

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 02/12/2021.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE

A acústica como dimensão de comunidades
ecológicas e instrumento para o
monitoramento da biodiversidade

Larissa Sayuri Moreira Sugai

Tese apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ecologia e Biodiversidade.

Dezembro - 2019

A ACÚSTICA
— *como dimensão de* —
COMUNIDADES ECOLÓGICAS
e instrumento para o
MONITORAMENTO DA
BIODIVERSIDADE



LARISSA SAYURI MOREIRA SUGAI

Orientador: **Prof. Dr. Tadeu de Siqueira Barros**

Co-orientador: **Prof. Dr. Thiago Sanna Freire Silva**

Co-orientador: **Prof. Dr. Diego Llusia**

Tese apresentada ao Instituto de Biociências do
Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual
Paulista, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Doutor em Ecologia e Biodiversidade.

Rio Claro – SP, 2019

S947a Sugai, Larissa Sayuri Moreira
A acústica como dimensão de comunidades ecológicas e instrumento para o monitoramento da biodiversidade / Larissa Sayuri Moreira Sugai. -- Rio Claro, 2019
169 f. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro
Orientador: Tadeu Siqueira
Coorientador: Diego Llusia

1. Montagem de comunidades. 2. Comunicação acústica. 3. Ecologia sensorial. 4. Pantanal. 5. Anuros. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: *A acústica como dimensão de comunidades ecológicas e instrumento para o monitoramento da biodiversidade*

AUTORA: LARISSA SAYURI MOREIRA SUGAI
ORIENTADOR: TADEU DE SIQUEIRA BARROS
COORDENADOR: THIAGO SANNA FREIRE SILVA
COORDENADOR: DIEGO LLUSIA GENIQUE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE, área: Biodiversidade pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DIEGO LLUSIA GENIQUE
Departamento de Ecologia / Universidad Autónoma de Madrid


Prof. Dr. LUIS FELIPE DE TOLEDO RAMOS PEREIRA
Departamento de Biologia / Universidade Estadual de Campinas

Profa. Dra. DENISE DE CERQUEIRA ROSSA FERES
Departamento de Zoologia e Botânica / UNESP/Câmpus de São José do Rio Preto


Profa. Dra. MARINA CORREA CORTES
Departamento de Ecologia / UNESP - Instituto de Biociências de Rio Claro - SP

Prof. Dr. VICTOR SATORU SAITO
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde / Universidade Federal de São Carlos

Rio Claro, 02 de dezembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Pelo estímulo e confiança ao longo desta jornada, dedico esta tese à minha amada família: Mãe Marisa, pai José Tadachi, irmãos Joyce, Melina, Massao, Mariana, Tadachi e Carolina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às agências que financiaram meu projeto de doutorado;

Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP), processos #2015/25316-6 e #2017/15772-0; Rufford Foundation Small Grants (19808-1); o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, financiamentos por meio do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (Procad) 07/2013 projeto 88881.068425/2014-01 e Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP) 817737/2015

Às pessoas fundamentais para o desenvolvimento e conclusão do projeto,

Thiago Sanna Freire Silva, meu original orientador pela UNESP e que agora se encontra na Universidade de Stirling (UK), por confiar neste projeto e contribuir na minha formação acadêmica com seu perspicaz ponto de vista;

Diego Llusia, por me supervisionar durante o desbravamento das rotas investigativas com acústica, por me receber em Madrid e suportar durante um ano o ruído em forma de ronco do meu estômago sempre às 11:00, e por abrir diversas oportunidades de colaboração e pesquisa;

Tadeu Siqueira, que gentilmente permitiu-me estabelecer uma base em seu laboratório e que por ventura se tornou o local onde concluo esta tese, sob sua orientação. Por suas sugestões ao longo do desenvolvimento do projeto e durante o fechamento dos manuscritos;

Aos funcionários da UNESP (ou que ali pude conhecer),

Milton, por gentilmente ceder uma parte dos gravadores utilizados neste projeto; Ivana e demais funcionários na Pós-Graduação; Cris, Carlinhos, Amarilis no departamento; Guilherme e Marcos do Erapi; aos professores que ministraram as disciplinas que atendi na pós; Iris, Grazi e demais funcionários da equipe da limpeza; aos porteiros e vigilantes; às funcionárias do RU;

Aos funcionários da UAM (ou que ali pude conhecer),

Manuel Morales por mediar meu período de intercâmbio na universidade; Pablo por ser extremamente solícito;

