



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS – ICB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOLOGIA – PPGZOOOL



RESPOSTAS FILOGENÉTICAS E FUNCIONAIS DE UMA ASSEMBLEIA DE
AVES AOS GRADIENTES DE URBANIZAÇÃO EM UMA METRÓPOLE
AMAZÔNICA

Bruna Kathlen da Silva e Silva

Manaus, Amazonas

Junho/2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - ICB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOLOGIA – PPGZOO



**RESPOSTAS FILOGENÉTICAS E FUNCIONAIS DE UMA ASSEMBLEIA
DE AVES AOS GRADIENTES DE URBANIZAÇÃO EM UMA METRÓPOLE
AMAZÔNICA**

Discente: Bruna Kathlen da Silva e Silva

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Henrique Borges

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Cintia Cornelius Frische

Dissertação de Mestrado apresentada à
Universidade Federal do Amazonas como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação
em Zoologia.

Manaus, Amazonas

Junho/2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586r Silva, Bruna Kathlen da Silva e
Respostas filogenéticas e funcionais de uma assembleia de aves
aos ggradientes de urbanização em uma metrópole amazônica /
Bruna Kathlen da Silva e Silva . 2024
35 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Sérgio Henrique Borges
Coorientadora: Cintia Cornelius Frische
Dissertação (Mestrado em Zoologia) - Universidade Federal do
Amazonas.

1. Metrópole amazônica. 2. Biodiversidade. 3. Ecologia urbana. 4.
Filogenia. 5. Diversidade funcional. I. Borges, Sérgio Henrique. II.
Universidade Federal do Amazonas III. Título

*Dedico este trabalho à minha
família e ao Romeuzinho.*

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui não foi fácil, mas sou imensamente grata pela experiência enriquecedora que foi executar uma pesquisa como esta. Estamos sempre tão ocupados com nossas vidas que às vezes esquecemos de apreciar a natureza no meio da cidade. E tem muita coisa por aí. Particularmente sempre observei isso, e com meu olhar voltado para as aves eu sempre me perguntei como era possível que em meio a tanto barulho, pessoas, prédios e outros elementos urbanos as aves se fizessem presentes. E a resposta para isso se encontra nas próximas páginas.

Quero começar os agradecimentos primeiramente à minha família, por toda égride cedida. Em especial, agradeço à minha irmã Sarah Yasmin, que sempre foi meu porto seguro e local de paz nos momentos que eu mais precisei. Também agradeço aos meus amigos pelo suporte que nunca me falta. Obrigada por tudo, vocês são incríveis. Aqui vai meu mais que muito obrigada ao meu querido orientador, Serginho, por toda orientação recebida, pela preocupação, paciência e por sempre estar me motivando a alcançar resultados melhores. Agora herdei a mania de pôr “_” em quaisquer arquivos, além de ter uma pasta cheia de subpastas. À minha coorientadora, Dr.^a Cíntia: agradeço por todo o auxílio prestado para a conclusão desta pesquisa, muito obrigada mesmo!! Também não poderia deixar de agradecer ao Prof. Fabrício Baccaro, por todas as vezes que salvou meus dados do emaranhado de scripts do R (e claro, por toda paciência e dedicação em atender aos pedidos de socorro). Quero fazer um agradecimento especial a duas pessoas essenciais para que esta pesquisa fosse realizada: Ricardo Almeida e William Santos. O Ricardo foi responsável por procurar os passarinhos por aí, e o Will foi o melhor auxiliar de campo que se poderia ter. Sem vocês não existiria meu trabalho. Cordialmente expresso minha gratidão à Universidade Federal do Amazonas e ao Programa de Pós-Graduação em Zoologia (em especial ao Gil) por todo suporte em prol do meu mestrado. Por fim, agradeço à Agência de fomento FAPEAM pela concessão da bolsa.

**RESPOSTAS FILOGENÉTICAS E FUNCIONAIS DE UMA ASSEMBLEIA DE
AVES AOS GRADIENTES DE URBANIZAÇÃO EM UMA METRÓPOLE
AMAZÔNICA***

Bruna Kathlen da Silva e Silva¹, Ricardo Afonso Machado de Almeida¹,
Cintia Cornelius Frische^{1,2}, João Carlos de Castro Pena³
e Sérgio Henrique Borges^{1,2}

¹ Universidade Federal do Amazonas – Programa de Pós-graduação em Zoologia Av.
General Rodrigo O. Jordão Ramos, 3000, Manaus,
Amazonas, 69077-000, Brasil

² Universidade Federal do Amazonas – Departamento de Biologia

³ Laboratório de Genética & Biodiversidade, Instituto de Ciências
Biológicas, Universidade Federal de Goiás, 74690-900,
Goiânia, Goiás, Brasil

* Esta dissertação foi elaborada no formato de manuscrito preparado segundo
as normas do periódico científico Acta Amazônica.

RESUMO

As variações nas características bióticas e abióticas no interior das cidades promovem a formação de gradientes ambientais. Neste estudo investigamos como estes gradientes ambientais urbanos influenciam os componentes filogenéticos e funcionais das assembleias de aves. Utilizamos dados obtidos de censos de aves realizados em 89 pontos da cidade de Manaus que cobrem variados gradientes ambientais. Quantificamos a diversidade filogenética e funcional através da estrutura taxonômica e de 22 traços ecológicos e morfológicos. A diversidade filogenética do conjunto total de aves foi negativamente afetada pela densidade de bordas, mas não pela cobertura florestal. A linhagem mais diversa de aves (Passeriformes) apresentou perda significativa de diversidade filogenética ao longo do gradiente de cobertura florestal e de ruído. Aproximadamente metade dos traços funcionais testados apresentaram diferenças ao longo do gradiente de cobertura florestal. Os traços filtrados pelos gradientes ambientais urbanos se relacionam principalmente com a nidificação, forrageamento e morfologia. Além disso, diferentes componentes da diversidade funcional (riqueza, regularidade, dispersão e divergência) foram afetados pelos gradientes ambientais. Aparentemente, traços ecológicos categóricos foram mais sensíveis do que os morfológicos às modificações ambientais ao longo dos gradientes de cobertura florestal. A urbanização afeta os componentes filogenéticos e funcionais das assembleias de ave de Manaus como relatado em outras cidades ao redor do mundo. No entanto, as respostas filogenéticas e funcionais aos gradientes ambientais urbanos de Manaus foram complexas e heterogêneas. Nossos resultados sugerem que a melhor estratégia de manejo do espaço urbano para as aves é a preservação de áreas com maior cobertura de ambientais florestais que estejam mais conectadas e com pouco efeito de borda em locais com pouco ruído.

PALAVRAS-CHAVE: Metrópole amazônica, biodiversidade, ecologia urbana, filogenia, diversidade funcional.

ABSTRACT

Variations in biotic and abiotic characteristics within cities promote the formation of environmental gradients. In this study we investigated how these urban environmental gradients influence the phylogenetic and functional components of bird assemblages. We used data obtained from bird censuses carried out in 89 points in the city of Manaus that cover varied environmental gradients. We quantified phylogenetic and functional diversity through taxonomic structure and 22 ecological and morphological traits. The phylogenetic diversity of the total assemblage of birds was negatively affected by edge density, but not by forest cover. The most diverse lineage of birds (Passeriformes) showed significant loss of phylogenetic diversity along the gradients of forest cover and noise. Approximately half of the functional traits tested showed differences along the forest cover gradient. The traits filtered by environmental gradients are mainly related to nesting, foraging and morphology. Furthermore, different components of functional diversity (richness, regularity, dispersion and divergence) were affected by environmental gradients. Apparently, categorical ecological traits were more sensitive than morphological traits to environmental changes along forest cover gradients. Urbanization affects the phylogenetic and functional components of bird assemblages in Manaus as reported in other cities around the world. However, phylogenetic and functional responses to urban environmental gradients were complex and heterogeneous. Our results suggest that the better management strategy of the urban space to birds is the preservation of large and connected areas with greater coverage of forests with little edge effect in places with little noise.

KEYWORDS: Amazonian metropolis, biodiversity, urban ecology, phylogeny, functional diversity.

INTRODUÇÃO

As cidades ao redor do mundo se configuram como um mosaico de elementos naturais e artificiais que servem de habitats para inúmeros organismos (Marzluff, 2001, Santos 2005). A distribuição das condições bióticas e abióticas em gradientes encontrados no interior das cidades influenciam diretamente as assembleias biológicas dos ecossistemas urbanos (Braga, Cerqueira & Oliveira, 2017). Como acontece em ecossistemas naturais, as espécies respondem de modo diferenciado a estes gradientes ambientais urbanos onde algumas espécies, principalmente as nativas e mais especializadas, diminuem em diversidade e abundância enquanto outras respondem de modo positivo aumentando suas abundâncias (McKinney 2006, McKinney 2008, Bergey *et al.* 2020).

Investigar como as espécies respondem aos gradientes ambientais é uma importante estratégia para entender os efeitos da urbanização sobre a abundância e diversidade das espécies. Esta abordagem taxonômica, no entanto, é insuficiente para entender como a urbanização atua como filtro das relações evolutivas entre as espécies bem como das adaptações e funções ecossistêmicas dos organismos. Neste sentido, as diversidades filogenética e funcional são importantes complementos ao componente taxonômico da diversidade biológica (Cianciaruso *et al.* 2009, De Bello *et al.* 2021, Vellend *et al.* 2011).

A diversidade filogenética captura a ancestralidade compartilhada entre as espécies tanto em termos de quantidade de história evolutiva acumulada dentro de uma assembleia quanto de divergência filogenética entre os táxons (Cianciaruso *et al.* 2009). Assembleias compostas por espécies de linhagens proximamente relacionadas são mais “pobres” em diversidade filogenética do que assembleias compostas por espécies de linhagens menos relacionadas (Cianciaruso *et al.* 2009). A diversidade funcional, por sua vez, se refere ao conjunto de atributos ou traços das espécies que podem ser mensurados no nível individual (Violle *et al.* 2007). A diversidade funcional pode ser entendida tanto em termos das respostas das espécies às alterações ambientais quanto aos efeitos dos traços funcionais sobre as funções ecossistêmicas (de Bello *et al.* 2021).

