



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Paisagens acústicas do Cerrado Brasileiro

Bárbara Armando Godinho

Brasília
maio/2024



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Paisagens acústicas do Cerrado Brasileiro

Bárbara Armando Godinho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Orientador: Dr. Ricardo Bomfim Machado

Brasília
maio/2024

Paisagens acústicas do Cerrado Brasileiro

Bárbara Armando Godinho

Dr. Ricardo Bomfim Machado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Banca examinadora:

Dr. Ricardo B. Machado
Orientador – UnB

Dr. Pedro Diniz
Membro Titular Externo - UnB

Dr. Raphael Igor da Silva Correa Dias
Membro Titular Externo - CEUB

Dr. Pedro Henrique Brum Togni
Suplente – UnB

Brasília

maio/2024

Agradecimentos

Agradeço a todos que colaboraram com o nascimento e a elaboração deste trabalho. Agradeço à minha mãe, Denise, por sempre apoiar meus sonhos, por sempre priorizar meus estudos e por todo o amor envolvido nessa jornada, que teve mudança de Estado e momentos difíceis. Apesar de tudo, sempre estive ao meu lado. E também agradeço à Fernanda por todo o apoio nesse processo, sempre vibrando com minhas conquistas, como se fossem dela.

Obrigada Larissa, por toda a paciência, pelo amor, carinho e cuidado em todo o processo desse trabalho. Agradeço por ter a paciência de ler e reler meu trabalho umas 40 vezes e por me aguentar em cada crise de ansiedade. Gratidão por tudo.

Agradeço ao meu orientador, Ricardo B. Machado, por toda a paciência nesse processo, pela ajuda na elaboração dessa dissertação, sempre me mostrando o caminho da independência e a aprender a construir os diferentes processos desse trabalho. Agradeço por se dispor a me acompanhar nos campos, embaixo de Sol e chuva; obrigada pelos conhecimentos compartilhados e todo o auxílio necessário para a construção desse trabalho.

Agradeço ao CNPq pela ajuda financeira preciosa para a construção desse trabalho, a bolsa certamente possibilitou a minha mudança de estado para o DF e sem a ajuda não seria possível a construção deste trabalho e minha permanência no programa. Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, onde fui contemplada com o auxílio PROEX, que foi essencial para a realização deste trabalho, possibilitando o trabalho de campo em São Paulo e todo o aprendizado prático com os aparelhos de gravação.

Agradeço à banca, pelas correções, contribuições e tempo dedicado ao meu crescimento profissional como futura pesquisadora.

Obrigada aos meus (velhos) amigos por me apoiarem nessa jornada, tão maluca e gostosa, por mesmo tendo mudado de estado, não mudar em nada em nossa relação, mesmo com toda a distância e a loucura do dia!!! Obrigada aos novos amigos que me aguentaram nessa jornada, com todos os choros e crises de ansiedade, sem dúvida vocês tornaram essa jornada muito mais leve porque somos uma máquina de vencer!

Esse trabalho é fruto de um sonho de uma criança que um dia imaginou ser pesquisadora e hoje esse sonho se torna cada vez mais real, mesmo com todos os tropeços, inseguranças e falhas ao longo do processo. Sei que tudo me tornou uma profissional melhor e uma pesquisadora aberta a todas as oportunidades. Então agradeço a mim mesma, por nunca desistir e sempre buscar ser melhor e nunca desistir dos seus sonhos. Nada é tão nosso, como os nossos sonhos.

Sumário

Introdução geral	6
Referências	8
Capítulo 1. Paisagens acústicas: uma comparação entre ambientes urbanos e naturais no Cerrado Brasileiro	10
Resumo	10
Abstract	11
1. Introdução	12
2. Material e métodos	14
2.1 Coleta de dados	14
2.2 Análises	15
2.2.1 Similaridade acústica	15
2.2.2 Índices acústicos	16
3. Resultados	17
3.1 Semelhanças entre as paisagens acústicas	17
3.2 Índices acústicos entre os ambientes urbanos e naturais	19
4. Discussão	20
Conclusão	23
Referências	23

Introdução geral

As atividades antrópicas, intencionais ou não, provocam diferentes mudanças ambientais, mudando padrões e processos no ecossistema terrestre (Wang et al., 2024; Díaz et al., 2019), como ciclos biogeoquímicos, clima, diversidade e composição de espécies (Grimm et al., 2008), podendo acarretar em diferentes tipos de poluição. Um desses tipos de poluição é o ruído antropogênico, que pode ser caracterizado por altas amplitudes, baixas frequências, sendo tipicamente registrado em paisagens urbanas (Francis et al., 2009). O ruído é definido como qualquer fator que reduz a capacidade do receptor do som de detectar ou discriminar um sinal do outro (Patricelli and Blickley 2006). Sendo assim, o ruído é um som que interfere na comunicação durante uma transmissão de sinal do emissor para o receptor (Brumm and Slabbekoorn 2005). O receptor pode não conseguir distinguir o sinal do emissor, existindo uma dificuldade em entender a informação que está ou em localizar a fonte do sinal, resultando uma redução da capacidade de discriminar os sinais (Kleist et al., 2016). O emissor na presença do ruído pode aumentar a frequência dos cantos das aves, com a finalidade de sobreporem ao ruído antropogênico (Roca et al., 2016).

O Cerrado é um bioma composto por 19 ecorregiões definidas por planaltos e depressões (Sano et al., 2019). Considerado um dos hotspots de biodiversidade do mundo, sendo classificado entre os 25 hotspots terrestres mais importantes, composto por um mosaico de árvores, arbustos e gramíneas (Myers et al., 2000). Esse bioma é vulnerável às mudanças climáticas, devido à sua alta sazonalidade e a disponibilidade limitada de água (Sano et al., 2019). A maior riqueza vegetal é encontrada em fronteiras entre os países Bolívia, Brasil e Paraguai, sendo que 50% da flora do Cerrado se encontra nesta fronteira (Velazco et al., 2023). A riqueza de aves e de outros grupos funcionais presentes no Cerrado, pode ser afetada de forma negativa com a mudança de recursos e dos habitats (Souza et al., 2019). O Distrito Federal (Brasil) está inserido no bioma Cerrado, com uma população de mais de 3 milhões habitantes (IBGE 2023), conseqüente de uma rápida expansão da urbanização e crescimento populacional.

Nesse contexto, trabalhei com o ruído antropogênico que faz parte da paisagem sonora de diferentes ambientes. Paisagens Acústicas são coleções de sons biológicos, geofísicos e antropogênicos que podem variar no espaço e no tempo (Pijanowski et al., 2011). Tais fontes sonoras são conhecidas como biofonia (sons produzidos por todos os organismos em locais e em tempo específicos); geofonia (são sons originários do ambiente, que incluem vento, água e trovões); e antropofonia ou tecnofonia (sons produzidos por atividades humanas, como veículos e construções) (Pijanowski et al., 2011).

O som pode ser descrito com base em três dimensões acústicas interligadas, sendo elas: tempo, frequência e energia. Nesse contexto, uma das formas de resumir a complexidade global ou a heterogeneidade de um registro sonoro foi a criação dos índices acústicos, que constituem funções matemáticas baseadas nessas três dimensões (Sueur et al., 2014).

Os sons dos animais são únicos em termos de características e complexidade acústica e estão presentes nas paisagens sonoras, enquanto biofonia, sendo associados à composição e à diversidade de espécies presentes na comunidade (Beecher and Brenowitz 2005). Por exemplo, uma gravação de áudio com um grande número de espécies apresenta uma energia distribuída em um amplo conjunto de frequências ou taxa de mudanças de energia da frequência em relação ao tempo (Alcocer et al., 2022).

A antropofonia pode prejudicar tanto os seres humanos, quanto os demais organismos da biota (Dowling et al., 2012). Esse ruído sonoro é caracterizado por altas amplitudes, baixas frequências e são registrados principalmente em regiões urbanas, podendo integrar-se à paisagem urbana ou estar presente no entorno das áreas alteradas pelas atividades humanas (Francis et al., 2009).