Aos colegas que passaram pelo Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Biodiversidade da UNESP,

E que fizeram os anos em Rio Claro serem memoráveis, Bárbara, Cleber, Rafaela, Helena, Edineusa, Danielle, Fernanda, Erison, Julia, Claudia, Laura, Paula, Cris Yuri, Xuleta, Neliton e Valeska;

Aos colegas do Ecodyn,

Que compartilharam horas aprazíveis regadas a muito café no saudoso laboratório, Rafaela, Bianca, Carlos, Bruno, Jefferson, Swanni, André, Júlio e João;

Aos colegas que me permitiram ter uma ótima experiência em Madrid,

Leila, Fernanda, Sara, Priscila, Cecília, Ana, Marióla, Iñaki, Jesús, Veronica, Alberto, Júlen, Andrea e Raúl;

A equipe da fazenda Barranco Alto,

Marina, Lucas, Corine e família pelo apoio e por permitir nossas coletas nos limites da fazenda; aos funcionários Sandra, Rosa, Suellen, Fernando, Pica-Pau, Paulo e Bruno;

Aos colegas que se dispuseram a auxiliar as tomadas de dados em campo,

Massao, Thiago, Raul, Carlinhos, Gabriel, Paula, Leonardo, Henrique, Samuel e aos pantaneiros que nos ajudaram a desatolar o quadricilo;

A todas as pessoas de minha família que me motivaram a seguir na ciência,

Mãe, pai, Jojo, Mê, Carol, Mari, Massao, Tchi, Carol, Marcelo e Cris, muito obrigada por toda força;

Vó Wilma, Ilse, Guto e Joey por se tornarem meu centro de gravidade no estado de São Paulo;

Tia Nê, tio João, Lele, Tia kika, César, Poti e minha Batchanzinha, por sempre me motivarem a ser perseverante;

Leleco, Nana, Zézão, Olívia, Yumi, Thor, Himura, Allis, Arya, Bandida, Goku, Bouche, Sasha, Toddy e Killer, *cãopanheiros* anarquistas que nunca tem tempo ruim e sempre dão infinitos motivos para seguir em frente;

Raul, por seu incondicional apoio e carinho durante esses anos e pela maestria em harmonizar as abundantes semifusas nos compassos dissonantes dessa Fuga em Lalá sustentado menor.

APRESENTAÇÃO

Após muito refletir sobre uma transversal retórica que pudesse amarrar os marcos no trajeto que culmina no desfecho desta tese, largo a partir de um dos raros momentos de grandes certezas na vida, quando muito pequena, decidi me tornar “roqueira”. Notavelmente, este desejo foi reprogramado ao longo da vida. Aos 17 e sob inescapáveis efeitos da idade, iniciei a faculdade de Ciências Biológicas motivada pelo abstrato ímpeto de entender a natureza. Motivada a despertar interesse por alguma linha de pesquisa, busquei diversificar em estágios e iniciações científicas, começando por parasitologia de jacarés, invertebrados cavernícolas, dispersão de sementes por bugios, polinização de ipês e genética da mosca da fruta. Também me voluntariei a auxiliar levantamentos florísticos, coletas de aranhas, morcegos, anuros, invertebrados herbívoros, abelhas e fungos endofíticos. Acreditava que, ao diversificar as práticas, em algum momento atingiria um nirvana e então saberia o que seguir na vida. Mas faltou noradrenalina, e isso nunca aconteceu.

Decidi mudar a escala e explorar o sensoriamento remoto como proposta de mestrado. Utilizei medidas de heterogeneidade da vegetação em veredas/brejos no Cerrado e as relatei a comunidades de anuros que meu irmão Massao havia coletado em seu mestrado. *“Interessante o projeto, existe todo um nicho de mercado para monitorar a Amazônia com satélites”*, me saudou um parente, sumariamente ignorando minha explicação sobre o mestrado. Ironicamente, me aproximei de um professor recentemente ingressado no departamento de Geografia da UNESP de Rio Claro que utilizava sensoriamento remoto para monitorar aspectos da vegetação da Amazônia (Thiago!). Essa ponte ocorreu pela minha prima Lelê, que me sugeriu a disciplina de ecologia de paisagem ministrada pelo Milton César Ribeiro, que por sua vez, me sugeriu trocar uma ideia sobre o doutorado com o Thiago Silva.