Os gradientes ambientais exercem pressões seletivas sobre as espécies, moldando a estrutura evolutiva e funcional das assembleias. As variações espaciais e temporais das condições bióticas e abióticas criam nichos ecológicos únicos, nos quais as espécies se especializam e se adaptam, incluindo as drásticas alterações ambientais promovidas pela

urbanização. Deste modo, entender como os gradientes ambientais estabelecidos no interior das cidades afetam a estrutura filogenética e funcional é de fundamental importância para o entendimento dos efeitos da urbanização sobre a biodiversidade.

As aves têm sido instrumentais no entendimento dos efeitos da urbanização sobre a diversidade filogenética e funcional (Sacco *et al.* 2015, Sol *et al.* 2017, Sol *et al.* 2020). A perda de diversidade filogenética de aves é documentada em algumas cidades ao redor do mundo, onde em média ocorre uma redução de 450 milhões de história evolutiva nas assembleias de aves que ocupam estas cidades comparadas com os ambientes naturais circundantes (Sol *et al.* 2017). Esta perda drástica de diversidade filogenética, no entanto, é menos evidente em cidades moderadamente urbanizadas. De modo similar, em locais altamente urbanizados ocorre uma redução de pelo menos 20% da diversidade funcional das aves em comparação com os habitats naturais circundantes (Sol *et al.* 2020). No entanto, como acontece com a diversidade filogenética, esta perda de diversidade funcional é amenizada em cidades com urbanização moderada, ou seja, cidades cujo índice de superfície impermeável é proporcional a quantidade de área verde distribuída pelo perímetro urbano.

A influência dos gradientes ambientais resultantes da dinâmica de urbanização sobre a diversidade filogenética e funcional das aves tem recebido pouca atenção em cidades localizadas na faixa tropical do planeta (Aronson *et al.* 2014, Padilla e Sutherland, 2019). O *pool* regional de aves dos ambientes que circundam as cidades tropicais inclui linhagens filogenéticas únicas bem como grupos funcionais que não são encontrados em ecossistemas temperados. Deste modo, é fundamental ampliar os estudos em cidades tropicais para aprofundar nosso conhecimento sobre os efeitos da urbanização sobre a diversidade filogenética e funcional de aves. Além disso, estudos desta natureza podem auxiliar na adoção de estratégias eficientes de manejo da biodiversidade em ambientes urbanizados.

Estudos sobre os impactos do crescimento urbano sobre as aves têm crescido e um dos grupos de destaque nestas pesquisas são os Passeriformes. Com o maior número de espécies catalogadas no planeta, os passeriformes correspondem a 60% do total de aves existentes (Gill & Donsker, 2023). Apesar de serem um dos grupos mais diversos e abundantes de aves, são particularmente sensíveis às mudanças ambientais, e suas respostas à urbanização variam de acordo com suas características ecológicas e comportamentais. Por exemplo, McKinney (2002) apontou que espécies mais generalistas e tolerantes ao distúrbio humano tendem a prosperar em ambientes urbanos,

enquanto espécies especializadas e sensíveis ao habitat são frequentemente excluídas ou sofrem declínios populacionais. Estudos como o de Chace e Walsh (2006) exploram como as aves em áreas urbanas podem ajustar seu comportamento, dieta e padrões de nidificação para se adaptarem ao ambiente modificado, muitas vezes mostrando maior agressividade ou mudanças no repertório vocal para lidar com o ruído urbano. Portanto, compreender a dinâmica dos passeriformes em relação à urbanização é crucial para o desenvolvimento de estratégias de conservação eficazes e para mitigar os impactos negativos da urbanização na biodiversidade das aves.

A proposta deste estudo foi investigar como os gradientes ambientais estabelecidos dentro do perímetro urbano de Manaus, a maior metrópole da Amazônia, afetam a diversidade filogenética e funcional das assembleias de aves. Manaus se localiza na Amazônia Central, uma das regiões mais ricas em diversidade de aves do mundo, onde até 600 espécies podem ser registradas. Nosso estudo foi orientado pelas seguintes questões: **i)** a perda de diversidade taxonômica de espécies de aves ao longo de gradientes de cobertura florestal implica no empobrecimento filogenético das assembleias de aves?; **ii)** quais traços funcionais das aves são filtrados ao longo dos gradientes de cobertura florestal encontrados na cidade de Manaus?; **iii)** quais as respostas filogenéticas e funcionais do grupo Passeriformes em relação aos gradientes de urbanização? **iv)** como os diferentes componentes do espaço funcional das assembleias de aves reagem à redução de cobertura florestal?; **v)** quais indicadores dos gradientes ambientais de escala local (p.ex. nível de ruídos) e de paisagem (p.ex. quantidade de bordas) afetam a diversidade filogenética e funcional das assembleias de aves em Manaus?

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

As aves foram amostradas no município de Manaus que possui uma extensão territorial de 11.401 km², com uma população estimada em mais de dois milhões de habitantes (IBGE, 2022). Apesar de sua enorme extensão, somente 17,19% do município se encontra em áreas urbanizadas (IBGE, 2020). O tipo climático da região de Manaus enquadra-se no subgrupo AF, Clima Tropical Chuvoso (Koppen, 1948), caracterizado por apresentar umidade excessiva durante os meses de janeiro a maio e menores índices de precipitação entre agosto e setembro.

Manaus é conhecida pelo seu Pólo Industrial (PIM) criado em 1967, anteriormente denominado Zona Franca de Manaus (ZFM), que marca o crescimento econômico e urbano moderno da cidade (Cancelli, 2008). O crescimento desordenado de Manaus, especialmente a partir da década de 1980, causou enormes impactos nas paisagens naturais vizinhas à cidade e mesmo as áreas remanescentes de florestas dentro do perímetro urbano da cidade foram reduzidas (Nogueira, 2007). Estes fragmentos florestais urbanos em meio à crescente expansão de Manaus refletem os impactos causados pela urbanização (Figura 1). Atualmente, alguns fragmentos florestais urbanos são oficialmente reconhecidos com áreas protegidas em Manaus incluindo APA Floresta Manaós (750 ha), Parque Sumaúma (53 ha), Parque Municipal do Mindu (40 ha) e o Refúgio de Vida Silvestre Sauim-Castanheiras (109,2 ha).

Manaus possui 63 bairros oficialmente reconhecidos pela administração municipal distribuídos em seis zonas administrativas (Manaus AM, 2010). Estes bairros apresentam grandes variações nas condições socioeconômicas da população e na distribuição de áreas verdes e urbanizadas. Em termos gerais, os setores mais urbanizados são as zonas sul e oeste, existindo um nítido processo de expansão da malha urbana para a zona norte (Figura 1). Em contraste, as zonas leste e oeste apresentam uma maior densidade de áreas verdes (Figura 1).

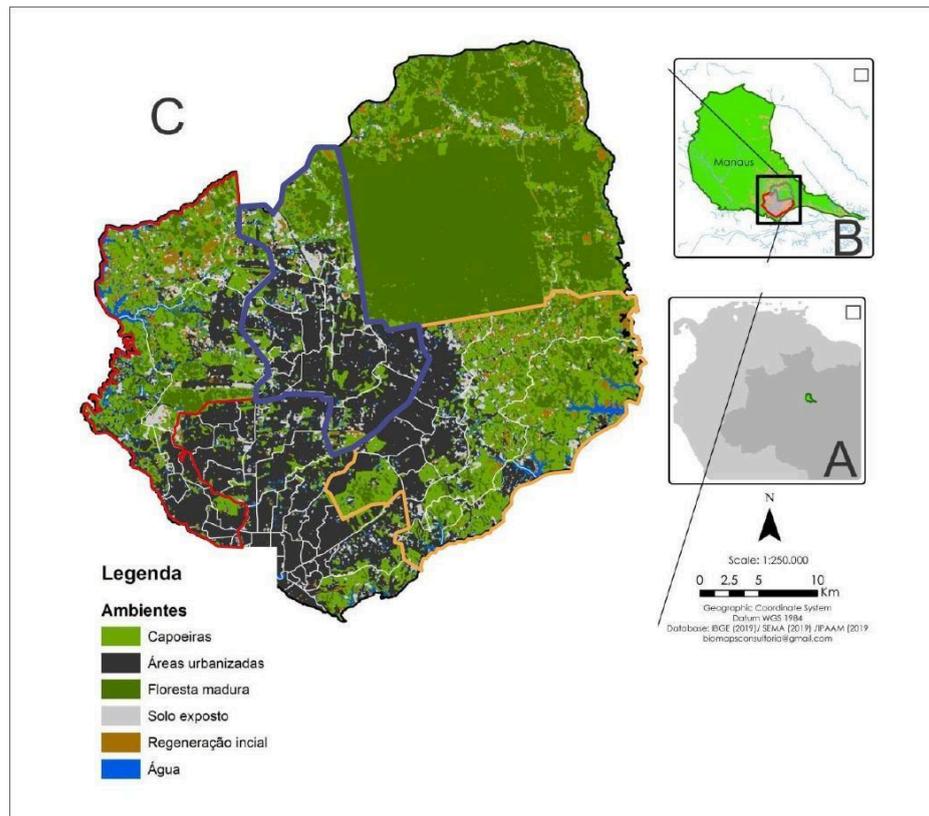


Figura 1. Localização do município de Manaus no norte da América do Sul (A) e na região da Amazônia Central (B). Em C se destaca a região do perímetro urbano do município com as linhas brancas delimitando os bairros da cidade. As classes de uso da terra são baseadas em uma classificação supervisionada a partir de uma imagem de satélite (Landsat, 30 m resolução) de 2017 (adaptada de Fragata *et al.* 2022). Destaca-se também as zonas Norte (roxo), Oeste (vermelho) e Leste (amarelo).

