de um meio e atinja um receptor (SHANNON & WEAVER, 1949). Ao receber o sinal, o receptor pode responder ajustando seu comportamento (BRADBURY & VEHRENCAMP, 2011). Assim sendo, a comunicação depende da intencionalidade do emissor e da capacidade de interpretação do receptor. Todo esse processo é estruturado para criar uma relação entre emissor e receptor, buscando um ajuste de ambos ao ambiente (SILVA, 2001).

Para se comunicar através de longas distâncias, os animais podem transmitir suas mensagens por meio de diversos canais. Contudo, aqueles que são mais utilizados dentro do meio terrestre são os canais químicos, visuais e acústicos (ALCOCK, 1989). Cada um destes canais apresenta vantagens e desvantagens em seu uso para a comunicação. O uso de determinado canal por uma espécie depende das limitações fisiológicas de seus sistemas sensoriais e motores, além de estar relacionado com a viabilidade ecológica para o contexto onde a espécie se insere (JOHNSGARD, 1967). Os sinais visuais são muito empregados devido ao seu baixo custo energético. Contudo, a disponibilidade de luz e a obstrução por obstáculos são fatores que limitam o seu uso (CATCHPOLE & SLATER, 2008). Já os sinais químicos não apresentam as mesmas desvantagens do canal anterior, pois possuem um alto alcance de detecção e propagam-se ao redor dos obstáculos ambientais, além de não dependerem da luminosidade. Entretanto, sua persistência no ambiente torna difícil uma mudança rápida no conteúdo da mensagem, fazendo com que não sejam adequados para a transmissão de mensagens complexas, que sofrem mudanças no decorrer do processo comunicativo (MARLER & SLABBEKOORN, 2004; CATCHPOLE & SLATER, 2008)

Por sua vez, os sinais acústicos são rápidos e transientes, o que os torna ideais para a transmissão rápida de informação através de um meio. Eles também não dependem da luminosidade para ser transmitido. Por ser uma onda mecânica, o som pode se propagar em todas as direções em um meio fluido, permitindo que ele seja transmitido em volta (e até mesmo através) de obstáculos (ALCOCK, 1989). A rápida transiência sonora torna fácil o ajuste de resposta ao contexto em que o emissor se insere. Porém, eles são mais custosos aos indivíduos que os produzem porque cada vez que um som é emitido, os músculos respiratórios e fonadores destes gastam energia para a sua produção (BRACKENBURY, 1979).

Qualquer evento que se interponha no processo de comunicação dificulta a decodificação da mensagem por parte do receptor (BRADBURY & VEHRENCAMP, 2011). Um dos pressupostos básicos da comunicação sonora em animais é de que os sinais evoluem para aumentar sua eficiência de transmissão de informação, buscando a diminuição do gasto energético (WILEY & RICHARDS, 1985). Assim, dado um determinado tempo evolutivo, os sinais sonoros mais eficazes são selecionados dentro de um certo contexto, priorizando características como eficiência de transmissão, alcance e conteúdo de informação (BRUMM & NAGUIB, 2009).

A informação contida em um sinal é o resultado da associação entre a estrutura do sinal com as interferências do meio. O conteúdo de informação do sinal é sempre maior na fonte (informação transmitida) do que no local de recepção (informação recebida) (WILEY & RICHARDS, 1978). Esta diferença entre a informação que foi transmitida e a que foi recebida é denominado *ruído*. De uma perspectiva centrada na teoria da comunicação, o ruído é qualquer perturbação que afeta um sinal e pode distorcer a informação carregada por ele (SHANNON & WEAVER, 1949). Assim, o ruído na comunicação reduz a eficácia da transmissão de um sinal por um canal, e pode levar tanto o receptor quanto o emissor a modificarem seu comportamento para aumentar a eficácia de transmissão frente a um obstáculo (BRUMM & NAGUIB, 2009).

1.2. Vocalização de aves

A vocalização das aves é extremamente diversificada e representa um dos maiores exemplos de plasticidade comportamental do reino animal. A maioria das vocalizações é distinta para cada espécie, e diversos estudos têm documentado nas últimas décadas uma ampla variação de sinais vocais em diferentes níveis de organização, incluindo específico, populacional, e individual (PODOS, 2004). Sendo assim, atualmente, diversos pesquisadores têm trabalhado para entender as origens da diversidade fenotípica nos sinais sonoros.

Tal diversidade surge, principalmente, dentro da estrutura sonora de uma vocalização. Esta “estrutura” refere-se às características componentes de uma onda sonora: período, frequência, amplitude e comprimento de onda (CATCHPOLE & SLATER, 2008). A modulação destas características sonoras cria uma variedade marcante, permitindo a expressão de sinais distintos, mesmo dentro de uma mesma espécie ou indivíduo (PODOS, 2004).

Portanto, é necessário padronizar as definições e nomenclaturas com relação sinais vocais de aves, para que seja possível a análise comparativa de seus elementos. Historicamente, as vocalizações de aves têm sido denominadas dicotomicamente ou como “cantos” ou como “chamados”¹. “Cantos” tendem a ser tratados como vocalizações complexas, com padrões intrincados, sendo utilizados exclusivamente por indivíduos machos durante a estação reprodutiva (GILL, 2007; CATCHPOLE & SLATER, 2008). Já “chamados” seriam considerados vocalizações mais simples, curtas, estereotipadas e executadas por ambos os sexos (CATCHPOLE & SLATER, 2008). Entretanto, tal dicotomia é vazia de significado, já que não existe qualquer diferença na estrutura acústica, emissão, recepção e desenvolvimento entre cantos e chamados (GILL, 2007). SPECTOR (1994), em uma extensa revisão sobre o uso da terminologia que fundamenta o estudo das vocalizações de aves, demonstra que os critérios para a adoção dos termos “canto” e “chamado” são obscuros, geralmente

¹ Considera-se, para efeitos de tradução, que o termo “canto” é equivalente ao termo “*song*”, enquanto “chamado” é traduzido do termo “*call*”. Ambos os termos traduzidos são adaptados de publicações científicas originalmente escritas em língua inglesa. Por isso, as traduções em português também carregam os preceitos e bases históricas antropomórficas que fundamentam as designações dos sinais vocais das aves.

se pautando em argumentos vazios de significado biológico, sendo atribuído à tradição e ao costume dos pesquisadores dentro da Ornitologia.

Sendo assim, neste texto, considerarei os sinais vocais emitidos por aves como “vocalizações”. Este termo é carregado de relevância biológica, pois designa os sinais sonoros emitidos por um aparelho fonador específico (*i. e.* siringe) que utiliza o fluxo de ar vindo do sistema respiratório como fonte de energia para a produção de sinais (BRACKENBURY, 1982). Esta terminologia diferencia os sinais acústicos vocais daqueles produzidos por outras estruturas, como o tamborilar produzido pelo bico ou o farfalhar produzido pelas asas (BYERS & KROODSMA, 2016). Não existem provas conclusivas de que aves são capazes de produzir sentenças que apresentem uma sintaxe lexical típica das composições humanas (MOLINO, 2000). Ainda que algumas delas vocalizem em padrões semelhantes aos modos tonais e rítmicos da música humana (ARAYA-SALAS, 2012; RAVIGNANI, 2015), a mensagem transmitida por suas vocalizações ainda não atinge um nível simbólico abstrato que permita comparar a evolução deste “canto” das aves com a música humana.

Pelo mesmo motivo, utilizarei o termo “elemento” para designar as menores unidades sonoras constituintes da vocalização, e não “nota”, que é normalmente empregado (CATCHPOLE & SLATER, 2008). O conjunto destes elementos, agrupados em uma unidade sonora composta, foi denominado “sílaba” (MARLER & SLABEKOORN, 2004). A organização destas sílabas em conjuntos temporais foi denominada “frase”, já que este termo compreende organizações sintáticas em vários níveis de complexidade (BERWICK *et al.*, 2011). Deste modo, uma vocalização é composta de conjuntos de motivos organizados temporalmente.

As pesquisas recorrentes sobre a vocalização das aves tendem a enfatizar a influência da estrutura acústica na evolução dos processos comunicativos. Tal qual a maioria dos sinais de acasalamento, a seleção sexual tem uma grande influência no desenvolvimento de características sonoras elaboradas e distintas (SEARCY & YASUKAWA, 1996). A seleção intra-sexual também pode contribuir para a diversificação das vocalizações, favorecendo certos padrões sonoros que sejam capazes de distinguir indivíduos por meio de seus sinais acústicos (LAMBRECHTS & DHONDT, 1995). Nas

espécies que possuem vocalização baseadas em aprendizado, as vocalizações podem diversificar-se rapidamente por meio do acúmulo de imprecisões de cópia durante a transmissão cultural (PAYNE, 1996). A diversidade vocal também pode variar como resposta à história da vida ou à variáveis ecológicas (SEDDON, 2005).

Embora a vocalização das aves possa ser suscetível a mudanças ao longo do tempo evolutivo, tais evoluções geralmente apresentam algumas limitações. Assim como quaisquer outras características fenotípicas, a evolução vocal é moldada por restrições intrínsecas à variação genética e ao design mecânico das estruturas morfológicas (PODOS, 2004). A compreensão destas restrições são de grande valia, pois ajudam a especificar os limites de expressão fenotípica que podem ocorrer, bem como sobre quais traços o processo seleção pode atuar (PERRIN & TRAVIS, 1992).

1.3. Transmissão sonora no ambiente

Assim como qualquer canal de comunicação, o som impõe certos obstáculos na sua propagação. Dentre os principais fatores que dificultam a transmissão eficaz de um sinal sonoro, estão a atenuação e degradação sonora (WILEY & RICHARDS, 1982; BRUMM & NAGUIB, 2009). A atenuação é a somatória de vários eventos acústicos que ocorrem simultaneamente, como a absorção atmosférica, a dispersão sonora e a atenuação por obstáculos, sendo dependente das bandas de frequência do sinal emitido (EMBLETON, 1996). Este evento acústico causa a diminuição da amplitude sonora no decorrer da transmissão do sinal, tornando o som menos intenso e menos capaz de atingir um possível receptor. A ação da atenuação tende a ser mais expressiva em sinais de alta frequência sonora (BASS, 1990), sendo um fator marcante na expressão sonora de animais que dependem destas bandas para se comunicar, como aves e morcegos (SNELL-ROOD, 2012).

Já a degradação sonora afeta a estrutura do sinal por meio dos efeitos combinados da reverberação e das flutuações de amplitude (WILEY & RICHARDS, 1982). Estes efeitos tendem a afetar a estrutura temporal dos sinais através da interação das múltiplas reflexões e difrações sonoras sobre um sinal carreador (BRUMM & NAGUIB, 2009). Em ambientes fechados, a reverberação causada

pela folhagem e pelos troncos das árvores é um dos principais fatores que degrada um sinal sonoro (NAGUIB, 2003). Já em ambientes abertos, as flutuações bruscas de temperaturas, que frequentemente estão associadas aos gradientes de turbulência do ar, podem afetar o sinal sonoro de uma maneira mais efetiva do que a vegetação do entorno (WILEY & RICHARDS, 1978).

Juntamente com a atenuação e a degradação, o ruído ambiental² pode ser um fator preponderante na transmissão de um sinal acústico. A magnitude da interferência na comunicação acústica depende da sobreposição espectral entre o sinal e o ruído (BRUMM & SLABBEKOORN, 2005). Quanto mais similares entre si, maior será a competição entre o ruído ambiental e o sinal, fazendo com que este último seja mascarado pelas bandas espectrais do ruído (BRUMM & ZOLLINGER 2011; FRANCIS & BARBER, 2013). Assim, o ruído ambiental pode ser outro fator crucial, que pode modificar a expressão vocal dos indivíduos (BRUMM & NAGUIB, 2009).

Deste modo, os efeitos da degradação, da atenuação e do ruído diminuem o espaço ativo de um sinal, que corresponde à distância máxima que um sinal pode percorrer mantendo suas características originais (CATCHPOLE & SLATER, 2008). Para superar estes obstáculos e maximizar a transmissão de informação, um emissor pode ajustar as características do sinal ao contexto ambiental onde se insere. Assim, a Hipótese de Adaptação Acústica, proposta por Eugene S. Morton (1975), postula a existência de uma convergência estrutural de sinais acústicos emitidos por animais situados em ambientes de estrutura semelhante. Segundo esta hipótese, as pressões seletivas dependentes do ambiente teriam moldado a estrutura acústica das vocalizações de aves, priorizando um maior alcance sonoro (BONCORAGLIO & SAINO, 2007).

Contudo, estes ajustes mostram-se mais complexos do que o proposto pela Hipótese da Adaptação Acústica. Como a vocalização de aves é um mediador de comportamento sexual, os atributos físicos do sinal acústico estão sujeitos a forte seleção sexual (MAAN & SEEHAUSER, 2011). Deste modo,

² Neste caso, o *ruído ambiental* não deve ser confundido com o *ruído de canal* que foi definido anteriormente. Considerando uma perspectiva mais ampla, a atenuação e a degradação também poderiam ser consideradas como casos particulares de ruído, como definido por Shannon & Weaver (1949). Contudo, o termo *ruído ambiental* vai ser utilizado na sua conotação mais comum, designando os sons presentes no ambiente que competem com um sinal pelo espaço acústico durante a transmissão sonora.

o exagero de certos traços sexuais pode ser reforçado sob contextos reprodutivos, mesmo quando não são condizentes com os limites impostos pelo ambiente (WILKINS, 2013). Por isso, muitas vezes, existe uma correlação intrínseca entre a coevolução dos sinais, dos sistemas sensoriais e da escolha de ambientes, que afetam tanto a emissão quanto a recepção dos sinais transmitidos (ENDLER, 1992).

1.4. Urbanização e transmissão sonora ambiental

1.4.1. A questão do ruído antropogênico

Quase todas as espécies do planeta foram, de alguma forma, afetadas pelas atividades humanas (SWADDLE *et al.*, 2015). Este impacto ocorre, principalmente, por meio de cinco mecanismos: perda ou fragmentação de hábitat, exploração direta, dispersão de espécies exóticas, mudanças climáticas e vários tipos de poluição (IPCC, 2007; SIH *et al.*, 2011). Embora estas cinco modalidades sejam complexas e afetem as espécies de maneiras distintas, elas compartilham o fato de que são mudanças ambientais rápidas induzidas pelos humanos. Os organismos submetidos a estas mudanças sofrem novas pressões seletivas, que geralmente envolvem taxas de modificações muito mais rápidas que as decorrentes do processo evolutivo (PALUMBI, 2001).

Deste modo, os impactos das atividades humanas ecoam em todas as esferas do meio ambiente, inclusive nas relações entre a paisagem e a sua composição sonora. Nos últimos anos, diversos pesquisadores têm voltado seus olhares para as relações intrínsecas entre os sons emitidos pelos animais e aqueles que são produzidos pelo ambiente, dentro do campo da Ecologia Acústica. O principal enfoque deste ramo da ciência é a análise da paisagem acústica, definida como as características acústicas de uma área que refletem seus processos naturais (SCHAFER, 1993). Os componentes das paisagens acústicas podem ser divididos em três grupos: biofonias, que correspondem à composição de sons produzidos pelos organismos vivos; geofonias, que tratam dos sons não biológicos produzidos por fenômenos ambientais abióticos; e as antropofonias, que correspondem aos sons produzidos pelas atividades humanas (KRAUSE, 1987; PIJANOWSKI *et al.*, 2011).

Tal divisão decorre da natureza estrutural de cada uma das categorias. O ruído antropofônico é diferente dos geofônicos e biofônicos, já que, geralmente, são mais intensos e possuem menores bandas de frequências que os naturais (BRUMM & SLABBEKOORN, 2005; MCGREGOR, 2013). Os ruídos antropogênicos podem atuar de maneira pontual ou contínua. Ruídos pontuais incluem impulsos sonoros de alta intensidade e tendem a causar impactos agudos, como danos temporários ou permanentes aos sistemas auditivos. Já os ruídos contínuos levam à efeitos crônicos, como estresse e mascaramento sonoro (MCGREGOR, 2013). Deste modo, a exposição a ruídos afeta negativamente os mecanismos sensoriais que permitem aos animais interagir com o meio (SWADDLE *et al.*, 2015). Os sistemas auditivos mediam comportamentos essenciais para a sobrevivência dos organismos, como escolha de parceiros reprodutivos, defesa de território, forrageamento e evasão de predadores (BRADBURY & VEHRENCAMP, 2011). Quando tais sistemas são perturbados pela poluição sonora, tais comportamentos se tornam menos eficientes, o que afeta a sobrevivência dos indivíduos. O mascaramento dos sinais sonoros emitidos pelos organismos pelo ruído é um dos mecanismos de interferência mais estudados (FRANCIS & BARBER, 2013). Contudo, o ruído excessivo pode afetar a percepção de perigos (SHANNON, 2014) e afetar a concentração do animal (CHAN, 2010). Estes fatores podem alterar vários comportamentos e características que são importantes para a sobrevivência.

As rápidas mudanças nos níveis de ruído estão acontecendo numa escala global, similares aos processos de mudança na cobertura do solo e mudanças climáticas (SWADDLE *et al.*, 2015). Estudos são necessários para compreender como este processo de perturbação acelerado afeta a vida dos animais. Grande parte do conhecimento da influência do ruído sonoro excessivo em animais é focado nos efeitos comportamentais a curto prazo. Organismos podem responder a esta perturbação com determinada tolerância (FRANCIS & BARBER, 2013; SLABBEKOORN, 2013) ou então fugir para evitá-la (FRANCIS, 2009).

De modo geral, o ruído influencia a fisiologia, a morfologia e o comportamento dos indivíduos (SLABBEKOORN & RIPMEESTER, 2008; SWADDLE *et al.*, 2015) e em um nível populacional,

pode alterar parâmetros como abundância e densidade (FRANCIS & BARBER, 2013). Para reagir em um ambiente ruidoso, animais consomem mais energia, reduzem o tempo e/ou a eficácia de forrageamento, e perdem oportunidades de reprodutivas. Uma das mudanças comportamentais se refere ao aumento de vigilância durante o tempo gasto em alimentação (RABIN, 2006). Quando submetidos a ruídos intenso, indivíduos de *Fringilla coelebs* gastam menos tempo com suas cabeças abaixadas para procurar alimento (QUINN, 2006), sugerindo que estas aves precisam confiar mais nos sinais visuais do que nos auditivos. Este maior risco de predação tem reflexos negativos nas taxas de ingestão de alimento, que tem efeito nas taxas de sobrevivência e de sucesso (SLABBEKOORN & RIPMEESTER, 2008).

O ruído também pode ser uma barreira na detecção entre animais da mesma espécie. Algumas espécies de aves dependem do comportamento vocal para delimitar territórios. Para isso, as características de suas vocalizações, como frequência, amplitude e repertório vocal, exercem influência direta na manutenção deste território. A mensagem codificada na estrutura da vocalização é determinante para a sua defesa (RIPMEESTER, 2007), já que a transmissão efetiva da mensagem pode prevenir possíveis competidores de se aproximar, evitando um gasto excessivo de energia e de tempo, além de diminuir os riscos de ferimentos por competição (BRADBURY & VEHRENCAMP, 2011; SLABBEKOORN & RIPMEESTER, 2008). Outros efeitos comportamentais em animais incluem a erosão do vínculo reprodutivos entre parceiros já definidos (SWADDLE & PAGE, 2007; DES AUNAY, 2014), aumento do tempo de forrageamento (SIEMERS & SCHAUB, 2010) e diminuição no aprendizado (CHENG, 2011).

Entre as aves, os efeitos comportamentais mais documentados são as variações na estrutura acústica das vocalizações que ocorrem para evitar os efeitos do mascaramento sonoro (PATRICELLY & BLICKLEY, 2006). O aumento da intensidade de ruídos urbanos pode prejudicar a recepção destes sinais, o que leva algumas aves a alterar a estrutura bioacústica destas emissões para adequar a transmissão no ambiente acústico local. Primeiramente, as aves podem aumentar os valores de amplitude em resposta ao ruído, como postulado pelo Efeito de Lombard (LOMBARD,

1911). Tal efeito é bem documentado em aves (BRUMM & TODT, 2000; KATTI & WARREN, 2004; NEMETH, 2013; SCHUSTER *et al.*, 2013; KIGHT & SWADDLE, 2015; RIÓS-CHELEN, 2015; ZOLLINGER & BRUMM, 2015). O ruído também pode causar uma tendência de aumento nos valores gerais de frequência das vocalizações das aves (SLABBEKOORN & SMITH, 2002; SLABBEKOORN & PEET, 2003; FERNÁNDEZ-JURICIC *et al.*, 2005; BERMÚDEZ-CUAMATZIN, 2009; ODEN *et al.*, 2015; POTVIN & MACDOUGALL-SHACKLETON, 2015), já que ele predomina nos valores de frequência mais baixos. Sendo assim, as aves tenderiam a aumentar os valores de frequência para evitar o mascaramento sonoro de suas vocalizações. O ruído também pode exercer pressão seletiva nos padrões temporais das vocalizações. Aves situadas em ambientes ruidosos apresentam vocalizações mais longas, tanto na duração das sílabas (HAMAQ & WATANABE, 2011; GOUGH, 2014) quanto na redundância do sinal sonoro (FICKEN, 1974; BRUMM & SLATER, 2006; HAMAQ & WATANABE, 2011). Esta perturbação também influencia a estrutura do repertório vocal, fazendo com que as aves emitam vocalizações com uma menor variedade de sílabas (HALFEWERK & SLABBEKOORN, 2009; CARTWRIGHT, 2014). Além disso, o excesso de ruído pode modificar a distribuição de organismos e diminuir o sucesso reprodutivo da espécie afetada, causando uma divergência evolutiva da espécie (WARREN, 2006; ZOLLINGER, 2013).

1.4.2. Estrutura acústica do ambiente urbano

Além do ruído abundante, a zona urbana impõe outros obstáculos para a comunicação animal. A estrutura das cidades é composta de diversas edificações artificiais, com superfícies planas compostas de materiais reflectantes (como metal, concreto e vidro), que afetam principalmente a reverberação dos sons (WARREN *et al.*, 2006). Enquanto a vegetação natural tende a atenuar e diminuir o alcance sonoro, as construções urbanas podem refletir os sons por diversas vezes (KATTI & WARREN, 2004). Este efeito, denominado “cânion urbano”, faz com que a onda sonora original seja degradada pelas interações com as sucessivas reflexões, causando um fenômeno de eco de vibração. Assim, a

onda resultante possui uma estrutura diferente daquela emitida, tendo perdido parte de seu conteúdo de informação ao ser transmitida em um ambiente urbano (PATRICELLI & BLICKLEY, 2006).

De modo semelhante, as condições climáticas urbanas são bem distintas daquelas encontradas nos ambientes naturais, o que pode conseqüentemente afetar a transmissão sonora por intermédio da atenuação atmosférica. Ambientes urbanos tendem a ser mais quentes e mais secos, com ventos menos intensos, e com uma variação climática mais ampla do que ambientes naturais (KAUFFMAN, 2007). Como os fenômenos de atenuação e degradação atmosférica do som são dependentes de temperatura e da umidade (BASS *et al.*, 1990; EMBLETON, 1996), as condições de propagação de sinais acústicos em ambientes urbanos é muito variável, o que pode refletir em pressões seletivas diferenciais sobre as populações animais que habitam ambientes urbanos (KATTI & WARREN, 2004).

Atualmente, já existem evidências que debatem a influência da configuração ambiental do ambiente urbano na vocalização de aves, demonstrando que existem diversos aspectos que moldam a expressão vocal das aves além do ruído. Como os efeitos de reverberação e atenuação são dependentes da frequência, determinadas bandas são transmitidas de maneira mais eficiente, e podem ser beneficiadas em ambientes urbanos (PATRICELLI & BLICKLEY, 2006; SLABBEKOORN, 2007). Job *et al.* (2016) demonstraram que indivíduos de *Spizella passerina* vocalizam com frequências de pico menores em ambientes densamente urbanizados, independentemente do nível de ruído do ambiente.

Portanto, a questão da comunicação em contextos urbanos é complexa e demanda uma exploração compreensiva, que englobe diversos aspectos da urbanização. A crescente urbanização representa um dos principais fatores que influencia na perda da biodiversidade. Entre os principais efeitos causados estão a perda de habitats, o isolamento de populações, o aumento do efeito de borda, o aumento na mortalidade de indivíduos, a dispersão de espécies exóticas, a modificação no comportamento das espécies e o acesso das perturbações humanas a novas áreas (TROMBULAK & FRISSEL, 2000; FORMAN *et al.*, 2002). A poluição sonora gerada pelas atividades antrópicas se destaca como uma

das perturbações mais importantes, afetando cada espécie de maneira diferencial. Em ambientes urbanos, o ruído pode atuar juntamente com as anomalias artificiais na transmissão sonora, favorecendo determinadas características vocais em populações situadas nestas localidades. Portanto, tais habitats podem exercer pressões seletivas diferenciais, levando a progressivas divergências vocais entre populações de uma mesma espécie (KATTI & WARREN, 2004; FRANCIS & BARBER, 2013; SWADDLE *et al.* 2015).

1.5. Espécie de Estudo

A corruíra, *Troglodytes musculus* Naumann, 1823 (Fig. 1) é uma espécie inserida dentro da família Troglodytidae. Esta família ocorre principalmente na América, sendo mais diversa na América Central e na América do Sul. Apenas uma espécie do gênero (*Troglodytes troglodytes*) foi introduzida em algumas regiões da Europa, Ásia e África. As espécies desta família possuem um tamanho corporal relativamente pequeno (9 - 22 cm), plumagens pouco conspícuas (em cores marrons, avermelhadas, brancas e pretas) e não apresentam dimorfismo sexual.



Figura 1. Indivíduo de *Troglodytes musculus* capturado durante a pesquisa.

Elas são adaptadas a uma diversidade grande de habitats e podem ser encontradas em áreas florestais, bordas de florestas, arbustos, áreas abertas e rochas (eBIRD, 2019). Além disso, muitas espécies se beneficiam da modificação de habitat feita pelo homem, habitando áreas suburbanas e rurais. As espécies são primariamente insetívoras, mas algumas variam os itens alimentares de acordo com a disponibilidade, podendo se alimentar de frutas e sementes em épocas pouco favoráveis. Possuem vocalizações complexas que são relacionadas aos aspectos reprodutivos, como a atração de parceiros sexuais e defesa de território. Estas vocalizações são muito influenciadas pelo aprendizado, e o feedback auditivo é importante para a ontogenia vocal das espécies (KROODSMA & BREWER, 2005).

A espécie *T. musculus* se distribui por toda América do Sul e pelo sul da América Central. Atualmente, existe uma divergência quanto à sua nomenclatura taxonômica. Muitas organizações e comitês tratam o táxon como uma das 31 subespécies pertencente à *Troglodytes aedon*. Vieillot, 1809 (CLEMENTS, 2018; GILL & DONSKER, 2019; REMSEN, 2019). Contudo, o Comitê Brasileiro de Registros Ornitológicos (CBRO) trata *T. musculus* como espécie distinta de *T. aedon*, devido principalmente a divergências comportamentais, morfológicas e genéticas (BRUMFIELD & CAPPARELLA, 1996; KROODSMA & BREWER, 2005; SOSA-LÓPEZ & MENNILL, 2014; KALUTHOTA 2016), atribuindo à espécie três subespécies distintas: *Troglodytes musculus clarus* Berlepsch & Hartert, 1902, *Troglodytes musculus musculus* Naumann, 1823 e *Troglodytes musculus bonariae* Hellmayr, 1919 (PIACENTINI, 2015). Por esta razão, neste texto, decidi seguir as proposições do CBRO para a espécie, tratando o táxon como *T. musculus*.

A espécie é pequena (12 cm em média), apresentando uma coloração marrom, com a região dorsal mais clara; faixa marrom-clara na região dos olhos; região uropigial acanelada, com rajado escuro nas penas da cauda e das asas (KROODSMA 2019). Ela ocupa diversos habitats, sendo geralmente encontrada em áreas abertas, áreas arbustivas, bordas de florestas e clareiras (SKUTCH, 1953). Ela é uma espécie bem adaptada a áreas perturbadas e aos subúrbios, podendo se beneficiar das mudanças no habitat natural (SICK, 1997). Por ser uma espécie sedentária com pouca movimentação, ela

estabelece territórios e utiliza a vocalização para delimitá-los (JOHNSON, 1998). Estas são bem conspícuas e são emitidas quando a ave está em poleiros expostos (GWYNNE, 2004), o que facilita a identificação do indivíduo emissor.