Nas entranhas destes acontecimentos, ainda não havia desistido de ser roqueira. Participava de uma banda com crescente espaço no cenário alternativo de Campo Grande na época. Quando gravamos uma faixa musical em um estúdio pela primeira vez, fiquei obstinada com o abismo que separava o som que tocávamos ao vivo e som gravado profissionalmente. Era literalmente o oposto de conhecer uma faixa de um álbum e a escutar ao vivo. Durante as gravações, me perguntaram se eu colocaria elementos que não estariam presentes ao vivo. Por um lado, era interessante

explorar novas possibilidades sonoras, e por outro, seria injusto se não fosse capaz de apresentá-las ao vivo. Esse impasse me motivou a utilizar pedais de efeito e a prezar pela qualidade do som, de forma a minimizar potenciais fenômenos acústicos (como a famosa microfonia) a partir de equalizadores e de configurações em mesas de som. Paralelamente, comecei a ter contato com trabalhos propondo o conceito de paisagens sonoras (sons ambientais) e de investigações sobre as dinâmicas dessas paisagens sonoras. Foi então que me convenci a aproximar a acústica à ecologia como uma linha investigativa, o que me induziu a buscar visões integrativas de áreas como comunicação animal, ecologia comportamental, ecologia de comunidades e sensoriamento remoto.

Dessa forma, eu e Thiago concebemos o projeto de doutorado propondo abordar o papel de interações acústicas na organização das comunidades. Além do sensoriamento remoto a partir de ondas eletromagnéticas, estávamos adentrando ao monitoramento de ondas sonoras produzidas por animais. Essa é uma tendência relativamente nova em ecologia, onde espécies que usam comunicação acústica podem ser registradas e associadas a uma coordenada geográfica. Entramos em contato com um pesquisador influente na área (Jêrome Sueur) para apresentar nossas ideias, que por sua vez, sugeriu que procurássemos o Diego Llusia, que passava uma temporada em Goiânia em função de seu projeto financiado pela *Marie Skłodowska-Curie Actions* (União Europeia). Trocamos alguns e-mails sobre o projeto que foram essenciais para consolidar as ideias propostas à Fapesp (Fundação de amparo à pesquisa do estado de São Paulo), que por fim aceitou financiar minha bolsa de doutorado.

Ao decorrer do projeto, identificamos a necessidade de sintetizar os muitos trabalhos que lançavam mão desta abordagem. Realizamos um levantamento sistematizado da literatura e revisamos as tendências dos estudos utilizando monitoramento acústico em ambientes terrestres (*capítulo I*), e uma síntese sobre os desenhos amostrais utilizados nesta literatura (*capítulo II*). O momento foi bastante oportuno para lançar esses trabalhos, que foram aceitos para publicação em revistas científicas (*BioScience* e *Remote Sensing in Ecology and Conservation*). Ainda, durante meu estágio na *Universidad Autónoma de Madrid* sob a supervisão do Dr. Diego Llusia, escrevemos uma opinião sobre o valor futuro das gravações ambientais que estão sendo realizadas atualmente, como um paralelo às cápsulas do tempo (*prólogo*), que também foi publicado (*Ecological Indicators*).

Os seguintes capítulos são frutos do nosso projeto de monitoramento acústico de anuros no Pantanal (figuras 1 e 2) e são aqui apresentados como manuscritos a serem submetidos. No *capítulo III*, utilizamos as características acústicas e as relações evolutivas entre as espécies para caracterizar as comunidades. Seleccionamos comunidades que representassem locais abrangendo um gradiente desde lagoas em um contexto florestal até lagoas em paisagens dominadas por gramíneas, as quais representam feições do mosaico de vegetações existentes no Pantanal. Geramos expectativas teóricas baseadas em hipóteses que previam um determinado arranjo do perfil acústico das comunidades de acordo com pressões seletivas ou interações sociais, e contrastamos essas expectativas com nossas observações. Já no *capítulo IV*, investigamos como a composição das espécies nas comunidades variam durante o período de atividade diária das espécies (ao decorrer da noite). Essa abordagem considera que as espécies apresentam diferentes padrões de atividade em seus turnos de vocalização. Dessa forma, investigamos se essas diferenças são detectáveis a partir da perspectiva de comunidades e se as características ambientais experimentadas por estas influenciam em maior ou menor grau as diferenças de composição em curto prazo.



Figura 1. Lagoas e formações vegetacionais típicas da região sul do Pantanal (Nhecolândia), localizadas na fazenda Barranco Alto, município de Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil. Dispomos gravadores autônomos acústicos para gravar a atividade de espécies de anuros em 39 lagoas.