Locais de amostragem

Foram selecionados pontos de amostragem em todas as zonas de Manaus de modo a representar os gradientes ambientais de cobertura florestal. Antes da seleção dos locais de amostragem foi realizado o mapeamento da cobertura do solo da malha urbana, a partir de uma classificação supervisionada de imagens de satélites Planet Team obtidas em 28/06/2021 com três metros de resolução utilizando o algoritmo de máxima verossimilhança do ArcGIS 10.6 (Figura 2). Na classificação foram utilizadas as seguintes classes de uso da terra: vegetação lenhosa (floresta), vegetação herbácea (áreas desmatadas e lotes abandonados) e urbana (superfícies impermeabilizadas como a rede viária, edificações e asfalto).

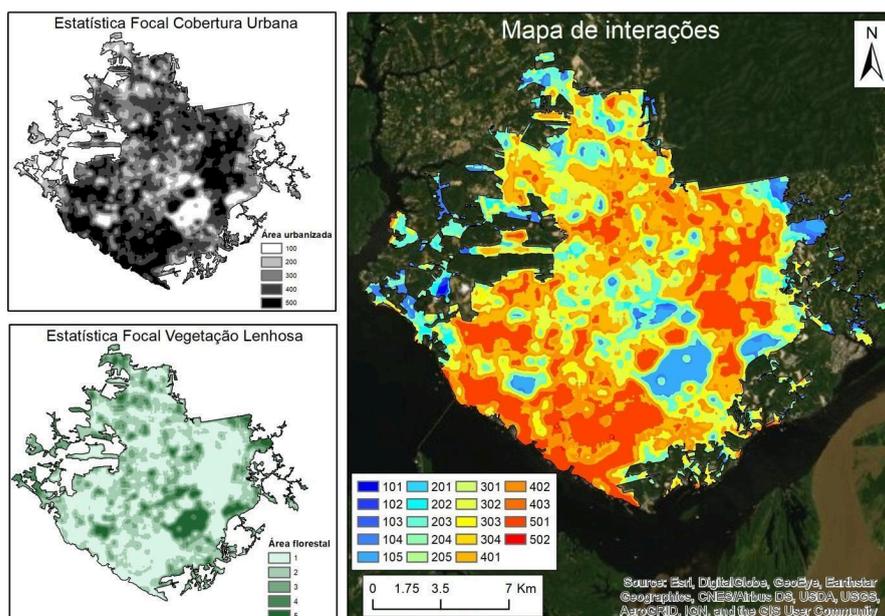


Figura 2: À esquerda, regiões com diferentes quantidades de cobertura urbana (100 indica menor cobertura urbana e 500 maior cobertura urbana) e vegetação lenhosa (1 pouca ou nenhuma vegetação e 5 próxima ou igual a 100%) em um raio de 500m no interior da mancha urbana contínua do município de Manaus (AM). À direita, mapa de interações entre cobertura vegetal e urbana.

Esta classificação supervisionada serviu de base para a seleção dos pontos de amostragem das aves, distribuídos de modo a contemplar tanto áreas altamente urbanizadas quanto áreas com maior cobertura de vegetação (Figura 3). Detalhes sobre os procedimentos de geoprocessamento adotadas podem ser obtidas em Almeida (2023).

Censo das aves e dados ambientais

Neste estudo utilizamos os dados obtidos de Almeida (2023), que amostrou aves para sua dissertação de mestrado focada na caracterização taxonômica das assembleias de aves da cidade de Manaus. A seguir descrevemos brevemente as metodologias de coleta de dados e mais detalhes podem ser obtidos em Almeida (2023). Para a amostragem quantitativa das assembleias de aves foi utilizada a metodologia de contagens em pontos fixos, amplamente utilizada em diferentes ecossistemas, incluindo áreas urbanas (Ralph *et al.* 1996, Anjos *et al.* 2010). As contagens das aves foram realizadas em 87 pontos distribuídos através do perímetro urbano da cidade utilizando como referência o mapa de classificação supervisionada descrito acima (Figura 2). Os pontos de contagem de

aves foram distribuídos de modo a amostrar o máximo de heterogeneidade ambiental nas paisagens de Manaus incluindo desde áreas altamente urbanizadas até áreas dominadas por ambientes naturais (Figura 3).

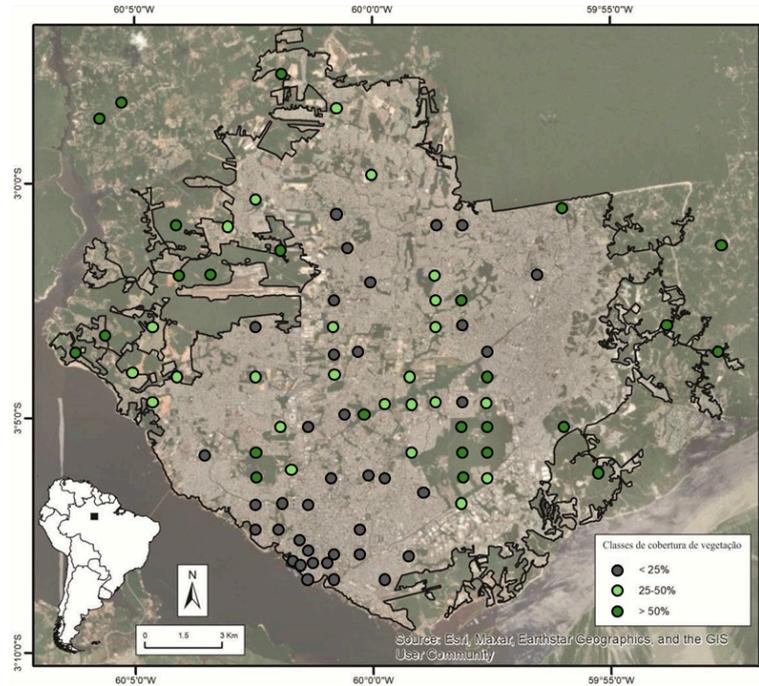


Figura 3. Pontos de amostragem para o censo de aves em Manaus.

Em cada um dos pontos, o observador (Ricardo Almeida) permaneceu por 15 minutos contabilizando todas as espécies e indivíduos de aves detectados por observação direta ou vocalização dentro ou fora de um raio estimado de 50 metros. As contagens foram realizadas entre 06h00min e 09h00min horas da manhã e todos os pontos foram reamostrados em dois dias seguidos. Aves registradas apenas sobrevoando os pontos foram excluídas das análises.

Para a caracterização dos gradientes ambientais encontrados nos pontos de amostragem e no seu entorno foram coletadas variáveis locais e de paisagem. Os dados locais foram obtidos a partir de um raio de 50 metros ao redor do ponto de contagem de aves e foram coletados ao mesmo tempo em que os censos foram realizados. Foram coletados os seguintes dados locais: i) nível de ruído (medido com um decibelímetro), ii) número de pessoas passando pelo ponto, iii) número de veículos automotores, iv) número de árvores ≥ 2 metros.

Adicionalmente, estabelecemos uma área circular com um raio de 500 metros ao redor do ponto dentro do qual foram obtidas as seguintes métricas de paisagem: i)

densidade de bordas, ii) número de fragmentos florestais, iii) área média dos fragmentos, iv) percentagem de cobertura de floresta, v) percentagem de cobertura de área urbana e vi) diversidade da paisagem medida através do índice de Shannon. Estas variáveis foram extraídas do mapa de classificação supervisionada (Figura 2) através do pacote *landscapemetrics* no programa R (Hesselbarth *et al* 2019).

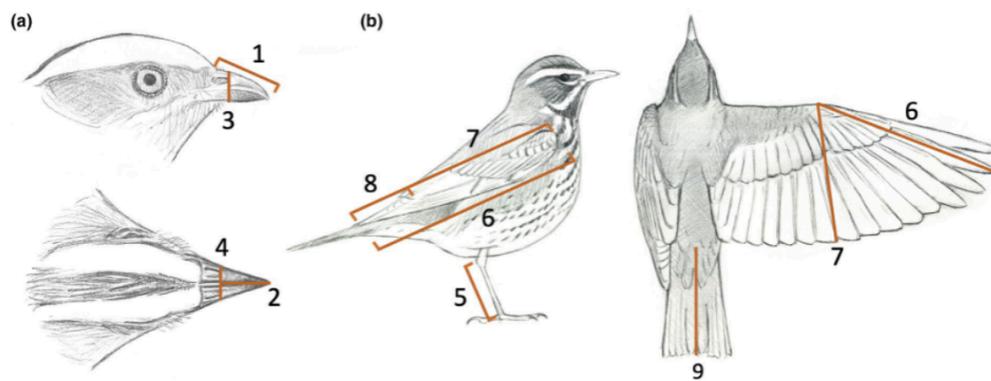


Figura 4. Diagrama de medidas lineares da morfologia das aves apresentado no AVONET (desenhos por Richard Johnson retirados de Tobias *et al.* 2022). Para este estudo, foram utilizadas as medidas 1 (cúlmen exposto), 4 (largura do bico), 5 (comprimento do tarso), 8 (tamanho da asa) e 9 (comprimento da cauda).

Traços funcionais

A diversidade funcional das aves foi quantificada através de atributos funcionais contínuos e categóricos. Os dados contínuos se referem às medidas morfológicas (Figura 4) que afetam a *performance* ou papel das espécies no ecossistema incluindo capacidade de dispersão (p.ex. tamanho e formato da asa), manipulação de alimentos (p.ex. tamanho do bico) e deslocamento (p.ex. comprimento do tarso). Na coleta de dados morfológicos foi utilizado o banco de dados disponível em Tobias *et al.* (2022) do qual foram extraídos os seguintes traços funcionais: i) peso (g); ii) cúlmen exposto (mm); iii) largura do bico (mm); iv) comprimento do tarso (mm); v) comprimento da asa (mm); vi) comprimento da cauda (mm) e vii) índice *hand-wing* (HWI)* (Figura 4). Este último índice tem sido utilizado com sucesso na estimativa de eficiência de voo e capacidade de dispersão (Claramunt, 2021).