O ruído antropogênico pode afetar diferentes táxons e respostas diferentes para cada tipo de organismo, como no caso da diminuição de riqueza e abundância de aves florestais, gafanhotos (Orthoptera) e libélulas (Odonata) na presença ao ruído (Senzaki et al., 2020). É relatado na literatura que os ambientes ruidosos podem ter efeitos direto nos animais, que as evitam devido ao comprometimento da comunicação acústica e a vigilância (Senzaki et al., 2020).

As aves sofrem com efeitos negativos do ruído antropogênico em locais ruidosos, pois esse tipo de poluição interfere na transmissão do som (Hamao et al., 2011) de forma a alterar a comunicação intra e interespecífica usada, por exemplo, na detecção de sinais de alerta (Francis et al., 2009) e na atração de parceiros para a reprodução (Schroeder et al., 2012).

Na atração de parceiros em locais ruidosos, foi possível observar que machos da espécie *Luscinia megarhynchos* (Passeriformes), que viviam em locais ruidosos, cantavam níveis sonoros mais altos quando comparados com os machos em locais menos afetados pelo ruído (Brumm 2004). Esse resultado demonstra uma estratégia das aves para tentar driblar o ruído quando este afeta a comunicação intraespecífica (Brumm 2004). Sabe-se também que a presença de altos níveis de ruído em áreas urbanas pode interferir nessa comunicação e afetar negativamente as funções de sobrevivência, em aves localizadas próximas aos centros urbanos (Cartwright et al., 2013). Nos peixes, é registrado que os machos da espécie *Porichtys notatus* (Batrachoidiformes), aumentam seu comportamento defensivo em ninhos, com ou sem ovos, quando há ruído de embarcações no ambiente (Woods et al., 2022).

Dito isto, o objetivo desta dissertação é comparar as paisagens acústicas entre os ambientes naturais e urbanos no Cerrado no Distrito Federal.

Referências

- Alcocer, I. *et al.* (2022) *Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis*. Available at: <https://doi.org/10.1111/brv.12890>.
- Beecher, M. and Brenowitz, E. (2005) 'Functional aspects of song learning in songbirds', *Trends in Ecology & Evolution*, 20(3), pp. 143–149. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.01.004>.
- Brumm, H. (2004) 'The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird', *Journal of Animal Ecology*, 73(3), pp. 434–440. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.0021-8790.2004.00814.x>.
- Cartwright, L.A. *et al.* (2014) 'Urban noise affects song structure and daily patterns of song production in Red-winged Blackbirds (*Agelaius phoeniceus*)', *Urban Ecosystems*, 17(2), pp. 561–572. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0318-z>.
- Francis, C., Ortega, C. and Cruz, A. (2009) 'Noise Pollution Changes Avian Communities and Species Interactions', *Current Biology*, 19(16), pp. 1415–1419. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.06.052>.
- Hamao, S., Watanabe, M. and Mori, Y. (2011) 'Urban noise and male density affect songs in the great tit *Parus major*', *Ethology Ecology & Evolution*, 23(2), pp. 111–119. Available at: <https://doi.org/10.1080/03949370.2011.554881>.
- IBGE. Panorama. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/brasil/panorama>. Acesso em: 29 abril 2024.
- Kleist, N.J. *et al.* (2016) 'Anthropogenic noise weakens territorial response to intruder's songs', *Ecosphere*, 7(3), p. e01259. Available at: <https://doi.org/10.1002/ecs2.1259>.
- Patricelli, G.L. and Blickley, J.L. (2006) 'Avian Communication in Urban Noise: Causes and Consequences of Vocal Adjustment', *The Auk*, 123(3), pp. 639–649. Available at: <https://doi.org/10.1093/auk/123.3.639>.

Roca, I.T. et al. (2016) ‘Shifting song frequencies in response to anthropogenic noise: a meta-analysis on birds and anurans’, *Behavioral Ecology*, 27(5), pp. 1269–1274. Available at: <https://doi.org/10.1093/beheco/arw060>.

Sano, E. et al. (2019) ‘Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation’, *Journal of Environmental Management*, 232, pp. 818–828. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>.

Senzaki, M., Kadoya, T. and Francis, C.D. (2020) ‘Direct and indirect effects of noise pollution alter biological communities in and near noise-exposed environments’, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1923), p. 20200176. Available at: <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0176>.

Souza, F.L. et al. (2019) ‘Impervious surface and heterogeneity are opposite drivers to maintain bird richness in a Cerrado city’, *Landscape and Urban Planning*, 192, p. 103643. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103643>.

Schroeder, J. et al. (2012) ‘Passerine Birds Breeding under Chronic Noise Experience Reduced Fitness’, *PLoS ONE*. Edited by T. Mappes, 7(7), p. e39200. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039200>.

Velazco, S.J.E. et al. (2023) ‘Transboundary conservation opportunities for Cerrado’s plant species’, *Biological Conservation*, 284, p. 110194. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110194>.

WANG, X.-L. et al. (2024) ‘Compound extreme inundation risk of coastal wetlands caused by climate change and anthropogenic activities in the Yellow River Delta, China’, *Advances in Climate Change Research*, 15(1), pp. 134–147. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2024.01.010>.

Woods, M.B. et al. (2022) ‘Context-dependent effects of anthropogenic noise on nest defence in a singing toadfish’, *Animal Behaviour*, 191, pp. 105–115. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2022.06.018>.

Capítulo 1. Paisagens acústicas: uma comparação entre ambientes urbanos e naturais no Cerrado Brasileiro

Resumo

A comunicação acústica é importante na transmissão de informações sobre a presença, localização e necessidades de diferentes espécies. Uma comunicação acústica bem-sucedida precisa que os sons se propaguem pelo ambiente, desde o emissor até o receptor, e um dos fatores que podem interferir na transmissão do sinal acústico é o ruído antropogênico. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é explorar se as paisagens acústicas variam entre áreas urbanas e áreas naturais no Cerrado. O primeiro objetivo específico foi verificar a similaridade acústica entre essas áreas e se as comunidades compartilham semelhanças em suas vocalizações; e o segundo foi comparar e avaliar a diversidade sonora utilizando os índices acústicos. Foram utilizados dados acústicos do Laboratório de Planejamento para a Conservação da Biodiversidade da Universidade de Brasília. As gravações foram coletadas em 24 pontos de amostragem utilizando gravador digital programável; os pontos de coleta foram em Unidades de Conservação e em áreas urbanas no Distrito Federal. Em seguida, ocorreu a análise de similaridade acústica e dos índices acústicos (ADI, ACI, NDSI, AEI, H e BI). Nos resultados de similaridade acústica foi possível observar uma clara diferença entre os ambientes, formado por dois agrupamentos distintos: um predominantemente urbano e o outro predominantemente natural. Os resultados dos índices acústicos mostraram que ACI, H e ADI foram maiores para ambientes naturais, enquanto os índices NDSI, AEI e BI foram maiores para ambientes urbanos; todos os índices acústicos apresentaram uma diferença significativa entre as áreas naturais e urbanas, confirmando a hipótese que previa a diferenciação das paisagens acústicas de acordo com o ambiente. Diferente do previsto, os valores de BI foram maiores em ambientes urbanos, isso pode acontecer porque o ambiente urbano é rico em uma gama de sons antropogênicos. Os resultados confirmam uma diferença significativa nas paisagens acústicas analisadas. No entanto, em ambientes urbanos, a quantidade de sons antrópicos pode distorcer a análise dos índices acústicos, o que exige uma cautela para evitar conclusões precipitadas.

Palavras-chave: Índices acústicos; Análise de Similaridade Acústica, Bioacústica, Antropofonia, Ruído Antropogênico.