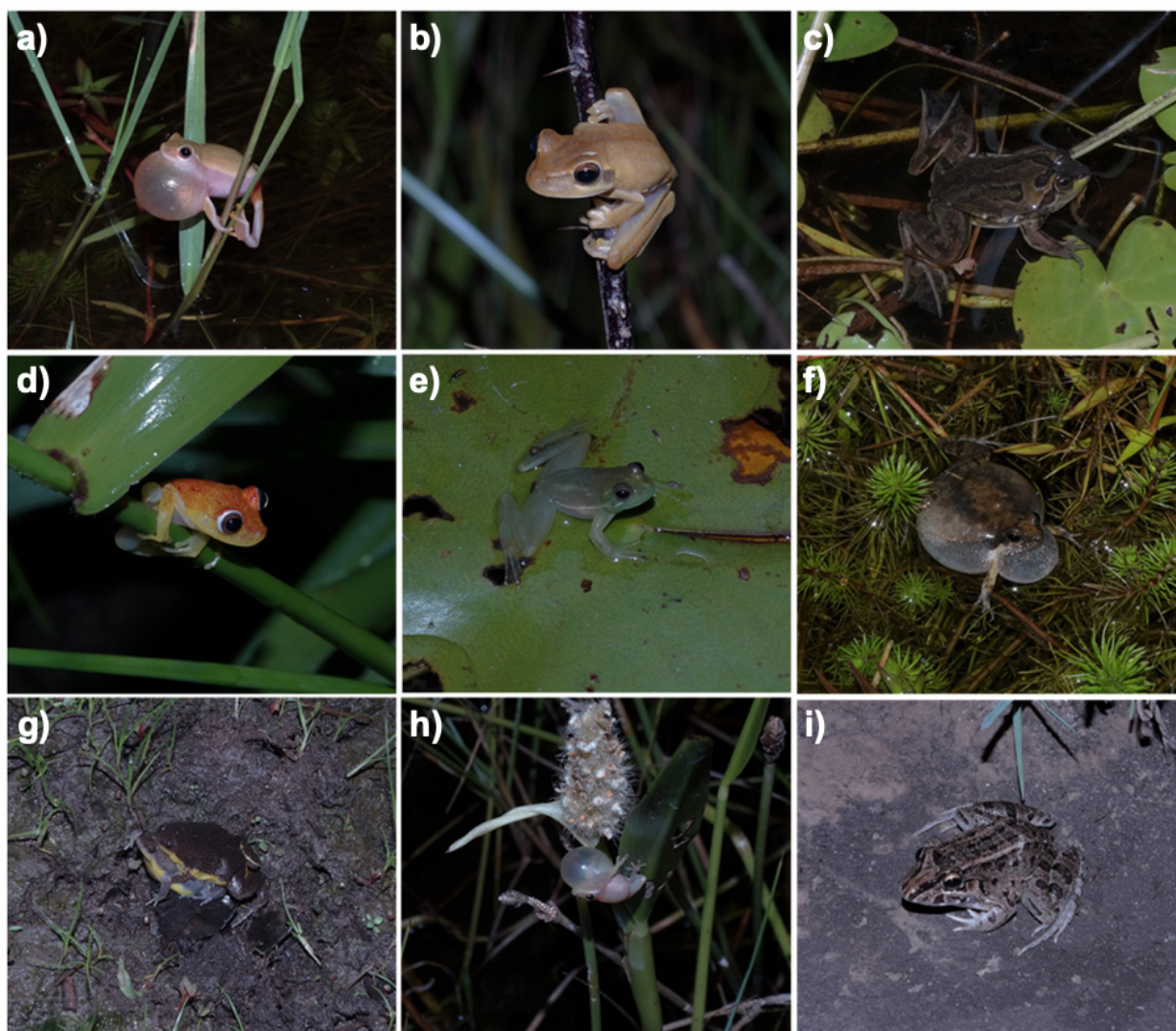


Figura 2. Algumas das espécies registradas durante o monitoramento acústico de anuros em lagoas localizadas na região sul do Pantanal: a) *Dendropsophus elianeae*, b) *Hypsiboas raniceps*, c) *Pseudis paradoxa*, d) *H. punctatus*, e) *Lysapsus limellum*, f) *Physalaemus albonotatus*, g) *Elachistocleis matogrosso*, h) *Scinax fuscomarginatus*, i) *Leptodactylus chaquensis*.