Os traços funcionais categóricos das aves foram baseados em comportamento reprodutivo, estrato de forrageamento, flexibilidade no uso de hábitat e dieta tendo sido obtidos para cada uma das espécies utilizando as fontes de dados descritas a seguir:

- i) **Tamanho máximo da ninhada:** informações obtidas principalmente da plataforma de ciência cidadã WikiAves (<https://www.wikiaves.com.br/>) e do banco de dados Avibase (<https://avibase.bsc-eoc.org/avibase.jsp>) e complementada com dados da literatura;
- ii) **Tipo de ninho:** usamos as seguintes categorias descritas por Pacheco e Simões, 2005: a) *ninho em cavidades* onde os ovos são colocados dentro de cavidades naturais ou artificiais, b) *ninho do tipo copo* que são ninhos que lembram uma tigela ou cesto, c) *ninho fechado* onde as paredes envolvem completamente a câmara incubatória e d) *ninho simples* onde os ovos são assentados diretamente sobre os substratos com pouco ou nenhum forro. As informações para este traço foram também obtidas do WikiAves e de Sick (1984);
- iii) **Estrato de forrageamento:** dados adaptados de Wilman *et al.* (2014) onde os estratos de forrageamento foram categorizados em água (juntando várias subcategorias de *water*), chão (*ground*), sub-bosque (*understory*) e estratos superiores obtidos através da junção de estrato médio (*midhigh*), copa (*canopy*) e meio aéreo (*aerial*);
- iv) **Uso de hábitat:** Para o uso de hábitat foi utilizada a base de informações de Stotz *et al.* 1996 que lista os vários hábitats utilizados por cada uma das espécies de aves neotropicais. Foi contabilizado o número de hábitats (variável discreta) utilizados pelas espécies como um indicador da amplitude no uso de hábitat;
- v) **Dieta:** Também baseada numa adaptação da base de dados de Wilman *et al.* 2014 utilizamos as seguintes categorias de dieta: a) *espécies frugívoras/granívoras* cuja dieta é baseada no consumo de frutos e grãos; b) *espécies insetívoras* com dieta dominada por insetos e outros invertebrados; c) *espécies carnívoras* que se alimentam principalmente de vertebrados vivos ou mortos; d) *espécies onívoras:* aves que se alimentam tanto de recursos vegetais quanto animais em proporções similares; e) *espécies nectarívoras:* dieta baseada em néctar de flores.

Os dados supracitados acima foram extraídos baseando-se na lista de espécies de Almeida (2023), onde as espécies do presente estudo foram consultadas nos bancos de dados e seus respectivos traços foram compilados.

*O *hand-wing index* é medido através da diferença entre o comprimento da primeira rêmige primária e o comprimento da primeira rêmige secundária. Valores mais altos no índice indicam aves com asas mais largas, e valores mais baixos indicam asas mais estreitas.

Análise de dados

A diversidade filogenética e funcional das aves foi quantificada através de diversos índices. Análises de diversidade filogenética em aves normalmente se baseiam numa filogenia universal das aves proposta por Jetz *et al.* 2012. Alternativamente, adota-se a estrutura taxonômica lineana das espécies assumindo que a taxonomia reflete bem as relações filogenéticas, utilizando-se índices filogenéticos. De fato, alguns estudos têm demonstrado que as categorias taxonômicas em plantas e aves apresentam boas correlações com filogenias explícitas destes organismos (Heino *et al.* 2015, Cai *et al.* 2018).

Para este estudo, avaliamos a diversidade filogenética utilizando a nomenclatura taxonômica das aves brasileiras proposta pelo Comitê Brasileiro de Registros Ornitológicos (CBRO) (Pacheco *et al.* 2021). Como as decisões taxonômicas do CBRO são baseadas em cuidadosa revisão de filogenias disponíveis, em especial as baseadas em dados moleculares, acreditamos que esta estrutura taxonômica pode ser útil para entender as relações evolutivas entre as espécies estudadas.

Neste estudo, a diversidade filogenética das assembleias de aves foi quantificada através do índice de distinção taxonômica (Delta+) que mede a distância taxonômica que separa todos os pares de espécies de uma amostra ao longo de uma árvore taxonômica (Clarke & Warwick, 1998). Este índice considera dados de presença ou ausência e foi aplicado a todas as espécies amostradas usando os *rankings* taxonômicos de espécie, gênero, família e ordem extraídos de Pacheco *et al.* 2021. Adicionalmente, realizamos uma análise separada considerando somente as espécies da ordem Passeriformes incluindo as categorias adicionais de parvordem e subordem. Para o cálculo desta métrica foi utilizado o programa PRIMER-E (Clarke e Warwick 2001).

Para identificar quais traços funcionais foram filtrados ao longo dos gradientes ambientais estudados calculamos a média ponderada de cada traço na comunidade ou CWM (*Community Weighted Mean*) que quantifica a importância quantitativa de determinado traço funcional nas amostras analisadas. O CWM é calculado através da fórmula: $CWM = \sum pi * xi$, onde: i = espécie na amostra; pi = abundância proporcional daquela espécie e xi = valor do traço funcional.

O conceito de diversidade funcional incorpora diferentes dimensões que não podem ser representadas por um único índice numérico (Mason *et al.* 2005). Neste estudo optamos por utilizar os índices de riqueza funcional (FRic), dispersão funcional (Fdis), regularidade funcional (Feve) e divergência funcional (Fdiv). Selecionamos estes

índices por medirem diferentes aspectos da diversidade funcional (Mason *et al.* 2005, Kuebbing *et al.* 2018). A riqueza funcional (FRic) mede o tamanho do espaço funcional ocupado pelas espécies em uma comunidade. A dispersão funcional (Fdis) mede a distância média das espécies ao centroide do espaço funcional ponderado pela abundância das espécies. A regularidade funcional (Feve) quantifica a regularidade no preenchimento do espaço de características funcionais pelas espécies de uma determinada comunidade com valores variando de 0 a 1. Finalmente, a divergência funcional (Fdiv) é calculada como o desvio de uma espécie individual até o centroide do polígono convexo refletindo mudanças na abundância das espécies com as características funcionais mais extremas (Mason *et al.* 2005).

Os índices de diversidade funcional foram calculados através do pacote FD (função “dbFD”) no software R (Laliberté *et al.* 2014). Foram organizadas duas matrizes de dados, sendo uma com dados de abundância relativa das espécies por pontos de amostragem e outra contendo os traços funcionais descritos acima. Os cálculos dos índices foram precedidos de uma transformação de Gower, uma vez que as matrizes de dados eram compostas por dados categóricos e contínuos (Villéger *et al.* 2008). Transformamos os dados morfométricos em razão logarítmica centrada controlando, assim, o efeito do tamanho do corpo nas variáveis morfológicas.

Neste estudo os gradientes ambientais foram representados de duas maneiras complementares nas análises de dados. Inicialmente, elegemos a cobertura florestal quantificada dentro de um raio de 500 metros ao redor do ponto como um indicador da disponibilidade de hábitat para as aves. Deste modo, classificamos os pontos de amostragens em três categorias de cobertura florestal: classe 1 (< de 25% de cobertura, $n = 37$), classe 2 (25 a 50%, $n = 24$) e classe 3 (> de 50%, $n = 25$). O objetivo desta abordagem foi de testar a influência do gradiente de cobertura florestal sobre a diversidade filogenética e funcional das aves mensuradas pelos índices descritos anteriormente. Testamos as diferenças dos índices de diversidade filogenética e funcional entre os tratamentos (classes de cobertura florestal) através de testes Kruskal Wallis com contraste de Dunn.

Também utilizamos modelos lineares generalizados (GLM) para explorar as relações entre variáveis respostas e preditoras e a abordagem de seleção de modelos usando o critério de Akaike seguindo a abordagem de Pena *et al.* (2017). As variáveis respostas utilizadas nos modelos foram os valores dos índices de distinção taxonômica (Delta+) e os índices de diversidade funcional descritos acima. Nestes modelos, as variáveis

preditoras foram as mensuradas no nível local e de paisagem descritas acima. Após verificar correlação entre as variáveis preditoras excluimos das análises as variáveis número de fragmentos florestais e percentagem de cobertura de área urbana por estarem fortemente correlacionadas ($r > 0.70$) com proporção de cobertura florestal dentro do raio de 500 metros.

RESULTADOS

Durante as amostragens foram contabilizadas 195 espécies de aves pertencentes a 48 famílias (Almeida, 2023). As famílias mais diversificadas e abundantes foram Tyrannidae (29 espécies), Thraupidae (12 espécies), Psittacidae (12 espécies) e Emberizidae (10 espécies). A avifauna de Manaus é composta basicamente por espécies nativas com somente quatro espécies exóticas introduzidas - *Columba livia* (Columbidae), *Estrilda astrild* (Passerelidae), *Passer domesticus* (Passeridae) e *Sicalis flaveola* (Fringiliadae). Excluimos das análises 11 espécies que foram avistadas somente sobrevoando os pontos de contagem. Deste modo, utilizamos dados de 3745 indivíduos distribuídos em 184 espécies amostradas nos 87 pontos de contagem.

Diversidade Filogenética

Considerando todas as espécies amostradas, foram observadas diferenças significativas na riqueza de espécies de aves entre as classes de cobertura florestal (Figura 5A). Locais com maiores quantidades de cobertura florestal abrigam maior riqueza de espécies comparada com locais com menor cobertura florestal, mas não foram encontradas diferenças na riqueza entre a classe intermediária e a de maior cobertura florestal (Figura 5). Em contraste com a diversidade taxonômica, não foram detectadas diferenças significativas na distinção taxonômica (Delta+) entre as classes de cobertura florestal (Figura 5B).