Abstract

Acoustic communication is important in transmitting information about the presence, location, and needs of different species. A successful acoustic communication requires sounds to propagate throughout the environment, from the emitter to the receiver, and one of the factors that can interfere with the transmission of the acoustic signal is anthropogenic noise. In this context, the objective of this research is to explore whether acoustic landscapes vary between urban areas and natural areas in the Brazilian Cerrado. The first specific objective was to verify the acoustic similarity between these areas and whether the communities share similarities in their vocalizations; and the second was to compare and evaluate sound diversity using acoustic indices. Acoustic data from the Planning Laboratory for Biodiversity Conservation at the University of Brasília were used. Recordings were collected at 24 sampling points using a programmable digital recorder; the collection points were in protected natural areas (conservation units) and in urban areas in the Federal District. Next, the acoustic similarity and acoustic indices (ADI, ACI, NDSI, AEI, H and BI) were analyzed. In the acoustic similarity results, it was possible to observe a clear difference between the environments, formed by two distinct groups: one predominantly urban and the other predominantly natural. The results of the acoustic indices showed that ACI, H and ADI were higher for natural environments, while the NDSI, AEI and BI indices were higher for urban environments; All acoustic indices showed a significant difference between natural and urban areas, confirming the hypothesis that predicted the differentiation of acoustic landscapes according to the environment. Contrary to expectations, BI values were higher in urban environments, which may happen because the urban environment is rich in a range of anthropogenic sounds. The results confirm a significant difference in the acoustic landscapes analyzed. However, in urban environments, the amount of anthropogenic sounds can distort the analysis of acoustic indices, which requires caution to avoid hasty conclusions.

Keywords: Acoustic index, Acoustic similarity analysis, Bioacoustic, Anthropophony, Anthropogenic noise.

1. Introdução

Os sinais acústicos transmitem informações sobre a presença, localização e intenções dos seus emissores, de forma a serem utilizados para provocar e coordenar a atividade social de diferentes grupos, por exemplo: ninhegos emitem sons agudos para a solicitação de comida aos pais (Beecher and Brenowitz 2005); sinais sonoros de alarme sinalizando a chegada de predadores (Luther and Wiley 2009) e a presença de alimento (Beecher and Brenowitz 2005). Em todos esses casos, a sinalização acaba sendo eficaz para aumentar a sobrevivência (Podos and Webster 2022).

Os sinais sonoros podem ser transmitidos a longas distâncias, sendo detectados por muitos receptores incluindo aqueles que não estão à vista do emissor (Patricelli and Blickley 2006). Outra característica dos sinais sonoros é que eles podem ser ajustados rapidamente, possibilitando uma flexibilidade de sinalização em situações de mudanças como, por exemplo, chegada ou partida de um rival, predador ou futuro parceiro (Gomes et al., 2022).

Uma comunicação acústica bem-sucedida requer que os sons se propaguem pelo ambiente entre o emissor e o receptor (Patricelli and Blickley 2006). Os sons presentes em uma paisagem são muitas vezes complexos, pois existem diferenças no tipo de fonte, tempo, frequência e distância do emissor (Villanueva-Rivera et al., 2011). De acordo com a hipótese de adaptação acústica, o ambiente natural possui força para atuar nas propriedades acústicas, assim, diferentes espécies conseguem ou não superar as restrições impostas pelas características do ambiente (Morton 1975). Por exemplo, a cobertura vegetal pode desempenhar um papel importante na comunicação sonora da espécie *Mungos mungo*, família Herpestidae (Mammalia), isso porque a degradação sonora aumenta com a densidade da vegetação, conseqüentemente, a espécie pode apresentar adaptações comportamentais, que possam ajudar a superar as restrições impostas pelo ambiente (Arasco et al., 2022).

Para além das características do ambiente, o ruído antropogênico também exerce uma pressão sobre a comunicação acústica (Brumm and Slabbekoorn 2005) e cada grupo vai responder de maneira diferente ao ruído. As aves, por exemplo, apresentam um padrão de alteração dos parâmetros acústicos, como frequência dominante, frequências mínimas e máximas, duração das notas e amplitude do canto (Dowling et al., 2012); já no caso dos anuros, é documentado que eles podem se adaptar ao ambiente por meio da alteração da amplitude do canto (Gomes et al., 2022).

Um estudo com *Formicarius colma* (Passeriformes), demonstrou que a abundância da espécie é menor em áreas próximas à rodovia, apontando que o ruído antropogênico pode ser um fator limitante para a espécie capaz de influenciar sua dinâmica (da Silva et al., 2023).

A elevação da frequência mínima do canto de aves em resposta ao ruído antropogênico (Dowling et al., 2012) aumenta as chances de os emissores serem ouvidos nos ambientes urbanos. Essa adaptação se dá porque o ruído antropogênico é caracterizado por baixas frequências e as mudanças na frequência mínima reduzem a sobreposição do som (Nemeth and Brumm 2010).

Para os estudos de comunicação acústica, foi utilizada a bioacústica cujas aplicações incluem avaliação da biodiversidade, identificação de espécies, comportamento, ecologia e comunicação, contribuindo para o monitoramento ambiental (Kvsn et al., 2020). A coleta de dados para análise é feita por meio de dois dispositivos: um microfone e um gravador de som. O processo de análise pode ocorrer por meio de características acústicas, como sílabas, com a utilização de softwares específicos para esse tipo de análise (Kvsn et al., 2020).

Os Índices Acústicos são funções matemáticas projetadas para avaliar aspectos da biodiversidade, como riqueza de espécies, uniformidade e abundância (Sueur et al., 2014). Os índices acústicos podem ser utilizados para estimar a riqueza de comunidades de aves no Cerrado brasileiro (Machado et al., 2017). O estudo indica que os índices acústicos podem ser uma alternativa válida para estudos tradicionais de aves no bioma do Cerrado, sendo uma avaliação rápida que consegue estimar a riqueza de espécies de forma a mostrar características das comunidades, diversidade e composição de espécies presente nessa paisagem sonora (Machado et al., 2017).

Os índices acústicos podem servir como um indicador da saúde do ecossistema em programas de monitoramentos em diferentes escalas espaciais e temporais, desta forma, podem ser uma ferramenta útil na gestão e no planejamento da conservação, indicando ambientes potenciais para serem hotspots de biodiversidade, identificando e priorizando áreas para serem protegidas (Sánchez-Giraldo et al., 2021).

Assim, o objetivo dessa pesquisa é explorar se as paisagens acústicas variam entre áreas urbanas e áreas naturais na região do Cerrado do Brasil central. O primeiro objetivo específico é verificar, a partir de uma análise de similaridade acústica, se as paisagens acústicas variam entre esses ambientes e se as comunidades compartilham semelhanças em suas características sonoras. Já o segundo objetivo específico consiste em utilizar índices acústicos para comparar e avaliar a diversidade sonora em áreas naturais e urbanas. As hipóteses levantadas para os objetivos específicos são, respectivamente: as áreas nativas serão mais similares entre si e as urbanas formarão um cluster a parte, sugerindo uma baixa similaridade acústica entre esses tipos de ambientes; e os índices acústicos têm diferenças significativas entre as áreas naturais e urbanas, de forma que os resultados apontem valores significativamente maiores para todos os índices acústicos relacionados positivamente à biodiversidade (Diversidade Acústica, Complexidade Acústica,

Entropia Total e Bioacústico) quando estes se referirem às áreas naturais e maiores valores de Uniformidade Acústica e Diferença Normalizada da Paisagem Acústica em ambientes urbanos.

2. Material e métodos

2.1 Coleta de dados

Este trabalho utilizou os dados que compõem a base de dados acústicos do Laboratório de Planejamento para a Conservação da Biodiversidade - LaBiO, da Universidade de Brasília, com 4.800 arquivos de 10 minutos cada, totalizando 800 horas de gravações. Tais gravações foram realizadas nos meses de fevereiro, outubro e dezembro de 2020.