Para apresentar o conteúdo relacionado a este projeto, apresento uma introdução geral composta por três seções, onde discorro os alicerces teóricos respaldados nos capítulos (figura 3). Na seção I, convido o leitor a uma introspecção acerca de aspectos filosóficos sobre construção do conhecimento na ciência e na ecologia. Na seção II, apresento bases conceituais sobre os principais temas subjacentes aos capítulos III e IV: ecologia de comunidades, ecologia da informação e comunicação acústica. Finalmente, na seção III discuto sobre aspectos relacionados a amostragem (escala e período de observação) e como novas tecnologias podem auxiliar a preencher lacunas de conhecimento em ecologia. Busco ser sintética nestas

seções introdutórias, conduzindo a narrativa para desembocar o referencial argumentado nos quatro capítulos aqui apresentados.

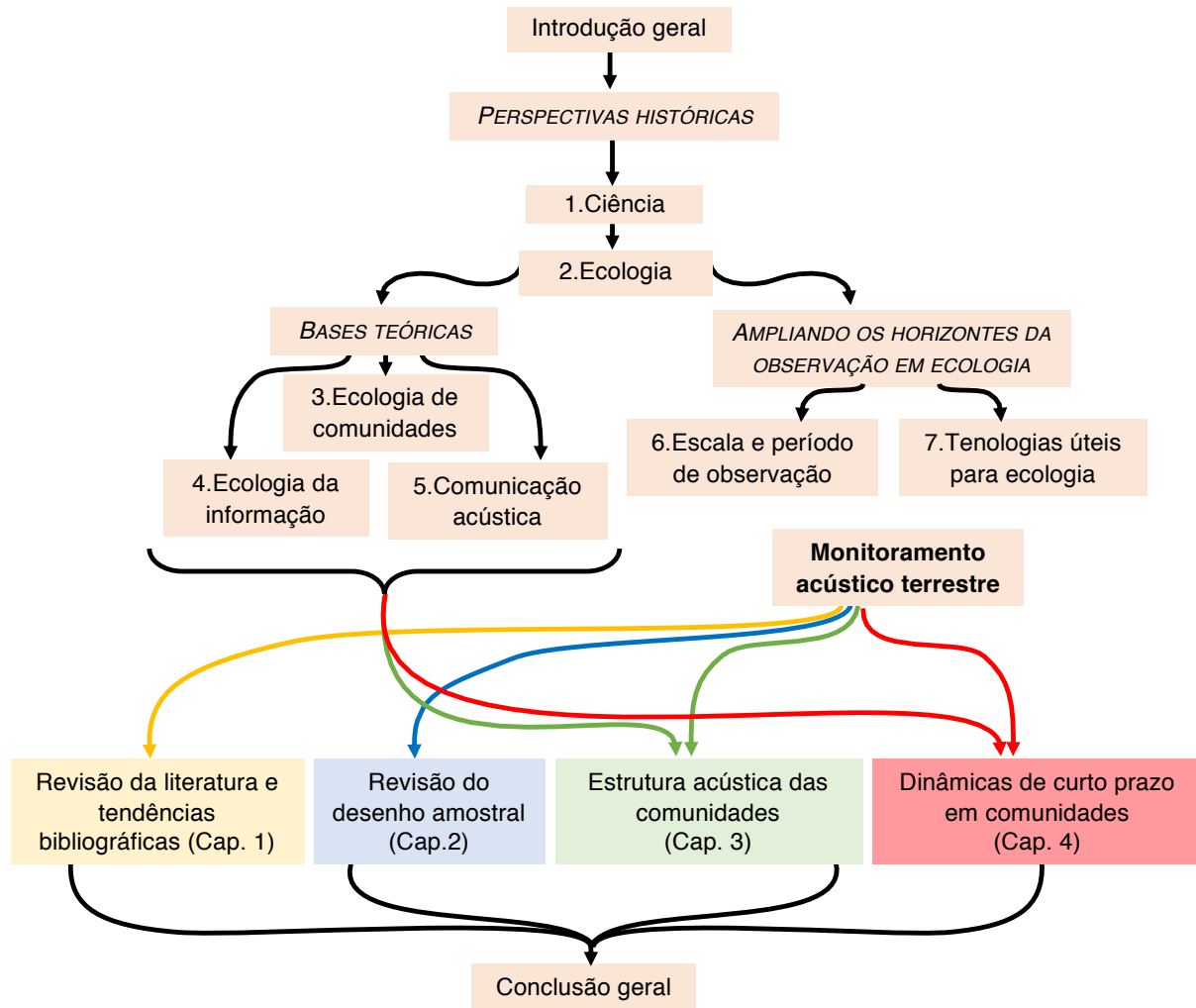


Figura 3. Estrutura desta tese de doutorado, com uma introdução geral composta por três seções, as quais apresentam os tópicos abordados nos quatro capítulos (caixas coloridas).