Considerando-se somente as espécies da ordem Passeriformes (54% das espécies amostradas), observa-se que os pontos com menor cobertura florestal também abrigam uma menor diversidade de espécies desta ordem (Figura 5C). No entanto, foi registrada uma diferença significativa na distinção taxonômica entre os Passeriformes quando comparamos os extremos do gradiente de cobertura florestal (Figura 5D). Este resultado sugere que existe perda de diversidade filogenética entre os Passeriformes nas áreas mais urbanizadas da cidade.

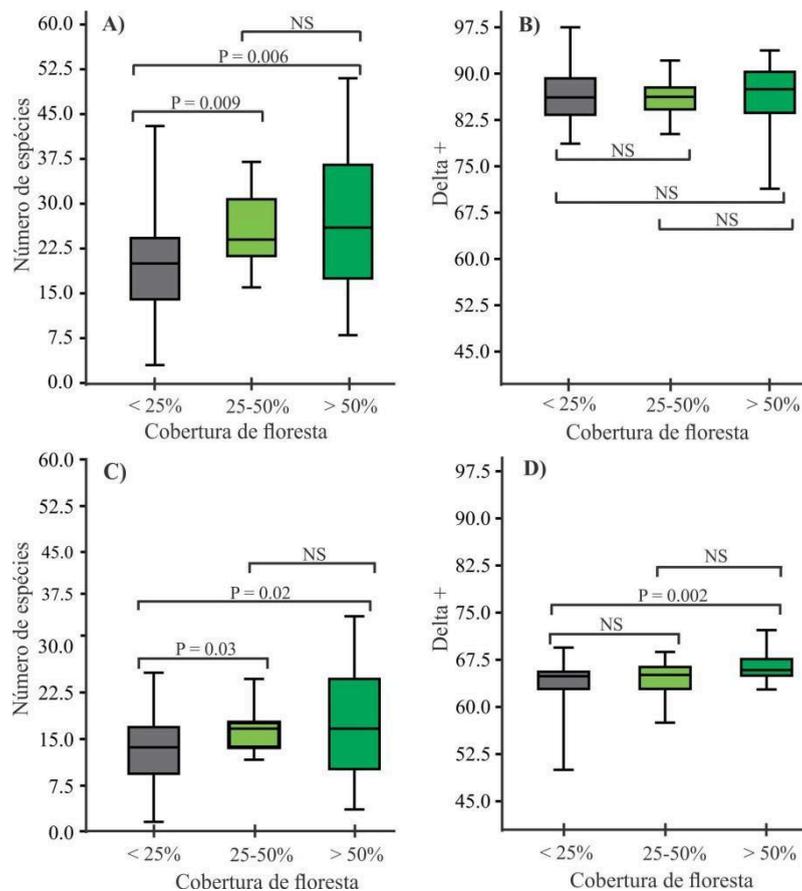


Figura 5. Riqueza de espécies e distinção taxonômica (Delta+) considerando todas as ordens do estudo (A, B) e apenas passeriformes (C, D).

Traços funcionais filtrados no gradiente ambiental

Dos 22 traços funcionais analisados, 10 apresentaram diferenças significativas entre as classes de cobertura florestal (Figura 6). Nidificação em cavidades foi mais frequente nas classes com maior cobertura florestal (25-50% e > 50%) comparado com áreas com pouca cobertura florestal (Figura 6A). Em contraste, espécies que constroem ninhos simples e forrageiam no solo foram mais abundantes em áreas com pouca cobertura de florestas (Figura 6B, C). Espécies que se alimentam de insetos e outros invertebrados e que possuem bicos maiores foram favorecidos em locais com maior cobertura florestal (Figura 6D, E). Locais com menor cobertura florestal foram ocupados preferencialmente por espécies com maiores valores de HWI (Figura 6F).

Outros traços funcionais como construção de ninhos fechados, forrageamento em estratos superiores, frugivoria e bicos mais largos também foram filtrados ao longo do gradiente de cobertura florestal sendo favorecidos em locais com maior cobertura

florestal. Os traços funcionais tamanho da ninhada e a flexibilidade no uso de hábitat não apresentaram diferenças entre as classes de cobertura florestal ($P < 0.05$ em todos os testes KW).

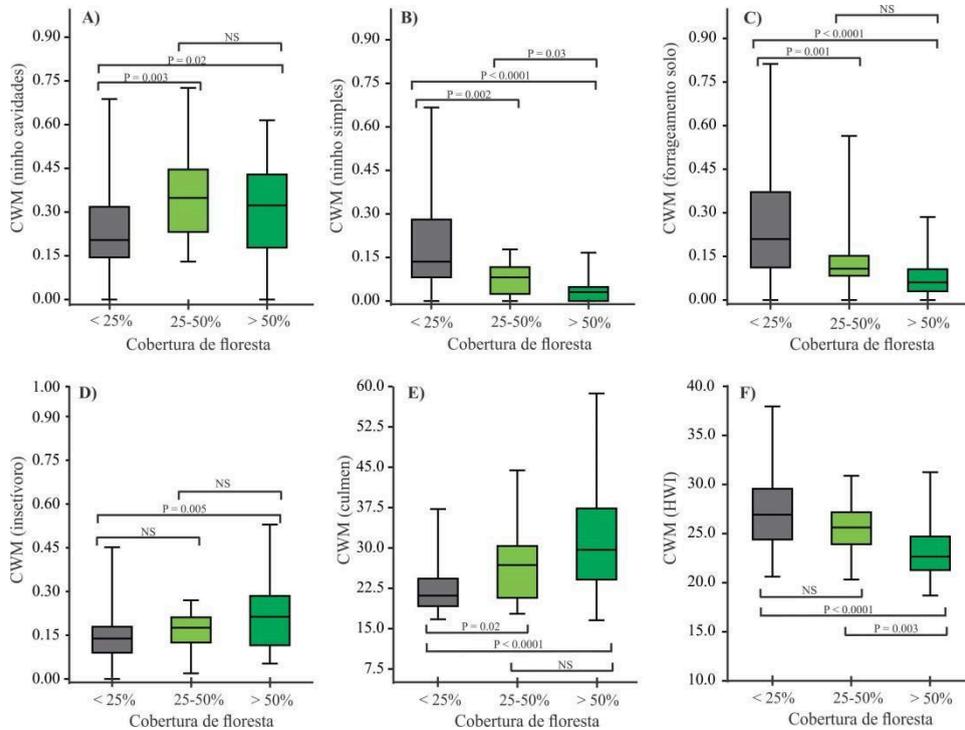


Figura 6. Seleção de seis traços funcionais que apresentaram diferenças significativas no CWM entre as classes de cobertura florestal.

Diversidade Funcional

A riqueza funcional (Fric) foi notavelmente menor nas amostras coletadas em pontos com menor cobertura florestal (Figura 7A). Em contraste, não foram observadas diferenças entre as classes de cobertura florestal na regularidade funcional (Feve) e na dispersão funcional (Fdis) (Figura 7B, D). Estes resultados indicam que a distribuição das abundâncias relativas dos traços funcionais e o tamanho do espaço funcional ponderado pela abundância não são afetados pelo gradiente de cobertura florestal. Na classe com menor cobertura florestal foi observada uma ligeira diferença na divergência funcional (Fdiv) quando comparado com a classe de cobertura intermediária de florestas (Figura 7C).

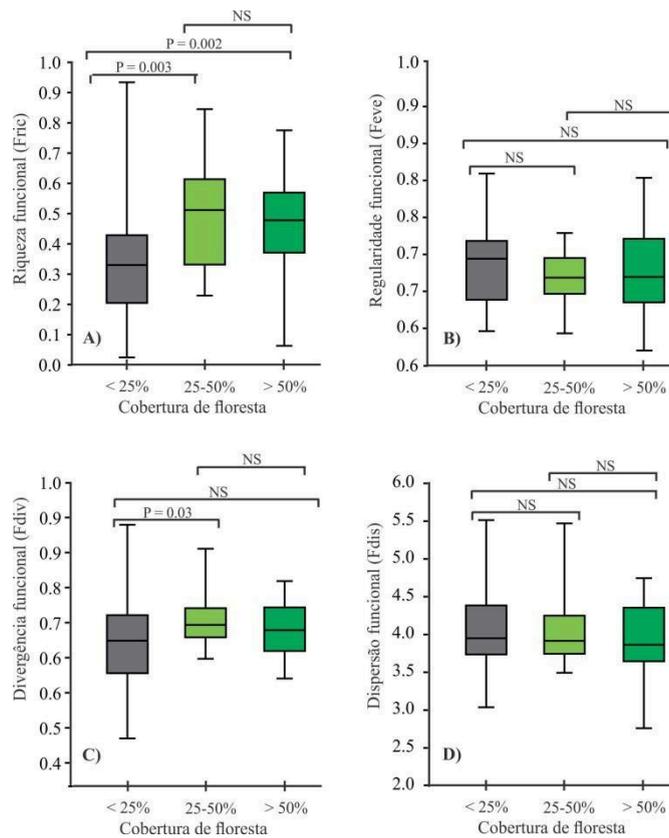


Figura 7. Índices de diversidade funcional considerando todos os traços.

Análises separadas dos traços ecológicos categóricos e dos morfológicos contínuos revelaram padrões diferenciados. Em termos ecológicos, os sítios localizados em áreas com menor cobertura florestal apresentaram maior regularidade e dispersão funcionais (Figura 8B, D). A divergência funcional, por sua vez, foi menor em áreas com maior cobertura florestal (Figura 8E). Considerando somente os traços morfológicos, somente a riqueza funcional foi menor em áreas com menor cobertura florestal (Figura 9).