As vocalizações desta espécie são muito utilizadas na relação social dos indivíduos (PLATT & FICKEN, 1986; JOHNSON & KERMOTT, 1991; MULLER, 1997). Elas mediam principalmente contextos reprodutivos, como a escolha de parceiros, a competição entre machos e o estabelecimento de território (JOHNSON & KERMOTT, 1991). Tais territórios são menores que 1 ha (JOHNSON, 1998; KROODSMA & BREWER, 2005), e a ave, por ser extremamente territorialista e sedentária, dificilmente abandona seu território para vocalizar espontaneamente (KROODSMA 2019). Qualquer ruído que se sobreponha às faixas de frequência em que a ave vocaliza (cerca de 3,0 kHz) (PLATT & FICKEN, 1986) pode reduzir a efetividade do processo comunicativo, diminuindo o sucesso reprodutivo da espécie (SWADDLE & PAGE, 2007). Assim, as vocalizações de *T. musculus* podem demonstrar os efeitos que as intervenções dos ruídos antropogênicos exercem sobre as diferentes populações de aves, permitindo a comparação com ambientes que não sofrem tal perturbação.

1.6. Justificativa

A espécie em estudo é um modelo importante para análise desta tese pelo fato de utilizar a vocalização como principal mediador de sua interação social. A estrutura ambiental poderá ser um fator determinante para definir as modificações estruturais e sintáticas das vocalizações dessa espécie, e isto poderá ser inferido para outras espécies de aves Neotropicais, como fizeram diversos autores em climas temperados. Deste modo, verificarei se existe um real impacto da estrutura do ambiente (*i. e.* ruído antropogênico excessivo e absorção atmosférica do som) na comunicação vocal desta espécie.

Muitas das pesquisas referentes à ecologia acústica se restringem às espécies de aves na Europa e na América do Norte. Os estudos que abordam a acústica da avifauna Neotropical se relacionam com aspectos de comportamento, evolução, sistemática e ecologia intrínsecos das espécies. As poucas pesquisas referentes aos impactos da atividade humana na comunicação sonora das aves abordam

principalmente a estrutura acústica do som e não se focam com outras características, como o repertório vocal e a sintaxe. Portanto, é importante conhecermos a diversidade bioacústica das aves neotropicais, e os estudos nestas áreas contribuem para o entendimento dos componentes dessa diversidade, auxiliando nas decisões em gestão ambiental e conservação ecológica.

Com a urbanização crescente de regiões em desenvolvimento, cresce também os efeitos aberrantes que os estressores urbanos exercem nas comunidades locais de animais. Estes fatores influenciam no modo de vida das populações animais do entorno destes centros, tanto em áreas urbanas quanto periurbanas. Aves de comportamento territorialista que empregam a vocalização como mediadora social sofrem com os efeitos deletérios da absorção e do ruído excessivos (NEMETH, 2013; SWADDLE, 2015), o que poderia diminuir o seu sucesso reprodutivo (KIGHT, 2012). Como citado anteriormente, tais estudos são abundantes em países desenvolvidos, mas são raros justamente nos países Neotropicais em desenvolvimento, como o Brasil, onde grande a urbanização crescente ocorre de maneira desordenada, e os transportes terrestres de serviços e produtos dependem majoritariamente da malha rodoviária. Portanto, o estudo dos impactos gerados pelo ambiente urbano na vocalização de aves permite a compreensão do problema e a busca por soluções viáveis, que permitam um desenvolvimento urbano sustentável.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivos Gerais

Este estudo realizará uma análise das vocalizações de *Troglodytes musculus* em seus parâmetros estruturais (acústicos e sintáticos), com o intuito de verificar as possíveis variações vocal entre duas populações disjuntas de *T. musculus*, buscando relacionar estas variações à estrutura abiótica do ambiente.

1.7.2. Objetivos Específicos

- i. Verificar a existência de divergência vocal entre duas populações de *T. musculus* com relação aos parâmetros de amplitude sonora geral, relacionando-os com os níveis de absorção atmosférica do som e de ruído ambiental antrópico.
- ii. Verificar a existência de divergência vocal entre duas populações de *T. musculus* com relação aos parâmetros de espectrais e temporais das componentes da vocalização (notas e sílabas), relacionando-os com os níveis de absorção atmosférica do som e de ruído ambiental antrópico.
- iii. Verificar a existência de divergência entre os repertórios vocais de duas populações disjuntas de *T. musculus*.
- iv. Verificar a existência de divergência vocal entre duas populações de *T. musculus* com relação aos parâmetros quantitativos sintáticos, relacionando-os com os níveis de absorção atmosférica do som e de ruído ambiental antrópico.

Assim sendo, considera-se duas hipóteses principais a partir desses objetivos:

- H_0 : As vocalizações de *T. musculus* não são diferentes entre as duas populações quanto aos parâmetros de amplitude, de estrutura acústica e de sintaxe.
- H_1 : As vocalizações de *T. musculus* são diferentes entre as duas quanto aos parâmetros de amplitude, de estrutura acústica e de sintaxe.

Desta forma, caso a H_1 seja confirmada, desdobram-se mais duas hipóteses, sendo elas

- H_0 : A divergência nos parâmetros de amplitude, de estrutura acústica e de sintaxe das vocalizações de *T. musculus* não é influenciada diretamente pela estrutura ambiental, sendo originada por outros fatores.
- H_1 : A divergência nos parâmetros de amplitude, de estrutura acústica e de sintaxe das vocalizações de *T. musculus* é influenciada diretamente pela estrutura ambiental.

1.8. Referências

- ALCOCK, J. The evolution of communication. In: _____. **Animal behaviour: An evolutionary approach**. 10ª ed. Sunderland: Sinauer Associates, 1989. p. 67-100.
- ARAYA-SALAS, M. Is birdsong music? Evaluating harmonic intervals in songs of a Neotropical songbird. **Animal Behavior**, v. 84, n. 2, p. 309-313, ago. 2012.
- BASS, H. E.; SUTHERLAND, L. C.; ZUCKERWAR, A. J. Atmospheric absorption of sound: Update. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 88, n. 4, p. 2019-2021, 1990.
- BERMUDEZ-CUAMATZIN, E.; RÍOS-CHELÉN, A. A.; GIL, D; GARCIA, C. M. Strategies of song adaptation to urban noise in the house finch: syllable pitch plasticity or differential syllable use? **Behaviour**, v. 146, n. 9, p. 1269-1286, 2009.
- BERWICK, R. C.; OKANOYA, K.; BECKERS, G. J. L.; BOLHUIS, J. J. Song to syntax: the linguistics of birdsong. **Trends in Cognitive Sciences**, v. 15, n. 3, p. 113-121, 2011.
- BONCORAGLIO, G; SAINO, N. Habitat structure and the evolution of bird song: a meta-analysis of the evidence for the acoustic adaptation hypothesis. **Functional Ecology**, v. 21, n. 1, p. 134-142, 2007.
- BRACKENBURY, J. H. Power Capabilities of the Avian Sound-Producing System. **The Journal of Experimental Biology**, v. 78, n. 1, p. 163-166, 1979.
- BRACKENBURY. The structural basis of voice production and its relationship to sound characteristics. In: KROODSMA, D. E.; MILLER, E. H. **Acoustic communication in birds**. 1ª ed. Londres: Academic Press, pp. 53-71, 1982.
- BRADBURY, J. W.; VEHRENCAMP, S. L. **Principles of Animal Communication**. 2ª ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2011. 697 p.
- BRUMFIELD, R. T.; CAPPARELLA, A. P. 1996. Genetic differentiation and taxonomy in the House Wren species group. **Condor**, v. 98, n. 3, pp. 547–556, 1996
- BRUMM, H.; SLABBEKOORN, H. Acoustic communication in noise. In: SLATER, P. J. B.; SNOWDON, C. T.; ROPER, T. J.; BROCKMANN, H. J.; NAGUIB, M. (Orgs.) **Advances in the study behavior**, v. 35. 1ª ed. San Diego: Elsevier, 2005. p. 151-209.
- BRUMM, H; NAGUIB, M. Environmental acoustics and the evolution of bird song. **Advances in the study of behavior**, v. 40. 1ª ed. San Diego: Elsevier, 2009. p. 1-33.
- BRUMM, H.; SLATER, P. J. B. Ambient noise, motor fatigue, and serial redundancy in chaffinch song. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 60, n. 4, p. 475-481. 2006.

- BRUMM, H.; TODT, D. Noise-dependent song amplitude regulation in a territorial songbird. **Animal Behavior**, v. 63, n. 5, p. 891-897, 2002.
- BRUMM, H.; ZOLLINGER, S. A. Avian vocal production in noise. In: BRUMM, H (ed.) **Animal Communication and Noise**, 2013. Berlin: Springer Academic Press. pp. 187–227.
- BYERS, B. E.; KROODSMA, D. E. Avian vocal behavior. In: LOVETTE, I. J.; FITZPATRICK, J. W. The Cornell Lab of Ornithology handbook of bird biology. 3^a ed. Chchester: John Wiley & Sons, Ltd., 2019, pp. 355-406.
- CATCHPOLE, C. K.; SLATER, P. J. B. **Bird Song: Biological Themes and Variations**. 2^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 348 p.
- CARTWRIGHT, L. A.; TAYLOR, D. R.; WILSON, D. R.; CHOW-FRASER, P. Urban noise affects song structure and daily patterns of song production in Red-winged Blackbirds (*Agelaius phoeniceus*). **Urban Ecosystems**, v. 17, n. 2, p. 561-572, 2014.
- CHAN, A. A. Y-H.; GIRALDO-PEREZ, P.; SMITH, S.; BLUMSTEIN, D. T. Anthropogenic noise affects risk assessment and attention: the distracted prey hypothesis. **Biology Letter**, v. 7, n. 1, p. 468-471, 2010.
- CHENG, L.; WANG, S. H.; CHEN, Q. C.; LIAO, L. M. Moderate noise induced cognition impairment of mice and its underlying mechanisms. **Physiology & Behaviour**, v. 104, n. 5, p. 981-988, 2011
- CHEPESIUK, R. Decibel hell: the effects of living in a noisy world. **Environmental Health Perspectives**, v. 113, n. 1, p. 34-41, 2005.
- CLEMENTS, J. F.; SCHULENBERG, T. S.; ILIFF, M. J.; ROBERSON, D.; FREDERICKS, T. A.; SULLIVAN, L.; WOOD, C.L. **The eBird/Clements checklist of birds of the world**. 2018. Disponível em: <http://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/download/>. 2018. Acesso em: 06 jul. 2019.
- COFFIN, A. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. **Journal of Transport Geography**, v. 15, n. 5, p. 396-406, 2007.
- DES AUNAY, G. H; SLABBEKOORN, H.; NAGLE, H.; PASSAS, F.; NICOLAS, P.; DRAGANOIU, T. I. Urban noise undermines female sexual preferences for low-frequency songs in domestic canaries. **Animal Behaviour**, v. 87, n. 1, p. 67-75, 2014.
- DOOLING, R. J.; BLUMENRATH, S. H. Avian Perception in Noise. In: BRUMM, H. **Animal communication and noise**. 1^a ed. Dordrecht: Springer, 2013. p. 229-250.

- eBIRD. **House Wren *Troglodytes aedon***. 2019. Disponível em: <<https://ebird.org/species/houwre>>. Acesso em: 06 jun. 2019.
- EMBLETON, T. F. W. Tutorial on sound propagation outdoors. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 100, n. 1, p. 31-48, 1996.
- ENDLER, J. A. Signals, signal conditions, and the direction of evolution. **The American Naturalist**, v. 139, p. S125-S153, 1992.
- FARINA, A. Sonic Patterns I: The Noise. In: _____. **Soundscape Ecology: Principles, Patterns, Methods and Applications**. 1ª ed. Dordrecht: Springer, 2014. p. 143-192.
- FERNÁNDEZ-JURICIC, E.; POSTON, R.; DE COLLIBUS, K.; MORGAN, T.; BASTAIN, B.; MARTIN, C.; JONES, K.; TREMINO, R. Microhabitat selection and singing behavior patterns of male house finches (*Carpodacus mexicanus*) in urban parks in a heavily urbanized landscape in the western U. S. **Urban Habitats**, v. 3, n. 1, p. 49-69, 2005.
- FICKEN, R. W.; FICKEN, M. S.; HAILMAN, J. P. Temporal pattern shifts to avoid acoustic interference in singing birds. **Science**, v. 183, n. 4126, p. 762-763, 1974.
- FORMAN, R. T. T.; SPERLING, D.; BISSONETTE, J. A.; CLEVINGER, A. P.; CUTSHALL, C. D.; DALE, V. H.; FAHRIG, L.; FRANCE, R.; GOLDMAN, C. R.; HEANUE, K.; JONES, J. A.; SWANSON, F. J.; TURRENTINE, T.; WINTER, T.C. **Road Ecology: Science and Solutions**. 2ª ed. Washington: Island Press, 2002.
- FRANCIS, C. D.; ORTEGA, C. P.; CRUZ, A. Noise Pollution Changes Avian Communities and Species Interactions. **Current Biology**, v. 19, n. 16, p. 1415-1419, 2009.
- FRANCIS, C. D.; BARBER, J. R. A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 6, p. 305-313, 2013.
- GILL, F. Vocalizations. In: _____. **Ornithology**, Nova Iorque: W. H. Freeman Company, 3ª ed, 2007. p. 215-242.
- GILL, F.; DONSKER, D. **IOC World Bird List**. 2019. Disponível em: <<https://www.worldbirdnames.org>>. Acesso em: 05 jun. 2019.
- GOUGH, D. C.; DANIEL, M. J.; NOL, E. Singing seaside: pacific wrens (*Troglodytes pacificus*) change their songs in the presence of natural and anthropogenic noise. **Wilson Journal of Ornithology**, v. 126, n. 2, p. 269-278, 2014.

- GWYNNE, J. A.; RIDGELY, R. S.; TUDOR, G. ARGEL, M. **Aves do Brasil: Pantanal & Cerrado.** 1ª ed. São Paulo: Editora Horizonte, 2010. 322 p.
- HALFWERK, W.; SLABBEKOORN, H. A behavioral mechanism explaining noise-dependent frequency use in urban birdsong. **Animal Behaviour**, v. 78, n. 6, p. 1301-1307, 2009.
- HAMAO, S.; WATANABE, M.; MORI, Y; Urban noise and male density affect songs in the great tit *Parus major*. **Ethology, Ecology and Evolution**, v. 23, n. 2, p. 111-119, 2011.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, D.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (eds.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007.
- JOB, J. R.; KOHLER, S. L.; GILL, S. A. Song adjustments by an open habitat bird to anthropogenic noise, urban structure, and vegetation. **Behavioral Ecology**, v. 27, n. 6, p. 1734-1744, 2016.
- JOHNSGARD, P. A. **Animal Behaviour.** 2ª ed. Duboque: W.M.C. Brown Company Publishers, 1967.
- JOHNSON, L. S. House Wren (*Troglodytes aedon*). IN: POOLE, A.; GILL, F. (eds.). **The Birds of North America.** Filadélfia: Academy of Natural Sciences & Washington: American Ornithologists' Union, 1998.
- JOHNSON, L. S.; KERMOTT, L. H. The function of song in male House Wren (*Troglodytes aedon*). **Behaviour**, v. 116, n. 3-4, p. 109-209, 1991.
- KATTI, M.; WARREN, P. S. Tits, noise and urban bioacoustics. **Trends in Ecology and Evolution**, Amsterdã v. 19, n. 3, p. 109-110, 2004.
- KALUTHOTA, C.; BRINKMAN, B. E.; DOS SANTOS, E. B.; RENDALL, D. 6). Transcontinental latitudinal variation in song performance and complexity in house wrens (*Troglodytes aedon*). **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 283, n. 1824, p. 20152765, 2016.
- KANSKY, K. J. **Structure of Transportation Networks: Relationships between network geometry and regional characteristics.** Tese (Doutorado em Geografia). Chicago, Department of Geography, The University of Chicago, 1963.
- KIGHT, C. R.; SWADDLE, J. P. Eastern bluebirds alter their song in response to anthropogenic changes in the acoustic environment. **Integrative and Comparative Biology**, v. 55, n. 2, p. 418-431, 2015.

- KIGHT, C. R.; SAHA, M. S.; SWADDLE, J. P. Anthropogenic noise is associated with reductions in the productivity of breeding Eastern Bluebirds (*Sialia sialis*). **Ecological Applications**, v. 22, n. 7, p. 1989-1996, 2012.
- KRAUSE, B. Bioacoustics, habitat ambience in ecological balance. **Whole Earth Review**, v. 57, n. 1, 1987, p. 1-11.
- KROODSMA, D. E.; BREWER, D. Family Troglodytidae (Wrens). In: DEL HOYO, J.; ELLIOT, A.; CHRISTIE, D.A. **Handbook of the birds of the world: Cuckoo-shrikes to Thrushes**. Vol. 10. Barcelona: Lynx Editions, 2005, p. 357-447.
- LAMBRECHTS, M. M.; DHONDT, A. A. Individual voice discrimination in birds. In: **Current ornithology**, v. 1. Springer: Boston, 1995. p. 115-139.
- LOMBARD, E. Le signe de l'elevation de la voix. **Annales des maladies de l'oreille, du larynx, du nez et du pharynx**, v. 37, n. 2, p. 101-119, 1911.
- MAAN, M. E.; SEEHAUSEN, O. Ecology, sexual selection and speciation. **Ecology letters**, v. 14, n. 6, p. 591-602, 2011.
- MARLER, P.; SLABBEKOORN, H. **Nature's Music: The science of birdsong**. 1^a ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 513 p.
- McGREGOR, P. K; HORN, A. G.; LEONARD, M. L.; THOMSEN, F. Anthropogenic Noise and Conservation. In: BRUMM, H. **Animal communication and noise**. 1^a ed. Dordrecht: Springer, 2013. p. 409-444.
- MOLINO, J. Toward an evolutionary theory of music and language. In: WALLIN, N. L.; MERKER, B.; BROWN, S. **The origins of music**. 1^a ed. Massachusetts: MIT Press, 2000, p. 165-176.
- MORTON, E. S. Ecological sources of selection on avian sounds. **The American Naturalist**, v. 109, n. 965, p. 17-34, 1975.
- MULLER, K. L.; STAMPS, J. A.; KRISHNAN, V. V.; WILLITS, N. H. The effects of conspecific attraction and habitat quality on habitat selection in territorial birds (*Troglodytes aedon*). **The American Naturalist**, v. 150, n. 5, p. 650-661, 1997.
- NAGUIB, M. Reverberation of rapid and slow trills: implications for signal adaptations to long-range communication. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 113, n. 3, p. 1749-1756, 2003.
- NEMETH, E.; PIERETTI, N.; ZOLLINGER, S. A.; GEBERZAHN, N.; PARTECKE, J.; MIRANDA, A. C.; BRUMM, H. Bird song and anthropogenic noise: vocal constraints may

- explain why birds sing higher-frequency songs in cities. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 280, n. 1754, 2013.
- ODEN, A. I.; BROWN, M. B.; BURBACHM M. E.; BRANDLE, J. R.; QUINN, J. E. Variation in avian vocalizations during the non-breeding season in response to traffic noise. **Ethology**, v. 121, n. 5, p. 472-479, 2015.
- PALUMBI, S. R. Humans as the world's greatest evolutionary force. **Science**, v. 293, n. 5536, p. 1786-1790, 2001.
- PATRICELLI, G. L.; BLICKLEY, J. L. Avian Communication in Urban Noise: Causes and Consequences of Vocal Adjustment. **The Auk**, v. 123, n. 3, p. 639-649, p. 2006.
- PARRIS, K. M. Ecological impacts of road noise and options for mitigation. In: van der REE, R.; SMITH, D. J.; GRILO, C. **Handbook of road ecology**, 1^a ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2015. p. 151-158.
- PERRIN, N; TRAVIS, J. On the use of constraints in evolutionary biology and some allergic reactions to them. **Functional Ecology**, v. 6, n. 3, p. 361-363, 1992.
- PIACENTINI, V. de Q. *et al.* Annotated checklist of the birds of Brazil by the Brazilian Ornithological Records Committee/Lista comentada das aves do Brasil pelo Comitê Brasileiro de Registros Ornitológicos. **Revista Brasileira de Ornitologia**, v. 23, n. 2, p. 91-298, 2015.
- PIJANOWSKI, B. C. *et al.* Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. **BioScience**, v. 61, n. 3, p. 203-216, 2011.
- PLATT, M. E; FICKEN, M. S. Organization of singing in House Wrens. **Journal of Field Ornithology**, v. 58, n. 2, p. 190-197, 1987.
- PODOS, J.; HUBER, S. K.; TAFT, B. Bird song: The interface of evolution and mechanism. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 35, n. 1, p. 55-87, 2004.
- POTVIN, D. A.; MACDOUGALL-SHACKLETON, S. A. Experimental chronic noise exposure affects adult song in zebra finches. **Animal Behaviour**, v. 107, n. 1, p. 201-207, 2015.
- QUINN, J. L.; WHITTINGHAM, M. J.; BUTLER, S. J.; CRESSWELL, W. Noise, predation risk compensation and vigilance in the chaffinch *Fringilla coelebs*. **Journal of Avian Biology**, v. 37, n. 6, p. 601-608, 2006.
- RABIN, L. A.; COSS, R. G.; OWINGS, D. H. The effects of wind turbines on antipredator behavior in California ground squirrels (*Sperophilus beecheyi*). **Biological Conservation**, v. 131, n. 3, p. 410-420, 2006.

- RAVIGNANI, A. V. The evolution of rhythm: a comparative approach to speech and music. In: XXV International Bioacoustics Congress, 25. **Anais...**Murnau, 2015.
- REMSEN, J. V.; ARETA, J. I.; CADENA, C. D.; CLARAMUNT, S.; JARAMILO, A.; PACHECO, J. F.; ROBBINS, M. B.; STILES, F. G.; STOTZ, D. F.; ZIMMER, K.J. 2019. **A classification of the bird species of South America**. 2019. Disponível em: <<http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/SACCWordFiles/SACCBaseline01.html>>. Acesso em: 10 jul. 2019.
- RIÓS-CHELÉN, A. A.; LEE, G. C.; GAIL, L. Anthropogenic noise is associated with changes in acoustic but not visual signals in red-winged blackbirds. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 69, n. 7, p. 1139-1151, 2015.
- RIPMEESTER, E. A. P.; DE VRIES, A. M.; SLABBEKOORN, H. Do Blackbirds Signal Motivation to Fight with Their Song? **Ethology**, v. 113, n. 11, p. 1021-1028, 2007.
- SCHAFER, R. M. **The soundscape**: Our sonic environment and the tuning of the world. Londres: Simon and Schuster, 1993.
- SCHUSTER, S.; ZOLLINGER, S. A.; LESKU, J. A. BRUMM, H. On the evolution of noise-dependent vocal plasticity in birds. **Biology Letters**, v. 23, n. 8, p. 913-916, 2012.
- SEARCY, W. A.; YASUKAWA, K. Use of the song repertoire in intersexual and intrasexual contexts by male red-winged blackbirds. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 27, n. 2, p. 123-128, 1990.
- SEDDON, N. Ecological adaptation and species recognition drives vocal evolution in Neotropical suboscine birds. **Evolution**, v. 59, n. 1, p. 200-215, 2005.
- SKUTCH, A. F. Life history of the Southern House Wren. **Condor**, v. 55, n. 1, p. 121-149. 1954.
- SHANNON, C. E.; WEAVER, W. **The mathematical theory of communication**. 1ª ed. Urbana: University of Illinois Press, 1949. 144 p.
- SHANNON, G.; ANGELONI, L. M.; WITTEMYER, G.; FRISTRUP, K. M.; CROOKS, K. R. Road traffic noise modifies behaviour of a keystone species. **Animal Behaviour**, v. 94, n. 1, p. 135-141, 2014.
- SIEMERS, B. M.; SCHAUB, A. Hunting at the highway: traffic noise reduces foraging efficiency in acoustic predators. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 278, n. 1, p. 1646-1652, 2010.
- SICK, H. **Ornitologia Brasileira**: uma introdução. 2ª ed. Brasília: Linha Gráfica Editora, 1997. Vol. II, 827 p.

- SIH, A.; FERRARI, M. C. O.; HARRIS, D. J. Evolution and behavioural responses to human-induced rapid environmental change. **Evolutionary Applications**, v. 4, n. 2, p. 167-187, 2011.
- SILVA, M. L. da. **Estrutura e organização de sinais de comunicação complexos: o caso do sabiá-laranjeira *Turdus rufiventris* (Aves, Passeriformes, Turdinae)**. Tese (Doutorado em Psicologia). Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- SNELL-ROOD, E. C. The effect of climate on acoustic signals: Does atmospheric sound absorption matter for bird song and bat echolocation? **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 2, p. 1650-1658, 2012.
- SPECTOR, D. A. Definition in biology: The case of “bird song”. **Journal of Theoretical Biology**, v. 168, n. 4, p. 373-381, 1994.
- SLABBEKOORN, H. Songs of the city: noise-dependent spectral plasticity in the acoustic phenotype of urban birds. **Animal Behaviour**, v. 85, n. 5, p. 1089-1099, 2013.
- SLABBEKOORN, H.; PEET, M. Birds sing at higher pitch in urban noise. **Nature**, v. 464, n. 6946, p. 267, 2003.
- SLABBEKOORN, H.; RIPMEESTER, E. A. Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. **Molecular Ecology**, v. 17, n. 1, p. 72-83, 2008.
- SLABBEKOORN, H.; SMITH, T. B. Habitat dependent song divergence in the little yehgreenbul: an analysis of environmental selection pressures on acoustic signal. **Evolution**, v. 56, n. 9, p. 1849-1858, 2002
- SLABBEKOORN, H.; YEH, P.; HUNT, K. Sound transmission and song divergence: a comparison of urban and forest acoustics. **Condor**, v. 109, n. 1, p. 67-78, 2007.
- SOSA-LÓPEZ, J. R.; MENNILL, D. J. Continent-wide patterns of divergence in acoustic and morphological traits in the House Wren species complex. **The Auk**, v. 131, n. 1, p. 41-54, 2014.
- SØRENSEN, M.; ANDERSEN, Z. J.; NORDSBORG, R. B.; BECKER, T.; TJØNNELAND, A.; OVERVAD, K.; RAASCHOU-NIELSEN, A. Long-term exposure to road traffic noise and incident diabetes: a cohort study. **Environmental Health Perspectives**, v. 121, n. 2, p. 217-222, 2013.
- SWADDLE, J. P.; PAGE, L. C. High levels of environmental noise erode pair preferences in zebra finches: implications for noise pollution. **Animal Behaviour**, v. 74, n. 3, p. 363-368, 2007.
- SWADDLE, J. P.; FRANCIS, C. D.; BARBER, J. R.; COOPER, C. B.; KYBA, C. C. M.; DOMINONI, D. M.; SHANNON, G.; ASCHEHOUG, E.; GOODWIN, S. E.; KAWAHARA,

- A. Y.; LUTHER, D.; SPOELSTRA, K.; VOSS, M.; LONGCORE, T. A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 30, n. 9, p. 550-560, 2015.
- TAAFFE, E. J.; MORRILL, R. L.; GOULD, P. R. Transport expansion in underdeveloped countries: A comparative analysis. **Geographical Review**, v. 54, n. 4, p. 503–529, 1963.
- TROMBULAK, S. C.; FRISSELL, C. A. Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. **Conservation Biology**, v. 14, n. 1, p. 18-30, 2000.
- WARREN, P. S.; KATTI, M.; ERMANN, M.; BRAZEL, A. Urban bioacoustics: it's not just noise. **Animal Behaviour**, v. 71, n. 3, p. 491-502, 2006.
- WHO. **Burden of disease from environmental noise**: quantification of healthy life years lost in Europe. World Health Organization, Geneva, 2011. Disponível em: <www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf>. Acessado em: 13/03/2016.
- WILEY, R. H. Adaptations for acoustic communication in birds: sound transmission and signal detection. **Acoustic communication in birds**, v. 1. San Diego: Elsevier Academic Press, 1982. p. 131-181.
- WILEY, R. H; RICHARDS, D. G. Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: implications for the evolution of animal vocalizations. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 3, n. 1, p. 69-94, 1978.
- WILKINS, M. R.; SEDDON, N.; SAFRAN, R. J. Evolutionary divergence in acoustic signals: causes and consequences. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 28, n. 3, p. 156-166, 2013.
- ZOLLINGER, S. A. Environmental noise and the evolution of vocal plasticity. In: INTERNATIONAL BIOACOUSTICS CONGRESS, 24., 2013, Pirenópolis. **Anais...**Pirenópolis: Pousada dos Pirineus, 2013.
- ZOLLINGER, S. A.; BRUMM, H. Why birds sing loud songs and why they sometimes don't. **Animal Behavior**, v. 105, n. 1, p. 289-295, 2015.