A coleta de dados aconteceu no Distrito Federal (DF), localizado na região central do Brasil, -15.82 S e -47.92 O, ocupando uma área de 5.779 km². Todo o território do DF está inserido no bioma Cerrado (IBGE 2023). Foram selecionados quatro tipos de ambientes dentro do DF para a coleta dos dados acústicos, as áreas foram classificadas como: nativas, rurais, áreas urbanas com baixa urbanização e áreas urbanas com alta urbanização. Os pontos de áreas nativas foram duas unidades de conservação: Estação Ecológica Jardim Botânico de Brasília (EEJBB) e o Parque Nacional de Brasília (PNB). As áreas urbanas foram o Plano Piloto, município de Sobradinho e o município de São Sebastião. O plano piloto é uma área central de Brasília, sendo considerada uma área urbana com alto nível de urbanização (490,18 habitantes/km²). Sobradinho é um município satélite com 358,42 habitantes/km², localizado na porção nordeste do Distrito Federal. São Sebastião também é um município satélite com 353,06 habitantes/km². As áreas rurais estão localizadas próximas aos municípios de Sobradinho e São Sebastião (Araújo and Machado, 2023).

Foram estabelecidos 24 pontos de amostragem distribuídos em seis pontos em áreas protegidas (EEJBB e PNB); seis pontos em áreas rurais (proximidades Sobradinho e de São Sebastião); seis em áreas com baixo nível de urbanização (Sobradinho e São Sebastião); e seis pontos em áreas urbanas com alto nível de urbanização (Plano Piloto) (Tabela 1). Os pontos de coleta foram determinados seguindo uma distância mínima de 500 metros entre eles, o que diminuiu a sobreposição das áreas amostradas.

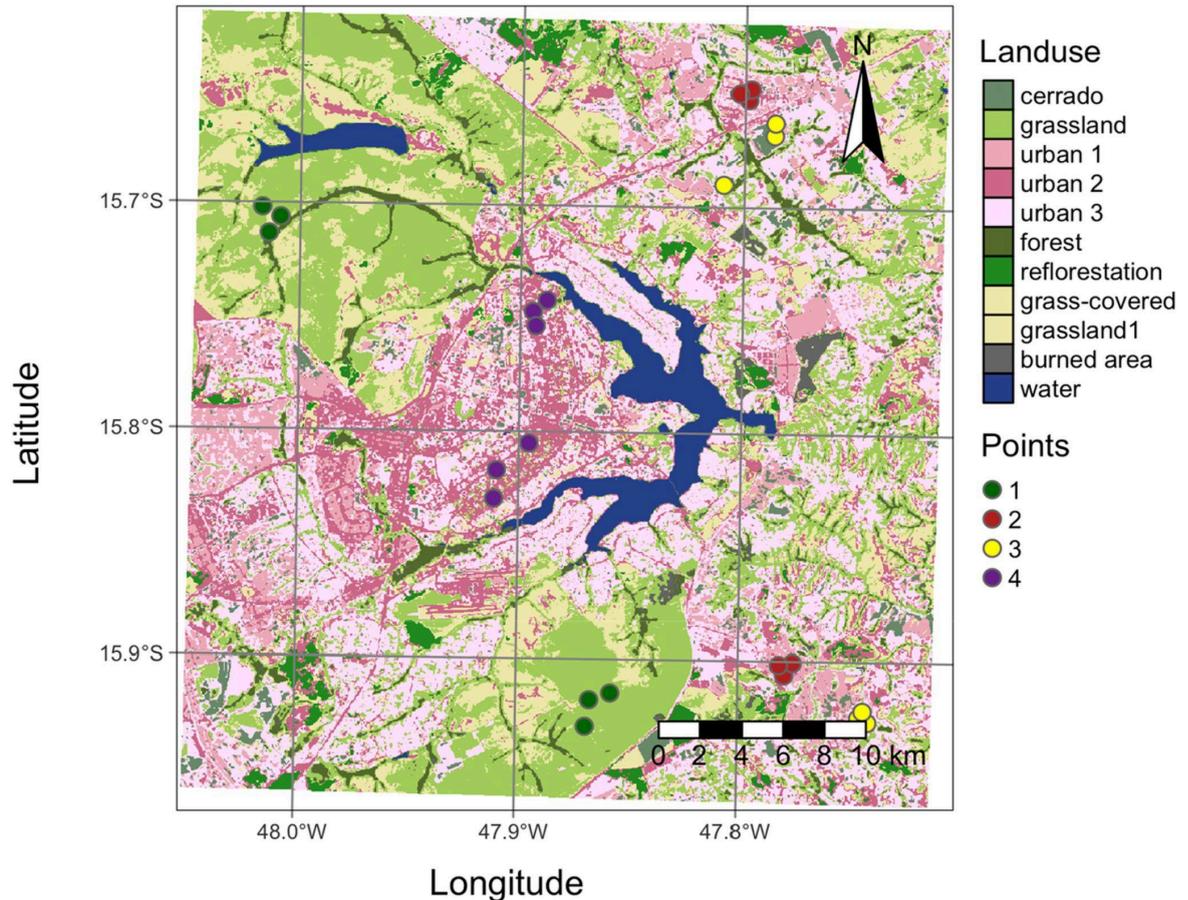


Figura 1: Mapa de uso do solo. Os pontos 1 (verde) localizados em áreas nativas, pontos 2 (vermelhos) localizados em áreas urbanas de baixa densidade, pontos 3 (amarelos) localizados em áreas rurais e pontos 4 (roxo) localizados em áreas urbanas de alta densidade.

Fonte: Araújo and Machado, 2023.

Tabela 1. Distribuição dos pontos de coleta de acordo com os ambientes.

Tipo de ambiente	Pontos
Natural	pnb03; pnb01; pnb02; jbt01; jbt02; jbt03
Urbano	sob01; sob02; sob03; sao01; sao02; sao03; sqn214; sqs303; sqs309; sqs412; sqn313; sqn311
Rural	sob04; sob05; sob06; sao04; sao05; sao06

Em cada ponto foi instalado um gravador digital programável (AudioMoth da Open Acoustic Devices) para a coleta de dados acústicos. Os gravadores foram programados para gerar arquivos no formato *wave* com uma taxa de amostragem de 48 kHz, resolução de 16 bits e monofônicos. A programação determinou que cada arquivo gerado teria duração de 10 minutos com intervalos de outros 10 minutos até o início da próxima gravação, resultando em três arquivos de

áudio por hora. As gravações cobriram o período de 30 minutos antes do nascer do Sol, sendo concluídas duas horas após o nascer do Sol de forma a registrar o período do coro matutino das aves. Os gravadores operaram por um período de 3 dias em cada ponto de amostragem, durante os meses (fevereiro, outubro e dezembro).

2.2 Análises

Todos os arquivos de dez minutos foram cortados para arquivos de um minuto por meio do programa R (R Core Team 2021), utilizando o pacote *tuneR* (Ligges et al., 2018). Em seguida, o pacote *seewave* (Sueur et al., 2008) foi utilizado para as análises e manipulações dos áudios. Os áudios foram organizados em diretórios correspondentes, sempre respeitando a localidade da gravação. Durante o processo de organização, os áudios que estavam corrompidos ou sofreram alguma falha foram ignorados na análise; além disso, no mês de dezembro três aparelhos não funcionaram adequadamente em Sobradinho (urbana), Sobradinho (rural) e no Plano Piloto; e, um aparelho foi roubado em São Sebastião (urbano), consequentemente a coleta nesses pontos foi refeita.

2.2.1 Similaridade acústica

Para a análise da similaridade acústica, utilizei os pacotes *seewave* (Sueur et al., 2008) e o *tuneR* (Ligges et al., 2018) no programa R. Na primeira etapa da análise, ocorreu o cálculo do espectro dos arquivos de forma separada em cada diretório correspondente, esse resultado foi salvo em formato de texto, respeitando o nome do diretório de origem. Na segunda etapa, ocorreu o cálculo da escala Mel Frequency Cepstral Coefficients (MEL), a MEL foi utilizada para reconhecimento a partir de sílabas/elementos, que compõem blocos de construção da vocalização das espécies (Somervuo et al., 2006), nesse processo, utilizei o pacote *seewave* para a análise. O uso da escala MEL foi necessário para que as análises fossem processadas apenas com as características sonoras de interesse, criando uma matriz de armazenamento de dados.