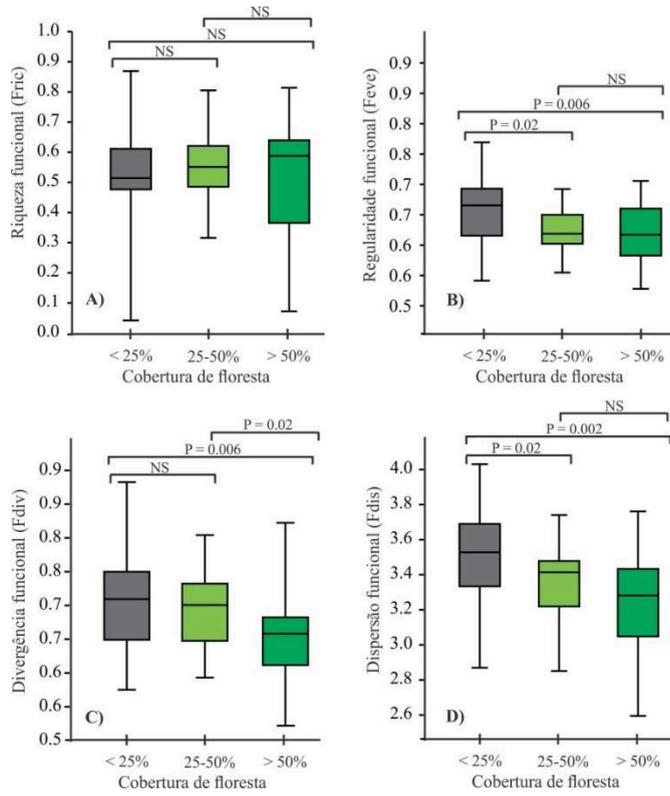


Figura 8. Índices de diversidade funcional considerando apenas os traços ecológicos.

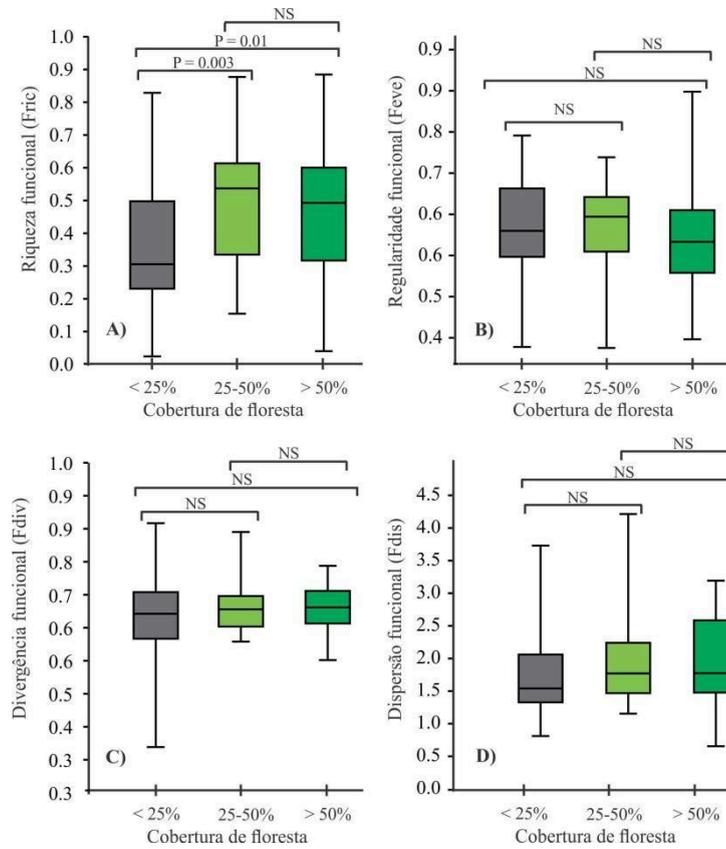


Figura 9. Índices de diversidade funcional considerando apenas os traços morfológicos.

Tabela 1. Variáveis explanatórias que influenciaram a diversidade filogenética e funcionais de aves. Asteriscos indicam valores estatisticamente diferentes nos modelos e os valores entre parênteses são demais resultados.

Variáveis explanatórias	Delta + (todas)	Delta + (Passeriformes)	Fric	Feve	Fdis
Densidade de borda	-0.03** (0.14)	ns	ns	ns	-0.002* (0.03)
Área média dos fragmentos	ns	ns	ns	0.02* (0.11)	ns
Nível de ruído	ns	-0.13* (0.20)	-0.007* (0.19)	ns	ns

521Outras medidas do gradiente ambiental

Das 10 variáveis testadas nos modelos GLM (ver Análise de dados) somente três exerceram alguma influência sobre a diversidade filogenética e funcional (Tabela 1). Considerando todas as espécies de aves, a densidade de borda, uma variável de paisagem, afetou negativamente a distinção taxonômica (Delta+) indicando que a diversidade filogenética é maior em locais com pouco ambiente de borda (Figura 10A). Entre os Passeriformes, locais com alto nível de ruído, uma variável local, apresentaram baixa diversidade filogenética (Figura 10B). O nível de ruído também influenciou negativamente a riqueza funcional (Fric) mostrando que as assembleias que ocupam locais com muito ruído tendem a apresentar um espaço funcional menor (Figura 11A). Em contraste, a área média de fragmentos florestais teve uma influência positiva, ainda que fraca, sobre a regularidade funcional (Feve), sugerindo que as assembleias de aves de locais com fragmentos grandes tendem a ter baixa dominância funcional (Figura 11B).

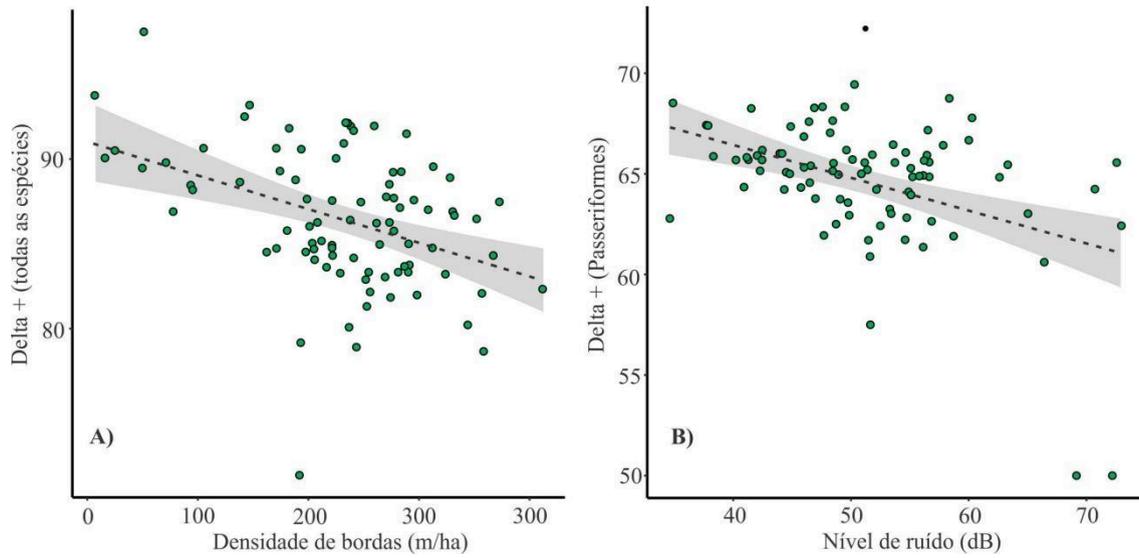


Figura 10. A diversidade filogenética de aves é afetada pela densidade de borda e nível de ruído.

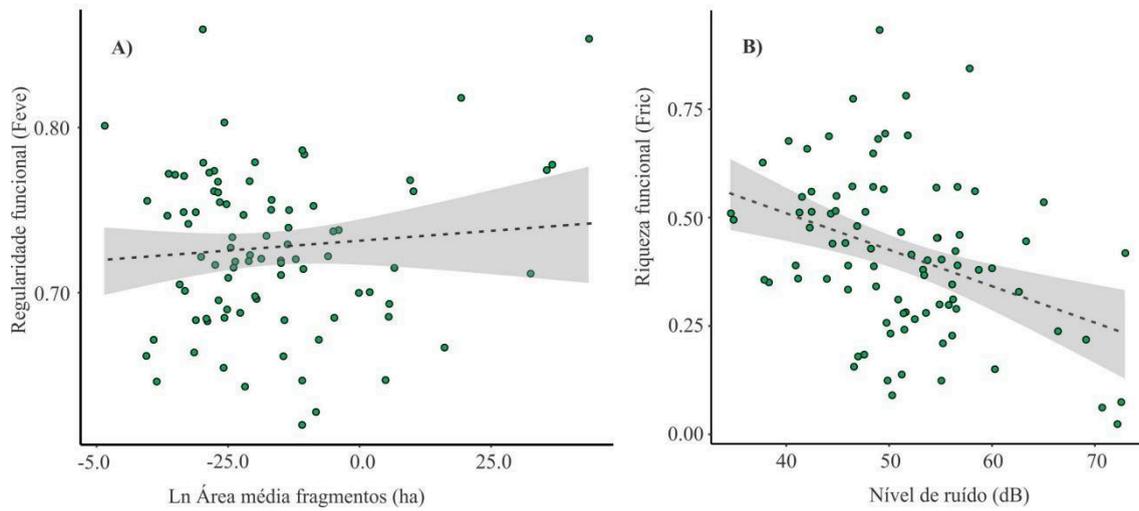


Figura 11. Relação entre índices de diversidade funcional e cobertura de área florestal e nível de ruído.

DISCUSSÃO

Em um estudo prévio Almeida (2023) demonstrou que a diversidade alfa e a composição de espécies de aves foram afetadas pelos diferentes níveis de cobertura florestal em Manaus. Em nosso estudo, estávamos interessados em investigar se estas modificações da diversidade taxonômica nas assembleias de aves de Manaus também se refletiam nas dimensões filogenética e funcional da diversidade biológica. Nossos resultados indicam que as respostas evolutivas e funcionais aos gradientes ambientais de Manaus são complexas e dependem das linhagens e dos traços funcionais analisados e dos indicadores de gradientes ambientais.