2. CAPÍTULO 1 – RUÍDO ANTROPOGÊNICO E ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA DO SOM INDUZEM A VARIAÇÕES NA AMPLITUDE DAS VOCALIZAÇÕES DE *Troglodytes musculus*

2.1. Resumo

A vocalização das aves é uma característica importante que media vários aspectos da reprodução deste grupo, como escolha de parceiros, defesa do território e reconhecimento individual. Qualquer fator que prejudique a transmissão vocal através do ambiente também pode prejudicar o reconhecimento específico e, assim, reduzir a eficácia da reprodução. Nesse cenário, as aves que habitam ambientes urbanos podem estar sujeitas a diferentes pressões seletivas em sua amplitude vocal devido a barreiras acústicas na transmissão da vocalização, como excesso de ruído ambiental e absorção atmosférica do som. Assim, eu analisei a amplitude das vocalizações da corruíra (*T. musculus*) para determinar as possíveis relações existentes entre a variação na amplitude vocal e as características ambientais. Deste modo, observei que as aves vocalizaram com maior amplitude em áreas onde o ruído do tráfego é elevado. A regressão linear múltipla mostrou uma relação positiva entre a amplitude da vocalização e o ruído do tráfego, além de uma relação negativa entre a amplitude e a atenuação atmosférica. Estes achados sugerem uma influência direta das estruturas ambientais urbanas sobre o comportamento vocal de *T. musculus*, o que pode diminuir a eficácia da comunicação entre os indivíduos, podendo afetar aspectos comportamentais da espécie.

Palavras-Chave: efeito de Lombard, adaptação vocal, plasticidade sonora, região Neotropical, mascaramento sonoro, ruído antropogênico.

2.2. Abstract

Birdsong is an important feature that mediates several aspects of bird reproduction, such as mate choice, territory defense, and individual recognition. Any factor that impairs vocal transmission through the environment may also impair conspecific recognition and thus reduce the effectiveness of reproduction. In this scenario, birds inhabiting urban environments might be subject to different selective pressures on their vocal amplitude due to acoustic barriers in the song transmission, such as excessive background noise and abnormal atmospheric absorption of sound. Therefore, we measured the amplitude of the song of the Southern House Wren (*Troglodytes musculus*), to determine the relationships between the variation in vocal intensity and the environmental features. We found that birds sang with higher amplitude in areas where traffic noise is elevated. Multiple linear regression showed a positive relationship between song amplitude and background noise and a negative relationship between vocal intensity and atmospheric attenuation. Our findings suggest a direct influence of urban environmental structures on the vocal behavior of wrens, which may challenge the effectiveness of communication between subjects and affect the behavioral ecology of the species.

Keywords Lombard effect · Vocal adaptation · Song plasticity · Neotropical region · Acoustic masking · Anthropogenic noise

2.3. Introdução

Os sinais vocais mediam comportamentos importantes das aves, incluindo defesa do território, atração de parceiros, prevenção contra predadores, forrageamento e reconhecimento individual (BRADBURY & VEHRENCAMP, 1998; CATCHPOLE & SLATER 2008). A transmissão das vocalizações através ambiente depende da estrutura do habitat, e vários fatores, como clima e cobertura vegetal, podem restringir o alcance das vocalizações (WILEY & RICHARDS, 1982). Tais características disruptivas tornam-se obstáculos para a comunicação eficaz entre diferentes indivíduos (BRUMM & NAGUIB 2009; SWADDLE *et al.*, 2015) e afetam a percepção e as respostas aos sinais emitidos.

A atenuação e degradação do som são relevantes nos habitats naturais, pois interferem na transmissão dos sinais acústicos (BRUMM & NAGUIB, 2009). A magnitude da atenuação acústica está relacionada à absorção e dispersão atmosférica, e ambos os processos aumentam com a frequência do som (WILEY & RICHARDS, 1982). Ambos os efeitos modulam a amplitude da vocalização e diminuem o alcance do sinal no ambiente (BLUMENRATH & DABELSTEEN, 2004), especialmente em frequências que ocorrem nas vocalizações de aves (SNELL-ROOD, 2012). Em contraste, a degradação do sinal ocorre em resposta aos efeitos combinados das flutuações de amplitude e reverberação (WILEY & RICHARDS, 1982). Em ambientes fechados, a cobertura vegetal causa tais reverberações que afetam a detectabilidade e o alcance de um sinal (WILEY & GODARD 1996; NAGUIB, 2003). No entanto, em áreas abertas, as variações abruptas em temperatura, umidade e velocidade do vento podem levar a flutuações de amplitude que afetam a estrutura original do sinal (WILEY & RICHARDS, 1978; BRUMM & NAGUIB, 2009).

Além desses dois fatores, o ruído ambiental pode prejudicar a eficácia da comunicação vocal porque a detecção e o reconhecimento estão intrinsecamente relacionados às relações sinal-ruído (WILEY, 2013). As frequências vocais podem se sobrepor ao espectro de ruído, mascarando o sinal e interrompendo a troca de informações entre indivíduos (BARBER *et al.*, 2010). Para superar obstáculos, como excesso de ruído no ambiente, os indivíduos podem alterar sua amplitude vocal e

ajustar a intensidade vocal. Essa regulação dependente do ruído, chamada “Efeito de Lombard” (LOMBARD, 1911), é difundida de maneira generalizada entre os organismos terrestres (BRUMM & ZOLLINGER, 2011). O aumento excessivo de amplitude é relevante na história de vida das espécies por impor pressões metabólicas, comportamentais e evolutivas sobre elas (BARBER *et al.*, 2010; ZOLLINGER & BRUMM 2015).

Esses problemas são agravados nos habitats urbanos devido a alterações antropogênicas na estrutura natural do ambiente. A urbanização da paisagem está correlacionada com alterações de temperatura, umidade e vento (ATWATER, 1972; HUANG *et al.*, 2015; ZHONG *et al.*, 2017), que podem modificar a maneira como o som é atenuado e disperso pelo ambiente. A presença de superfícies artificiais (como paredes de concreto, janelas de vidro, placas de metal, entre outros) também pode modificar processos refração e reflexão do som, criando anormalidades na reverberação e deteriorando a estrutura acústica dos sinais das aves (SLABBEKOORN *et al.*, 2007; LAIOLO, 2010). Todos esses fatores e seus efeitos combinados são relevantes na transmissão acústica dos sinais, sendo consideradas pressões desfavoráveis para a comunicação efetiva de aves que habitam as cidades.

No entanto, um dos fatores mais adversos na comunicação vocal de aves urbanas é o ruído antropogênico. Ele é um poluente sensorial que impõe várias restrições à propagação do som, e suas concentrações têm aumentado ao longo dos anos devido às atividades humanas. O ruído excessivo pode mascarar energeticamente as ondas acústicas e, portanto, prejudicar a recepção do sinal por potenciais receptores (FRANCIS & BARBER 2013; SWADDLE *et al.*, 2015). Para superar o mascaramento, um sinalizador pode intensificar a amplitude de sua vocalização para aumentar as chances de discriminação sonora em um ambiente barulhento. De fato, várias espécies de aves regulam sua amplitude vocal em resposta aos níveis de ruído antropogênico (BRUMM, 2004; BRUMM & SLATER 2006; LOWRY *et al.*, 2012; DORADO-CORREA *et al.*, 2018). Esta plasticidade fenotípica impõe custos de condicionamento ao sinalizador, pois a emissão de sinais com

amplitude elevada requer um aumento no gasto de energia para a composição destes sinais (ZOLLINGER *et al.*, 2011).

Áreas em urbanização são relevantes e importantes para o estudo da comunicação animal. Nesses locais, as atividades que alteram a paisagem acústica original estão se expandindo e essas mudanças podem afetar profundamente a fauna circundante. A maioria dos estudos que explorou os efeitos de ambientes urbanizados na comunicação de aves foi realizada em países desenvolvidos. Assim, faltam informações em regiões em desenvolvimento, como os países Neotropicais. Esse conhecimento é crucial para o planejamento de ações de conservação nos países em desenvolvimento, que geralmente ainda contêm uma biodiversidade rica e inexplorada.

Portanto, no presente estudo, eu realizei uma análise dos sinais vocais de *T. musculus* em um habitat urbanizado em Bauru, São Paulo. Para isso, verifiquei se os níveis de amplitude das vocalizações da espécie respondeu aos níveis de ruído antropogênico e atenuação do som no ambiente pesquisado. Eu esperava detectar certa influência das estruturas ambientais na vocalização, especificamente em relação à amplitude vocal e ao ruído antropogênico.

2.4. Material e métodos

2.4.1. Seleção dos indivíduos em campo

Eu selecionei indivíduos machos de *T. musculus* em uma área periurbana de Bauru, São Paulo, Brasil (22 ° 18 '54 "S, 49 ° 03' 39" W) entre julho e dezembro de 2017. Embora a espécie não possua um dimorfismo sexual aparente, foi possível identificar os machos por meio do seu comportamento. Eles mostram-se mais agressivos e mais vocalmente ativos do que as fêmeas (JOHNSON & KERMOTT, 1991), sendo que eles produzem a vocalização típica da espécie para delimitação territorial (JOHNSON & KERMOTT 1991; KROODSMA 2019).

A área de estudo está situada próxima a uma junção entre duas principais rodovias do estado de São Paulo: o SP-225 e o SP-300. Ambas as rodovias sofrem tráfego intenso porque conectam importantes regiões do estado de São Paulo, com mais de 4.000 veículos viajando a cada dia (DER,

2017). Esse tráfego intenso produz um ruído abundante que interfere no ambiente circundante, principalmente durante as primeiras horas do dia (DER, 2017).

Como vários fatores interferem nas medições de amplitude, estas análises foram realizadas com muita cautela durante a coleta de dados. Nas primeiras semanas de pesquisa, eu selecionei 50 machos com base na estrutura ambiental de seu habitat. Escolhi os indivíduos que habitavam áreas abertas com vegetação aberta, evitando os machos residentes em áreas com dosséis estruturados que poderiam alterar a transmissão sonora por reverberação (RICHARDS & WILEY, 1980). Também evitei escolher indivíduos que ocupavam habitats com alto grau de alteração antrópica, como edifícios e casas, uma vez que essas construções feitas pelo homem podem interferir na transmissão e reverberação do som e, assim, levar a medições de amplitude enviesadas.

Além da influência ambiental na estrutura vocal, as interações sociais também podem levar a mudanças de amplitude entre os indivíduos. A intensidade da vocalização desempenha um papel na seleção sexual e interações agonísticas intermediárias entre os machos (LAMPE *et al.*, 2010; BRUMM & RITSCHARD, 2011; RITSCHARD *et al.*, 2012). Portanto, para minimizar a influência social na modulação de amplitude, foram selecionados machos que mantinham territórios [separados de outros indivíduos a uma distância mínima de 100 m um do outro. Registrei as localizações de cada homem usando um GPS Garmin eTrex 20.

Eu dividi os machos em dois grupos. No primeiro grupo, selecionei 25 indivíduos em territórios localizados a uma distância linear máxima de 500 m da rodovia mais próxima. O segundo grupo era composto por 25 indivíduos que habitavam áreas a uma distância linear mínima de 1.500 m até o cruzamento (Fig. 2). As medições e gravações foram realizadas apenas em dias claros, quando não havia vento (*i. e.* velocidade do vento menor que 0,5 m/s). A velocidade do vento (em m/s), a temperatura (em °C), a umidade (em %) e o nível de ruído [(em dB(A)] foram avaliados usando um medidor ambiental Extech EN300. A partir dos registros de temperatura e umidade em cada local, consegui calcular a absorção ambiental do som a uma frequência de 4 kHz a 93 kPa de pressão do ar, ou seja, a pressão média do ar na região de Bauru. Essa frequência sonora abrange os valores médios

de pico das vocalizações de *T. musculus*, que reflete a pressão seletiva ambiental na modulação de amplitude para o conteúdo espectral da vocalização. Os cálculos da absorção sonora seguiram as recomendações da ISO-9613-1 (1993).

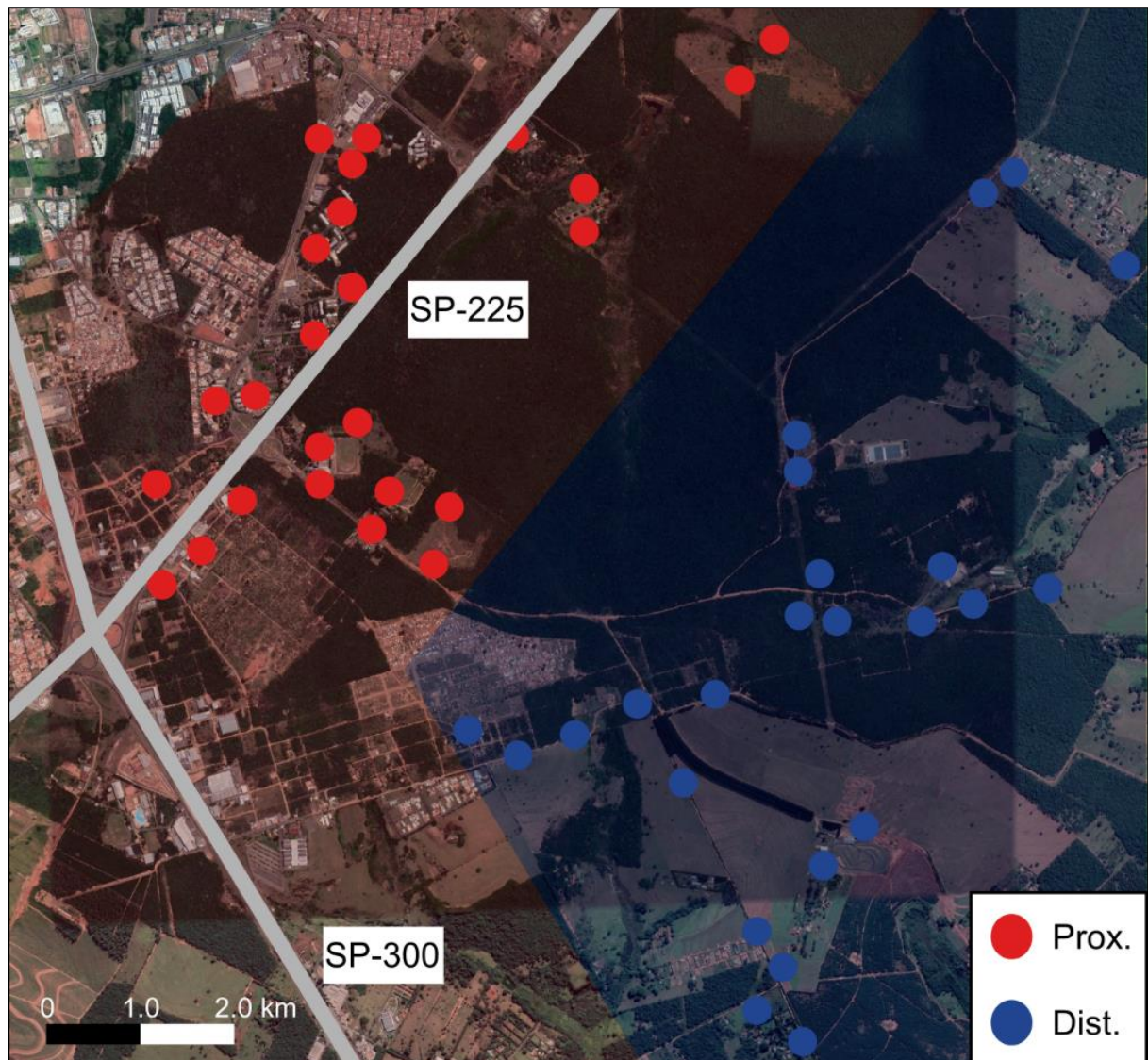


Figura 2. Mapa de distribuição dos indivíduos amostrados, onde cada círculo corresponde a um indivíduo. Os círculos vermelhos correspondem aos indivíduos próximos à rodovia, enquanto os azuis correspondem aos indivíduos distantes. As linhas cinzentas representam as duas rodovias (SP-300 e SP-225). Fonte: Google Earth Engine, 2020.

2.4.2. Captura, marcação e morfometria

Determinadas características morfológicas, como a massa corporal e o tamanho, podem influenciar a modulação da amplitude. Os mecanismos de produção sonora das estão relacionados ao sistema respiratório, sendo limitados pela força e tamanho dos músculos e membranas associados à siringe (ZOLLINGER *et al.*, 2011). Portanto, eu realizei a medição de algumas características

morfométricas para verificar se elas influenciam possíveis variações de amplitude como um fator covariante.

Para analisar esses parâmetros, eu capturei os machos usando redes de neblina e medi as variáveis morfométricas de comprimento do bico, da cabeça, do tarso, da asa e da cauda, além da massa corporal. Após as medições, foram realizadas as marcações os indivíduos usando uma anilha de alumínio colorida e uma anilha padrão CEMAVE. Portanto, foram capturados e mensurados 37 dos 50 machos selecionados.

2.4.3. Medidas acústicas

Para controlar os efeitos atenuantes da radiação sonora, a amplitude vocal foi apenas medida quando o indivíduo estivesse vocalizando em linha reta com o medidor ambiental, sem qualquer obstrução entre a ave e o instrumento, e com seu bico voltado de frente para o medidor ambiental. Eu avaliei os níveis de amplitude vocal logo abaixo dos indivíduos, em um ângulo de incidência que varia de 45° a 60° em relação ao eixo longitudinal das aves. Não foram utilizados playbacks reproduções para estimular a produção vocal, fazendo com que todas as medições fossem realizadas apenas quando as aves estivessem vocalizando espontaneamente. Por fim, evitei de medir a amplitude vocal quando ruídos pontuais (*i.e.* ruídos não contínuos de curta duração) eram percebidos no ambiente. Após as medições vocais, foi calculada a distância entre a ave e o medidor ambiental usando uma trena a laser. No total, eu measurei os níveis de amplitude sonora de 803 vocalizações (média: 16 ± 5 vocalizações por indivíduo, intervalo: 7 a 35 vocalizações).

Quando o som é transmitido através de um meio ruidoso, as ondas sonoras interagem entre si, mascarando assim a amplitude do sinal original. Para medir com precisão a amplitude das vocalizações, eu subtraí o ruído de fundo das leituras do medidor ambiental usando computação logarítmica. Após a subtração do ruído, também padronizei o efeito dispersor da distância entre a ave e o aparelho medidor. Como a amplitude acústica diminui com a distância, eu ajustei as medidas à distância entre as aves do estudo e o medidor de amplitude, padronizando as leituras para 1 m de

referência. Como essa correção é menos precisa em longas distâncias, garanti que o registro de todas as medições fosse feito a uma distância linear máxima de 10 m dos indivíduos pesquisados. Corrigi os efeitos do ruído de fundo e da distância seguindo as proposições de BRUMM & ZOLLINGER (2011).

Após a medição da amplitude vocal, foram avaliados os níveis de ruído ambiental. Posicionei o medidor ambiental logo abaixo do poleiro da ave logo após esta ter abandonado o local. Foram realizadas cinco medições em cada ponto cardinal, começando pela direção norte e depois movendo o medidor ambiental no sentido horário. As medições de nível de amplitude duraram 20 s, sendo registrado o seu valor máximo por leitura. No presente estudo, defini os níveis de dB para 20 kPa como referência.

2.4.4. Análise de dados

Foram testadas as diferenças na amplitude da vocalização (em dB), no ruído ambiental (em dB) e na absorção atmosférica (em dB/m) entre os grupos próximo e distante da rodovia por meio de um teste T, depois de confirmada a natureza normal e homocedástica dos dados. Com relação aos dados morfológicos, eu realizei um análise fatorial de componente principal (*principal component analysis*, ou PCA) nas variáveis de comprimento usando uma matriz de correlação. Tal análise permite a redução das variáveis em um subconjunto menor e reduzindo os problemas de colinearidade dos dados. A partir do PCA, obtive dois autovalores maiores que 1,0 (Tab. 1), cuja diferença entre os dois grupos foi testada, juntamente com os dados de massa corporal, por meio de um teste T (após a verificação da normalidade e da homocedasticidade).

Para verificar a influência das características do hábitat e das características morfológicas nos níveis de amplitude sonora das aves, eu realizei uma regressão linear múltipla e hierárquica. O nível de ruído, a absorção sonora, os escores do PC1 e a massa corporal foram estabelecidos como preditores, e os níveis de amplitude sonora como variável resposta. Como PC2 é correlacionado com

a massa corporal (coeficiente de correlação de Spearman = 0,463, $p = 0,005$) e explica uma porção menor da variação no tamanho corporal, eu escolhi remover esta variável das análises posteriores.

Tabela 1. Coeficientes extraídos da análise de componente principal utilizado para sintetizar as variáveis de tamanho corporal de (*T. musculus*).

Característica morfológica	PC 1	PC 2
Comprimento da asa (cm)	0,956	0,185
Comprimento da cabeça (cm)	0,520	0,036
Comprimento do bico (cm)	0,460	-0,223
Comprimento do tarso (cm)	0,430	0,143
Comprimento da cauda (cm)	0,094	0,995
Autovalor	1,788	1,094
Variância (%)	42,770	21,840

Valores em negrito representam os coeficientes maiores que 0,5

2.5. Resultados

Eu encontrei diferenças nos níveis de ruído e nos níveis de amplitude sonora entre os grupos próximo e distante da rodovia (Tab. 2). Tanto a amplitude vocal quanto o ruído são mais intensos nos indivíduos situados próximo à rodovia, enquanto a absorção sonora, o PC1 de tamanho corporal e a massa corporal não variaram entre os grupos (Fig.3). As médias dos valores de amplitude vocal do grupo próximo à rodovia são cerca cinco dB maiores que aquelas situadas longe da rodovia, o que corresponde a quase o dobro de pressão sonora.

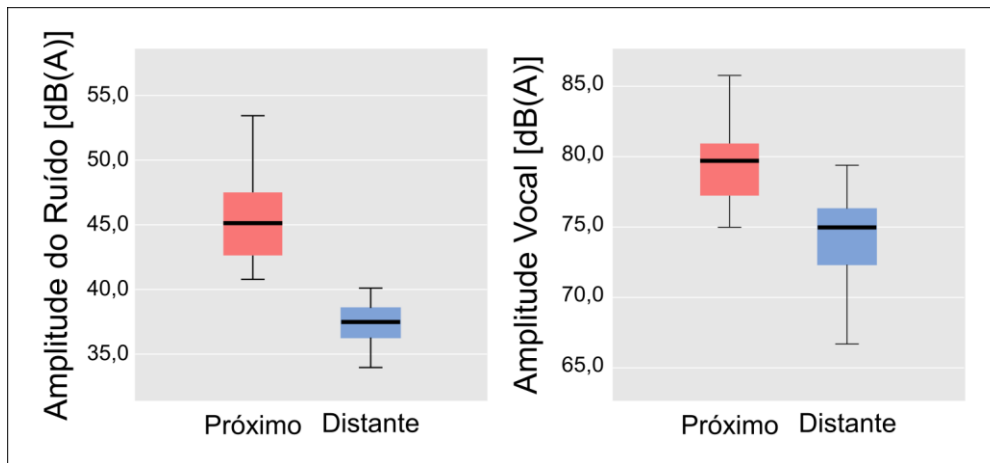


Figura 3. Variação nos níveis de ruído e amplitude vocal entre os grupos próximo e distante de *T. musculus*.

Tabela 2. Diferença nas variáveis avaliadas nos indivíduos situados próximo e distante da rodovia de *T. musculus*. Os dados de cada variável estão representados por média \pm desvio padrão (n – número de amostras, t – valor do teste t, g.l. – graus de liberdade, p – nível de significância).

Variável	n	Próximo	Distante	t	d.f.	p
Amplitude vocal [dB(A)]	50	79.91 \pm 2.66	75.01 \pm 3.33	4.144	48	< 0.001
Amplitude do ruído [dB(A)]	50	45.01 \pm 3.52	36.59 \pm 3.36	11.166	48	< 0.001
Absorção sonora [10^{-2} dB(A/m)]	50	1.83 \pm 0.81	1.90 \pm 0.82	-1.792	48	0.079
PC1 de tamanho corporal	37	0.09 \pm 0.90	-0.11 \pm 1.05	0.583	35	0.564
Massa corpora (g)	37	12.18 \pm 0.82	11.81 \pm 0.81	1.340	35	0.189

Os valores em negrito representam as variáveis com nível de significância $p < 0,05$.

As variáveis predictoras do modelo de regressão linear foram capaz de explicar quase 61% da variação na amplitude vocal ($F_{1,46} = 8.564$, $r^2 = 0.609$, $p = 0.001$). Tanto o nível de ruído ambiental (coeficiente β padronizado = 0.312, $t = 2.466$, $p = 0.017$) quanto a absorção atmosférica do som (coeficiente β padronizado $\beta = -0.365$, $t = -2.886$, $p = 0.006$) foram os principais preditores da amplitude vocal. A amplitude das vocalizações tende a aumentar juntamente com o ruído ambiental, enquanto diminui com o aumento da absorção atmosférica (Fig. 4). A massa corporal (coeficiente β padronizado = 0.130, $t = 1.006$, $p = 0.320$) e o PC de tamanho corporal (coeficiente β padronizado = 0.141, $t = 1.130$, $p = 0.264$) não mostraram uma relação estatisticamente significativa com a variável resposta, o que corrobora com os achados do teste T.

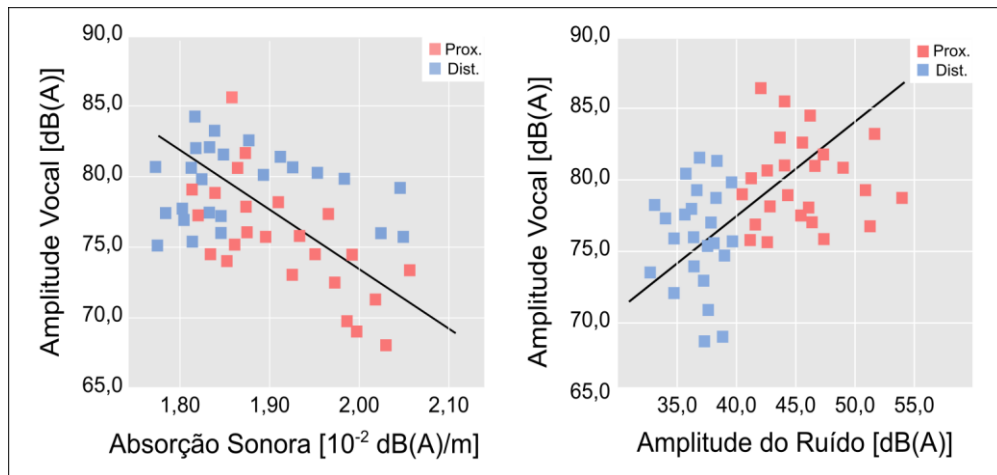


Figura 4. Relações lineares entre a amplitude sonora de *T. musculus* e a absorção sonora (esquerda) e o ruído ambiental (direita). Os quadrados representam os dados de cada um dos indivíduos analisado. As linhas pretas representam a regressão linear para cada modelo parcial.

2.6. Discussão

Eu encontrei evidências que atrelam a estrutura dos ambientes urbanos com os níveis de amplitude vocal de *T. musculus*. Os indivíduos que se situam próximo as áreas ruidosas produzem vocalizações com maiores amplitudes do que aqueles em áreas com mais quietas. Além disso, a absorção atmosférica demonstrou ser um preditor negativo de amplitude, sugerindo que as aves que vivem em ambientes com alta atenuação sonora produzem vocalizações com menores amplitudes. Como as variações morfológicas não influenciaram as variação vocal, observa-se que as condições ambientais podem influenciar diretamente as modulações de amplitude nas vocalizações da corruíra.

Estes resultados demonstraram os efeitos do ruído antropogênico nas vocalizações levando a uma mudança significativa na amplitude. Essas alterações na estrutura vocal parecem surgir em resposta a estressores de ruído, o que indica um ajuste nas relações sinal/ruído de sua emissão vocal em função do nível de ruído. A relação observada no presente estudo corrobora os achados de estudos anteriores envolvendo outras espécies de aves, tanto em testes controlados (POTASH, 1972; BRUMM & TODT, 2002; MANABE, 2002; SCHUSTER *et al.*, 2012; DORADO-CORREA *et al.*, 2018) e em pesquisas de campo (PYTTE *et al.*, 2003; BRUMM, 2004; WOOD & YEZERINAC, 2006; LOWRY, *et al.* 2012). Tais respostas ao ruído ambiente podem aumentar a detectabilidade dos sinais sonoros

emitidos pelos machos sob essas condições e, assim, aumentar suas chances de transmitir sinais específicos em ambientes ruidosos.