RESUMO

A natureza é ruidosa. Passarinhos gorjeiam enquanto o vento silva ao pentear os campos com abelhas e seus zunzuns rondando flores. Desatentos, deixamos de notar uma incrível quantidade de elementos retumbando em nosso entorno. No entanto, cada som parte de uma fonte, deixando uma pista sobre a situação na qual foi produzido. Podemos identificar a espécie de passarinho pelo seu canto, e, quem sabe, revelar a passagem de uma espécie migratória. A imagem de um campo nos é desperta ao escutar o vento soprando por gramíneas, que ressoaria diferente se soprasse por uma floresta. Por conseguinte, podemos registrar a atividade acústica dos organismos e descrever as dinâmicas de ecossistemas através de um conjunto de técnicas oferecidas pelo *monitoramento acústico passivo*. Além disto, os diversos sons emitidos por animais são produzidos sobretudo para fins reprodutivos e territoriais. Sua produção possui elevado custo energético e influencia se a performance de um organismo resultará em saldo positivo para a perpetuação de seus descendentes. Diante disso, alguns percalços no caminho entre a emissão e a recepção desses sons podem adulterar suas características e inviabilizar seu reconhecimento. Por serem ondas mecânicas, a vegetação pode refratar e absorver elementos dos sons emitidos por animais. Ou ainda, em grandes agregações, como os coros por aves no amanhecer e por anuros e invertebrados ao ocaso, os diversos sons podem gerar interferências. Em ambos os casos, a degradação sonora pode comprometer o sucesso reprodutivo das espécies. Contrariamente, uma outra perspectiva prevê que esses percalços não seriam tão custosos assim, e que na verdade os sons emitidos intermediam interações entre diferentes espécies podendo influenciar a distribuição dos organismos. Isto posto, tive como objetivos nesta tese i) sumarizar aplicações do monitoramento acústico em ecologia e conservação e ii) investigar a organização de comunidades de anuros no Pantanal sul-matogrossense a partir de seus aspectos acústicos e de uma alta precisão temporal para representar as comunidades. Para tal, começo com um *prólogo* que traça um paralelo entre o conjunto de gravações acústicas obtidos atualmente à “cápsulas do tempo” que no futuro, podem se tornar registros únicos do passado dos ecossistemas. Em sequência, os dois primeiros capítulos buscam sintetizar aplicações e tendências bibliográficas sobre monitoramento acústico passivo em ambientes terrestres, sendo o *primeiro capítulo* uma revisão sistemática da literatura. No *segundo capítulo*, resumo os desenhos amostrais utilizados e apresento diretrizes para otimizar a amostragem. A segunda parte da tese é destinada a investigação da organização de comunidades de anuros através de monitoramento acústico. No *capítulo 3*, caracterizo as comunidades a partir de atributos das vocalizações dos anuros e investigo se o espaço acústico estaria arranjado de forma a minimizar potenciais interferências na comunicação. Em geral, as comunidades foram constituídas por espécies acusticamente similares, e aquelas comunidades contendo espécies mais distintas filogeneticamente apresentaram maior similaridade acústica. Esses resultados sugerem que, sob uma perspectiva acústica, as comunidades podem estar organizadas em função do uso de informação a partir dos sinais acústicos umas das outras. No *capítulo 4*, analiso as comunidades de anuros a partir de um recorte temporal bastante preciso, onde variações dentro do período de atividade diária das espécies são consideradas. As

comunidades apresentaram a maior parte das espécies ativas no começo do período noturno, com conseguinte decaimento ao longo da noite. Essa variação em curto prazo é maior em locais cujo ambiente é estruturalmente mais complexo, sugerindo contundentes dinâmicas temporais de curto prazo associadas a periodicidade e ao ambiente. Isso implica que essas dinâmicas podem modular interações entre espécies e, por consequência, refletir na estruturação das comunidades. Por fim, espero que essa tese possa estimular o uso do monitoramento acústico em pesquisas ecológicas, e apresentar novas perspectivas, a partir da acústica, sobre o funcionamento de comunidade ecológicas.