A menor diversidade taxonômica em áreas com menor cobertura florestal não implicou em uma perda significativa de diversidade filogenética, considerando todas as espécies amostradas. Este resultado indica que a perda de diversidade taxonômica não implicou em perda de diversidade filogenética ao longo do gradiente de cobertura florestal na cidade, sugerindo que a estrutura evolutiva das aves de Manaus não é tão sensível às variações na cobertura de floresta quanto a diversidade taxonômica medida pela riqueza de espécies. Isso pode ser devido à presença de espécies de uma ampla gama de linhagens evolutivas que sobrevivem em ambientes urbanos (Aronson *et al.*, 2014). Como notado por Bonier *et al.* 2007, as espécies de aves mais tolerantes às modificações de ambiente causadas pela urbanização tendem a ser generalistas de habitat. Nossos resultados sugerem que estas espécies generalistas que se adaptam às condições urbanas provêm de linhagens pouco relacionadas, o que mantém a diversidade filogenética regional. Embora a perda de espécies possa ser evidente em áreas de menor cobertura florestal, a urbanização pode criar novas configurações ecológicas onde espécies com diferentes histórias evolutivas e traços funcionais coexistem, potencialmente promovendo uma resistência do hábitat às mudanças causadas pela expansão das cidades.

Isso não quer dizer que a diversidade filogenética não tenha sido afetada pela urbanização. De fato, a densidade de bordas, outro importante indicador do gradiente ambiental, afetou negativamente a diversidade filogenética total das aves. Neste caso, locais com baixa densidade de bordas tendem a abrigar espécies pouco relacionadas filogeneticamente, elevando a distinção taxonômica das assembleias. Este resultado indica a complexidade das respostas das assembleias biológicas aos múltiplos

indicadores dos gradientes ambientais urbanos, e que nem sempre a quantidade de hábitat é a principal influência, mas sim sua distribuição espacial. Este padrão também foi verificado em cidades europeias, onde a proporção de áreas verdes variou de 2% a 46%, indicando que outras características da paisagem podem exercer efeitos sobre a biodiversidade urbana (Fuller & Gaston, 2009).

Adicionalmente, uma maior diversidade filogenética em áreas urbanas pode refletir a capacidade das cidades de abrigar uma gama de micro-habitats que suportam espécies de diferentes linhagens evolutivas. Esta heterogeneidade de habitats pode ser um resultado da fragmentação urbana, que, paradoxalmente, cria mosaicos de ambientes favoráveis para diferentes grupos de aves, conforme descrito por Marzluff e Ewing (2001). Essa diversidade de microhabitats pode, por sua vez, explicar por que certas espécies generalistas, pertencentes a linhagens filogeneticamente distintas, são capazes de permanecer em paisagens urbanas. Isso sugere que a urbanização pode levar a uma complexidade ecológica que favorece a co-ocorrência de espécies filogeneticamente diversas. Entretanto, a aparente resiliência da diversidade filogenética em face da perda de espécies, combinada com uma significativa redução na diversidade funcional, sugere que os ecossistemas urbanos de fato promovem a homogeneização biológica, mesmo que a diversidade taxonômica e filogenética pareçam menos impactadas.

É importante enfatizar, ainda, que as espécies da ordem Passeriformes apresentaram perda de diversidade filogenética nos extremos do gradiente de cobertura florestal. Morelli (2020) registrou que a cobertura de área urbanizada afetou negativamente a diversidade filogenética deste grupo, sugerindo que espécies mais aparentadas terão sucesso em ambientes muito urbanizados com pouca cobertura florestal. Além disso, os ambientes urbanos são caracterizados por altos níveis de poluição sonora, o que pode ter um efeito adverso na comunicação vocal de passeriformes (Francis *et al.*, 2011). A comunicação é crucial para o acasalamento e a defesa de territórios entre aves, e a poluição sonora pode interferir significativamente nesses processos, forçando as espécies a ajustar seus cantos ou migrar para áreas mais silenciosas. Slabbekoorn e Ripmeester (2008) mostraram que o ruído urbano pode levar a uma perda de informação importante nos sinais acústicos, o que pode, por sua vez, afetar a estrutura social e a dinâmica populacional das aves urbanas. Essa perda de comunicação efetiva pode ter efeitos indiretos na diversidade filogenética e funcional, ao influenciar quais espécies conseguem persistir em ambientes urbanos ruidosos. De fato, locais com alto nível de ruído em Manaus foram caracterizados por assembleias de Passeriformes proximamente

relacionadas. Três espécies exóticas que ocorrem em Manaus são da ordem Passeriformes, e a presença e abundância destas espécies também pode ser um fator explicativo para a perda de diversidade filogenética (Baiser, 2018). Em resumo, a estrutura filogenética das assembleias de aves foi afetada pelas variações do gradiente urbano, mas estas respostas não foram homogêneas entre as grandes linhagens de aves, sendo os Passeriformes aparentemente mais susceptíveis à perda de diversidade filogenética devido à urbanização.

A diversidade funcional também foi afetada pelos diferentes níveis de cobertura florestal em Manaus. Aproximadamente metade dos traços funcionais apresentaram diferenças ao longo do gradiente de cobertura florestal. Traços funcionais associados à nidificação, dieta e capacidade dispersiva foram os mais afetados, demonstrando um forte filtro ambiental da urbanização sobre estes traços. Estes resultados se coadunam com os obtidos por Neate-Clegg *et al.* (2023) em um estudo que inclui inúmeras cidades ao redor do mundo. Curiosamente, o tamanho da ninhada e a flexibilidade no uso de hábitat não foram traços selecionados pelos gradientes de urbanização, o que também foi documentado para a avifauna de Brasília (Santos *et al.* 2024).

Os traços que foram favorecidos em áreas com maior cobertura florestal incluíram a nidificação em cavidades e forrageamento no dossel. Esses traços são frequentemente associados a ambientes mais estáveis e com maior complexidade estrutural de árvores (Bergey *et al.*, 2020). Construção de ninhos simples e forrageamento no solo, em contraste, foram traços mais frequentes em áreas urbanas, e isso se deve à capacidade das espécies de explorar habitats mais abertos e sujeitos a perturbações, como parques urbanos e jardins, locais que são utilizados como refúgios para as espécies em meio à malha urbana (Davis e Glick 1978; Fernandez-Juricic & Tellería, 1999). O índice *hand-wing* em locais com maior urbanização indica aves com melhores capacidades dispersivas, provavelmente devido a necessidade de superar obstáculos encontrados nas cidades.

Os índices que consideram o conjunto dos traços funcionais mostraram que diferentes componentes da diversidade funcional respondem de modo distinto aos gradientes de urbanização. Tanto a regularidade funcional (F_{ave}) quanto a dispersão funcional (F_{dis}) não foram afetadas pela cobertura florestal considerando todos os traços mensurados. Os valores de F_{ave} sugerem que os traços funcionais estão distribuídos de maneira uniforme entre as espécies que ocupam diferentes partes do

gradiente de cobertura florestal. Isso implica que funções ecológicas não estão concentradas em poucas espécies proporcionando um equilíbrio funcional dentro da comunidade. Este padrão pode indicar que, embora a urbanização reduza a diversidade de traços, as espécies adaptadas às cidades ainda conseguem preencher de forma equitativa os nichos funcionais disponíveis, garantindo certa redundância funcional (Díaz & Cabido, 2001).

Em contraste, a riqueza funcional (Fric) foi menor em áreas com menor cobertura florestal sugerindo que a urbanização reduz a variedade de funções ecológicas exercidas pelas aves (Violle *et al.*, 2007) e que a quantidade de floresta afeta o espaço funcional ocupado pelas assembleias de aves em Manaus. Também foi observado que a riqueza funcional diminui em locais com alto nível de ruídos. É importante salientar, no entanto, que a riqueza funcional (Fric) parece ter sido amplamente afetada pelos traços funcionais contínuos (morfológicos) das aves. Resultados semelhantes foram obtidos por Pigot *et al.* 2020, que verificou uma relação intrínseca entre a morfologia das aves e suas funções ecológicas, onde características como tamanho do bico, formato da asa e tamanho corporal estão fortemente ligados à exploração de recursos dentro de um nicho, portanto promovem variações substanciais nas comunidades de aves.

Traços categóricos como tipos de ninho e dieta parecem ter influenciado de modo mais evidente a regularidade, divergência e dispersão funcionais ao longo dos gradientes ambientais estudados. A regularidade funcional (Feve) calculada somente com traços ecológicos demonstrou que as áreas com menor cobertura florestal abrigam assembleias de aves que apresentam maior regularidade funcional. Isso sugere que os escassos recursos encontrados em áreas muito urbanizadas são utilizados de modo mais equitativo pelas comunidades de aves que ocupam esses locais. Espécies com traços funcionais ecológicos mais extremos também parecem ser mais abundantes em áreas com pouca cobertura florestal como indicado pela divergência funcional (Fdis). Tais padrões parecem ser sustentados por uma menor redundância funcional em ambientes urbanizados, entretanto, ainda há perda de diversidade funcional (Sol *et al.* 2020).

De modo similar, a alta dispersão funcional (Fdis) entre os traços das espécies que ocupam áreas altamente urbanizadas demonstra que, apesar da pressão seletiva imposta pela urbanização, existe uma diversidade de estratégias adaptativas que permite a coexistência de espécies com diferentes traços funcionais (de Bello *et al.*, 2010). Este é um aspecto essencial que reflete na adaptação das comunidades às mudanças ambientais e promove a estabilidade ecológica em longo prazo (Mouillot *et al.*, 2013).