No entanto, esse aumento de amplitude está relacionado com o incremento em custos energéticos, comportamentais e evolutivos para os indivíduos (FRANCIS & BARBER, 2013; SWADDLE, 2015; ZOLLINGER & BRUMM, 2015). As mudanças de amplitude podem afetar os processos de defesa territorial, principalmente com relação à interação agonística entre machos, uma vez que os indivíduos tendem a responder mais agressivamente a sinais com maior intensidade (BRUMM & RITSCHARD, 2011; RITSCHARD *et al.*, 2012). O aumento da amplitude vocal também pode aumentar as taxas de predação e parasitismo (ZOLLINGER & BRUMM, 2015). As alterações nas vocalizações, portanto, têm custos de condicionamento físico que influenciam as taxas de sobrevivência e reprodução efetiva, podendo levar a pressões seletivas diferenciais nas populações que residem em áreas com ruído ambiental elevado

Enquanto isso, a absorção atmosférica do som pode servir como outro fator que molda a intensidade vocal. No entanto, em contradição com o que foi esperado, a atenuação do som se relacionou negativamente com a amplitude da vocalização. Aparentemente, os indivíduos não compensaram os efeitos da atenuação através de mudanças de amplitude, o que implica que a plasticidade vocal de outras características vocais, em vez da intensidade, possa estar envolvida. Como a eficácia da transmissão depende do conteúdo espectral do sinal (BASS, 1990; SNELL-ROOD, 2012), os machos podem superar a atenuação do som usando modulação de frequência e evitando as bandas espectrais onde a absorção é mais forte. De maneira semelhante, a flexibilidade vocal associada à divergência ambiental pode ocorrer na estrutura temporal dos sinais sonoros (NEMETH, 2006; SLABBEKOORN, 2006; VILLEGAS, 2018) e envolve o tempo de emissão (DABELSTEEN & MATHEVON, 2002; LENGAGNE & SLATER 2002; BROWN & HANDFORD, 2003), cujos mecanismos consistentes podem ser empregados pelos indivíduos para superar os efeitos deletérios da atenuação atmosférica.

Tanto o ruído quanto a atenuação podem representar pressões seletivas sinérgicas na amplitude vocal de *T. musculus*. Essas características ambientais podem exercer seleção diferencial nas vocalizações dos emissores, o que afeta a percepção do sinal por possíveis receptores. Em um ambiente urbano, vocalizar com maior amplitude pode ser vantajoso para os indivíduos sinalizadores, porque sons mais intensos podem ser mais fáceis de serem discriminados por possíveis receptores (ENDLER, 1992). De modo semelhante, existem evidências mostrando que as aves favorecem certo conteúdo espectral sob a influência de ruído de fundo elevado em áreas naturais (DINGLE, 2008; MAHLER & GIL, 2009), o que sugere uma seleção positiva em relação à produção de sinais que não se sobrepõem àqueles dos espectros de ruído ambiente. De maneira semelhante, a mudança de amplitude em um habitat perturbado pelo ruído pode ser uma característica sexualmente selecionada. Fêmeas de *Agelaius phoeniceus* (SEARCY & NOWICKI 2006) e *Taeniopygia guttata* (RITSCHARD *et al.*, 2010) demonstraram ter preferência por vocalizações masculinas com altas amplitudes. As mudanças de amplitude nas vocalizações masculinas observadas em nosso estudo podem compensar as condições de ruído ambiental e absorção acústica, aumentando o sucesso do acasalamento em ambiente urbano. No entanto, esses ajustes têm importantes *trade-offs* entre amplitude, taxa de emissão vocal e frequência mínima (OBERWEGER & GOLLER, 2001; FERNÁNDEZ-JURICIC, 2005; PATRICELLI & BLICKLEY, 2006; WARREN *et al.* 2006), que poderiam efetivamente reduzir a atratividade de sinais intensos.

Simultaneamente, o aprendizado cultural pode aumentar as chances de transmissão de sinais com alta amplitude através das gerações, porque a intensidade vocal é uma característica aprendida (RITSCHARD & BRUMM, 2011). Como as vocalizações de *T. musculus* têm uma ontogenia baseada no aprendizado cultural (TUBARO, 1990), esse comportamento pode facilitar a assimilação de memes (*e.g.* vocalizações aprendidas) em ambientes acústicos alterados, como cidades humanas (PATRICELLI & BLICKLEY, 2006). Como o comportamento vocal medeia a atividade sexual, qualquer pressão seletiva poderia levar ao isolamento pré-zigótico entre as populações (SLABBEKOORN e SMITH, 2002), que é uma etapa incipiente do processo de especiação. No

entanto, não está claro se esse tipo de mudança de amplitude é resultado de flexibilidade fenotípica imediata ou adaptação microevolucionária, os efeitos co-fundadores do aprendizado podem mascarar a relevância de fatores sensoriais, como estressores de ruído, no processo evolutivo (SWADDLE, 2015).

Neste estudo, eu demonstrei que o ruído urbano e a absorção atmosférica do som influencia os sinais acústicos de *T. musculus*. Embora a espécie não esteja ameaçada de extinção (BIRDLIFE INTERNATIONAL, 2017), nossas descobertas têm implicações importantes para a conservação da biodiversidade em ambientes urbanos. À medida em que a magnitude das alterações induzidas pelo homem nos habitats naturais aumenta a cada ano, é crucial entender como as respostas das expressões fenotípicas a essas mudanças influenciam a relação entre os sujeitos e o meio ambiente. Esse conhecimento é fundamental para o desenvolvimento de esforços de conservação em áreas urbanas, que levam em consideração a influência dos sistemas de comunicação na manutenção da diversidade da fauna.

2.7. Referências

- ATWATER, M. A. Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer: a numerical study. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 3, n. 2, p. 229-245, 1972.
- BARBER, J. R.; CROOKS, Kevin R.; FRISTRUP, Kurt M. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. **Trends in ecology & evolution**, v. 25, n. 3, p. 180-189, 2010.
- BASS, H. E.; SUTHERLAND, L. C.; ZUCKERWAR, A. J. Atmospheric absorption of sound: Update. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 88, n. 4, p. 2019-2021, 1990.
- BIRDLIFE INTERNATIONAL (2017) *Troglodytes aedon*. The IUCN Red List of Threatened Species. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-1.RLTS.T103886826A111242743>> Acesso em: 28 ago. 2019.
- BLUMENRATH, S.; DABELSTEEN, T. Degradation of great tit (*Parus major*) song before and after foliation: implications for vocal communication in a deciduous forest. **Behaviour**, v. 141, n. 8, p. 935-958, 2004.

- BRADBURY, J. W.; VEHCENCAMP, S. L. Principles of Animal Communication, 2^a ed. Sunderland: Sinauer Associates, 1998.
- BROWN, T. J.; HANDFORD, P. Why birds sing at dawn: the role of consistent song transmission. *IBIS*, v. 145, n. 1, p. 120-129, 2003.
- BRUMM, H. The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. **Journal of Animal Ecology**, v. 73, n. 3, p. 434-440, 2004.
- BRUMM, H; NAGUIB, M. Environmental acoustics and the evolution of bird song. **Advances in the Study of Behavior**, v. 40, p. 1-33, 2009.
- BRUMM, H; RITSCHARD, M. Song amplitude affects territorial aggression of male receivers in chaffinches. **Behavioral Ecology**, v. 22, n. 2, p. 310-316, 2011.
- BRUMM, H; SLATER, P. J. B. Animals can vary signal amplitude with receiver distance: evidence from zebra finch song. **Animal Behaviour**, v. 72, n. 3, p. 699-705, 2006.
- BRUMM, H.; TODT, D. Noise-dependent song amplitude regulation in a territorial songbird. **Animal Behaviour**, v. 63, n. 5, p. 891-897, 2002.
- CATCHPOLE, C. K.; SLATER, P. J. B. **Bird song: biological themes and variations**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- DABELSTEEN, T.; MATHEVON, N. Why do songbirds sing intensively at dawn? **Acta Ethologica**, v. 4, n. 2, p. 65-72, 2002.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGENS (DER) Estatística de tráfego: Volume diário médio (VDM). Secretaria de Logística e Transportes. 2017. Disponível em: <http://200.144.30.103 /vdm/SFCGConcessionaria.asp? CodRodovia=SP%20225>. Acesso em: 11 jun. 2019.
- DINGLE, C.; HALFWERK, W.; SLABBEKOORN, H. Habitat-dependent song divergence at subspecies level in the grey-breasted wood-wren. **Journal of Evolutionary Biology**, v. 21, n. 4, p. 1079-1089, 2008.
- DORADO-CORREA, A. M.; ZOLLINGER, S. A.; BRUMM, H. Vocal plasticity in mallards: multiple signal changes in noise and the evolution of the Lombard effect in birds. **Journal of Avian Biology**, v. 49, n. 1, p. jav-01564, 2018.
- ENDLER, J. A. Signals, signal conditions, and the direction of evolution. **The American Naturalist**, v. 139, p. S125-S153, 1992.

- FERNÁNDEZ-JURICIC, E. *et al.* Microhabitat selection and singing behavior patterns of male house finches (*Carpodacus mexicanus*) in urban parks in a heavily urbanized landscape in the western US. **Urban habitats**, v. 3, n. 1, p. 49-69, 2005.
- FRANCIS, C. D.; BARBER, J. R. A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 6, p. 305-313, 2013.
- HUANG, C. *et al.* Changes in land use, climate and the environment during a period of rapid economic development in Jiangsu Province, China. **Science of the Total Environment**, v. 536, p. 173-181, 2015.
- ISO-9613-1. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. International Organization for Standardization, Geneva. 1993.
- KERMOTT, L. Henry; JOHNSON, L. Scott. The functions of song in male house wrens (*Troglodytes aedon*). **Behaviour**, v. 116, n. 3-4, p. 190-209, 1991.
- KROODSMA, D.; BREWER, D.; KIRWAN, G. M. Southern House Wren (*Troglodytes musculus*). In: del Hoyo, J., Elliott, A., Sargatal, J., Christie, D.A. & de Juana, E. (Eds) **Handbook of the birds of the world alive**. Lynx Edicions, Barcelona. 2019. Disponível em: <<https://www.hbw.com/node/58153>>. Acesso em: 11 jun. 2019.
- LAIOLO, P. The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. **Biological Conservation**, v. 143, n. 7, p. 1635-1645, 2010.
- LAMPE, H. M. *et al.* Does twitter song amplitude signal male arousal in redwings (*Turdus iliacus*)?. **Behaviour**, v. 147, n. 3, p. 353-365, 2010.
- LENGAGNE, T.; SLATER, P. J. B. The effects of rain on acoustic communication: tawny owls have good reason for calling less in wet weather. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 269, n. 1505, p. 2121-2125, 2002.
- LOMBARD, E. Le signe de l'élévation de la voix Annales des Maladies de L'Oreille et du Larynx, v. 37, n. 1, p. 101-119, 1911.
- LOWRY, H.; LILL, A.; WONG, B. B. M. How noisy does a noisy miner have to be? Amplitude adjustments of alarm calls in an avian urban 'adaptor'. **PLoS One**, v. 7, n. 1, p. e29960, 2012.
- MAHLER, B.; GIL, D. The evolution of song in the Phylloscopus leaf warblers (Aves: Sylviidae): a tale of sexual selection, habitat adaptation, and morphological constraints. **Advances in the Study of Behavior**, v. 40, n. 1, p. 35-66, 2009.

- MANABE, K.; SADR, E. I.; DOOLING, R. J. Control of vocal intensity in budgerigars (*Melopsittacus undulatus*): differential reinforcement of vocal intensity and the Lombard effect. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 103, n. 2, p. 1190-1198, 1998.
- NAGUIB, M. Reverberation of rapid and slow trills: implications for signal adaptations to long-range communication. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 113, n. 3, p. 1749-1756, 2003.
- NEMETH, E. Rainforests as concert halls for birds: are reverberations improving sound transmission of long song elements?. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 119, n. 1, p. 620-626, 2006.
- OBERWEGER, K.; GOLLER, F. The metabolic cost of birdsong production. **Journal of Experimental Biology**, v. 204, n. 19, p. 3379-3388, 2001.
- PATRICELLI, G. L.; BLICKLEY, J. L. Avian communication in urban noise: causes and consequences of vocal adjustment. **The Auk**, v. 123, n. 3, p. 639-649, 2006.
- POTASH, L. M. Noise-induced changes in calls of the Japanese quail. **Psychonomic Science**, v. 26, n. 5, p. 252-254, 1972.
- PYTTE, C. L.; RUSCH, K. M.; FICKEN, M. S. Regulation of vocal amplitude by the blue-throated hummingbird, *Lampornis clemenciae*. **Animal Behaviour**, v. 66, n. 4, p. 703-710, 2003.
- RICHARDS, D. G.; WILEY, R. H. Reverberations and amplitude fluctuations in the propagation of sound in a forest: implications for animal communication. **The American Naturalist**, v. 115, n. 3, p. 381-399, 1980.
- RITSCHARD, M.; BRUMM, H. Effects of vocal learning, phonetics and inheritance on song amplitude in zebra finches. **Animal Behaviour**, v. 82, n. 6, p. 1415-1422, 2011.
- RITSCHARD, M.; RIEBEL, K.; BRUMM, H. Female zebra finches prefer high-amplitude song. **Animal Behaviour**, v. 79, n. 4, p. 877-883, 2010.
- RITSCHARD, M. *et al.* Song amplitude of rival males modulates the territorial behaviour of great tits during the fertile period of their mates. **Ethology**, v. 118, n. 2, p. 197-202, 2012.
- SCHUSTER, S. *et al.* On the evolution of noise-dependent vocal plasticity in birds. **Biology letters**, v. 8, n. 6, p. 913-916, 2012.
- SEARCY, W. A.; NOWICKI, S. Signal interception and the use of soft song in aggressive interactions. **Ethology**, v. 112, n. 9, p. 865-872, 2006.

- SLABBEKOORN, H.; ELLERS, J.; SMITH, T. B. Birdsong and sound transmission: the benefits of reverberations. **The Condor**, v. 104, n. 3, p. 564-573, 2002.
- SLABBEKOORN, H.; SMITH, T. B. Bird song, ecology and speciation. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 357, n. 1420, p. 493-503, 2002.
- SLABBEKOORN, H.; YEH, P.; HUNT, K. Sound transmission and song divergence: a comparison of urban and forest acoustics. **The Condor**, v. 109, n. 1, p. 67-78, 2007.
- SNELL-ROOD, E. C. The effect of climate on acoustic signals: Does atmospheric sound absorption matter for bird song and bat echolocation?. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 2, p. 1650-1658, 2012.
- SWADDLE, J. P. *et al.* A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 30, n. 9, p. 550-560, 2015.
- TUBARO, P. L. Song description of the House Wren (*Troglodytes aedon*) in two populations of eastern Argentina, and some indirect evidences of imitative vocal learning. **El Hornero**, v. 13, n. 02, p. 111-116, 1990.
- VILLEGAS, M. *et al.* Vocal variation in *Chiroxiphia boliviana* (Aves; Pipridae) along an Andean elevational gradient. **Evolutionary ecology**, v. 32, n. 2-3, p. 171-190, 2018.
- WARREN, P. S. *et al.* Urban bioacoustics: it's not just noise. **Animal behaviour**, v. 71, n. 3, p. 491-502, 2006.
- WILEY, R. H. Signal detection, noise, and the evolution of communication. In: BRUMM, H. (ed.). *Animal Communication and Noise. Animal Signals and Communication*, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 7-30
- WILEY, R. H.; GODARD, R. Ranging of conspecific songs by Kentucky warblers and its implications for interactions of territorial males. **Behaviour**, v. 133, n. 1-2, p. 81-102, 1996.
- WILEY, R. H.; RICHARDS, D. G. Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: implications for the evolution of animal vocalizations. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 3, n. 1, p. 69-94, 1978.
- WILEY, R. H.; RICHARDS, D. G. Adaptations for acoustic communication in birds: sound transmission and signal detection. In: KROODSMA, D. E.; MILLER, E. H. (eds.). **Acoustic communication in birds**, 1^a ed. Academic Press, London, pp 131-181, 1982.

- WOOD, W. E.; YEZERINAC, S. M. Song sparrow (*Melospiza melodia*) song varies with urban noise. **The Auk**, v. 123, n. 3, p. 650-659, 2006.
- ZHONG, S. *et al.* Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 8, p. 5439-5457, 2017.
- ZOLLINGER, S. A.; BRUMM, H. The evolution of the Lombard effect: 100 years of psychoacoustic research. **Behaviour**, v. 148, n. 11-13, p. 1173-1198, 2011.
- ZOLLINGER, S. A.; BRUMM, H. Why birds sing loud songs and why they sometimes don't. **Animal Behaviour**, v. 105, p. 289-295, 2015.
- ZOLLINGER, S. A.; GOLLER, F.; BRUMM, H. Metabolic and respiratory costs of increasing song amplitude in zebra finches. **PLoS One**, v. 6, n. 9, p. e23198, 2011.

3. CAPÍTULO 2 – RUÍDO DO TRÁFEGO E ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA DO SOM AFETAM A ESTRUTURA ACÚSTICA DAS VOCALIZAÇÕES DE *Troglodytes musculus*

3.1. Resumo

A maioria dos vertebrados terrestres utiliza sinais acústicos para mediar a interação social, o comportamento reprodutivo, a prevenção de predadores e a defesa de recursos. Quando a onda acústica é propagada através de um meio fluido, ela está sujeita a degradação durante sua transmissão através do ambiente. Vários processos podem reduzir a eficácia da comunicação, reduzindo o alcance do sinal e mascarando seu conteúdo. Desses, a absorção atmosférica do som e o excesso de ruído ambiental são obstáculos importantes que podem levar a modificações na estrutura do sinal. Nosso objetivo é buscar variação vocal entre duas populações da corruíra (*Troglodytes musculus*), buscando correlacionar essa diferença com fatores ambientais, como ruído e absorção. Selecionei machos em dois locais: um estava próximo e o outro longe de uma grande rodovia situada na região sudoeste do Brasil. As vocalizações foram gravadas e seus parâmetros espectrais e temporais foram medidos. Eu encontrei diferenças entre os grupos, onde o grupo mais próximo à rodovia vocalizou com maior frequência máxima e maior largura de banda de frequência, enquanto o desvio vocal e o deslocamento do pico foram maiores no grupo distante da rodovia. Também foi observado que a absorção e o ruído foram os principais preditores de variação vocal, com os parâmetros vocais aumentando junto com eles. Esse achado mostra a relação sinérgica entre dois obstáculos na comunicação vocal dos pássaros. Ambos os fatores podem estar moldando a estrutura das vocalizações dos machos, e a interação entre eles pode estar relacionada ao *drive* sensorial e à plasticidade da expressão fenotípica das corruíras.

Palavras-chave: adaptação vocal, Hipótese da Adaptação Acústica, distúrbio antropogênico, variação climática, sinais sexuais.

3.2. Abstract

Most of the terrestrial vertebrates uses acoustic signals to mediate social interaction, breeding behavior, predator avoidance, and resource defense. When the acoustic wave is propagated across a fluid media, it is subject to degradation during its broadcasting through the environment. Several processes could reduce the effectiveness of communication by reducing the range of the signal or masking its content. Of those, atmospheric absorption of sound and excessive background noise are important obstacles that could lead to modification in the signal structure. Our objective is to search for vocal variation between two populations of Southern House Wren, seeking to correlate this difference with environmental factors, such as noise and absorption. We selected males from two locations: one was near and the other was far from a major highway in the southwestern region of Brazil. The male songs were recorded and its spectral and temporal parameters were measured. We found differences between the groups, since the group closer to the highway vocalize with higher maximum frequency and wider frequency bandwidth, while vocal deviation and peak displacement are greater in the group far from the highway. We also found absorption and noise as the main predictors of vocal variation, with vocal parameters increasing along with them. This finding shows the synergetic relationship between two obstacles in the vocal communication of birds. Both factors could be shaping the structure of the songs of the males, and the interaction between them could be related to sensory drive and plasticity of phenotypic expression in Southern House Wren.

Keywords: vocal adaptation, Acoustic Adaptation Hypothesis, anthropogenic disturbance, climate, acoustic divergence, mating signals.

3.3. Introdução

O uso de sinais acústicos na comunicação animal é comum entre vários táxons, e é frequentemente usado como um mediador eficaz de vários aspectos da vida animal, incluindo comportamento reprodutivo, defesa de recursos e prevenção de predações (KROODSMA & BYERS, 1991). A onda sonora é uma portadora plástica do sinal, tendo uma natureza transitória que codifica informações sobre o sinalizador, como localização, identidade, condição e intenção, reduzindo os custos de encontros com possíveis agonistas (WILKINS, 2013). Os animais podem transmitir sons a longas distâncias e através de obstáculos, o que conseqüentemente prejudica a qualidade do sinal (BRADBURY & VEHRENCAMP, 1998).

Conforme definido por MORTON (1986), a degradação do sinal é o resultado de alterações acumuladas na estrutura do sinal, causadas por distúrbios na transmissão pelo ambiente. Este efeito reduz o espaço ativo do som, diminuindo a detectabilidade do sinalizador e prejudicando a comunicação em longas distâncias (BRUMM & NAGUIB, 2009). Um dos principais componentes da degradação é a atenuação do som, que é a diminuição da intensidade acústica com o aumento da distância (BONCORAGLIO & SAINO, 2007; EY & FISCHER 2009). Vários estudos exploram os efeitos da atenuação na produção de vocalizações por meio de um viés dicotômico, comparando a estrutura acústica dos sinais entre ambientes abertos e fechados. Essa abordagem, frequentemente chamada "Hipótese de Adaptação Acústica" (MORTON, 1975), propõe uma relação intrínseca entre a estrutura do habitat e as propriedades acústicas do sinal (BONCORAGLIO & SAINO, 2007) e afirma que a variação na cobertura vegetal impõe pressões seletivas diferenciais aos indivíduos (ENDLER, 1992). Portanto, o habitat, os sistemas sensoriais e a estrutura sonora dos sinais interagem entre si e podem culminar variação vocal intraespecífica (NEMETH, 2001; BLUMENRATH & DABELSTEEN, 2004, BERG, 2006; BRUMM & SLATER, 2006; HILL, 2017).

Embora a vegetação possa impor restrições na transmissão sonora, poucos estudos isolam os efeitos da cobertura vegetal e exploram os efeitos da atenuação atmosférica na transmissão das vocalizações de aves. As condições climáticas podem afetar os sistemas de sinalização sonora por

meio da absorção atmosférica (WILEY & RICHARDS, 1978; RICHARDS & WILEY, 1980). Existe uma complexa interação entre temperatura, umidade e pressão atmosférica, que juntas podem mitigar a amplitude sonora (RICHARDS & WILEY, 1980; BASS, 1990; SNELL-ROOD, 2012). A magnitude da absorção é dependente do conteúdo de frequência do sinal, sendo mais proeminente em sinais agudos (BASS, 1990). Assim, mesmo uma pequena variação na estrutura climática do ambiente pode afetar as taxas de absorção sonora, implicando em uma divergência no alcance de detecção e na locabilidade do sinal (RICHARDS & WILEY, 1980). Portanto, debate-se a relevância da absorção atmosférica como um obstáculo para a transmissão, que poderia levar a uma divergência por meio de *drive* sensorial.

Enquanto isso, o ruído ambiental é outro fator que pode moldar a produção vocal de aves. Muitos estudos demonstram a flexibilidade estrutural dos sinais como resposta aos níveis de ruído biótico e abiótico (BRUMM & ZOLLINGER, 2013; FRANCIS & BARBER, 2013). Este estressor diminui os limites da audibilidade de algumas bandas de frequência específicas (BRUMM & ZOLLINGER, 2013; FRANCIS & BARBER, 2013), reduzindo a eficiência de transmissão sonora em contextos ruidosos. Tal fator pode ser uma importante restrição que afeta a estrutura vocal, com indivíduos adaptando a estrutura vocal para evitar o mascaramento sonoro causado por fontes de ruído crônico (RYAN & BRENOWITZ, 1985; KIRSCHER *et al.*, 2009; LUTHER & DERRYBERRY, 2012; WILKINS *et al.*, 2013). No caso específico do ruído do tráfego, ele tem uma maior intensidade nas baixas frequências, em torno dos 1,5 kHz (SLABBEKOORN & RIPMEESTER, 2008; SWADDLE 2015), o que pode afetar os elementos mais graves da vocalização. Como resposta, aves urbanas tendem a aumentar os valores de frequência para evitar a influência excessiva do ruído (SLABBEKOORN & PEET, 2003; HU & CARDOSO, 2010; VERZIJDEN *et al.* 2010; FRANCIS *et al.*, 2011; MONTAGUE *et al.*, 2013; MOIRON *et al.*, 2015; LEE & PARK, 2019). Isto pode ter vários impactos na biologia das aves, podendo levar a uma divergência vocal que coincida com a intensidade do ruído (WILKINS, 2013)

Portanto, o impacto do ruído e da absorção atmosférica pode ser fatores relevantes na possível divergência estrutural acústica entre populações de aves. Ambos os fatores podem atuar como pressões seletivas nas vocalizações, afetando a produção de sinais para incrementar sua transmissão através do ambiente. Assim, este trabalho buscou encontrar variação vocal entre duas populações urbanas de *T. musculus*. Eu explorei os efeitos diretos do ruído e da absorção atmosférica na produção vocal, isolando outras covariáveis que poderiam afetar a transmissão do som, como cobertura vegetal, velocidade do vento e reverberações artificiais. Eu esperava encontrar divergências entre essas duas populações em sua estrutura acústica e observar o ruído e a absorção como os principais preditores de diferenças vocais entre elas.

3.4. Material e métodos

3.4.1. Seleção, captura e medição dos indivíduos

Tanto a etapa de seleção preliminar quanto a de captura e medição dos indivíduos seguiram os protocolos estabelecidos no capítulo anterior. Eu tomei as mesmas precauções para que não houvessem outros fatores contextuais que fossem capazes de enviesar a coleta de dados. Da mesma maneira, os mesmos 50 indivíduos foram selecionados (25 pertencentes grupo próximo da rodovia e 25 pertencentes ao grupo distante). Destes, os mesmos 37 foram capturados, marcados e mensurados.

3.4.2. Gravação das vocalizações

Posteriormente, eu gravei as vocalizações das aves com um gravador digital Marantz PMD 661 conectado a um microfone direcional Yoga HT-81. Registrei indivíduos que estavam cantando espontaneamente a partir de poleiros expostos, com uma distância linear máxima de 10 m entre o microfone e o pássaro. A distância foi medida usando um telêmetro a laser apontado para o poleiro onde a ave estava vocalizando. Para controlar os possíveis efeitos da atenuação sonora por dispersão,

apenas gravei os indivíduos que estavam vocalizando com seus bicos apontados diretamente para o microfone.

Logo após as gravações, eu medi as condições ambientais. Eu measurei a temperatura (em °C), a umidade (em%), a velocidade do vento (em ms) e o nível de ruído (dB) usando um medidor ambiental Extech EN300. Essas gravações foram feitas apenas em condições de baixa velocidade do vento (<0,5 m/s) para evitar os efeitos de dispersão da turbulência do ar. Pelas características ambientais, foi possível extrair a absorção atmosférica do som. A absorção é um parâmetro complexo que surge da interação entre temperatura do ar, umidade relativa, pressão do ar e frequência do som. Por esse motivo, empreguei os valores de temperatura e umidade em cada local para calcular o grau de absorção (em dB/km). Também selecionei uma faixa de frequência de 3,2 kHz a 93 kPa de pressão atmosférica, que foi a pressão atmosférica média na região de Bauru. Essa frequência corresponde à média aritmética das frequências de pico das vocalizações de *T. musculus*. Por fim, a absorção atmosférica do som foi calculada de acordo com as proposições do ISO-9613-1 (2011).

3.4.3. Medidas acústicas

A gravação das vocalizações foi padronizada a uma taxa de amostragem de 44.100 Hz, 16 bits de resolução e formato *.wav*. Este formato foi escolhido para evitar os efeitos de compactação do formato *.mp3*, que poderiam influenciar as medidas por meio de retirada de frequências inaudíveis ao ouvido humano, mas que poderiam estar presentes nas vocalizações (ARAYA-SALAS *et al.*, 2017). Eu measurei os parâmetros acústicos de cada vocalização contidos em um arquivo de som, usando o oscilograma para medir variáveis temporais (Fig. 5) e os espectros de amplitude para medir as espectrais (Fig. 6).