Após a finalização de todos os diretórios, calculei a similaridade entre todos os conjuntos de arquivos resultantes da escala MEL, resultando numa matriz de distância euclideana.. Esse cálculo foi realizado pela função *simpec* programa R (R Core Team 2021) e foi responsável por avaliar a similaridade acústica entre os arquivos presentes na matriz unificada (Bang and Rege 2017).

A matriz resultante do processo do cálculo de similaridade em todos os conjuntos foi empregada na construção de um dendrograma, que fornece uma relação entre os diferentes

ambientes estudados com base em suas características acústicas. Os agrupamentos do dendrograma são baseados na distância entre os pontos analisados, visando demonstrar a semelhança entre os distintos locais analisados (Bang and Rege, 2017). Usamos a função *anosim* do pacote *vegan* (Oksanen et al., 2022) para testar se os valores de similaridade variam entre os grupos de áreas (ou seja, nativas, rurais ou urbanas).

2.2.2 Índices acústicos

A análise da paisagem acústica ocorreu por meio de diferentes índices acústicos que foram calculados utilizando os pacotes *soundecology* (Villanueva-Rivera and Pijanowski 2018) e *seewave* (Sueur et al., 2008) disponíveis no programa R (R Core Team 2021). Os índices acústicos analisados nesta etapa foram: Índice de Diversidade Acústica (ADI) (Villanueva-Rivera et al., 2011); Índice de Complexidade Acústica (ACI) (Pieretti et al., 2011); Índice da Diferença Normalizada da Paisagem Acústica (NDSI) (Kasten et al., 2012); Índice de Uniformidade Acústica (AEI) (Villanueva-Rivera et al., 2011); Índice de Entropia Total (H) (Sueur et al., 2008); e Índice Bioacústico (BI) (Boelman et al., 2007).

O ADI indica a diversidade acústica das espécies que estão presentes em determinado ambiente (Villanueva-Rivera et al., 2011). Já o Índice de Uniformidade Acústica estima a uniformidade sonora, sendo calculado pela função *Gini* em uma seleção de banda de frequências, onde é calculado qual frequência tem maior ocupação na gravação (Villanueva-Rivera et al., 2011). O Índice de Complexidade Acústica busca quantificar de forma direta e rápida as vocalizações das aves, presentes no ambiente (Pieretti et al., 2011). O ACI se baseia na observação de que os sons bióticos (vocalização das aves) são caracterizados por uma variabilidade de intensidade, enquanto alguns tipos de ruído antropogênico (obra, carro, avião e etc) apresentam valores de intensidades constantes (Pieretti et al., 2011). Neste trabalho o ACI foi utilizado para considerar sinais acústicos produzidos dentro da faixa de áudio, sem discriminação posterior dos grupos da biota que foram quantificados.

O Índice de Diferença Normalizada da Paisagem Acústica tem como finalidade estimar o nível de perturbação antropogênica na paisagem sonora (frequência entre 1 e 2 kHz) e estimar a biofonia (frequência entre 2 e 8 kHz) no ambiente acústico (Kasten et al., 2012). A Entropia Total é calculada a partir do produto das entropias temporal e espectral e seu resultado varia entre 0 e 1, de forma que os valores mais próximos de 1 podem indicar um ambiente mais conservado (Sueur et al., 2008). Por fim, o Índice Bioacústico é responsável por estimar a abundância de indivíduos presentes na paisagem sonora, quanto maior o BI mais indivíduos estão presentes nesse ambiente, o

cálculo do BI é feito com os valores da amplitude do som em decibéis e o número de bandas de frequências ocupadas (Boelman et al., 2007; Sueur et al., 2008).

Para a análise dos índices acústicos em áreas naturais e urbanas, foram utilizados apenas os pontos classificados como urbanos (Plano Piloto, Sobradinho e São Sebastião) e naturais (PNB e EEJBB), excluindo os rurais.

Para os cálculos de índices acústicos ADI e AEI consideramos a frequência de sons até 10 kHz, para o cálculo do BI consideramos frequências entre 50 Hz e 10 kHz e para o cálculo do NDSI, consideramos frequências de até 1 kHz para antropofonia e frequências de 2 kHz a 10 kHz para biofonia. Para os cálculos dos índices ACI e H, foram considerados os parâmetros padronizados nos pacotes *soudecology* e *seewave*.

Os parâmetros estatísticos dos índices acústicos foram verificados utilizando o teste de Shapiro-Wilk para verificar o padrão de distribuição dos dados e o resultado demonstrou uma distribuição não normal (ADI: $W = 0.61714$, $p < 0,001$; ACI: $W = 0.54725$, $p < 0,001$; AEI: $W = 0.88515$, $p < 0,001$; NDSI: $W = 0.86042$, $p < 0,001$; H: $W = 0.52261$, $p < 0,001$ e BI: $W = 0.89484$, $p < 0,001$), sendo assim, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, o qual foi realizado para cada índice acústico. Após essa etapa, para uma melhor visualização, realizei a confecção de um boxplot. Também realizei a análise de estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo), para uma melhor compreensão dos dados.

3. Resultados

3.1 Semelhanças entre as paisagens acústicas

Respondendo ao primeiro objetivo específico, que foi a exploração das semelhanças das paisagens acústicas, a análise de similaridade foi realizada comparando as paisagens acústicas de todos os 24 pontos coletados. Os resultados revelaram uma diferenciação clara nas paisagens acústicas entre os ambientes, sendo possível observar agrupamentos distintos no dendrograma obtido, indicando uma separação entre os ambientes urbanos e naturais em dois principais grupos (Figura 1).

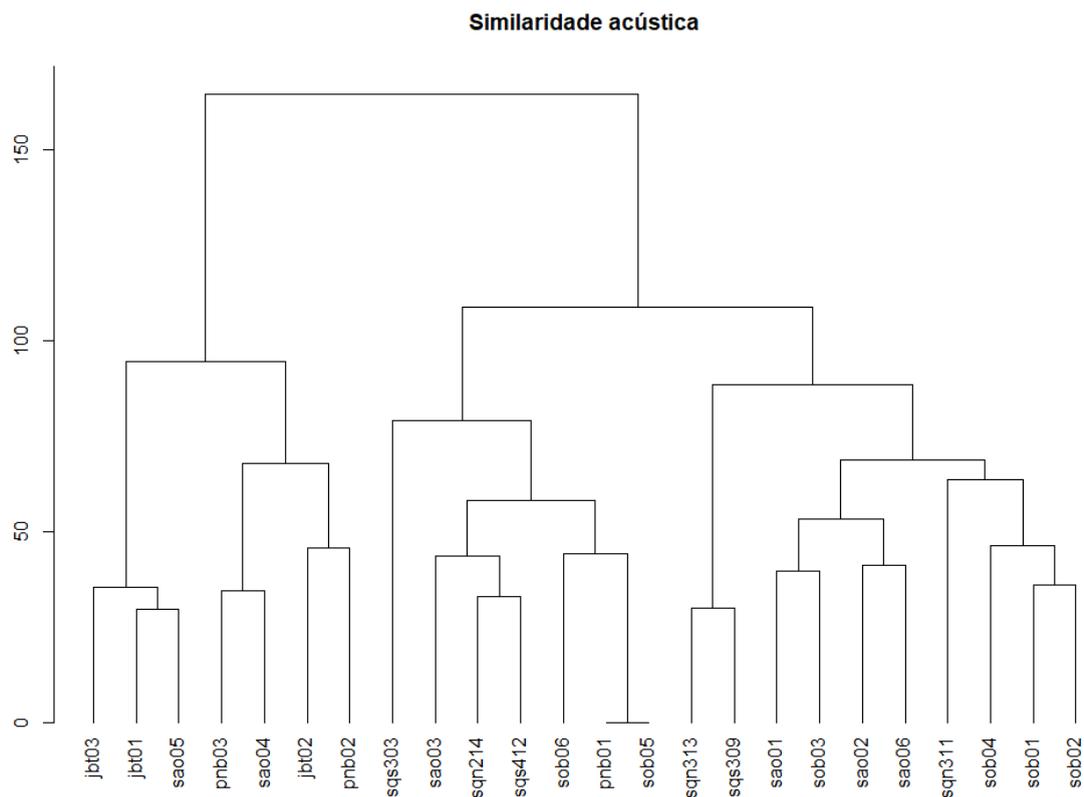


Figura 1. Agrupamentos do ambiente natural e do ambiente urbano.