Palavras-chave: montagem de comunidades, comunicação acústica, anuros, Pantanal, ecologia da informação

ABSTRACT

Nature is noisy. Birds chirps while the wind whistle when brushing the fields, with bees buzzing around flowers. Meanwhile, our absence of mind prevents us to notice many elements rumbling on our surroundings. However, each sound has a source that leaves clues about the situation in which it was produced. The songbird can be identified by its song and eventually reveal the passage of a migratory species. The wind blowing through the grass quickly resemble the image of a field that would otherwise sound different if it blew through a forest. Therefore, such acoustic activity of the organisms can be recorded and used to describe ecosystems dynamics through a set of techniques included in *passive acoustic monitoring*. In addition, sounds emitted by animals are produced mainly for reproductive and territorial purpose. Its production is costly and influences whether the performance of an organisms will lead a positive balance for the perpetuation of its descendants. As such, obstacles on the path between sound emission and reception may distort its characteristics and impair sound recognition. As sound are mechanical waves, vegetation can refract and absorb elements on the acoustic signal, or in large aggregations, such as dawn bird chorus and dusk anuran and invertebrate choruses, an abundance of animal sounds can generate interferences. In both cases, sound degradation may compromise species' reproductive success. On the contrary, another perspective predicts that such obstacles are not that hard, and that in fact, animals use sounds to mediate interactions between species, even influencing the distribution of those relying in such interactions. Hence, my goals with this thesis were i) to summarize applications of acoustic monitoring in ecology and conservation, and ii) to investigate the structuring of anuran communities in the southwest Pantanal in Brazil using acoustic characteristics and a high temporal precision perspective to determine communities. Thereby, I begin this thesis with a *prologue* that parallels que set of acoustic recordings being acquired currently to "time capsules" for the humanity. Following up, I devote two chapters to synthesize applications and bibliographic tendencies about passive acoustic monitoring in terrestrial environments. The *first chapter* is a systematic review of the literature and the *second* is a synthesis of survey designs used in the reviewed bibliography, with guidelines to optimize acoustic sampling. The next chapters are dedicated to investigating the organization of anuran communities in the Pantanal wetlands, acoustic monitoring was employed. In *chapter 3*, I address the acoustic dimension to characterize communities, described by anurans' advertisement calls. We

explore the arrangement of such acoustic space and whether its structure may reflect strategies to minimize interference in animal communication. In general, communities were composed by species with similar acoustic characteristics, where those communities composed by more distantly related species showed greater acoustic similarities. These findings suggest that communities may reflect strategies for information use through the acoustic signals of heterospecifics. In *chapter 4*, I use a fine temporal resolution scale to address species' diel activity and investigate its consistency within and between communities. Communities had most species are active in early periods of nocturnal activity and short-term species composition decay along the night. Such nocturnal decay in species composition was also associated with communities located at more structurally complex habitats. These findings suggest widespread short-term dynamics across communities associated to diel cycle and environmental structure, which may influence species interaction potential and consequently, the structure of communities. Finally, I hope that this thesis can stimulate ecological research with acoustic monitoring and to open new perspectives with acoustics on the dynamics of ecological communities.

Keywords: community assembly, acoustic communication, anura, Pantanal, ecology of information

SUMÁRIO

1.Introdução	16
1.1 Seção I – Perspectivas epistemológicas	16
1.1.1 A Construção do conhecimento científico	16
1.1.2 A ecologia como ela é... ..	20
1.2 Seção II – Bases teóricas	23
1.2.1 Adentrando às comunidades ecológicas	23
1.2.2 A Ecologia da informação	28
1.2.3 Comunicação acústica em anuros	31
1.3 Seção III – Ampliando os horizontes de observação em ecologia	37
1.3.1 Pontos cegos: Escala e período de observação	37
1.3.2 Como a tecnologia auxilia a ecologia?	40
2. Prólogo: Bioacoustic time capsules: using acoustic monitoring to documentt biodiversity	46
2.1 Abstract	47
2.2 Main text	47
2.3 Acknowledgments	52
2.4 References	52
3. Capítulo 1: Terrestrial Passive Acoustic Monitoring: Review and Perspectives	55
3.1 Abstract	56
3.2 Introduction	56
3.3 Reviewing the literature of terrestrial passive acoustic monitoring	58
3.4 Overview of passive acoustic monitoring in terrestrial ecosystems	59
3.4.1 Monitored taxa	63
3.4.2 Geographical distribution	65
3.4.3 Recording periods	65
3.4.4 Acoustic analysis	66
3.5 Challenges and future directions for terrestrial PAM	68
3.6 Integrating PAM to global monitoring networks	70
3.7 Conclusions	72
3.8 Acknowledgments	73
3.9 References	73
4. Capítulo 2: A roadmap for survey designs in terrestrial acoustic monitoring	77
4.1 Abstract	78
4.2 Introduction	78
4.3 Literature review	80
4.4 Spatial sampling	82
4.4.1 Spatial sampling in the literature	82
4.4.2 Overview of spatial sampling in PAM	84
4.4.3 Considerations about detection space	85
4.5 Temporal sampling	86
4.5.1 Temporal sampling in the literature	86