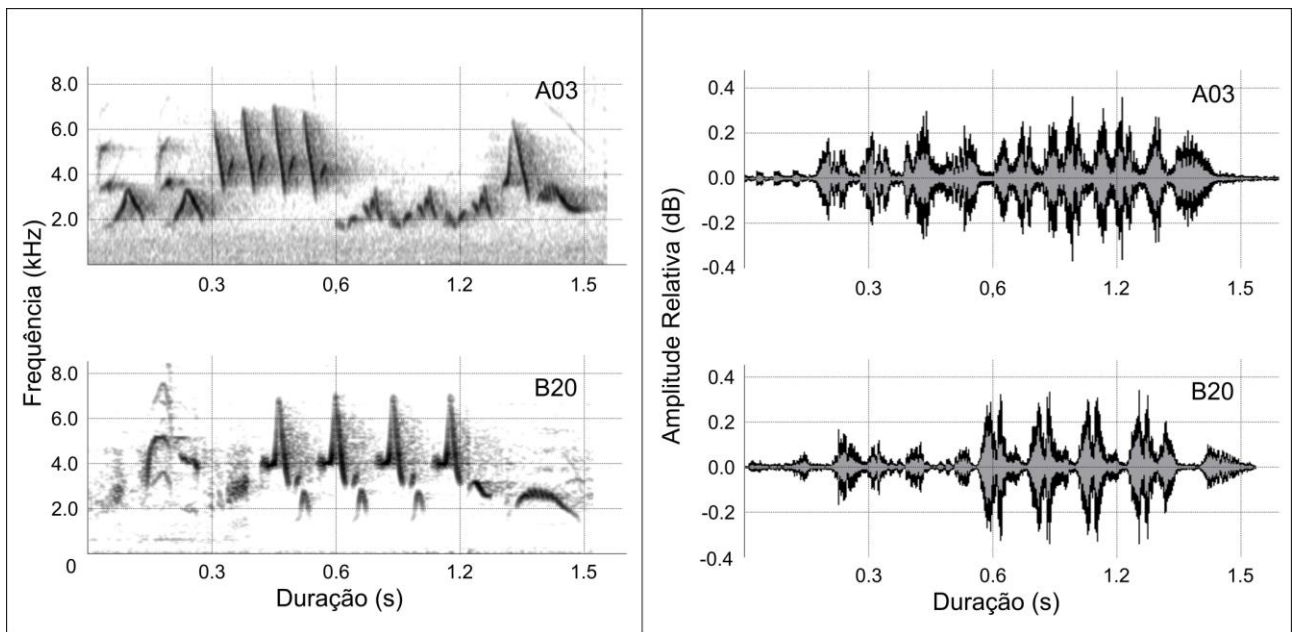


Figura 5. Espectrogramas de frequência (direita) e oscilogramas (esquerda) dos arquivos vocais analisados. Estão discriminados exemplos de vocalizações de indivíduos situados próximos da rodovia (A03) e distantes (B20).

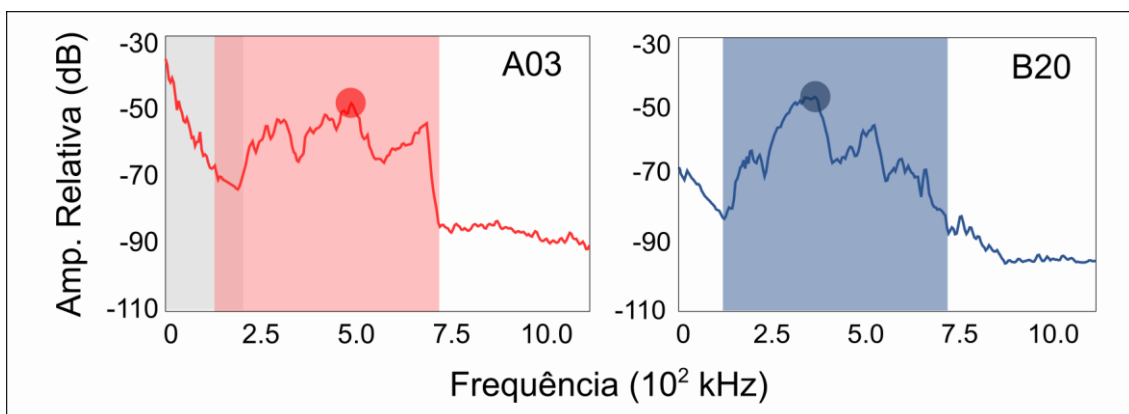


Figura 6. Espectros de amplitude dos arquivos vocais analisados. Estão discriminados exemplos de vocalizações de indivíduos situados próximos da rodovia (A03) e distantes (B20). As áreas coloridas (azul e vermelha) representam os limites da vocalização dentro do espectro. Os círculos representam as frequências de pico para cada vocalização. A área acinzentada no gráfico da esquerda representa as bandas de ruído antropogênico.

Embora vários autores usem o espectrograma para extrair variáveis acústicas dos arquivos sonoros, eu decidi não usá-las para evitar possíveis erros causados por diferenças na resolução na frequência e no tempo (ZOLLINGER, 2012). As variáveis espectrais foram calculadas estabelecendo um limite de -15 dB abaixo do pico de frequência para evitar bandas de ruído de baixa frequência que pudessem interferir na análise vocal. Todas as vocalizações foram analisadas as cegas quanto a

identidade original do arquivo de áudio. Eu tomei essa precaução para evitar vieses subjetivos nos processos de análise que poderiam levar a erros do tipo II (RÍOS-CHELÉN *et al.*, 2017).

O primeiro parâmetro que medi foi a duração total da vocalização (em segundos). Depois disso, eu identifiquei a sentença que tinha a taxa de trinado mais rápida na vocalização e medi as seguintes variáveis: duração da sentença (em segundos), taxa de trinado (nas sílabas segundo⁻¹), frequência máxima (em kHz), frequência mínima (em kHz), largura de banda da frequência (em kHz) e a frequência de pico (em kHz). Realizei as medições apenas na sentença mais rápida, para buscar uniformidade entre os componentes da vocalização, tentando reduzir qualquer possível viés em direção às frequências máxima e mínima. A partir destes, eu extrai mais dois parâmetros adicionais: o desvio vocal e o pico de deslocamento. O primeiro foi medido seguindo as proposições de PODOS (2001), e refere-se à capacidade de alguns indivíduos de vocalizar perto de suas restrições físicas. O desvio vocal surge do trade-off entre a taxa de trinado e a largura de banda da frequência de uma frase trinada, e indica quais indivíduos poderiam vocalizar perto de seus limites morfológicos, sendo um indicativo da qualidade do macho (BALLENTINE, 2004). Enquanto isso, o deslocamento do pico (DP) foi calculado de acordo com a seguinte equação: $DP = (Freq. de Pico - Freq. Mínima) / Largura da Banda$. Este parâmetro mede o deslocamento da frequência de pico em relação à frequência mínima com o controle da largura de banda da frequência. Sua escala varia de 0 a 1, onde valores próximos a 0 indicam um desvio das frequências de pico em direção às frequências mínimas e valores próximos a 1 mostram um deslocamento em direção às frequências máximas. Assim, eu medi nove parâmetros vocais de cada vocalização.

3.4.4. Tratamento e análise dos dados

Primeiro, eu verifiquei a natureza dos dados quanto a homocedasticidade e a normalidade usando os testes de Levene e Shapiro-Wilk, respectivamente. Como eles não atenderam a essas premissas, os dados foram transformados em \log_{10} , o que resolveram os problemas de normalidade e homogeneidade de variância. As características morfométricas são correlacionadas entre si

(correlação de Spearman $r_s > 0,4$), portanto, realizei uma análise de componentes principais (PCA) para lidar com redundância e colinearidade dos dados morfológicos, o que também resume a variação dos dados em um pequeno conjunto de variáveis independentes. O PCA gerou dois componentes principais com autovalores maiores que 1,0, o que explica quase 65% da variação morfológica entre os indivíduos (ver Tab. 1).

Para testar as diferenças nas vocalizações entre os grupos próximo e distante, eu utilizei uma análise multivariada de variância (MANOVA) com as variáveis transformadas. Juntamente com esta análise, conduzi análises de variância (ANOVA) para cada uma das variáveis, verificando quais delas variaram entre os grupos.

Além disso, eu conduzi uma regressão linear múltipla e hierárquica com as variáveis acústicas para testar se as características ambientais e/ou morfológicas influenciam no comportamento de cada uma das variáveis. Eu empreguei o ruído ambiental, a absorção atmosférica, o primeiro componente principal (PC1) e a massa corporal como variáveis preditoras, nesta ordem específica. O tamanho e a massa corporais foram escolhidos como os últimos preditores porque eu não esperava encontrar uma variação morfológica expressiva entre e dentro dos grupos, sendo que estes traços podem ser mais relevantes na interação com as características ambientais (*i. e.* ruído e absorção). As variáveis preditoras foram testadas quanto à divergência entre grupos por meio de um teste T.

Por fim, eu conduzi um escalonamento multidimensional não-métrico (nMDS) usando as distâncias euclidianas com as variáveis não transformadas. Esta análise permitiu a verificação da distribuição das amostras no espaço multivariado para determinar se os dois grupos são divergentes entre si na estrutura vocal. Eu ajustei aos preditores na ordenação final do nMDS para observar os efeitos que estas variáveis têm na distribuição da estrutura vocal no espaço multidimensional. Os procedimentos foram realizados no programa IBM SPSS 23.0, com exceção do nMDS, que foi conduzido no PAST 3.0.

3.5. Resultados

Com relação aos preditores da variação vocal, apenas o ruído foi distinto entre os dois grupos (ruído ambiental: $t = 10.669$, $p < 0.001$; absorção atmosférica: $t = 0.169$, $p = 0.867$; massa corporal: $t = 1.340$, $p = 0.189$; PC1 de tamanho corporal: $t = 0.862$, $p = 0.395$). Eu verifiquei que os valores de amplitude do ruído foram maiores no grupo próximo da rodovia, que é produzido pelo intenso tráfego nas redondezas (Fig. 7).

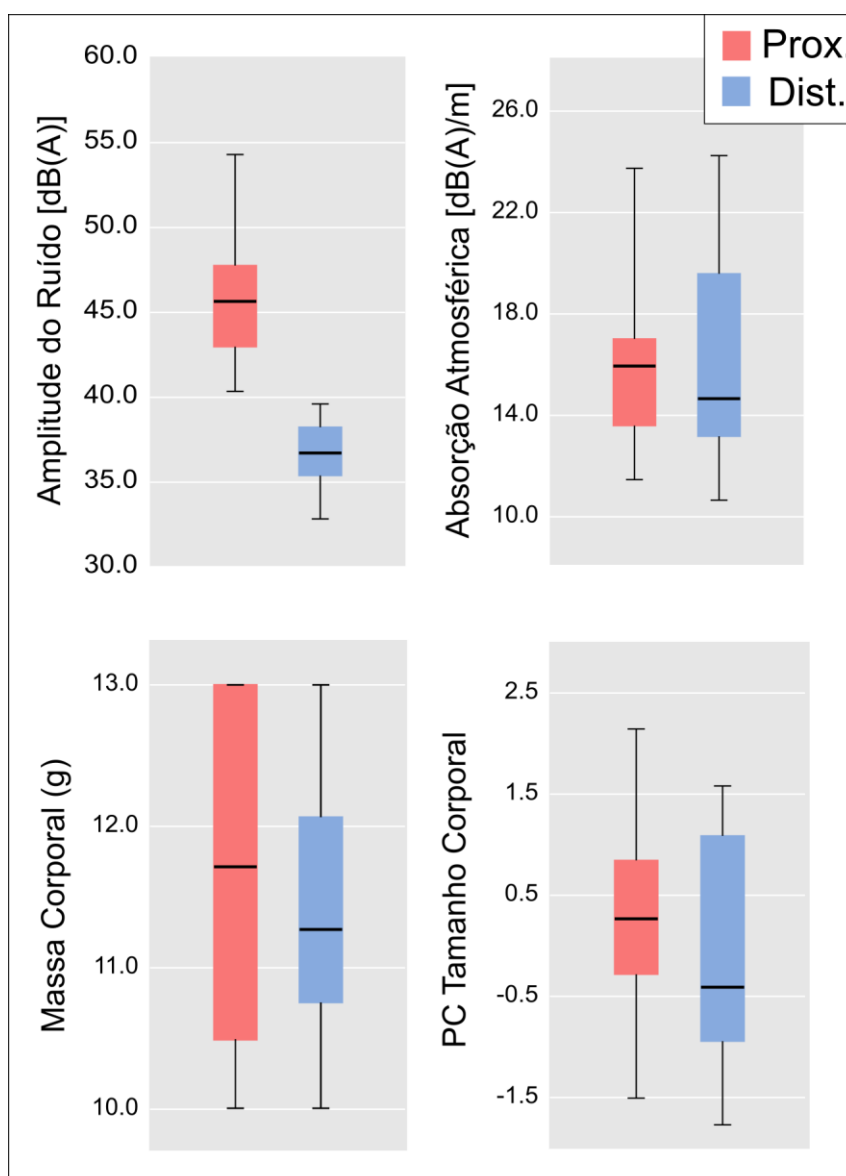


Figura 7. Distribuição das variáveis predictoras nos dois grupos (próximo e distante).

Com relação à estrutura vocal, eu encontrei diferenças entre os dois grupos ($F_{9,40} = 2.580$, $p = 0.019$, Wilks' $\lambda = 0.633$). Dos parâmetros analisados, apenas a frequência máxima, a frequência mínima, a banda de frequência, a performance vocal e o desvio de pico mostraram uma variação estatisticamente significativa entre os dois grupos (Tab. 3). O grupo próximo vocaliza com maiores frequências máximas e bandas de frequência mais amplas, enquanto o grupo distante possui maiores valores de desvio vocal e deslocamento de pico (Fig. 8).

Tabela 3. Testes de normalidade (Shapiro-Wilk), homocedasticidade (Levene) e análise de variância (ANOVAs) para cada variável vocal transformada. Os valores que apresentaram diferenças significativas foram destacados ($p < 0,05$).

Parâmetro vocal (\log_{10})	Shapiro Wilk		Levene		ANOVAs		
	<i>W</i>	<i>p</i>	<i>F</i> _{1,48}	<i>p</i>	<i>F</i> _{1,48}	<i>p</i>	η^2
Duração da Vocalização (s)	0,985	0,772	0,558	0,459	0,512	0,478	0,011
Duração da frase (s)	0,982	0,639	0,757	0,389	3,133	0,083	0,061
Taxa de trinado (elementos s^{-1})	0,960	0,098	1,556	0,218	0,545	0,464	0,011
Frequência Máxima (kHz)	0,978	0,470	0,003	0,957	20,052	0,001	0,295
Frequência Mínima (kHz)	0,970	0,244	3,498	0,068	0,574	0,452	0,012
Banda de Frequência (kHz)	0,983	0,705	0,480	0,492	20,135	0,001	0,296
Frequência de Pico (kHz)	0,961	0,106	0,514	0,477	3,504	0,067	0,068
Performance Vocal	0,932	0,070	4,519	0,053	8,331	0,006	0,148
Desvio de Pico	0,963	0,114	2,038	0,160	6,189	0,016	0,114

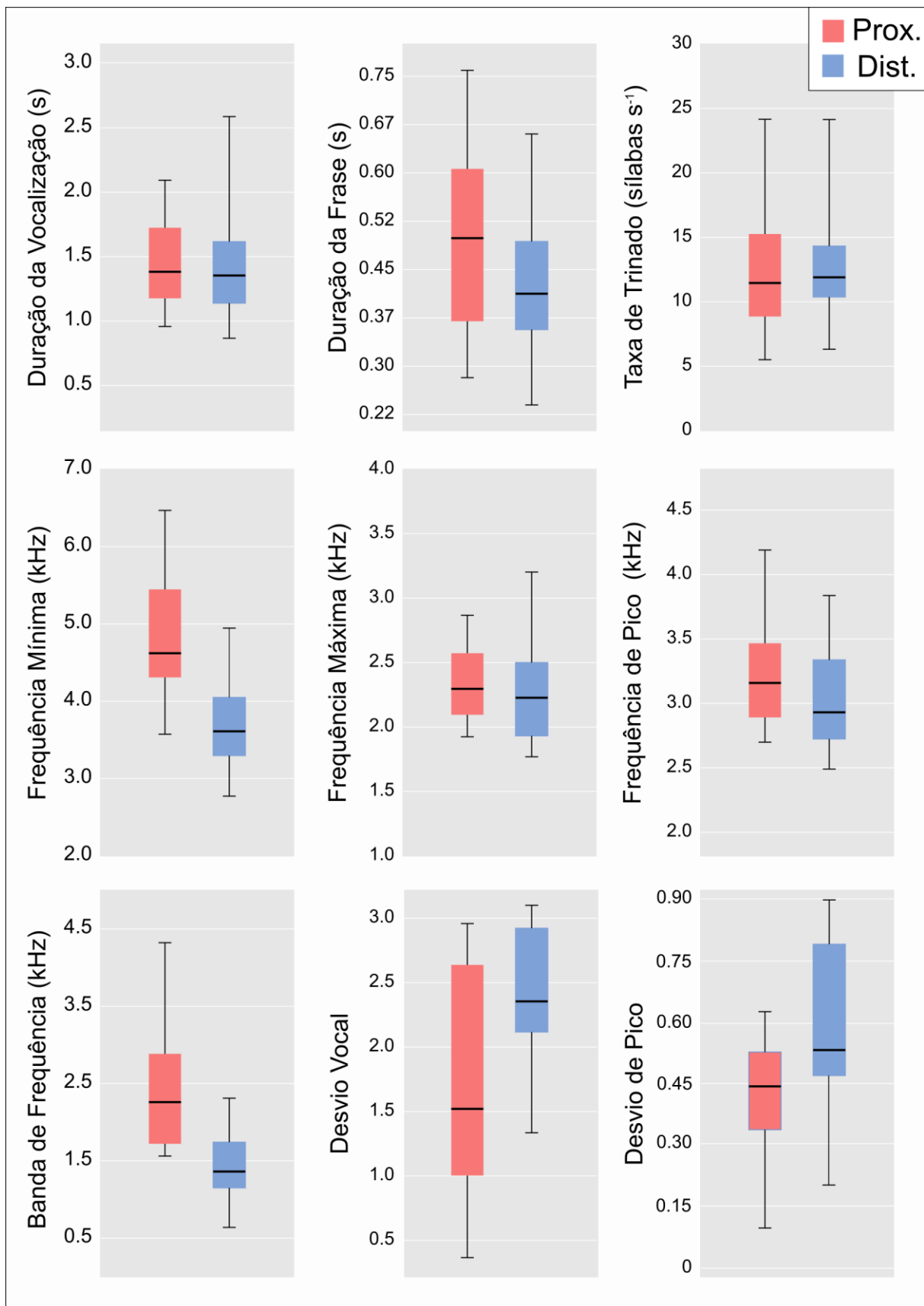


Figura 8. Distribuição das variáveis vocais nos dois grupos (próximo e distante).

A absorção atmosférica e o ruído de fundo foram os principais preditores da variação vocal (Tab. 4). O ruído afeta positivamente a duração da sentença, a frequência máxima e a largura de banda da frequência, enquanto a absorção é um preditor positivo das frequências máxima, mínima e de pico (Fig. 9). Algumas características morfométricas também influenciam, uma vez que a massa corporal é um preditor negativo de frequência mínima, e o PC1 de tamanho corporal afeta positivamente o desvio vocal. A distribuição das amostras no espaço multivariado mostra pouca sobreposição entre os dois grupos (Fig. 10), corroborando com a ideia de distinção acústica.

Tabela 4. Resumo dos modelos de regressão linear para cada variável. Estão descritos apenas os modelos que tiveram significância estatística ($p < 0,05$). Para cada um, está exibido o coeficiente de regressão (r), o coeficiente de determinação (r^2), os graus de liberdade (gl.1 e gl.2), o valor da estatística F e o nível de significância. Também estão exibidos os valores dos coeficientes parciais β e os valores de t para cada preditor.

Parâmetro	Preditor(es)	Parâmetros do Modelo							
		r	r^2	gl.1	gl.2	F	p	β	t
Duração da frase (s)		0,425	0,181	2	32	3,534	0,041		
	Absorção							0,258	1,610
	Ruído							0,335	2,096
Frequência Máxima (kHz)		0,564	0,318	2	32	7,487	0,002		
	Absorção							0,473	3,243
	Ruído							0,302	2,067
Frequência Mínima (kHz)		0,560	0,314	1	33	14,627	< 0,001		
	Absorção							0,560	3,824
Banda de Frequência (kHz)		0,450	0,202	2	31	5,277	0,027		
	PC1							0,317	2,007
	Ruído							0,313	1,918
Frequência de Pico (kHz)		0,831	0,690	1	33	73,474	< 0,001		
	Absorção							0,831	11,808

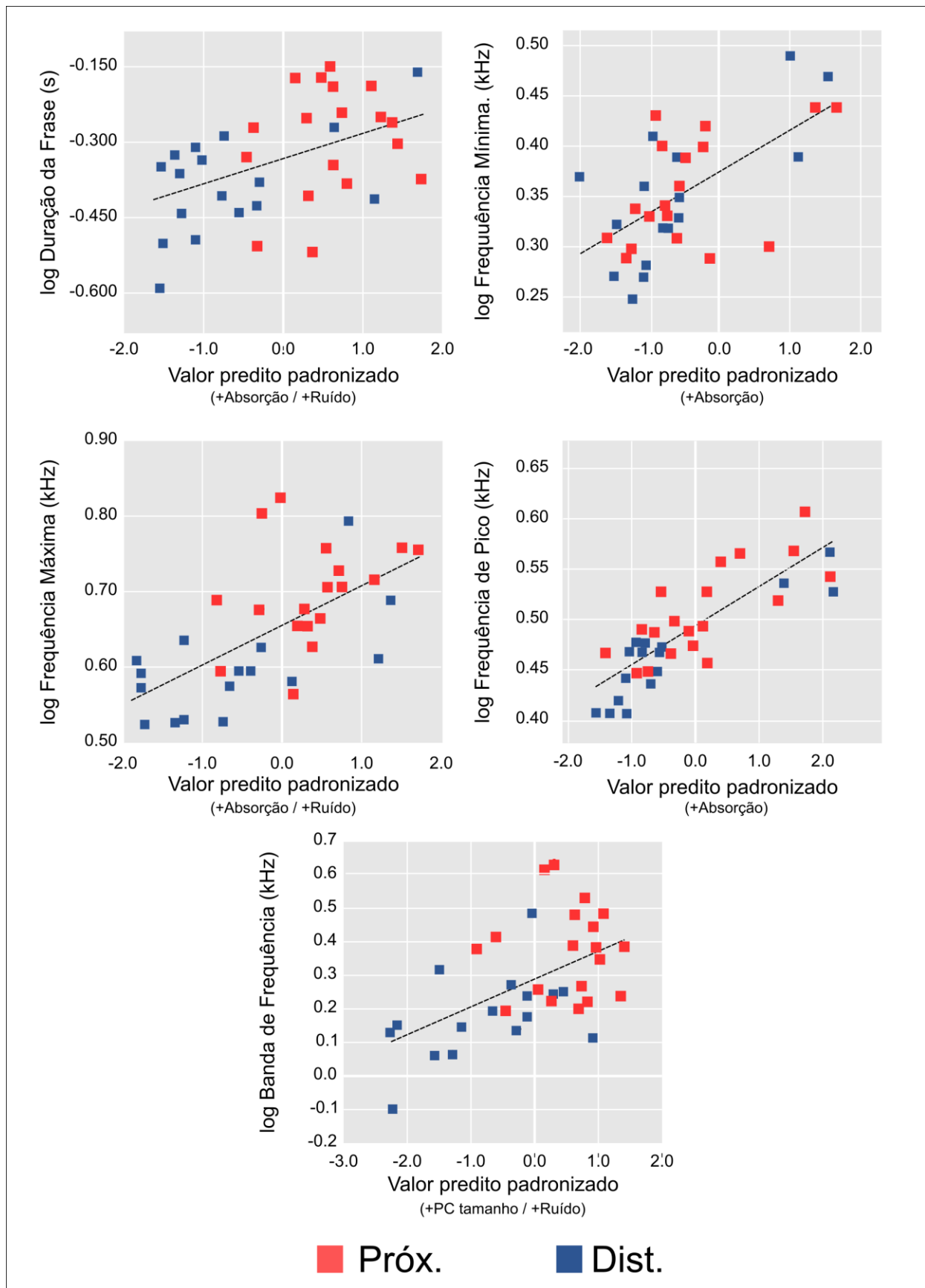


Figura 9. Regressões lineares múltiplas entre os preditores e as variáveis vocais. Cada quadrado representa um indivíduo dos grupos próximo e distante da rodovia. As variáveis foram plotadas com os valores preditos padronizados, que estão descritos no eixo X. Também estão descritos a natureza positiva ou negativa dos preditores. As linhas pretas representam a linha de regressão para cada modelo.

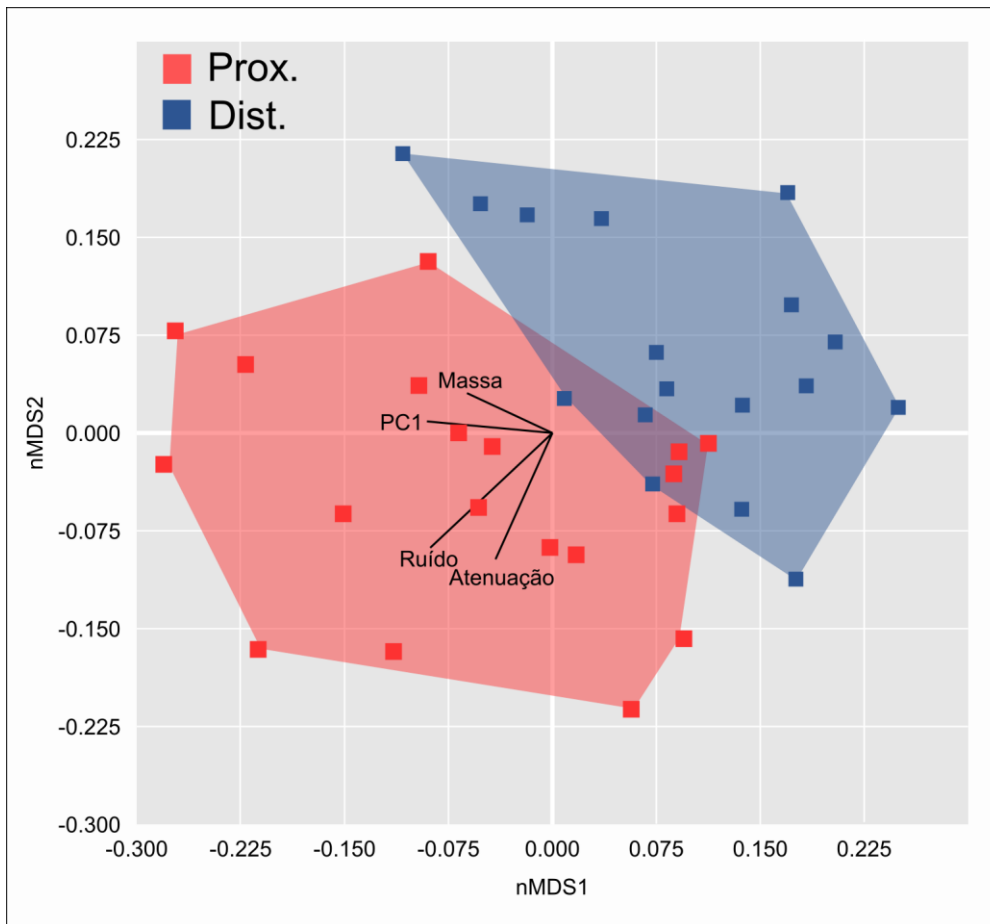


Figura 10. Ordenação multidimensional não-métrica das características vocais de *T. musculus*. Os polígonos delimitam os contornos multivariados para cada grupo (próximo e distante). Os quatro eixos representam a ordenação dos preditores de variação (ruído, atenuação, PC de tamanho corporal e massa corporal). Os dados demonstram uma boa aderência ao modelo proposto (estresse = 0,148).

3.6. Discussão

Como previsto, a absorção atmosférica e o ruído afetam a estrutura acústica das vocalizações de *T. musculus*. Ambas as características influenciam os parâmetros espectrais e temporais das vocalizações e interferem na comunicação vocal.