O primeiro agrupamento da direita para esquerda, agrega principalmente áreas naturais e será tratado aqui como Grupo-Natural (GN). Os resultados presentes neste agrupamento demonstram que dos setes pontos no GN, cinco pertencem a ambientes naturais e dois pertencem a ambientes urbanos, estes últimos dizem respeito à região rural de São Sebastião.

O segundo agrupamento é composto principalmente por áreas urbanas e rurais e será tratado aqui como Grupo-Antrópico (GA). Este grupo conta com a maior parte dos pontos de coleta ($n = 17$), havendo também um ponto localizado no Parque Nacional de Brasília. A análise de similaridade (ANOSIM) foi realizada para testar as diferenças entre as comunidades acústicas das áreas classificadas como nativas, rurais e urbanas. O resultado do teste mostrou que as áreas são significativamente diferentes ($R = 0.1965$, $p = 0.031$), refletindo a complexidade e a heterogeneidade das paisagens sonoras analisadas. Assim, os resultados confirmam que as comunidades acústicas são significativamente diferentes entre as áreas estudadas, embora a separação não seja completa, sugerindo a existência de algumas semelhanças acústicas transversais entre áreas de diferentes categorias.

3.2 Índices acústicos entre os ambientes urbanos e naturais

O teste de Kruskal-Wallis confirmou a hipótese de que existe diferença significativa entre os tipos de áreas analisadas (urbanas e naturais). Os resultados do teste Kruskal-Wallis para os índices acústicos foram: ADI $p < 0,001$ e Chi^2 1176.4; ACI $p < 0,001$ e Chi^2 35.8; NDSI $p < 0,001$ e Chi^2 314.01; AEI $p < 0,001$ e Chi^2 15.797; H $p < 0,001$ e Chi^2 878.31; e BI $p < 0,001$ e Chi^2 13.15. Todos os índices testados variaram significativamente ($p < 0,001$) de acordo com o tipo de ambiente de coleta dos dados. Na análise de estatística descritiva da mediana, foi possível observar numericamente como os Índices Acústicos variam nos ambientes (Tabela 2).

	ADI	ACI	NDSI	AEI	H	BI
Áreas naturais	2.227	750.664	0.698	0.100	0.923	5.378
Áreas urbanas	2.055	764.513	0.508	0.303	0.874	8.687

A análise indicou que os índices acústicos ADI, NDSI e H foram maiores para as áreas naturais, enquanto os índices acústicos ACI, AEI e BI foram maiores para as áreas urbanas (Figura 2).

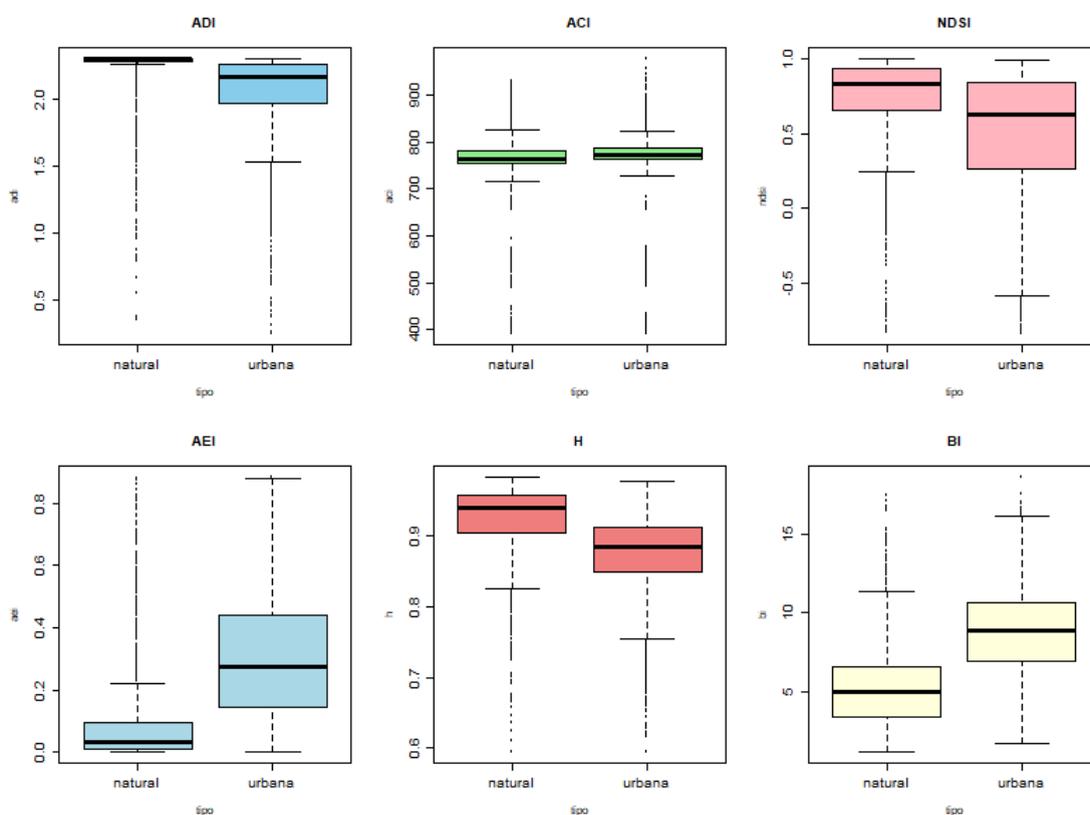


Figura 2. Boxplot dos valores dos índices acústicos no ambiente natural e urbano. Índice de Diversidade Acústica (ADI) (Villanueva-Rivera et al., 2011); Índice de Complexidade (ACI) (Pieretti et al., 2011); Índice da Diferença Normalizada da Paisagem Acústica (NDSI) (Kasten et al., 2012); Índice de Uniformidade Acústica (AEI) (Villanueva-Rivera et al., 2011); Índice de Entropia Total (H) (Sueur et al., 2008); e Índice Bioacústico (BI) (Sueur et al., 2008).

4. Discussão

O objetivo deste trabalho foi analisar as paisagens acústicas do Cerrado do Brasil central explorando as diferenças entre as áreas urbanas e naturais. Trabalhei com a hipótese que previa que as áreas nativas seriam mais similares entre si e as urbanas formariam um cluster à parte, sugerindo uma baixa similaridade entre as áreas. Na segunda hipótese, a previsão era que os índices acústicos (BI, ADI, ACI e H) apresentariam valores maiores para as áreas naturais, do que em as áreas urbanas, confirmando uma diferença clara entre as paisagens acústicas.