CONCLUSÕES

- As consequências da urbanização previamente documentadas para a estrutura taxonômica das assembleias de aves de Manaus se estendem aos componentes filogenéticos e funcionais como relatado em outras cidades ao redor do mundo. No entanto, as respostas filogenéticas e funcionais aos gradientes ambientais urbanos foram complexas e heterogêneas.
- A linhagem mais diversa de aves (Passeriformes) apresentou perda significativa de diversidade filogenética ao longo do gradiente de cobertura florestal e de ruído. Adicionalmente, a diversidade filogenética do conjunto total de aves foi negativamente afetada pela densidade de bordas. Estes resultados indicam que nem todas as linhagens de aves reagem da mesma maneira à urbanização e que algumas destas linhagens respondem a diferentes indicadores dos gradientes ambientais.
- Os traços filtrados pelos gradientes ambientais se relacionam principalmente com a morfologia, nidificação e forrageamento. Adicionalmente, diferentes componentes da diversidade funcional foram afetados ao longo dos gradientes ambientais. Ademais, nosso estudo sugere que os traços ecológicos foram mais sensíveis às modificações ambientais ao longo dos gradientes de cobertura florestal.
- Nosso estudo pode ser útil na adoção de medidas de conservação e preservação ambiental que promovam a diversidade filogenética e funcional de aves nas cidades. Manaus já conta com inúmeros fragmentos e corredores urbanos, mas o crescimento desenfreado da cidade interfere na sobrevivência das espécies. A partir de nossos resultados é possível inferir que a melhor estratégia de manejo é a preservação de áreas verdes maiores, mais conectadas e com pouco efeito de borda em locais com pouco ruído.
- Por fim, o presente estudo destaca a importância de considerar múltiplas dimensões da biodiversidade ao avaliar os efeitos da urbanização sobre as espécies urbanas, enfatizando que as diversidades funcional e filogenética são complementares à diversidade taxonômica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, R. A. M. Como gradientes ambientais influenciam a diversidade de aves em cidades tropicais? Assembleia de aves em uma metrópole amazônica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Zoologia – PPGZOO, Universidade Federal do Amazonas. 2023.
- ANJOS, L. dos *et al.* Bird species composition and richness in an urban area in southern Brazil. *Urban Ecosystems*, v. 13, n. 1, p. 147-161, 2010.
- ARONSON, M. F. J. *et al.* A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. *Proceedings of the Royal Society B*, v. 281, n. 1780, p. 20133330, 2014.
- Avibase – The world bird database. Disponível em:
<https://avibase.bsceoc.org/avibase.jsp>.
- CHACE, J. F., & WALSH, J. J. Urban effects on native avifauna: A review. *Landscape and Urban Planning*, 74(1), 46-69. 2006.
- CIANCIARUSO, M. V. *et al.* Functional and phylogenetic structure of bird communities: A review of the patterns and processes. *Oecologia Australis*, v. 13, n. 3, p. 739-755, 2009.
- BAISER, B., VALLE, D., ZELAZNY, Z., & BURLEIGH, J. G. Non-random patterns of invasion and extinction reduce phylogenetic diversity in island bird assemblages. *Ecography*, 41(2), 361-374. 2018.
- BENINDE, J.; VEITH, M.; HOCHKIRCH, A. Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology letters*, v. 18, n. 6, p. 581-592, 2015.
- BONIER, F.; MARTIN, P. R.; WINGFIELD, J. C. Urban birds have broader environmental tolerance. *Biology letters*, v. 3, n. 6, p. 670-673, 2007.
- BRAGA, R. F.; CERQUEIRA, R.; OLIVEIRA, G. Urbanização e biodiversidade: o que sabemos até o momento? In: Rodrigues, R. R.; Diniz Filho, J. A. F. (Eds.). *Ecologia de comunidades: abordagens ecológicas e evolutivas*. Editora Interciência, 2017. p. 483-508.
- CANCELLI, F. E. Zona Franca de Manaus: Uma análise do processo de implantação e desenvolvimento. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2008.

- CLARKE, K. R.; WARWICK, R. M. A taxonomic distinctness index and its statistical properties. In: PRIMERE LTD (Ed.). *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*. Plymouth, 2001. p. 523-531.
- DAVIS, A. M.; GLICK, T. F. Urban ecosystems and island biogeography. *Environmental Conservation*, v. 5, n. 4, p. 299-304, 1978.
- FERNÁNDEZ-JURICIC E.; Tellería, J. L. Recruitment patterns of blackbirds (*Turdus merula*) in urban fragmented populations. *Ardeola* 46: 61–70, 1999.
- IBGE. Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2022. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>.
- IBGE. Aspectos geográficos do município de Manaus. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>.
- DE BELLO, F. *et al.* Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, v. 19, p. 2873-2893, 2010.
- DIAZ, S.; CABIDO, M.; CASANOVES, F. Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *Journal of Vegetation Science*, v. 9, n. 1, p. 113-122, 1998.
- FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 34, p. 487-515, 2003.
- FULLER, R. A., & GASTON, K. J. Dimensioning the coverage of green spaces in European cities. *Bio. Lett.*, 5, 352-355. 2009.
- GILL, F. B., & DONSKER, D. (Eds.). *IOC World Bird List* (v13.1). 2023.
- HEINO, J. *et al.* A comparative analysis reveals weak relationships between ecological factors and beta diversity of stream insect metacommunities at two spatial levels. *Ecology and Evolution*, v. 5, n. 6, p. 1235-1248, 2015.
- HESSELBARTH, M. H. K. *et al.* landscapemetrics: An open-source R tool to calculate landscape metrics. *Ecography*, v. 42, n. 10, p. 1648-1657, 2019.
- KOPPEN, W. Clima tropical chuvoso: Subtipo Af. Clima do Brasil. 1948.
- LALIBERTÉ, E.; LEGENDRE, P.; SHIPLEY, B. FD: measuring functional diversity from multiple traits, and other tools for functional ecology. R package version 1.012, 2014. Disponível em: <https://cran.rproject.org/web/packages/FD/index.html>.
- MANAUS AM. Prefeitura de Manaus. Plano Diretor Urbano de Manaus, 2010.

- MARZLUFF, J. M. Worldwide urbanization and its effects on birds. In: MARZLUFF, J. M.; BOWMAN, R.; DONNELLY, R. (Eds.). *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. Springer, 2001. p. 1947.
- MCKINNEY, M. L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, v. 127, n. 3, p. 247260, 2006.
- MCKINNEY, M. L. Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals. *Urban Ecosystems*, v. 11, n. 2, p. 161176, 2008.
- MORELLI, F. *et al.* Insurance for the future? Potential avian community resilience in cities across Europe. *Climatic Change*, v. 159, p. 195-214, 2020.
- MOUILLOT, D. *et al.* Rare species support vulnerable functions in high-diversity ecosystems. *PLoS biology*, v. 11, n. 5, p. e1001569, 2013.
- MURCIA, C. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 10, n. 2, p. 5862, 1995.
- NEATE-CLEGG, M. H., TONELLI, B. A., YOUNGFLESH, C., WU, J. X., MONTGOMERY, G. A., ŞEKERCIOĞLU, Ç. H., & TINGLEY, M. W. Traits shaping urban tolerance in birds differ around the world. *Current Biology*, 33(9), 1677-1688, 2023.
- PIGOT, A. L., SHEARD, C., MILLER, E. T., BREGMAN, T. P., FREEMAN, B. G., ROLL, U., ... & TOBIAS, J. A. Macroevolutionary convergence connects morphological form to ecological function in birds. *Nature Ecology & Evolution*, 4(2), 230-239. 2020.
- SANTOS, E. G., WIEDERHECKER, H. C., POMPERMAIER, V. T., GAINSBURY, A. M., SCHIRMER, S. C., MORAIS, C. V. F., ... & MARINI, M. Â. Urbanization reduces diversity, simplifies community and filter bird species based on their functional traits in a tropical city. *Science of the Total Environment*, 173379. 2024.
- SICK, H. *Ornitologia Brasileira*. University of Brasilia Press, 1984.
- SLABBEKORN, H., & RIPMEESTER, E. A. P. Birdsong and anthropogenic noise: Implications and applications for conservation. *Molecular Ecology*, 17(1), 72-83. DOI: 10.1111/j.1365-294x.2007.03487.x. 2008.
- SOL, D. *et al.* Evolutionary divergence in urban birds: A comparative analysis of morphology, ecology, and life history traits. *Evolutionary Applications*, v. 10, n. 7, p. 682695, 2017. DOI: 10.1111/eva.12513.
- SOL, D., *et al.* Urbanization and the loss of phylogenetic diversity in birds. *Ecology Letters*, v. 23, n. 4, p. 661672, 2020.

- STOTZ, D. F.; FITZPATRICK, J. W.; PARKER III, T. A.; MOSKOVITS, D. K. Neotropical birds: ecology and conservation. University of Chicago Press, 1996.
- TERBORGH, J. Diversity and the tropical rain forest. Scientific American Library, 1992.
- TILMAN, D.; LEHMAN, C. L.; THOMSON, K. T. Plant diversity and ecosystem productivity: theoretical considerations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 94, n. 5, p. 18571861, 1997.
- TOBIAS, J. A., *et al.* AVONET: morphological, ecological and geographical data for all birds. *Ecology*, v. 103, n. 5, e3631, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ecy.3631>.
- VILLEGER, S.; MASON, N. W. H.; MOUILLOT, D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, v. 89, n. 8, p. 22902301, 2008.
- VIOLLE, C.; NAVAS, M. L.; VILE, D.; KAZAKOU, E.; FORTUNEL, C.; HUMMEL, I.; GARNIER, E. Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882-892, 2007.
- WikiAves. A Enciclopédia das Aves do Brasil. Disponível em: <https://www.wikiaves.com/index.php>.
- WILMAN, H.; BELMAKER, J.; SIMPSON, J.; DE LA ROSA, C.; RIVADENEIRA, M. M.; JETZ, W. Elton Traits 1.0: Species level foraging attributes of the world's birds and mammals. *Ecology*, v. 95, n. 7, p. 20272027, 2014. DOI: 10.1890/131917.1.