Eu verifiquei que a duração da frase é mais longa nas vocalizações produzidas por indivíduos que residem em áreas barulhentas, o que pode aumentar as chances de transmissão de som nesse meio. Muitas espécies de aves produzem vocalizações redundantes para aumentar a probabilidade de uma transmissão acústica bem-sucedida (BRUMM & ZOLLINGER, 2013). De fato, as aves podem responder a níveis elevados de ruído aumentando a duração da frase (LEONARD & HORN, 2005; OSMANSKI & DOOLING, 2009; REDONDO 2013) ou a taxa de trinado (BRUMM *et al.* 2009; NEMETH & BRUMM, 2009, PROPPE *et al.*, 2012). O fato dos machos aumentarem a duração da

frase concorda com a ideia de que vocalizações mais longas têm uma chance maior de serem detectadas por um potencial receptor. Como a taxa de trinado não varia entre os grupos e não é influenciada por características ambientais, vocalizações mais longas melhoram a detectabilidade através do aumento das chances de detecção de sinal (DOOLING & SEARCY, 1985; POHL *et al.*, 2013).

O conteúdo espectral das vocalizações também é determinado pelos níveis de ruído. A frequência máxima e a largura de banda da frequência têm valores significativamente mais altos nas áreas mais próximas às rodovias, e ambos os parâmetros são determinados positivamente pela amplitude do ruído. Por outro lado, as frequências mínima e de pico não variam entre os grupos e não foram correlacionadas com o ruído. Esse fato contradiz muitas evidências relatando um aumento na frequência mínima em resposta ao ruído ambiental (SLABBEKOORN & RIPMEESTER, 2008; OSMANSKI & DOOLING, 2009; BRUMM & ZOLLINGER, 2013). Aparentemente, o som de baixa frequência produzido por *T. musculus* não se sobrepõe aos espectros de ruído, o que poderia explicar a ausência de variação na frequência mínima vinculada ao ruído. A frequência máxima, no entanto, é influenciada pelo ruído, e a elevação de seus valores pode resultar em um aumento no alcance do sinal, melhorando a detectabilidade do sinal em tais contextos (BRUMM, 2004; WILEY, 2006). Essa relação entre frequência máxima e ruído também foi observada em *Vireo vicinor* (FRANCIS *et al.*, 2011), *Turdus merula*, *Parus major* (NEMETH & BRUMM, 2010) e *Dumetella carolinensis* (DOWLING *et al.*, 2012), mas é frequentemente associada a mudanças em frequências de pico e mínimas. Nas vocalizações das corruíras, as frequências graves permanecem estáveis, independentemente dos níveis de ruído. Essa variação na frequência máxima também pode explicar a divergência na largura de banda de frequência entre os grupos, pois parece surgir como um produto da manutenção dos valores mínimos de frequência e da elevação das máximas frequências.

O ambiente também está interferindo na transmissão vocal das corruíras através da absorção atmosférica. De fato, parece que esse fator é preponderante na variação da estrutura vocal, pois prevê o comportamento da duração da frase, bem como as frequências máxima, mínima e de pico. Em

relação ao pico de frequência, a absorção explica quase 70% da variação espectral ($r^2 = 0,690$), sendo um forte preditor dessa característica vocal. A atenuação é maior em frequências elevadas (WILEY & RICHARDS, 1982; BASS *et al.*, 1990) e pode induzir plasticidade na estrutura vocal das aves (BONCORAGLIO & SAINO, 2007; EY & FISCHER, 2009). Existem algumas evidências que ligam a divergência vocal e ecológica entre populações isoladas (KIRSCHER, 2009) e subespécies alopátricas (SEMENTILI-CARDOSO & DONATELLI, 2019), gerando divergência fenotípica de acordo com as características climáticas (WILKINS *et al.*, 2013).

No entanto, o que muitos estudos negligenciam é a relação sinérgica que pode emergir do ruído e da absorção sonora. No caso da corruíra, a duração e a frequência máxima da frase detalhada são determinadas por ambos os fatores ambientais. Esses preditores têm um peso semelhante na magnitude da variação vocal, e os modelos que os incluem explicam grande parte da divergência vocal entre os indivíduos. A interação entre ruído e absorção poderia explicar o aumento na duração da sentença trinada, pois sentenças mais longas têm maior probabilidade de serem discriminadas em um ambiente em que a absorção e o ruído agem em conjunto (BARCLAY & BRIGHAM, 1991). Enquanto isso, o aumento no conteúdo da frequência pode ser explicado como resultado da combinação desses dois recursos. Pode-se argumentar que o aumento da absorção pode levar à diminuição dos valores de frequência, uma vez que as vocalizações agudas sofrem menos com a atenuação atmosférica (SNELL-ROOD, 2012). No entanto, como os espectros de ruído dominam as bandas baixas de frequência, as pressões ambientais podem exercer a pressão inversa e levar a um aumento das frequências gerais.

Outra explicação possível para a variação vocal é a seleção sexual agindo em conjunto com fatores ecológicos (WILKINS, 2013). A largura de banda de frequência e a taxa de trinado das vocalizações das aves são características sexualmente selecionadas e indicam a qualidade masculina (CRAMER, 2013; VEHRENCAMP, 2013), afetando a agressão dos machos (PHILLIPS & DERRYBERRY, 2017) e a escolha feminina por parceiros (SLABBEKOORN & SMITH, 2002; BALLENTINE, 2004; BYERS *et al.*, 2010). Os machos de corruíra podem estar aumentando os

valores de duração e frequência de suas frases para melhorar a atratividade da vocalização em um contexto desfavorável (*i.e.* habitats com maior ruído e absorção de som). Sabe-se que sentenças elaboradas com maior largura de banda são mais atraentes para as fêmeas (BALLENTINE *et al.*, 2004). Assim, em ambientes estressantes, os sujeitos poderiam desenvolver esses traços exagerados para facilitar sua adaptação em contextos de mudança e aumentar as taxas de resposta feminina (PROPPE *et al.*, 2011).

A variação vocal também pode emergir como um subproduto da variação morfológica. Características como massa corporal, tamanho corporal e comprimento do bico estão sujeitas a seleção ecológica (PODOS, 2004) e podem influenciar o conteúdo espectral e temporal das vocalizações (DERRYBERRY *et al.* 2012; 2018). No entanto, esse parece não ser o caso dos indivíduos amostrados, pois não encontrei divergência morfométrica entre os grupos “próximo” e “distante”. Além disso, apenas a largura de banda de frequência é influenciada, em parte, pelo tamanho do corpo. Caso as características morfológicas tivessem influenciado a estrutura vocal dos indivíduos masculinos, o tamanho corporal seria um preditor da expressão de vários parâmetros acústicos, especialmente a taxa de trinado (PODOS, 2001). Esse fato pode indicar que o drive sensorial pode estar levando a variação vocal, em vez de adaptação morfológica a pressões ecológicas diferenciais (SEDDON, 2005).

Em conclusão, este trabalho correlacionou a variação da vocalização a fatores abióticos que predizem o comportamento de vários parâmetros vocais. Ao controlar o efeito da cobertura vegetal e dos obstáculos na propagação do som, avaliei o impacto do ruído urbano e da absorção atmosférica no comportamento vocal de *T. musculus*. Este é um dos poucos estudos que buscou os efeitos combinados de ruído e absorção, e análises adicionais envolvendo variação vocal devem investigar a influência do *drive* sensorial, levando em consideração outros aspectos, como evolução cultural e deriva genética, além de fatores ecológicos.

3.7. Referências

- ARAYA-SALAS, M.; SMITH-VIDAURRE, G.; WEBSTER, M. Assessing the effect of sound file compression and background noise on measures of acoustic signal structure. **Bioacoustics**, v. 28, n. 1, p. 57–73, 2017.
- BALLENTINE, B.; HYMAN, J.; NOWICKI, S. Vocal performance influences female response to male bird song: An experimental test. **Behavioral Ecology**, v. 15, n. 1, p. 163–168, 2004.
- BARBER, J. R.; CROOKS, K. R.; FRISTRUP, K. M. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 25, n. 3, p. 180–9, 2010.
- BARCLAY, R. M. R.; BRIGHAM, M. R. Prey detection, dietary niche breadth, and body size in bats: why are aerial insectivorous bats so small. **American Naturalist**, v. 137, n. 5, p. 693–703, 1991.
- BASS, H. E.; SUTHERLAND, L. C.; ZUCKERWAR, A. J. Atmospheric absorption of sound - Update. **Acoustical Society of America**, v. 88, n. 1986, p. 102019–102021, 1990.
- BERG, K. S.; BRUMFIELD, R. T.; APANIUS, V. Phylogenetic and ecological determinants of the neotropical dawn chorus. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 273, n. 1589, p. 999–1005, 2006.
- BLUMENRATH, S. H.; DABELSTEEN, T. Degradation of great tit (*Parus major*) song before and after foliation: Implications for vocal communication in a deciduous forest. **Behaviour**, v. 141, n. 8, p. 935–958, 2004.
- BONCORAGLIO, G.; SAINO, N. Habitat structure and the evolution of bird song: a meta-analysis of the evidence for the acoustic adaptation hypothesis. **Functional Ecology**, v. 21, n. 1, p. 134–142, fev. 2007.
- BRADBURY, J. W.; VEHRENCAMP, S. L. **Principles of Animal Communication**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc, 1998.
- BRUMFIELD, R. T.; CAPPARELLA, A. P. Genetic Differentiation and Taxonomy in the House Wren Species Group. **The Condor**, v. 98, n. 3, p. 547–556, 1996.
- BRUMM, H. *et al.* Acoustic communication in noise: regulation of call characteristics in a New World monkey. **Journal of Experimental Biology**, v. 2007, n. 1, p. 443–448, 2004.
- BRUMM, H.; NAGUIB, M. Environmental acoustics and the evolution of bird Song. **Advances in the Study of Behavior**, v. 40, n. 09, p. 1–33, 2009.
- BRUMM, H.; SCHMIDT, R.; SCHRADER, L. Noise-dependent vocal plasticity in domestic

fowl. **Animal Behaviour**, 2009.

- BRUMM, H.; SLATER, P. J. B. Animals can vary signal amplitude with receiver distance: evidence from zebra finch song. **Animal Behaviour**, v. 72, n. 3, p. 699–705, set. 2006.
- BRUMM, H.; ZOLLINGER, S. A. Avian vocal production in noise. In: BRUMM, H (ed.) **Animal Communication and Noise**, 2013. Berlin: Springer Academic Press. pp. 187–227.
- BYERS, J.; HEBETS, E.; PODOS, J. Female mate choice based upon male motor performance. **Animal Behaviour**, v. 79, n. 4, p. 771–778, 2010.
- CLEMENTS, J. F. *et al.* **The eBird/Clements checklist of birds of the world**. Disponível em: <<http://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/download/>>. Acesso em: 20 jul. 2019.
- CRAMER, E. R. A. Physically challenging song traits, male quality, and reproductive success in House Wrens. **PLoS ONE**, v. 8, n. 3, p. e59208, 2013.
- DERRYBERRY, E. P. *et al.* Correlated evolution of beak morphology and song in the neotropical woodcreeper radiation. **Evolution**, v. 66, n. 9, p. 2784–2797, 2012.
- DERRYBERRY, E. P. *et al.* Ecological drivers of song evolution in birds: Disentangling the effects of habitat and morphology. **Ecology and Evolution**, v. 8, n. 3, p. 1890–1905, 2018.
- DOOLING, R. J.; SEARCY, M. H. Temporal integration of acoustic signals by the budgerigar (*Melopsittacus undulatus*). **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 77, n. 5, p. 1917–1920, 1985.
- DOWLING, J. L.; LUTHER, D. A.; MARRA, P. P. Comparative effects of urban development and anthropogenic noise on bird songs. **Behavioral Ecology**, v. 23, n. 1, p. 201–209, 2012.
- ENDLER, J. A. Signals, signal conditions, and the direction of evolution. **The American Naturalist**, v. 139, p. S125–S153, 1992.
- EY, E.; FISCHER, J. The acoustic adaptation hypothesis: A review of the evidence for anurans, birds and mammals. **Bioacoustics**, v. 19, n. 1–2, p. 21–48, 2009.
- FRANCIS, C. D.; BARBER, J. R. A framework for understanding noise impacts on wildlife : an urgent conservation priority In a nutshell : **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 6, p. 305–313, 2013.
- FRANCIS, C. D.; ORTEGA, C. P.; CRUZ, A. Different behavioural responses to anthropogenic noise by two closely related passerine birds. **Biology Letters**, v. 7, n. 6, p. 850–852, 2011.
- GILL, F.; DONSKER, D. **IOC World Bird List**. Disponível em: <<https://www.worldbirdnames.org/>>. Acesso em: 20 jul. 2019.

- HILL, S. D.; PAWLEY, M. D. M.; JI, W. Local habitat complexity correlates with song complexity in a vocally elaborate honeyeater. **Austral Ecology**, v. 42, n. 4, p. 590–596, 2017.
- HU, Y.; CARDOSO, G. C. Which birds adjust the frequency of vocalizations in urban noise? **Animal Behaviour**, v. 79, n. 4, p. 863–867, abr. 2010.
- JOHNSON, L. S.; SEARCY, W. A. Female attraction to male song in house wrens (*Troglodytes aedon*). **Behaviour**, v. 133, n. 5–6, p. 357–366, 1996.
- JOHNSON, S. L.; KERMOTT, L. H. The Functions of Song in Male House Wrens (*Troglodytes aedon*). **Behaviour**, v. 116, n. 3–4, p. 190–209, 1991.
- KALUTHOTA, C. *et al.* Transcontinental latitudinal variation in song performance and complexity in house wrens (*Troglodytes aedon*). **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 283, n. 1824, p. 20152765, 2016.
- KIRSCHER, A. N. G. *et al.* Birdsong tuned to the environment: Green hylia song varies with elevation, tree cover, and noise. **Behavioral Ecology**, v. 20, n. 5, p. 1089–1095, 2009.
- KROODSMA, D. E.; BREWER, D. **House Wren (*Troglodytes aedon*)**. Disponível em: <<https://www.hbw.com/node/58151>>. Acesso em: 20 jul. 2019.
- KROODSMA, D. E.; BYERS, B. E. The function(s) of bird song. **American Zoologist**, v. 31, n. 2, p. 318–328, 1991.
- LEE, C.; PARK, C. R. An increase in song pitch of eastern great tits (*Parus minor*) in response to urban noise at Seoul, Korea. **Urban Ecosystems**, v. 22, n. 2, p. 227–233, 2019.
- LEONARD, M. L.; HORN, A. G. Ambient noise and the design of begging signals. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 272, n. 1563, p. 651–656, 2005.
- LUTHER, D. A.; DERRYBERRY, E. P. Birdsongs keep pace with city life: changes in song over time in an urban songbird affects communication. **Animal Behaviour**, v. 83, n. 4, p. 1059–1066, abr. 2012.
- MOIRON, M. *et al.* Singing in the city: High song frequencies are no guarantee for urban success in birds. **Behavioral Ecology**, v. 26, n. 3, p. 843–850, 2015.
- MONTAGUE, M. J.; DANEK-GONTARD, M.; KUNC, H. P. Phenotypic plasticity affects the response of a sexually selected trait to anthropogenic noise. **Behavioral Ecology**, v. 24, n. 2, p. 343–348, 2013.
- MORTON, E. S. Ecological sources of selection on avian sounds. **The American Naturalist**, v.

109, n. 965, p. 17–34, 1975.

- MORTON, E. S. Predictions from the ranging hypothesis for the evolution of long distance signals in birds. **Behaviour**, v. 99, n. 1–2, p. 65–86, 1986.
- NEMETH, E.; BRUMM, H. Blackbirds sing higher-pitched songs in cities: adaptation to habitat acoustics or side-effect of urbanization? **Animal Behaviour**, v. 78, n. 2, p. 637–641, 2009.
- NEMETH, E.; BRUMM, H. Birds and anthropogenic noise: are urban songs adaptive? **The American naturalist**, v. 176, n. 4, 2010.
- NEMETH, E.; WINKLER, H.; DABELSTEEN, T. Differential degradation of antbird songs in a Neotropical rainforest: Adaptation to perch height? **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 110, n. 6, p. 3263–3274, 2001.
- OSMANSKI, M. S.; DOOLING, R. J. The effect of altered auditory feedback on control of vocal production in budgerigars (*Melopsittacus undulatus*). **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 126, n. 2, p. 911–919, 2009.
- PHILLIPS, J. N.; DERRYBERRY, E. P. Equivalent effects of bandwidth and trill rate: support for a performance constraint as a competitive signal. **Animal Behaviour**, v. 132, n. 1, p. 209–215, 2017.
- PODOS, J. Correlated evolution of morphology and vocal signal structure in Darwin’s finches. **Nature**, v. 409, n. 6817, p. 185–188, 2001.
- PODOS, J.; HUBER, S. K.; TAFT, B. Bird song: The interface of evolution and mechanism. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 35, n. 1, p. 55–87, 2004.
- POHL, N. U. *et al.* Why longer song elements are easier to detect: Threshold level-duration functions in the Great Tit and comparison with human data. **Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology**, v. 199, n. 3, p. 239–252, 2013.
- PROPPE, D. S. *et al.* Black-capped chickadees *Parus atricapillus* sing at higher pitches with elevated anthropogenic noise, but not with decreasing canopy cover. **Journal of Avian Biology**, v. 43, n. 4, p. 325–332, 2012.
- PROPPE, D. S.; STURDY, C. B.; ST. CLAIR, C. C. Flexibility in animal signals facilitates adaptation to rapidly changing environments. **PLoS ONE**, v. 6, n. 9, p. e25413, 2011.
- REDONDO, P.; BARRANTES, G.; SANDOVAL, L. Urban noise influences vocalization structure in the House Wren *Troglodytes aedon*. **Ibis**, v. 155, n. 3, p. 621–625, 2013.

- REMSEN, J. V. *et al.* **A classification of the bird species of South America**. Disponível em: <<http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/SACCBaseline.htm>>. Acesso em: 20 jul. 2019.
- RICHARDS, D. G.; WILEY, R. H. Reverberations and Amplitude Fluctuations in the Propagation of Sound in a Forest: Implications for Animal Communication. **The American Naturalist**, v. 115, n. 3, p. 381–399, 1980.
- RÍOS-CHELÉN, A. A. *et al.* Do birds vocalize at higher pitch in noise, or is it a matter of measurement? **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 71, n. 1, p. 29, 2017.
- RYAN, M. J.; BRENOWITZ, E. A. The role of body size, phylogeny, and ambient noise in the evolution of bird song. **The American Naturalist**, v. 126, n. 1, p. 87–100, 1985.
- SEDDON, N. Ecological adaptation and species recognition drives vocal evolution in Neotropical suboscine birds. **Evolution**, v. 59, n. 1, p. 200–215, 2005.
- SEMENTILI-CARDOSO, G.; DONATELLI, R. J. Vocal divergence between two disjunct populations of Giant Antshrike (*Batara cinerea*) is related to environmental conditions. **Austral Ecology**, v. 44, n. 3, p. 484–493, 2019.
- SICK, H. **Ornitologia Brasileira: uma introdução**. 2ª ed. Brasília: Linha Gráfica Editora, 1997. Vol. II, 827 p.
- SLABBEKOORN, H.; PEET, M. Birds sing at a higher pitch in urban noise. **Nature**, v. 424, n. 6946, p. 267, 2003.
- SLABBEKOORN, H.; RIPMEESTER, E. A. P. Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. **Molecular Ecology**, v. 17, n. 1, p. 72–83, jan. 2008.
- SLABBEKOORN, H.; SMITH, T. B. Bird song, ecology and speciation. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 357, n. 1420, p. 493–503, 2002.
- SNELL-ROOD, E. C. The effect of climate on acoustic signals: Does atmospheric sound absorption matter for bird song and bat echolocation? **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 2, p. 1650–1658, 2012.
- SOSA-LÓPEZ, J. R.; MENNILL, D. J. Continent-wide patterns of divergence in acoustic and morphological traits in the House Wren species complex. **The Auk**, v. 131, n. 1, p. 41–54, 2014.
- SWADDLE, J. P. *et al.* A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 30, n. 9, p. 550–560, 2015.

- VEHRENCAMP, S. L. *et al.* Trill performance components vary with age, season, and motivation in the banded wren. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 67, n. 3, p. 409–419, 2013.
- VERZIJDEN, M. N. *et al.* Immediate spectral flexibility in singing chiffchaffs during experimental exposure to highway noise. **Journal of Experimental Biology**, v. 213, n. 15, p. 2575–2581, 2010.
- WILEY, R. H. Signal detection and animal communication. **Advances in the Study of Behavior**, v. 36, n. 1, p. 217–247, 2006.
- WILEY, R. H.; RICHARDS, D. G. Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: Implications for the evolution of animal vocalizations. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 3, n. 1, p. 69–94, 1978.
- WILEY, R. H.; RICHARDS, D. G. Adaptations for acoustic communication in birds: sound transmission and signal detection. In: KROODSMA, D. E.; MILLER, E. H. (Eds.). **Acoustic communication in birds**. 1. ed. London: Academic Press, 1982. p. 131–181.
- WILKINS, M. R.; SEDDON, N.; SAFRAN, R. J. Evolutionary divergence in acoustic signals: Causes and consequences. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 28, n. 3, p. 156–166, 2013.
- ZOLLINGER, S. A. *et al.* On the relationship between, and measurement of, amplitude and frequency in birdsong. **Animal Behaviour**, v. 84, n. 4, p. e1–e9, out. 2012.

4. CAPÍTULO 3 - FATORES AMBIENTAIS INFLUENCIAM NA COMPLEXIDADE SINTÁTICA DAS VOCALIZAÇÕES DE *Troglodytes musculus*

4.1. Resumo

A complexidade vocal é um importante mediador do comportamento reprodutivo das aves. A variação em parâmetros de complexidade, como a diversidade de sílabas e o tamanho do repertório vocal, pode afetar atividades de delimitação de território, escolha de parceiros e defesa de recursos, fazendo com que quaisquer variações nestes sinais possam acarretar em divergências fenotípicas entre indivíduos expostos a diferentes contextos. O ambiente exerce uma pressão seletiva importante neste aspecto, e, juntamente com a seleção sexual, pode dirigir a adaptação acústica das espécies, influenciando na sua complexidade sintática e em seu repertório vocal. Deste modo, eu avaliei a divergência nestes dois aspectos organizacionais das vocalizações de *Troglodytes musculus*, correlacionando-os com as possíveis variações nos aspectos ambientais e morfológicos. Para este fim, realizei a gravação de vocalizações de indivíduos situados em duas áreas distintas: uma próxima e outra distante de uma rodovia de intenso tráfego. Através de análises de complexidade sintática e de repertório, observei que as vocalizações dos dois grupos são diferentes quanto ao número de sentenças. Já a relação com os possíveis preditores mostra que a complexidade vocal reduz com o incremento do ruído e da absorção atmosférica do som. Além disso, observa-se uma diferença entre os repertórios silábicos das duas populações, pois encontrei menor diversidade silábica nos indivíduos situados próximos à rodovia. Estes resultados apontam para uma influência de parâmetros abióticos na emissão sonora dos indivíduos, demonstrando que a complexidade tende a reduzir em ambientes que possuem obstáculos pronunciados para a transmissão de som.

Palavras-chave: atenuação climática, bioacústica, adaptação acústica, urbanização, ruído antropogênico.

4.2. Abstract

Song complexity is an important mediator of the reproductive behavior of birds. Variation in complexity parameters, such as syllable diversity and repertoire size, may affect reproductive parameters such as territory delimitation, mate choice, and resource defense activities. Thus, any variations in these signals may lead to phenotypic divergences between individuals exposed to different environmental contexts. The habitat exerts an important selective pressure in those features, and, along with sexual selection, can drive the acoustic adaptation of species, influencing their syntactic complexity and vocal repertoire. Thus, we evaluated the divergence in these two organizational aspects of *Troglodytes musculus* songs, correlating them with possible variations in environmental and morphological aspects. Therefore, we recorded vocalizations of individuals in two distinct areas: one near and one far from a high-traffic highway. Through the analysis of syntactic complexity and repertoire, we observed vocal divergence between the groups regarding the number of sentences. The relationship with the environmental and morphological predictors shows that vocal complexity decreases with the increase of noise and atmospheric absorption of sound. In addition, there is a difference between the syllabic repertoires of the two populations, as we find less syllabic diversity in individuals near the highway. These results point to an influence of abiotic parameters on the sound emission of individuals, demonstrating that complexity tends to reduce in environments that have pronounced obstacles to sound transmission.

Keywords: climatic attenuation, Bioacoustics, acoustic adaptation, urbanization, anthropogenic noise

4.3. Introdução

A evolução de sinais acústicos complexos em aves é inerente à evolução sexual, já que a complexidade sintática das vocalizações é um importante mediador das relações de delimitação de território e escolha de parceiros sexuais (NAGUIB & RIEBEL, 2003; RIEBEL *et al.*, 2005; CATCHPOLE & SLATER, 2008). A vocalização das aves consiste em uma série de elementos acústicos que se arranjam em uma ordem temporal particular (SASAHARA & IKEGAMI, 2007; BERWICK *et al.*, 2011). Esta ordenação pode estar estruturada em uma sequência rígida, onde os elementos componentes da vocalização se sucedem sempre da mesma maneira, compondo um sinal estereotipado com pouca variação (LEGER, 2005).

Contudo, muitas espécies de aves possuem uma sintaxe flexível em suas vocalizações, permitindo a combinação de elementos estruturais para a formação de novos tipos de sinais (SUZUKI *et al.*, 2016; BOLHUIS *et al.*, 2018). Tal flexibilidade pode ser alcançada tanto pela repetição quanto pela combinação dos elementos componentes do sinal acústico (HAILMAN & FICKEN, 1986; HAILMAN, 1989). Isto faz com que novas possibilidades sintáticas aumentem a complexidade do repertório vocal das aves apenas pela recombinação de elementos pré-existentes. Este tipo de sintaxe (denominado sintaxe combinatória) tende a ser disseminado principalmente entre as aves Passeriformes Oscines (CATCHPOLE & SLATER, 2008), com algumas exceções encontradas fora do grupo (LEGER 2005; FICKEN *et al.*, 2006).

Assim como outros atributos estruturais acústicos de uma vocalização, a sintaxe pode sofrer pressões seletivas e variar tanto entre quanto dentro de uma população. A complexidade do repertório vocal das aves está relacionada a várias características sexuais, como a escolha da fêmea por parceiros (MARCEL *et al.*, 1991; MOUNTJOY & LEMON, 1996; BYERS & KROODSMA, 2009) e as taxas de cópula extra-par (HASSELQUIST, 1996). Isto faz com que o repertório vocal esteja intimamente relacionado com o sucesso reprodutivo das aves, influenciando em suas taxas de sobrevivência (KROODSMA & BYERS, 1991; GIL & GAHR, 2002).

Deste modo, quaisquer fatores que influenciem na detectabilidade do sinal sonoro pode ser determinante para uma transmissão bem sucedida. Como o sinal sonoro percorre meio fluidos, ele está sujeito alterações causadas pelas características do ambiente (MORTON, 1975). Muitos autores sugerem que a divergência vocal pode emergir das diferenças entre as condições do hábitat, como cobertura vegetal (HUNTER & KREBS, 1979; RICHARDS & WILEY, 1980; WILEY & RICHARDS, 1982), condições climáticas (BASS, 1990; KIRSCHER *et al.*, 2009; SNELL-ROOD, 2012) e ruído ambiental (BRUMM & SLABBEKOORN, 2005; BRUMM & NAGUIB, 2009; BRUMM & ZOLLINGER, 2013). Assim, para aumentar as chances de detecção em um ambiente com tais obstáculos, os indivíduos podem produzir vocalizações mais redundantes e estereotipadas, o que reduz a sua complexidade sintática em resposta às condições do ambiente (WILEY & RICHARDS, 1982; READ & WEARY, 1992; PRICE, 2013).

Devido a importância dos repertórios vocais na história de vida das aves, faz-se necessário uma investigação da sua variação, bem como das origens desta divergência, dentro de populações coespecíficas. Deste modo, nosso estudo analisou a complexidade sintática e dos repertórios vocais de indivíduos de *T. musculus*, buscando por variações estruturais entre duas populações próximas. Já era esperado que tais divergências fossem ligadas com a estrutura do ambiente, com a diminuição da complexidade vocal em resposta a parâmetros ambientais, como o ruído e a absorção sonora.

4.4. Material e métodos

4.4.1. Seleção, captura e medição dos indivíduos

Tanto a etapa de seleção preliminar quanto a de captura e medição dos indivíduos seguiram os protocolos estabelecidos no capítulo foram os mesmos que os estabelecidos nos capítulos anteriores. Eu tomei as mesmas precauções para que não houvessem outros fatores contextuais que fossem capazes de enviesar a estrutura sintática da vocalização dos animais.