A análise de similaridade acústica realizada mostrou uma diferenciação nas paisagens acústicas entre as áreas urbanas e naturais. Foi possível observar dois grupos principais (Fig. 1): o primeiro, agregou principalmente áreas naturais, Grupo-Natural (GN), sendo cinco pontos pertencendo a áreas naturais e dois pontos pertencendo a áreas urbanas; e o segundo agrupamento principal, composto principalmente por ambientes rurais e urbanos, Grupo-Antrópico (GA). Este agrupamento conta com o maior número de pontos ($n = 17$), incluindo um ponto localizado em área natural (Parque Nacional de Brasília). A diferenciação dos ambientes por meio de dois agrupamentos pode sugerir variações marcantes nas paisagens sonoras em função do grau de urbanização. Foi observado em Araújo and Machado (2023) que áreas nativas tendem a gerar valores maiores dos índices ADI, H e NDSI, esses resultados indicam que áreas próximas/nativas podem apresentar uma maior diversidade de espécies, em estudos realizados em Madagascar utilizando sete tipos de uso da terra, foi observado uma menor biodiversidade em ambientes com uso intensivo do uso da terra (Droge et al., 2021).

O primeiro agrupamento GN demonstra setes pontos, sendo que cinco pertencem a ambientes naturais e dois pertencem a ambientes urbanos, estes últimos dizem respeito à região rural de São Sebastião, sugerindo uma maior similaridade acústica entre esses ambientes e uma consistência nas paisagens sonoras entre ambientes menos afetados pela urbanização. A presença de duas áreas urbanas junto ao GN pode indicar uma semelhança nas paisagens sonoras entre esses dois tipos de ambiente. É possível que a ausência ou minimização de ruídos antropogênicos em áreas rurais possa resultar em paisagens acústicas mais semelhantes às das áreas naturais.

Os pontos de ambientes urbanos que formaram o GA podem demonstrar uma maior atividade humana ocasionada por um aumento da antropofonia (Pijanowski et al., 2011), sugerindo uma homogeneidade nas características acústicas entre os ambientes com diferentes gradientes de urbanização e paisagens rurais. Esses resultados sugerem um impacto do ambiente urbano na diversidade acústica, levando a uma padronização ou similaridade entre as comunidades acústicas.

O ruído antropogênico, ou antropofonia, é caracterizado por altas amplitudes e baixas frequências, sendo típico de habitats próximos ou ao redor de paisagens que foram alteradas pela atividade humana (Francis et al., 2009).

De acordo com a literatura, espera-se que a composição da paisagem acústica em áreas nativas seja mais similar, indicando uma baixa similaridade com os ambientes urbanos (Patricelli and Blickley 2006), tal fato colabora com a hipótese e os dados levantados neste trabalho. O GN de fato agrupou as áreas nativas considerando-as mais similares entre si, possivelmente por causa do ruído antropogênico presente nas paisagens acústicas das áreas urbanas.

Os índices acústicos apontam para uma clara variação na composição da paisagem acústica e sugere uma considerável diferenciação na complexidade e diversidade dos padrões sonoros entre os ambientes naturais e urbanos. Essa distinção pode ocorrer por causa da hipótese da adaptação acústica, que prevê que o ambiente em que está inserido o organismo, pode ser uma barreira acústica de transmissão de sinal (Morton 1975; Arasco et al., 2022).

Em meus resultados encontrei valores maiores de ACI para ambientes urbanos, o que é corroborada com o trabalho de Rajan et al., (2018), que observou valores de ACI mais altos para o parque urbano analisado, esse resultado foi gerado pois as gravações percorreram ao longo do dia (Rajan et al., 2018).

O NDSI tem como objetivo estimar nível de perturbação e sons biológicos encontrados nas amostras (Kasten et al., 2012) e em meus resultados, os valores de NDSI nos ambientes naturais foram maiores quando comparados aos valores das áreas urbanas, contrariando a hipótese inicial. A literatura apresenta explicações diferentes para esse resultado, em Rajan et al., (2018) por exemplo, os valores do NDSI foram maiores nas paisagens da reserva natural, foram sustentados pois essa reserva é conhecida como um santuário de aves na Índia, abrindo um número expressivo de espécies raras e ameaçadas de extinção, apresentando uma grande diversidade de aves, o que contribui para valores positivos do NDSI nessa região. No trabalho também foi encontrado valores altos de ADI e BI o que corrobora com o valor positivo do NDSI (Rajan et al., 2018).

Quanto ao Índice de Entropia Acústica é descrito que valores mais baixos podem ser observados em regiões com maior intensidade do uso da terra, o que pode indicar uma menor biodiversidade e um ambiente menos adequado (Droge et al., 2021). Em meus resultados, o índice

H apresenta maiores valores para ambientes naturais, indicando um habitat mais adequado, quando comparado com o ambiente urbano (Droge et al., 2021; Machado et al., 2017).

Em meus resultados, o ADI apresentou valores maiores para as áreas naturais, em comparação com as urbanas, assim como era esperado em minha hipótese de trabalho. Esses dados complementam o trabalho da Araújo and Machado (2023) e enfatizam diferenças significativas entre os ambientes naturais e ambientes urbanos.

Os dados apresentados neste estudo apontam que o AEI é maior para o ambiente urbano, de acordo com a hipótese inicial do trabalho. Valores altos de AEI representam sons em diferentes durações e frequências (Han et al., 2022), indicando uma distribuição mais desigual de vocalizações (Villanueva-Rivera et al., 2011). A literatura descreve que valores com baixa uniformidade acústica podem indicar habitats em boas condições (Fuller et al., 2015), representando baixa variação na intensidade sonora entre as bandas (Han et al., 2022).

Contrariando minha hipótese, meus resultados indicam que o valor do BI é maior para área urbana, isso pode ser possível porque o ambiente urbano é dominado por uma gama de sons antropogênicos, nesse caso o índice pode não estar medindo a biofonia, e sim estar sendo influenciado pelo som antropogênico nas gravações (Fairbrass et al., 2017). Em seu trabalho, Sueur et al. (2008) traz que o cálculo é uma estimativa de abundância de espécies de aves presentes no ambiente, então quanto maior o valor de BI, maior a abundância de aves, porém ressalto que o trabalho foi realizado em duas Florestas Costeiras da Tanzânia. Já o trabalho de Fairbrass et al. (2017) foi realizado em ambiente urbano dentro e ao redor de Londres (Reino Unido), os resultados do artigo vão de acordo com minhas análises, apontando valores maiores de BI em áreas urbanas, onde foi encontrado uma relação positiva entre o BI e a diversidade antropogênica, devias as características de frequência e amplitude do som nesse ambiente (Fairbrass et al., 2017).

A partir dos resultados, foi possível observar uma diferença entre as paisagens acústicas em áreas naturais e urbanas. Na análise de similaridade acústica foi possível observar dois grupos distintos (GN e GA) e a utilização dos índices acústicos demonstrou uma diferença nas paisagens acústicas de acordo com o tipo de área analisada. Em Machado et al. (2017) foram utilizados índices acústicos com a finalidade de medir a biodiversidade de aves no Cerrado Brasileiro juntamente a análises manuais, os resultados mostraram que os índices acústicos (ACI, AEI, BI, H e NDSI) poderiam ser utilizados como representantes da biodiversidade em ambientes naturais do Cerrado. Já Fairbrass et al. (2017) realizou análises no ambiente urbano, e demonstrou que a análise exclusivamente pelos índices acústicos, sobretudo ACI, ADI, NDSI e BI, pode induzir o pesquisador a conclusões precipitadas, já que o ambiente urbano é influenciado por sons não bióticos capazes de enviesar os resultados dos índices acústicos. Dito isto, ressalto que a utilização

de índices acústicos para a comparação de paisagens acústicas em ambientes urbanos deve ser realizada com cautela.

Apesar das ressalvas sobre a utilização dos índices acústicos em áreas urbanas, este trabalho confirma a relevância dos índices acústicos enquanto avaliadores da paisagem acústica e ferramentas auxiliares no planejamento e monitoramento ambiental (Sánchez-Giraldo et al., 2021) de locais com vegetação natural e/ou Unidades de Conservação no Cerrado.