4.4.2. Registro das vocalizações

As vocalizações da espécie exercem grande importância na sua história do táxon. Muitas espécies cogenéricas demonstram uma alta complexidade sintática em sua estrutura vocal (KROODSMA & MOMOSE, 1991; KROODSMA, 2002; CAMACHO-SCHLENKER, 2011; RENDALL & KALUTHOTA, 2013; SOSA-LÓPEZ & MENNILL, 2014). Por sua vez, *T. musculus* apresenta uma variação considerável na sua composição vocal, tanto na estrutura acústica (FASANELLA & FERNÁNDEZ, 2009; FERNÁNDEZ *et al.*, 2012; REDONDO *et al.*, 2013) quanto sintática (KALUTHOTA *et al.*, 2016; DOS SANTOS *et al.*, 2018). A organização de suas vocalizações é não-randômica, pois a espécie utiliza uma rede de elementos centrais, variando sua estrutura sintática no entorno destes componentes principais (DESLANDES *et al.*, 2014).

Posteriormente à escolha e captura dos indivíduos, eu iniciei as gravações das vocalizações com um gravador digital Marantz PMD 661 acoplado a um microfone direcional Yoga HT-81 (formato *.wav*, 44.100 Hz de taxa de amostragem, 16 bits de resolução). Gravei apenas as vocalizações espontâneas emitidas a partir de poleiros expostos. A distância máxima entre o gravador e a ave foi de 10 m, sendo esta distância medida com uma trena a laser Super Tech SP 40XT. Após o término das gravações, eu medi as condições ambientais com um medidor ambiental da mesma maneira que a descrita nos capítulos anteriores.

4.4.3. Parâmetros sintáticos

Cada indivíduo foi gravado em três dias não consecutivos, totalizando 5 minutos de gravação. Após esta etapa, eu realizei uma inspeção em cada arquivo sonoro utilizando espectrogramas de frequência gerados pelo software Sonic Visualizer 3.0. Por meio desta análise preliminar, caracterizei a estrutura geral das vocalizações dos indivíduos, buscando por padrões sintáticos comuns a todos os indivíduos. Assim, eu observei a presença de uma uniformidade na composição sintática, o que permitiria uma comparação entre os indivíduos por meio de suas vocalizações.

Depois de delinear os componentes básicos de cada vocalização, eu realizei um catálogo das sílabas e notas usando as convenções de nomenclatura bioacústica. Segundo as proposições de BERWICK (2011), “notas” ou “elementos” correspondem a traços contínuos presentes no espectrograma, “sílabas” correspondem a combinações temporais de notas, e “frases” são arranjos de sílabas. Assim, uma vocalização corresponderia a um arranjo de diversas sentenças em uma ordem temporal, e a variação nesta ordem caracteriza vocalizações distintas, com uma sintaxe combinatória.

As vocalizações de *T. musculus* seguem o padrão típico das espécies do mesmo gênero. Elas são constituídas de uma série discreta e contínua de sílabas que possuem duração de 1 a 3 segundos, seguidas por um intervalo de silêncio conspícuo, que varia de 2 a 5 segundos (JOHNSON & KERMOTT, 1991; JOHNSON & SEARCY, 1996; RENDALL & KALUTHOTA, 2013; KALUTHOTA, 2016). A maioria das vocalizações é composta de duas seções, que são facilmente distinguíveis pela estrutura visível no espectrograma. A primeira, denominada introdutória, possui uma série de notas de baixa amplitude (“soft notes”), que são pouco estruturadas e ricas em harmônicos, configurando um aspecto ruidoso e de pouco contraste com relação ao ruído de fundo. Esta seção possui sílabas cujas notas individuais são de difícil delimitação, inviabilizando a mensuração de suas características estruturais. Já a segunda seção, denominada terminal, é composta de notas e sílabas de maior amplitude, que possuem um bom contraste e são facilmente delimitadas no espectrograma. Por este motivo, eu medi as variáveis acústicas apenas desta última seção.

Deste modo, extraí cinco parâmetros sintáticos de cada vocalização: (1) duração da vocalização, (2) número de sentenças, (3) número de sílabas, (4) tipos de sílabas, (5) porcentagem de sílabas trinadas. A partir destas métricas básicas, eu extraí outras medidas derivativas, como (6) produção de sílabas por segundo, (7) tipos de sílabas por segundo, e (8) índice de diversidade silábica, calculado por meio do quociente entre os tipos de sílabas e o número de sílabas.

4.4.4. Estimativa da diversidade silábica

Tal qual as comunidades ecológicas, as vocalizações de aves são compostas por uma combinação de elementos comuns e raros (sejam espécies ou sílabas), e assim, muitas abordagens metodológicas advindas da ecologia de comunidades já foram utilizadas para a estimativa de diversidade de sílabas (PESHEK & BLUMSTEIN, 2011; POTVIN & CLEGG, 2015; KEIGHLEY *et al.*, 2017). Para calcular o tamanho do repertório silábico dos dois grupos, eu realizei a análise de rarefação e extrapolação (CHAO & JOST, 2012; CHAO *et al.*, 2014). Deste modo, tratei as sílabas distintas como “espécies” e cada indivíduo como uma “amostra”, e empreguei as técnicas de rarefação e extrapolação para verificar a existência da heterogeneidade silábica entre os indivíduos de cada um dos dois grupos. PESHEK e BLUMSTEIN (2011) demonstraram que a rarefação é um método eficaz para a delimitação de repertórios, e que não difere estatisticamente de outros métodos. Como a rarefação e a extrapolação são sensíveis ao número de sílabas, a presença de uma amostragem desequilibrada poderia enviesar as análises. Por este motivo, eu sorteei 20 vocalizações por indivíduo, realizando as análises apenas nestes sinais escolhidos.

4.4.5. Análise dos dados

Primeiramente, avalei os parâmetros normalidade e homogeneidade das variâncias de todas as variáveis (vocais, ambientais e morfológicas). Aquelas que não satisfizeram estas suposições foram transformadas utilizando o logaritmo de base 10, resolvendo as questões acima citadas.

Como existe uma correlação entre as variáveis morfométricas (Coeficiente de correlação de Spearman $r_s > 0,4$), realizei uma análise de componente principal (PCA) utilizando as variáveis de comprimento (excluindo a massa corporal). A análise resumiu a variância do dados em dois componentes principais com autovalores maiores que 1,0. Os componentes, em conjunto, explicam quase 65% da variação entre as amostras (ver Tab. 1).

Posteriormente, eu testei a diferença vocal entre os dois grupos por meio de uma análise multivariada de variância (MANOVA), empregando os oito parâmetros sintáticos transformados.

Também chequei as variações em cada um dos parâmetros separados por meio de análises de variância (ANOVA) individuais, que foram conduzidas como parte da MANOVA. Já diferença entre os parâmetros morfológicos e ambientais foi testada por meio de um teste t de Student.

Para verificar a influência que os parâmetros morfológicos e ambientais exercem nas medidas de complexidade vocal, eu realizei uma regressão linear múltipla. Para isso, agrupei os preditores de maneira hierárquica, inserindo primeiramente os parâmetros ambientais (ruído e absorção atmosférica do som) e, posteriormente, os parâmetros morfométricos (componentes principais de comprimento e massa corporal). As variáveis ambientais foram escolhidas como principais preditoras pois eu esperava que a variação ambiental seja mais expressiva que a divergência morfológica entre indivíduos, tendo um maior reflexo na magnitude da variação vocal.

Por último, eu conduzi um escalonamento multidimensional não-métrico (nMDS) com as variáveis sintáticas. Foram utilizadas as distâncias euclidianas entre os dados brutos para verificar a distribuição das características vocais dos indivíduos dentro do espaço multivariado. Incluí as variáveis ambientais e morfológicas na ordenação final do nMDS, observando os efeitos destes parâmetros na estrutura sintática.

4.5. Resultados

4.5.1. Composição sintática das vocalizações

Eu obtive um total de 949 vocalizações, com $19,36 \pm 4,33$ vocalizações por indivíduos. Destas, 506 pertenciam ao grupo próximo da rodovia, e 443 ao grupo distante. A maioria das vocalizações analisadas (98,7%) possuíam a mesma estrutura global, com as duas seções (introdutória e terminal) presentes em todas (Fig. 11). Apenas 1,3% das vocalizações apresentava apenas a seção terminal, enquanto nenhum dos arquivos analisados apresentava apenas a seção introdutória.

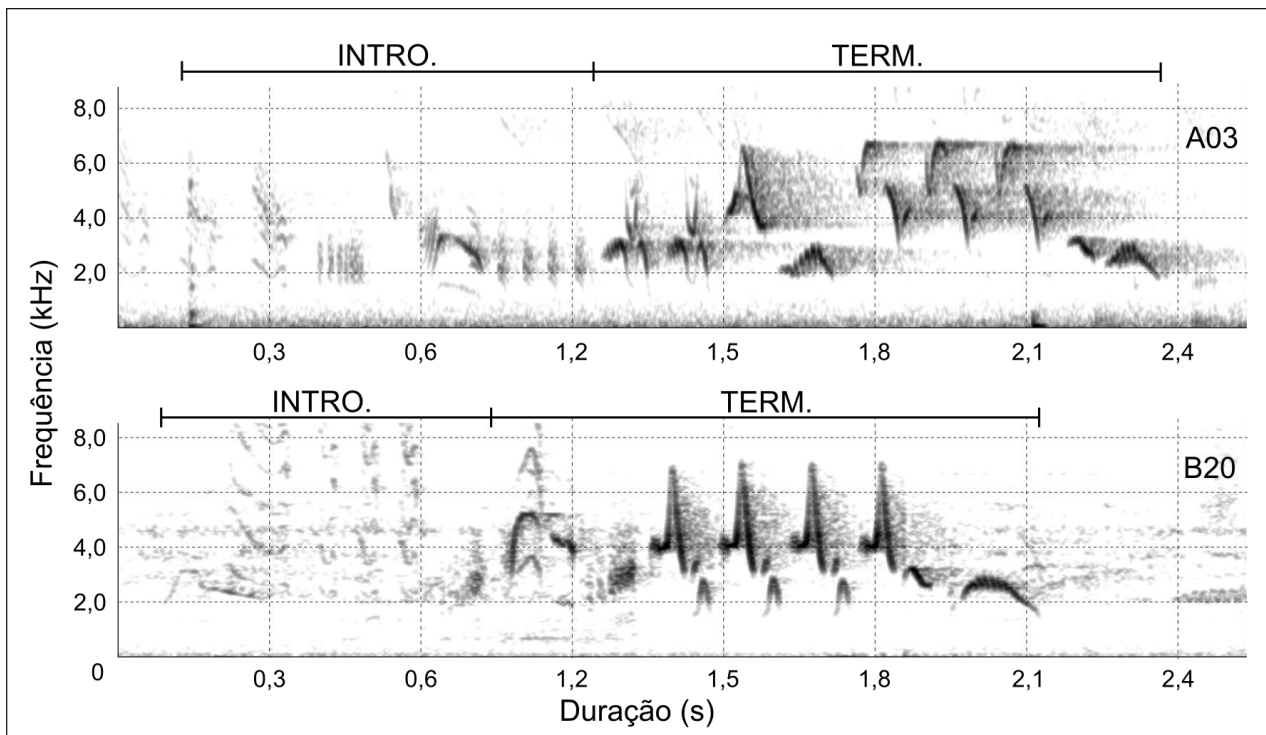


Figura 11. Espectrogramas de frequência dos arquivos sonoros avaliados. Estão exemplificados duas vocalizações pertencentes a cada um dos grupos: próximo (A03) e distante (B20) da rodovia. Nota-se que ambas apresentam as seções introdutória e terminal.

O catálogo de sílabas demonstra que foram encontrados 56 tipos diferentes de sílabas (Apêndice 1). Eles foram categorizados em três grupos distintos. O primeiro foi composto de 15 sílabas sibiladas (“*whistled*”). Neste conjunto, estão as sílabas que apresentaram notas únicas, sem harmônicos múltiplos, e que se repetiam apenas uma ou duas vezes na mesma vocalização. O segundo conjunto agrupou 28 sílabas trinadas (“*trilled*”), com sílabas de notas únicas que se repetiam mais de uma vez em um intervalo curto de tempo (intervalos menores que 0,1 s). Por fim, o terceiro grupo englobou 7 sílabas harmônicas (“*harmonic*”), que continham elementos sobrepostos em múltiplos harmônicos, mas que se repetiam apenas uma ou duas vezes.

4.5.2. Divergência entre os grupos

Com relação aos preditores de variação vocal, apenas o ruído ambiental é diferente entre os dois grupos (ver Fig. 4). Com relação às variáveis de complexidade vocal, observei que existe variação entre os dois grupos ($F_{6,43} = 3,735$, $p = 0.003$, Wilks’ $\lambda = 0,656$). De todas as variáveis,

apenas o número de sentenças foi estatisticamente diferente entre os dois grupos, sendo maior no conjunto de indivíduos situados distantes da rodovia (Tab. 5).

Tabela 5. Variação nos parâmetros vocais analisados. Os valores representam a média \pm desvio padrão para os grupos próximo e distante da rodovia. Também estão exibidos os valores da estatística F, de significância estatística (p) e de variância total em um determinado parâmetro vocal (η^2). Os valores em negrito representam as variáveis que variaram significativamente entre os grupos.

Parâmetro Vocal	Próximo	Distante	ANOVA		
			$F_{1,48}$	p	η^2
Duração da Vocalização (s)	1,312 \pm 0,272	1,396 \pm 0,439	0,187	0,667	0,004
Número de Sentenças (unidades)	4,099 \pm 1,159	4,943 \pm 1,568	4,708	0,035	0,089
Número de Sílabas (unidades)	11,988 \pm 2,67	12,948 \pm 4,084	0,537	0,467	0,011
Tipos de Sílabas (unidades/s)	4,526 \pm 1,346	5,177 \pm 1,756	0,664	0,419	0,014
Taxa de Produção de Sílabas (unidades/s)	9,319 \pm 2,048	9,419 \pm 1,783	0,021	0,887	0,001
Taxa de Tipos de Sílabas (unidades/s)	3,466 \pm 0,731	3,771 \pm 0,858	1,823	0,183	0,037
Índice de Versatilidade Silábica	0,383 \pm 0,094	0,402 \pm 0,065	0,462	0,500	0,011
Sílabas Trinadas (%)	0,796 \pm 0,175	0,842 \pm 0,102	1,363	0,249	0,010

Eu observei que o ruído, a absorção sonora e a massa corporal são preditores negativos da variação entre indivíduos (Tab. 6). O número de sentenças diminui com o aumento da absorção e do ruído. Já a taxa de produção de sílabas decresce com o aumento apenas da absorção sonora. Por fim, a taxa de tipos silábicos reduz com o aumento da massa e da absorção (Fig. 12).

Tabela 6. Modelos de regressão linear para cada variável. Estão exibidos apenas as regressões que apresentaram um nível de significância $p < 0.05$. Além disso, estão discriminados os coeficientes de regressão (r), de determinação (r^2), os valores de F e de significância (p). Além disso, também exibi os coeficientes parciais β e os valores de t para cada preditor.

Parâmetro Sintático	Preditor(es)	Parâmetros do Modelo					
		r	r^2	$F_{1,33}$	p	β	t
Número de Sentenças		0,605	0,382	5,979	0,002	-	-
	Absorção	-	-	-	-	-0,293	-1,977
	Ruído	-	-	-	-	-0,322	-2,122
Taxa de Produção de Sílabas		0,407	0,166	6,526	0,015	-	-
	Absorção	-	-	-	-	-0,407	-2,523
Taxa de Tipos de Sílabas		0,480	0,277	4,702	0,016	-	-
	Massa	-	-	-	-	-0,326	-1,747
	Absorção	-	-	-	-	-0,438	-2,698

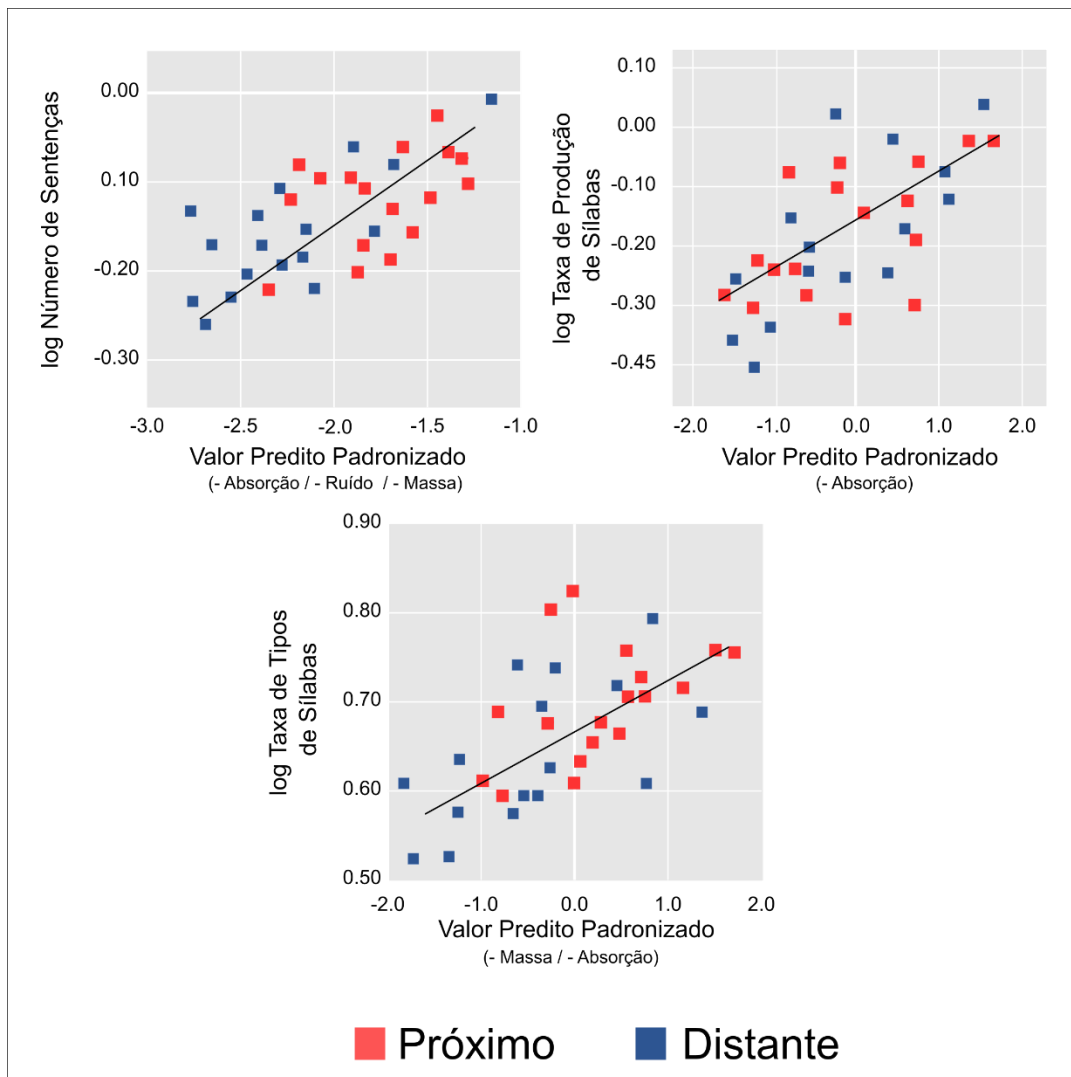


Figura 12. Regressões lineares múltiplas entre os preditores (ruído, absorção sonora e massa corporal) e as variáveis de complexidade vocal. Cada quadrado representa um indivíduo pertencente a um dos grupos. Plotei as variáveis junto com os valores preditos padronizados para o conjunto de preditores (descritos abaixo do eixo X). A natureza da relação (positiva ou negativa) está discriminada juntamente com cada preditor. A linha preta representa a linha de regressão para cada modelo.

As curvas de rarefação demonstram uma diferença pronunciada entre os dois grupos. Nota-se que a população distante da rodovia possui uma maior variedade silábica, com um incremento acentuado da diversidade silábica antes de atingir 1000 sílabas. Mesmo com a extrapolação das curvas, observei a ausência de sobreposição dos limites de confiança, indicando que o grupo próximo da rodovia apresenta uma diversidade silábica menor do que o grupo distante (Fig. 13).

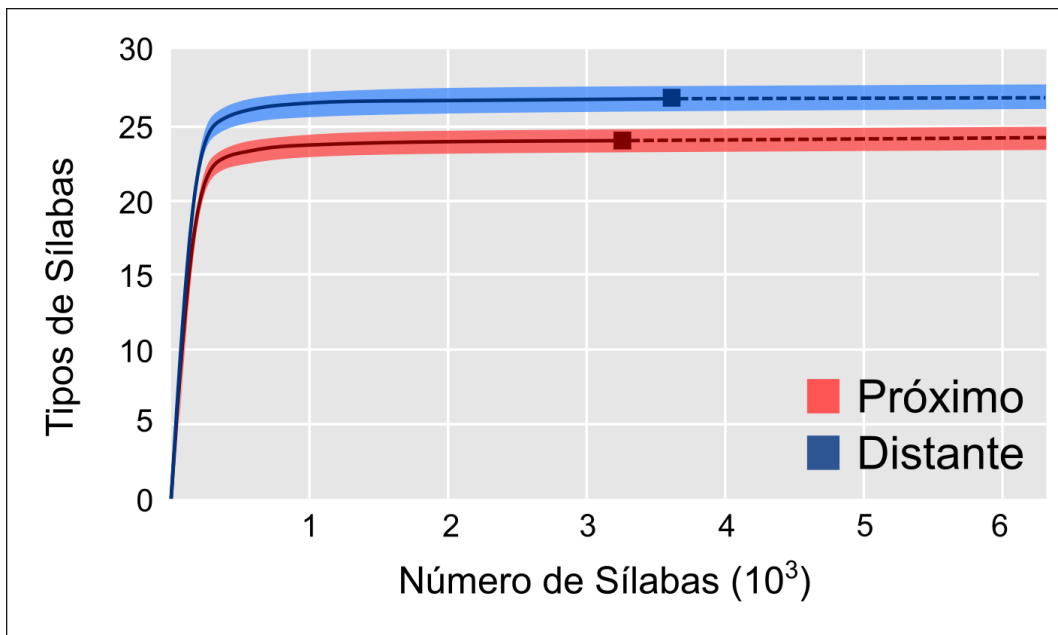


Figura 13. Curvas de rarefação da diversidade silábica dos grupos próximo e distante da rodovia. Os quadrados representam os valores observados para cada grupo, enquanto a linha pontilhadas representam a extrapolação dos dados

A distribuição das amostras no espaço multivariado demonstra uma grande sobreposição dos dois grupos. Houve uma boa adesão dos dados ao modelo proposto (stress = 0,133), indicando que existe pouca distinção entre ambos os grupos com relação à estrutura sintática (Fig. 14).

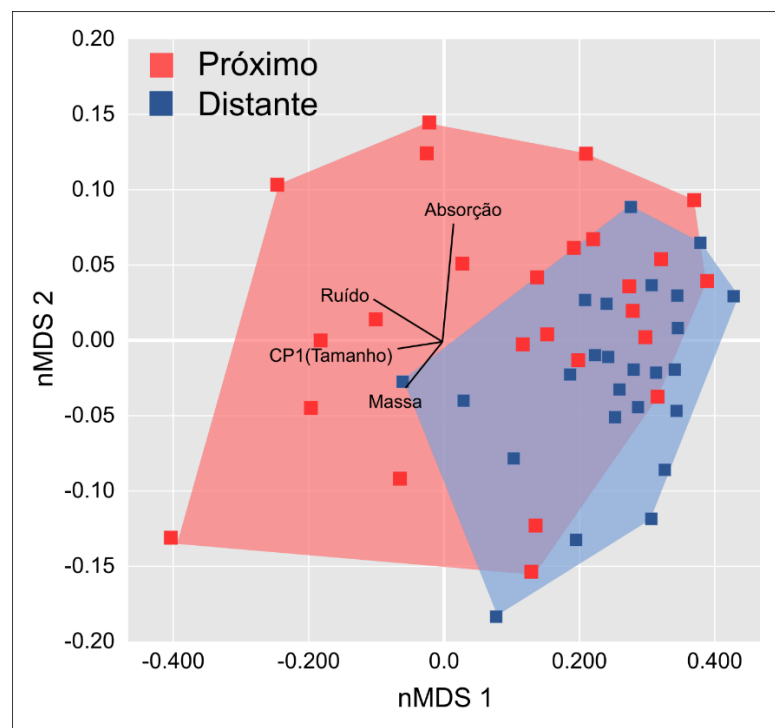


Figura 14. Ordenação multidimensional não-métrica (nMDS) das características sintáticas analisadas. Os quatro eixos representam os preditores de variação vocal (absorção, ruído, CP de tamanho corporal e massa). Os polígonos delimitam os limites alcançados pelas amostras em cada um dos grupos (próximo e distante).

4.6. Discussão

Estes resultados corroboram com as previsões acerca da influência das características ambientais na complexidade vocal de *T. musculus*. Verifiquei a existência de diferenças significativas nos parâmetros analisados, bem como a influência dos preditores no comportamento das variáveis.

Os parâmetros de complexidade vocal tendem a decrescer com a influência da absorção sonora, do ruído ambiental e da massa corporal dos indivíduos. Muitos estudos apontam a influência da complexidade do hábitat na estrutura sintática e no repertório das vocalizações de aves. A maioria deles relaciona as diferenças na cobertura vegetal, relatando que a complexidade sintática tende a aumentar com o incremento na densidade vegetal (DERRYBERRY, 2009; KAGAWA *et al.*, 2012; HILL *et al.*, 2017; APOL *et al.*, 2018), indicando que a fragmentação e o desmatamento de áreas naturais podem reduzir o repertório vocal das espécies de maneira efetiva (LAILOLO & TELLA, 2007).

Contudo, a dicotomização das análises em apenas dois tipos de ambientes (aberto *versus* fechado) implica numa simplificação das relações complexas que existem entre condições climáticas e ecológicas que podem interagir entre si para a evolução da sintaxe e dos repertórios vocais de aves. A maioria dos estudos que exploram a divergência sintática como reflexo das características ecológicas enfoca-se, principalmente, na influência do ruído ambiental. Sabe-se que o ruído interfere na comunicação vocal, diminuindo a distância máxima que um sinal pode atingir e enfraquecendo a capacidade de discriminação sonora (NEMETH & BRUMM, 2010). Uma das estratégias adaptativas que os organismos podem adotar é aumentar a repetição dos tipos de sinais, aumentando sua redundância e diminuindo sua complexidade (Potash 1972; Gross *et al.* 2010; Montague *et al.* 2013). Em condições de ambientes ruidosos, o aumento da redundância pode melhorar a performance sonora de um indivíduo, ampliando as suas chances de ser detectado nestes contextos (BRUMM & SLABBEKOORN, 2005; BRUMM & ZOLLINGER, 2013). Estas observações corroboram com esta teoria, já que o número de sentenças tende a diminuir com a influência do ruído. Como indivíduos de *T. musculus* tendem a utilizar um conjunto de elementos comuns em suas vocalizações, é provável

que aqueles situados próximo a zonas ruidosas utilizem um número reduzido de sentenças de maneira mais redundante, o que aumenta a probabilidade de detecção. O mesmo efeito foi diagnosticado em *Fringilla coelebs*, onde machos habitando ambientes ruidosos apresentavam uma maior redundância serial em sentenças trinadas (BRUMM & SLATER, 2006).

Já os efeitos da absorção sonora ainda são pouco explorados pela literatura. Atualmente, existem evidências relacionando a estrutura acústica de aves com a variação climática (MORTON 1975; KIRSCHER *et al.*, 2009; SNELL-ROOD, 2012). Argumenta-se que a variação e a imprevisibilidade climática podem afetar características fisiológicas e comportamentais das aves (ORZACK & TULJAPURKAR, 2001; SOL *et al.*, 2005; SCHUCK-PAIM *et al.*, 2008), o que pode refletir num repertório mais complexo (BOTERO *et al.*, 2009). Contudo, estas adaptações são desencadeadas pelas alterações nas condições ecológicas (como disponibilidade de alimento e taxas de predação), que afetam aspectos morfofisiológicos e refletem, como causa última, na estrutura vocal. No caso do nosso estudo, não notei nenhum indício de variação morfológica ligada a variação ecológica. A variação no tamanho e na massa corporal das aves parece estar ligado muito mais as condições naturais de competição intraespecíficas por recursos, e não por alguma anomalia climática que desbalanceia a disponibilidade de recursos para os dois grupos.

Assim, a explicação mais plausível é de que a variação na sintaxe e nos repertórios decorre das diferentes condições ambientais na absorção e no ruído ambiental. De maneira semelhante ao ruído, ambientes mais atenuantes dificultam a transmissão de sons através do ambiente. O aumento na magnitude da absorção pode tornar a comunicação a longas distâncias menos eficaz (BONCORAGLIO & SAINO, 2007). Assim, a redução na taxa de emissão e de variação silábica pode ser uma estratégia efetiva para aumentar a detectabilidade de um sinal juntamente com o decréscimo na complexidade e um incremento da redundância (RICHARDS & WILEY, 1980; PRICE, 2013).

O peso também parece ser uma variável que influencia na complexidade sonora. Este parâmetro pode influenciar tanto a complexidade sintática quanto o tamanho do repertório por meio

da massa cerebral. Indivíduos com cérebros maiores e mais pesados desenvolvem núcleos telencefálicos mais elaborados, que se relacionam diretamente com a flexibilidade de elementos sonoros (BRENOWITZ, 1997; NEALEN & SCHMIDT, 2002; PFAFF *et al.*, 2007). Contudo, mesmo os indivíduos com maiores massas podem apresentar um decréscimo nestas regiões cerebrais em resposta ao estresse ambiental (Buchanan *et al.* 2004). O ruído pode ser um dos principais fatores que desencadeiam alterações fisiológicas em estágios de desenvolvimento cerebral (BARBER *et al.*, 2010; SWADDLE *et al.*, 2015; POTVIN *et al.*, 2016), o que pode desencadear alterações comportamentais e redução da complexidade vocal (SLABBEKOORN & BOER-VISSER, 2006). Assim, a presença de indivíduos com maior massa corporal não é necessariamente uma vantagem em ambientes estressantes.

Como *T. musculus* é uma espécie territorialista, os indivíduos estão expostos a alto níveis de ruído desde a eclosão, o que pode acarretar variações hormonais em estágios juvenis que, no decorrer do desenvolvimento, podem resultar em uma redução da complexidade vocal. Somado a isso, existe o fato de que indivíduos maiores apresentam restrições morfológicas quanto à produção sonora. A massa corporal está frequentemente correlacionada com diminuição nas taxas de repetição dos elementos trinados (PODOS, 2001; PODOS *et al.*, 2004), o que pode ser um fator determinante na relação entre ambiente e morfologia. Esta inferência pode ser suportada pelo fato de que a massa corporal foi um preditor de variação vocal apenas juntamente com as outras variáveis ambientais, indicando que os três parâmetros podem estar atuando em conjunto nos padrões de variação na complexidade vocal.

4.7. Referências

- APOL, C. A.; STURDY, C. B.; PROPPE, D. S. Seasonal variability in habitat structure may have shaped acoustic signals and repertoires in the black-capped and boreal chickadees. **Evolutionary Ecology**, v. 32, n. 1, p. 57–74, 2018.
- BARBER, J. R.; CROOKS, K. R.; FRISTRUP, K. M. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. **Trends in ecology & evolution**, v. 25, n. 3, p. 180–9, mar. 2010.
- BASS, H. E.; SUTHERLAND, L. C.; ZUCKERWAR, A. J. Atmospheric absorption of sound - Update. **Acoustical Society of America**, v. 88, n. 1986, p. 102019–102021, 1990.
- BERWICK, R. C. et al. Songs to syntax: the linguistics of birdsong. **Trends in cognitive sciences**, v. 15, n. 3, p. 113–21, mar. 2011.
- BOLHUIS, J. J. et al. Meaningful syntactic structure in songbird vocalizations? **PLoS Biology**, v. 6, n. 16, p. e2005157, 2018.
- BONCORAGLIO, G.; SAINO, N. Habitat structure and the evolution of bird song: a meta-analysis of the evidence for the acoustic adaptation hypothesis. **Functional Ecology**, v. 21, n. 1, p. 134–142, fev. 2007.
- BOTERO, C. A. et al. Climatic Patterns Predict the Elaboration of Song Displays in Mockingbirds. **Current Biology**, v. 19, n. 13, p. 1151–1155, 2009.
- BRENOWITZ, E. A. Comparative approaches to the avian song system. **Journal of Neurobiology**, v. 33, n. 5, p. 517–531, 1997.
- BRUMM, H.; NAGUIB, M. Environmental Acoustics and the Evolution of Bird Song. **Advances in the Study of Behavior**, v. 40, n. 09, p. 1–33, 2009.
- BRUMM, H.; SLABBEKOORN, H. Acoustic communication in noise. In: SLATER, P. J. B.; SNOWDON, C. T.; ROPER, T. J.; BROCKMANN, H. J.; NAGUIB, M. (Orgs.) **Advances in the study behavior**, v. 35. 1^a ed. San Diego: Elsevier, 2005. p. 151-209
- BRUMM, H.; SLATER, P. J. B. Ambient noise, motor fatigue, and serial redundancy in chaffinch song. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 60, n. 4, p. 475–4841, 2006.

- BRUMM, H.; ZOLLINGER, S. A. Avian vocal production in noise. In: BRUMM, H (ed.) **Animal Communication and Noise**, 2013. Berlin: Springer Academic Press. pp. 187–227.
- BUCHANAN, K. L. et al. Developmental stress selectively affects the song control nucleus HVC in the zebra finch. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 271, n. 1555, p. 2381–2386, 2004.
- BYERS, B. E.; KROODSMA, D. E. Female mate choice and songbird song repertoires. **Animal Behaviour**, v. 77, n. 1, p. 13–22, jan. 2009.
- CAMACHO-SCHLENKER, S.; COURVOISIER, H.; AUBIN, T. Song sharing and singing strategies in the winter wren *Troglodytes troglodytes*. **Behavioural Processes**, v. 87, n. 3, p. 260–267, 2011.
- CARRO, M. E.; LLAMBÍAS, P. E.; FERNÁNDEZ, G. J. Mate and territory availability affect breeding dispersal and divorce in a resident Southern House Wren *Troglodytes aedon musculus* population. **Ibis**, v. 159, n. 1, p. 168–179, 2017.
- CATCHPOLE, C. K.; SLATER, P. J. B. **Bird Song: Biological Themes and Variations**. 2^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 348 p.
- CHAO, A. et al. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. **Ecological Monographs**, v. 84, n. 1, p. 45–56, 2014.
- CHAO, A.; JOST, L. Coverage-based rarefaction and extrapolation: Standardizing samples by completeness rather than size. **Ecology**, v. 93, n. 12, p. 2533–2547, 2012.
- DERRYBERRY, E. P. Ecology Shapes Birdsong Evolution: Variation in Morphology and Habitat Explains Variation in White-Crowned Sparrow Song. **The American Naturalist**, v. 174, n. 1, p. 24–33, 2009.
- DESLANDES, V. et al. The structure of an avian syllable syntax network. **Behavioural Processes**, v. 106, p. 53–59, 2014.
- DOS SANTOS, E. B.; LLAMBIAS, P. E.; RENDALL, D. Male song diversity and its relation to breeding success in Southern House Wrens. **Journal of Avian Biology**, v. 49, n. 6, p.

<https://doi.org/10.1111/jav.01606>, 2018.

- FASANELLA, M.; FERNÁNDEZ, G. J. Alarm calls of the Southern House Wren *Troglodytes musculus*: Variation with nesting stage and predator model. **Journal of Ornithology**, v. 150, n. 4, p. 853–863, 2009.
- FERNÁNDEZ, G. J.; CORRAL, M. G.; CARRO, M. E. Variation in the alarm calls of Southern House Wrens (*Troglodytes musculus*). **Emu**, v. 112, n. 1, p. 71–75, 2012.
- FICKEN, M. S. et al. Blue-throated Hummingbird song: A pinnacle of nonoscine vocalizations. **The Auk**, v. 117, n. 1, p. 120–128, 2006.
- GIL, D.; GAHR, M. The honesty of bird song: Multiple constraints for multiple traits. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 17, n. 3, p. 133–141, 2002.
- GROSS, K.; PASINELLI, G.; KUNC, H. P. Behavioral plasticity allows short-term adjustment to a novel environment. **The American Naturalist**, v. 176, n. 4, p. 456–464, 2010.
- HAILMAN, J. P. The organization of major vocalizations in the Paridae. **The Wilson Bulletin**, v. 101, n. 2, p. 305–343, 1989.
- HAILMAN, J. P.; FICKEN, M. S. Combinatorial animal communication with computable syntax: Chick-a-dee calling qualifies as “Language” by structural linguistics. **Animal Behaviour**, v. 34, n. 6, p. 1899–1901, 1986.
- HASSELQUIST, D.; BENSCH, S.; VON SCHANTZ, T. Correlation between male song repertoire, extra-pair paternity and offspring survival in the great reed warbler. **Nature**, v. 381, n. 6579, p. 229, 1996.
- HILL, S. D.; PAWLEY, M. D. M.; JI, W. Local habitat complexity correlates with song complexity in a vocally elaborate honeyeater. **Austral Ecology**, v. 42, n. 4, p. 590–596, 2017.
- HUNTER, M. L.; KREBS, J. R. Geographical Variation in the Song of the Great Tit (*Parus major*) in Relation to Ecological Factors. **The Journal of Animal Ecology**, v. 48, n. 3, p. 759, 1979.
- JOHNSON, L. S.; SEARCY, W. A. Female attraction to male song in house wrens (*Troglodytes aedon*). **Behaviour**, v. 133, n. 5–6, p. 357–366, 1996.

- JOHNSON, S. L.; KERMOTT, L. H. The Functions of Song in Male House Wrens (*Troglodytes aedon*). **Behaviour**, v. 116, n. 3–4, p. 190–209, 1991.
- KAGAWA, H. et al. Ecological correlates of song complexity in white-rumped munias: The implication of relaxation of selection as a cause for signal variation in birdsong. **Interaction Studies**, v. 13, n. 2, p. 263–284, 2012.
- KALUTHOTA, C. et al. Transcontinental latitudinal variation in song performance and complexity in house wrens (*Troglodytes aedon*). **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 283, n. 1824, p. 20152765, 2016.
- KEIGHLEY, M. V. et al. Geographic variation in the vocalizations of Australian palm cockatoos (*Probosciger aterrimus*). **Bioacoustics**, v. 26, n. 1, p. 91–108, 2017.
- KIRSCHER, A. N. G. et al. Birdsong tuned to the environment: Green hylia song varies with elevation, tree cover, and noise. **Behavioral Ecology**, v. 20, n. 5, p. 1089–1095, 2009.
- KROODSMA, D. E. Correlates of song organization among North American wrens. **The American Naturalist**, v. 111, n. 981, p. 995–1008, 2002.
- KROODSMA, D. E.; BREWER, D.; KIRWAN, G. M. **Southern House Wren (*Troglodytes musculus*)**. Disponível em: <<https://www.hbw.com/node/58153>>. Acesso em: 26 jul. 2019.
- KROODSMA, D. E.; BYERS, B. E. The Function (s) of Bird Song. **American Zoologist**, v. 31, n. 2, p. 318–328, 1991.
- KROODSMA, D. E.; MOMOSE, H. Songs of the Japanese Population of the Winter Wren (*Troglodytes troglodytes*). **The Condor**, v. 93, n. 2, p. 424–432, 1991.
- LAILOLO, P.; TELLA, J. L. Erosion of animal cultures in fragmented landscapes. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 2, p. 68–72, 2007.
- LEGER, D. W. First documentation of combinatorial song syntax in a suboscine Passerine species. **The Condor**, v. 107, n. 4, p. 765–774, 2005.
- MARCEL, E.; RIANNE, P.; VERHEYEN, R. F. Male song as a cue for mate choice in the European Starling. **Behaviour**, v. 116, n. 3–4, p. 210–238, 1991.

- MONTAGUE, M. J.; DANEK-GONTARD, M.; KUNC, H. P. Phenotypic plasticity affects the response of a sexually selected trait to anthropogenic noise. **Behavioral Ecology**, v. 24, n. 2, p. 343–348, 2013.
- MORTON, E. S. Ecological sources of selection on avian sounds. **The American Naturalist**, v. 109, n. 965, p. 17–34, 1975.
- MOUNTJOY, D. J.; LEMON, R. E. Female choice for complex song in the European starling: A field experiment. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 38, n. 1, p. 65–71, 1996.
- NAGUIB, M.; RIEBEL, K. Birdsong: a key model in animal communication. v. 13, n. 3, p. 40–53, 2003.
- NEALEN, P. M.; SCHMIDT, M. F. Comparative approaches to avian song system function: Insights into auditory and motor processing. **Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology**, v. 188, n. 11, p. 929–941, 2002.
- NEMETH, E.; BRUMM, H. Birds and anthropogenic noise: are urban songs adaptive? **The American naturalist**, v. 176, n. 4, 2010.
- ORZACK, S. H.; TULJAPURKAR, S. Reproductive effort in variable environments, or environmental variation is for the birds. **Ecology**, v. 82, n. 9, p. 2659–2665, 2001.
- PESHEK, K. R.; BLUMSTEIN, D. T. Can rarefaction be used to estimate song repertoire size in birds? **Current Zoology**, v. 57, n. 3, p. 300–306, 2011.
- PFAFF, J. A. et al. Song repertoire size varies with HVC volume and is indicative of male quality in song sparrows (*Melospiza melodia*). **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 274, n. 1621, p. 2035–2040, 2007.
- PODOS, J. Correlated evolution of morphology and vocal signal structure in Darwin's finches. **Nature**, v. 409, n. 6817, p. 185–188, 2001.
- PODOS, J.; HUBER, S. K.; TAFT, B. Bird song: The interface of evolution and mechanism. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 35, n. 1, p. 55–87, 2004.
- POTASH, L. M. Noise-induced changes in calls of the Japanese quail. **Psychonomic Science**, v. 26,

n. 5, p. 252–254, 1972.

POTVIN, D. A. et al. Experimental exposure to urban and pink noise affects brain development and song learning in zebra finches (*Taenopygia guttata*). **PeerJ**, v. 4, n. e2287, 2016.

POTVIN, D. A.; CLEGG, S. M. The relative roles of cultural drift and acoustic adaptation in shaping syllable repertoires of island bird populations change with time since colonization. **Evolution**, v. 69, n. 2, p. 368–380, 2015.

PRICE, J. J. Why is birdsong so repetitive? Signal detection and the evolution of avian singing modes. **Behaviour**, v. 150, n. 9–10, p. 995–1013, 2013.

READ, A. F.; WEARY, D. M. The evolution of bird song: comparative analyses. **Philosophical Transactions - Royal Society of London, B**, v. 338, n. 1284, p. 165–187, 1992.

REDONDO, P.; BARRANTES, G.; SANDOVAL, L. Urban noise influences vocalization structure in the House Wren *Troglodytes aedon*. **Ibis**, v. 155, n. 3, p. 621–625, 2013.

RENDALL, D.; KALUTHOTA, C. D. Song organization and variability in Northern House Wrens (*Troglodytes aedon parkmanii*) in western Canada. **The Auk**, v. 130, n. 4, p. 617–628, 2013.

RICHARDS, D. G.; WILEY, R. H. Reverberations and Amplitude Fluctuations in the Propagation of Sound in a Forest: Implications for Animal Communication. **The American Naturalist**, v. 115, n. 3, p. 381–399, 1980.

RIEBEL, K.; HALL, M. L.; LANGMORE, N. E. Female songbirds still struggling to be heard. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 8, p. 419–420, 2005.

SASAHARA, K.; IKEGAMI, T. Evolution of birdsong syntax by interjection communication. **Artificial Life**, v. 13, n. 3, p. 259–277, 2007.

SCHUCK-PAIM, C.; ALONSO, W. J.; OTTONI, E. B. Cognition in an ever-changing world: Climatic variability is associated with brain size in neotropical parrots. **Brain, Behavior and Evolution**, v. 71, n. 3, p. 200–215, 2008.

SKUTCH, A. F. Life history of the Southern House Wren. **Condor**, v. 55, n. 1, p. 121–149, 1954.

SLABBEKOORN, H.; BOER-VISSER, A. DAN. Cities change the songs of birds. **Current Biology**,

v. 16, n. 23, p. 2326–2331, 2006.

SNELL-ROOD, E. C. The effect of climate on acoustic signals: Does atmospheric sound absorption matter for bird song and bat echolocation? **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 2, p. 1650–1658, 2012.

SOL, D.; LEFEBVRE, L.; RODRÍGUEZ-TEIJEIRO, J. D. Brain size, innovative propensity and migratory behaviour in temperate Palaearctic birds. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 272, n. 1571, 2005.

SOSA-LÓPEZ, J. R.; MENNILL, D. J. The vocal behavior of the Brown-throated Wren (*Troglodytes brunneicollis*): Song structure, repertoires, sharing, syntax, and diel variation. **Journal of Ornithology**, v. 155, n. 2, p. 435–446, 2014.

SUZUKI, T. N.; WHEATCROFT, D.; GRIESSER, M. Experimental evidence for compositional syntax in bird calls. **Nature Communications**, v. 7, p. 10986, 2016.

SWADDLE, J. P. et al. A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 30, n. 9, p. 550–560, 2015.

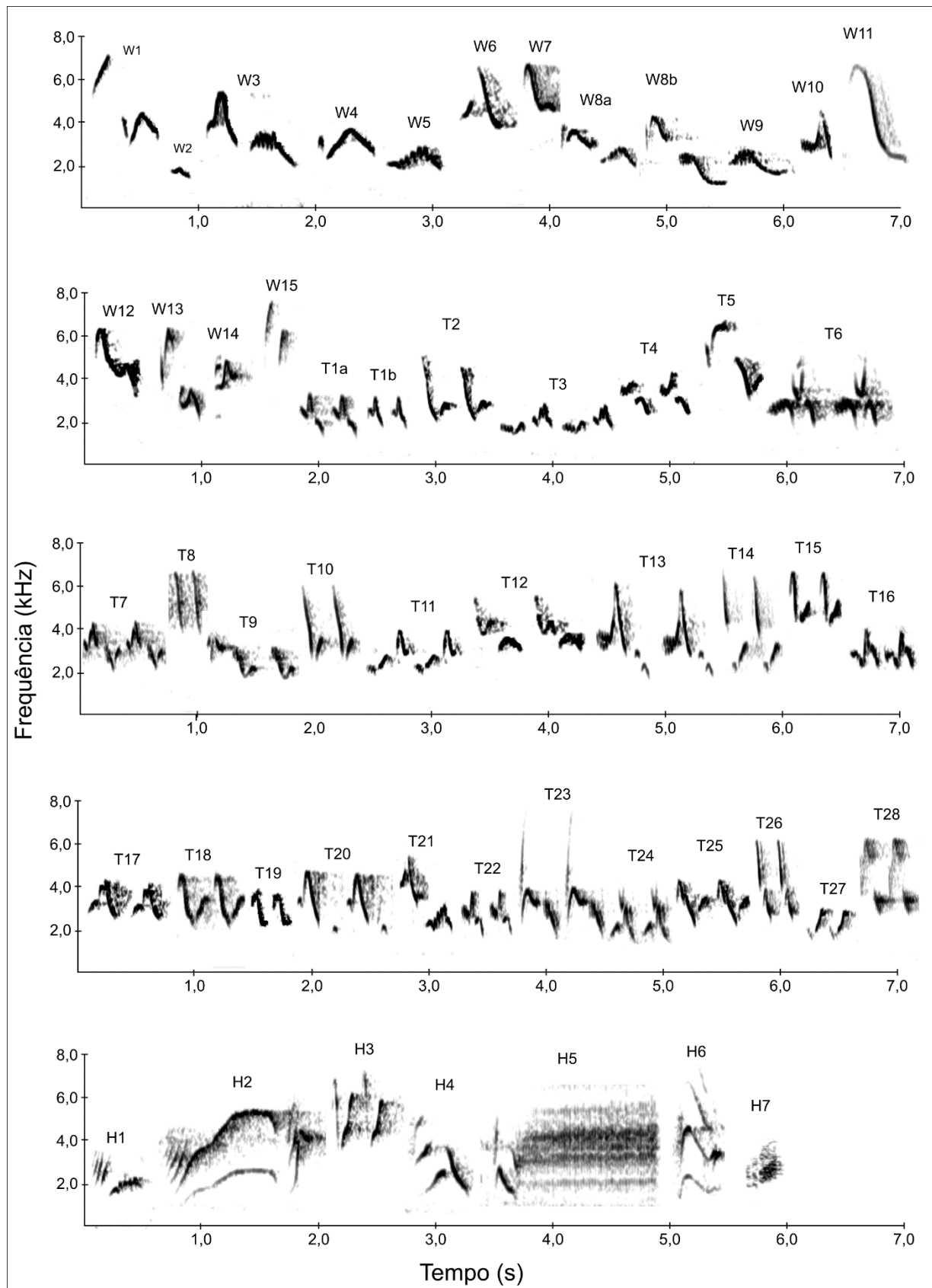
WILEY, R. H.; RICHARDS, D. G. Adaptations for acoustic communication in birds: sound transmission and signal detection. In: KROODSMA, D. E.; MILLER, E. H. (Eds.). **Acoustic communication in birds**. 1. ed. London: Academic Press, 1982. p. 131–181.

CONCLUSÃO

Neste estudo, observa-se que a variação vocal foi diagnosticada nos três níveis: intensidade, estrutura e sintaxe. Isto demonstra que as nossas observações corroboram com as hipóteses levantadas de que (1) as vocalizações são distintas entre as duas populações a níveis de ruído distintos; e (2) as características abióticas do ambiente influenciam diretamente na estrutura vocal dos indivíduos. Dentre os principais influenciadores, estão o ruído ambiental antropogênico produzido pelo tráfego rodoviário e a absorção atmosférica do som causada pelos efeitos de temperatura e umidade. Assim, observei as características vocais de amplitude, tempo, frequência, sintaxe e repertório sendo diretamente e indiretamente afetadas pela estrutura abiótica do ambiente onde os indivíduos se inserem. Tais variações podem ter um impacto relevante na biologia da espécie, indicando a possível ocorrência de divergências fenotípicas passíveis de seleção ecológica, o que acarretaria em uma divergência evolutiva incipiente dentro da espécie. Assim, este estudo se firma como um passo importante no entendimento das pressões que o ambiente urbanizado impõe às espécies, podendo ser utilizado como um modelo para outras espécies que utilizam a vocalização como mediador de suas atividades. Com isso, a compreensão dos mecanismos que operam na seleção dos sinais vocais pode ser de suma importância para estudos posteriores que englobem o manejo da paisagem acústica na conservação de espécies.

APÊNDICES

Apêndice 1. Catálogo de sílabas das vocalizações de *T. musculus* da região de Bauru-SP. As sílabas estão categorizadas segundo a sua morfologia, sendo divididas em sílabas sibiladas ("whistled" - W), trinadas ("trilled" - T) e harmônicas ("harmonic" - H).



Apêndice 2. Lista de indivíduos amostrados. Estão discriminados os números de identificação dos indivíduos (A – próximos da rodovia; B – distantes da rodovia), a data de captura, as coordenadas geográficas (em graus decimais), as medidas morfométricas e a numeração das anilhas seguindo o padrão estabelecido pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Aves Silvestres (CEMAVE).

Ind.	Data	Latitude	Longitude	Bico (cm)	Cabeça (cm)	Tarso (cm)	Asa (cm)	Cauda (cm)	Massa (g)	Anilha
A01	04/06/2017	-22.343909°	-49.029082°	0,47	1,48	1,68	5,6	4,1	13	C78756
A02	05/08/2017	-22.351542°	-49.033389°	0,44	1,28	1,49	5,4	4,5	12	C78759
A03	20/08/2017	-22.356631°	-49.026946°	0,55	1,39	1,6	5,5	4,6	12	C78760
A04	23/08/2017	-22.342931°	-49.017360°	0,51	1,22	1,7	5,4	4,5	13	C78761
A05	23/08/2017	-22.336849°	-49.008743°	0,49	1,22	1,51	5,1	4,9	12	C78762
A06	04/06/2017	-22.345456°	-49.030489°	0,44	1,34	1,16	5,3	4,7	12	C78757
A07	24/08/2017	-22.354187°	-49.030186°	0,46	1,33	1,49	5,5	4,9	13	C78763
A08	-	-22.358418°	-49.035738°	-	-	-	-	-	-	C78789
A09	24/08/2017	-22.344588°	-49.017540°	0,42	1,23	1,6	5,5	4,7	13	C78764
A10	-	-22.351842°	-49.034867°	-	-	-	-	-	-	C78790
A11	21/07/2017	-22.338295°	-49.009743°	0,59	1,46	1,39	5,3	4,1	13	C78758
A12	02/09/2017	-22.353383°	-49.028508°	0,46	1,19	1,58	5,3	4,5	11	C78769
A13	02/09/2017	-22.342027°	-49.028797°	0,57	1,22	1,34	5,3	4,2	11	C78766
A14	05/09/2017	-22.359764°	-49.037501°	0,48	1,28	1,52	5	4,2	11	C78773
A15	-	-22.355341°	-49.037633°	-	-	-	-	-	-	-
A16	-	-22.349141°	-49.030595°	-	-	-	-	-	-	-
A17	11/06/2017	-22.357751°	-49.024218°	0,48	1,17	1,35	5,4	4,8	11	C78755
A18	24/08/2017	-22.355683°	-49.030028°	0,47	1,22	1,45	5,5	4,5	11	C78765
A19	02/09/2017	-22.358179°	-49.027423°	0,52	1,31	1,59	5,5	4,6	13	C78768
A20	04/09/2017	-22.356369°	-49.033915°	0,42	1,25	1,52	5,5	4,2	13	C78770
A21	-	-22.347203°	-49.028570°	-	-	-	-	-	-	-
A22	02/09/2017	-22.341211°	-49.029907°	0,49	1,21	1,36	5,2	4,6	12,5	C78767
A23	04/09/2017	-22.340964°	-49.028249°	0,48	1,26	1,44	5,3	4,4	12,5	C78772
A24	-	-22.340454°	-49.020870°	-	-	-	-	-	-	-
A25	09/05/2017	-22.359069°	-49.024551°	0,36	1,2	1,61	5,6	4,9	12,5	C78754
B01	08/09/2017	-22.353624°	-49.007529°	0,47	1,24	1,4	5,1	4,5	11,5	C78775
B02	25/09/2017	-22.364996°	-49.011445°	0,45	1,35	1,47	5,3	4,6	13	C78783
B03	04/10/2017	-22.377379°	-49.008513°	0,4	1,23	1,44	5,1	4,5	12	C78786
B04	-	-22.370460°	-49.004310°	-	-	-	-	-	-	-
B05	-	-22.361541°	-49.007267°	-	-	-	-	-	-	-
B06	10/09/2017	-22.355000°	-49.007434°	0,48	1,22	1,5	5,2	4,8	12,5	C78777
B07	10/09/2017	-22.341688°	-48.997546°	0,5	1,39	1,6	5,6	4,8	13	C78776
B08	07/09/2017	-22.368876°	-49.012737°	0,42	1,38	1,41	5,6	4,5	11,5	C78774
B09	-	-22.372395°	-49.006286°	-	-	-	-	-	-	-
B10	-	-22.360589°	-49.006623°	-	-	-	-	-	-	-
B11	13/09/2017	-22.340408°	-48.996561°	0,44	1,17	1,49	5,6	4,4	11,5	C78778
B12	04/10/2017	-22.375468°	-49.009351°	0,51	1,33	1,5	5,5	4,6	13	C78787
B13	08/10/2017	-22.361477°	-49.001610°	0,44	1,12	1,4	5	4,2	11,5	C78788
B14	-	-22.366713°	-49.018073°	-	-	-	-	-	-	-
B15	-	-22.361941°	-49.005737°	-	-	-	-	-	-	-

Ind.	Data	Latitude	Longitude	Bico (cm)	Cabeça (cm)	Tarso (cm)	Asa (cm)	Cauda (cm)	Massa (g)	Anilha
B16	13/09/2017	-22.345923°	-48.991910°	0,47	1,26	1,34	5,5	4,2	10	C78779
B17	22/09/2017	-22.380509°	-49.006802°	0,41	1,19	1,42	5	4,2	11	C78782
B18	20/09/2017	-22.365112°	-49.015116°	0,45	1,21	1,38	5,2	4,6	12	C78780
B19	26/09/2017	-22.367657°	-49.020740°	0,41	1,18	1,4	5,7	4,7	12	C78784
B20	-	-22.360073°	-48.995673°	-	-	-	-	-	-	-
B21	22/09/2017	-22.342837°	-48.998849°	0,5	1,26	1,38	5,3	4	11	C78781
B22	02/10/2017	-22.379127°	-49.009465°	0,44	1,18	1,41	5,2	4,1	11,5	C78785
B23	04/09/2017	-22.366365°	-49.023153°	0,48	1,26	1,39	5,2	4,3	12	C78771
B24	-	-22.360829°	-48.998896°	-	-	-	-	-	-	-
B25	-	-22.359670°	-49.000564°	-	-	-	-	-	-	-