Conclusão

A Similaridade Acústica e os Índices Acústicos foram abordagens complementares utilizadas para o mesmo propósito: avaliar a paisagem acústica em áreas naturais e urbanas no Cerrado do Distrito Federal. Este estudo demonstrou uma diferenciação nas paisagens acústicas entre as áreas urbanas e naturais, apontando uma clara separação entre o GN e o GA tanto na análise de similaridade acústica - onde as áreas nativas foram mais próximas entre si, sugerindo uma baixa similaridade acústica com as áreas urbanas; quanto na análise dos índices acústicos - que apresentaram uma diferença significativa entre as áreas naturais e urbanas, ocorrendo uma relação positiva das áreas naturais com a biodiversidade acústica.

Referências

Arasco, A. *et al.* (2024) 'More than two-fifths of the protected land in a global biodiversity hotspot in southwest China is under intense human pressure', *Science of The Total Environment*, 906, p. 167283. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167283>.

Araujo, A.D. and Machado, R.B. (2023) 'Acoustic communities in an environmental gradient from native to urban areas in Central Brazil', *Austral Ecology*, 48(8), pp. 1941–1960. Available at: <https://doi.org/10.1111/aec.13432>.

Bang, A.V. and Rege, P.P. (2017) 'Recognition of Bird Species from their Sounds using Data Reduction Techniques', in *Proceedings of the 7th International Conference on Computer and Communication Technology. ICCCT-2017: International Conference on Computer and Communication Technology*, Allahabad India: ACM, pp. 111–116. Available at: <https://doi.org/10.1145/3154979.3155002>.

Beecher, M. and Brenowitz, E. (2005) 'Functional aspects of song learning in songbirds', *Trends in Ecology & Evolution*, 20(3), pp. 143–149. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.01.004>.

Boelman, N.T. *et al.* (2007) 'Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: Bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing', *Ecological Applications*, 17(8), pp. 2137–2144. Available at: <https://doi.org/10.1890/07-0004.1>.

Brumm, H. and Slabbekoorn, H. (2005) 'Acoustic Communication in Noise', in *Advances in the Study of Behavior*. Academic Press, pp. 151–209. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0065-3454\(05\)35004-2](https://doi.org/10.1016/S0065-3454(05)35004-2).

da Silva, J.N. *et al.* (2023) 'Highway noise decreases the abundance of an understory rainforest bird', *Emu - Austral Ornithology*, 123(4), pp. 303–309. Available at: <https://doi.org/10.1080/01584197.2023.2253837>.

Dowling, J.L., Luther, D.A. and Marra, P.P. (2012) 'Comparative effects of urban development and anthropogenic noise on bird songs', *Behavioral Ecology*, 23(1), pp. 201–209. Available at: <https://doi.org/10.1093/beheco/arr176>.

Droge, S. *et al.* (2021) 'Listening to a changing landscape: Acoustic indices reflect bird species richness and plot-scale vegetation structure across different land-use types in north-eastern Madagascar', *Ecological Indicators*, 120, p. 106929. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106929>.

Fairbrass, A. *et al.* (2017) 'Biases of acoustic indices measuring biodiversity in urban areas', *Ecological Indicators*, 83, pp. 169–177. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.064>.

Francis, C., Ortega, C. and Cruz, A. (2009) 'Noise Pollution Changes Avian Communities and Species Interactions', *Current Biology*, 19(16), pp. 1415–1419. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.06.052>.

Fuller, S. *et al.* (2015) 'Connecting soundscape to landscape: Which acoustic index best describes landscape configuration?', *Ecological Indicators*, 58, pp. 207–215. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.057>.

Gomes, L. *et al.* (2022) 'Influence of Anthropogenic Sounds on Insect, Anuran and Bird Acoustic Signals: A Meta-Analysis', *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. Available at: <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.827440>.

Han, P. *et al.* (2022) 'The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An

archive for studying soundscape ecology’, *Ecological Informatics*, 12, pp. 50–67. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.08.001>.

Ligges, U.; Krey, S.; Mersmann, O.; Schnackenberg, S. (2018). URL: <https://CRAN.R-project.org/package=tuneR>.

Kasten, E. *et al.* (2012) ‘The remote environmental assessment laboratory’s acoustic library: An archive for studying soundscape ecology’, *Ecological Informatics*, 12, pp. 50–67. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.08.001>.

Kvsn, R.R. *et al.* (2020) ‘Bioacoustics Data Analysis – A Taxonomy, Survey and Open Challenges’, *IEEE Access*, 8, pp. 57684–57708. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978547>.

Luther, D.A. and Wiley, R.H. (2009) ‘Production and perception of communicatory signals in a noisy environment’, *Biology Letters*, 5(2), pp. 183–187. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0733>.

Machado, R., Aguiar, L. and Jones, G. (2017) ‘Do acoustic indices reflect the characteristics of bird communities in the savannas of Central Brazil?’, *Landscape and Urban Planning*, 162, pp. 36–43. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.01.014>.

Marín-Gómez, O. *et al.* (2019) ‘Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation’, *Journal of Environmental Management*, 232, pp. 818–828. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>.

Morton, E.S. (1975) ‘Ecological Sources of Selection on Avian Sounds’, *The American Naturalist*, 109(965), pp. 17–34. Available at: <https://doi.org/10.1086/282971>.

Nemeth, E. and Brumm, H. (2010) ‘Birds and Anthropogenic Noise: Are Urban Songs Adaptive?’, *The American Naturalist*, 176(4), pp. 465–475. Available at: <https://doi.org/10.1086/656275>.

Oksanen J. *et al.* (2022). Community Ecology Package_. R package version 2.6-4, <<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>>.

- Patricelli, G.L. and Blickley, J.L. (2006) 'Avian Communication in Urban Noise: Causes and Consequences of Vocal Adjustment', *The Auk*, 123(3), pp. 639–649. Available at: <https://doi.org/10.1093/auk/123.3.639>.
- Pieretti, N., Farina, A. and Morri, D. (2011) 'A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI)', *Ecological Indicators*, 11(3), pp. 868–873. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>.
- Pijanowski, B.C. *et al.* (2011) 'What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science', *Landscape Ecology*, 26(9), pp. 1213–1232. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9600-8>.
- Podos, J. and Webster, M.S. (2022) 'Ecology and evolution of bird sounds', *Current Biology*, 32(20), pp. R1100–R1104. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.07.073>.
- Proppe, D.S., Sturdy, C.B. and St. Clair, C.C. (2013) 'Anthropogenic noise decreases urban songbird diversity and may contribute to homogenization', *Global Change Biology*, 19(4), pp. 1075–1084. Available at: <https://doi.org/10.1111/gcb.12098>.
- Rajan, S.C. *et al.* (2019) 'Rapid assessment of biodiversity using acoustic indices', *Biodiversity and Conservation*, 28(8), pp. 2371–2383. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1673-0>.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R 330 Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>.
- Sánchez-Giraldo, C., Correa Ayram, C. and Daza, J.M. (2021) 'Environmental sound as a mirror of landscape ecological integrity in monitoring programs', *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(3), pp. 319–328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.04.003>.
- Somervuo, P., Harma, A. and Fagerlund, S. (2006) 'Parametric Representations of Bird Sounds for Automatic Species Recognition', *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 14(6), pp. 2252–2263. Available at: <https://doi.org/10.1109/TASL.2006.872624>.
- Sueur, J. *et al.* (2008) 'Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal', *PLOS ONE*, 3(12), p. e4065. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>.

Sueur, J. *et al.* (2014) ‘Acoustic Indices for Biodiversity Assessment and Landscape Investigation’, *Acta Acustica united with Acustica*, 100(4), pp. 772–781. Available at: <https://doi.org/10.3813/AAA.918757>.

Villanueva-Rivera, L.J. *et al.* (2011) ‘A primer of acoustic analysis for landscape ecologists’, *Landscape Ecology*, 26(9), pp. 1233–1246. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9>.

Villanueva-Rivera L.J.; Pijanowski B.C. (2018). soundecology: Soundscape Ecology. R package version 1.3.3, <<https://CRAN.R-project.org/package=soundecology>>.