4.5.2 Overview of temporal sampling in PAM	87
4.5.3 Considerations about audio settings	89
4.6 Autonomy estimation	92
4.7 Rewinding the tape: trade-offs between sampling efficiency and cost	95
4.8 Acknowledgments	97
4.9 References	97
5. Capítulo 3: A role for social information use on the structure of signaling communities	103
5.1 Abstract	104
5.2 Introduction	105
5.3 Methods	108
5.3.1 Study area	108
5.3.2 Sampling site selection and vegetation characterization	108
5.3.3 Acoustic monitoring	108
5.3.4 Acoustic traits	109
5.3.5 Signaling and phylogenetic structure	110
5.3.6 Null models	111
5.3.7 Statistical analyses	111
5.4 Results	112
5.5 Discussion	117
5.6 Acknowledgments	121
5.7 References	121
5.8 Supplementary Material	126
6. Capítulo 4: Widespread short-term dynamics in tropical anuran communities	141
6.1 Abstract	142
6.2 Introduction	142
6.3 Methods	144
6.3.1 Study area and environmental characterization	144
6.3.2 Anuran communities	147
6.3.3 Null models and variation on species composition along nocturnal periods	148
6.3.4 Drivers of short-term community composition and congruence across communities	149
6.4 Results	150
6.4.1 Compositional variation in nocturnal activity	150
6.4.2 Environmental drivers of diel similarities and its variation	150
6.5 Discussion	154
6.6 Acknowledgments	158
6.7 References	159
6.8 Supplementary Material	163
7. Conclusão geral	166

1. INTRODUÇÃO

1.1 Seção I – Perspectivas epistemológicas

1.1.1 A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO

“For myself, I am interested in science and in philosophy only because I want to learn something about the riddle of the world in which we live, and the riddle of man's knowledge of that world. And I believe that only a revival of interest in these riddles can save the sciences and philosophy from an obscurantist faith in the expert's special skill and in his personal knowledge and authority” – Karl Popper

Na quinta-feira de 11 de abril deste ano (2019), as capas dos jornais ao redor do mundo destacavam a imagem de um dos fenômenos mais intrigantes do imaginário humano: o buraco negro (figura 4). Há cem anos, o físico *Albert Einstein* consolidava a teoria da relatividade geral, a qual postulava o efeito da gravidade sobre a luz, sendo capaz de gerar distorções no espaço-tempo. A fascinante imagem de um anel luminoso no espaço, mesmo que borrada, é a mais forte evidência que reitera a importância da teoria da relatividade no entendimento do universo e, conseqüentemente, na nossa existência.

Esse marco histórico não seria possível sem o amplo e recorrente uso de uma metodologia científica tanto por precursores quanto por sucessores a *Einstein*. De maneira simplificada, a lógica aplicada utilizou 1) *uma teoria subjacente* – teoria da relatividade, 2) *o levantamento de uma hipótese* – o buraco negro, 3) *teste/coleta de observações* – obtenção de medidas a partir de uma rede de oito radiotelescópios espalhados pelo mundo e 4) *análise* – processamento de quatro milhões de gigabytes em um supercomputador ao longo de dois anos. Este exemplo foi deliberadamente escolhido para ilustrar que a partir de então, quaisquer outras hipóteses prevendo uma conformação do buraco negro distinta daquela divulgada nos jornais pelo mundo será dificilmente aceita pois um novo paradigma foi estabelecido e servirá de base para a formulação e teste de novas hipóteses (*Kuhn 1962*).

A assertiva de que algo foi “cientificamente provado” já é parte de nosso cotidiano. Mas já se perguntou como é possível provar (cientificamente) algo? Imagine

que a imagem obtida do buraco negro resultasse em algo incompatível com o esperado pela teoria. Claro, isto poderia decorrer de falhas nos algoritmos usados para gerar a imagem, ou nas engrenagens dos telescópios, ou nas práticas adotadas por aqueles que operaram os telescópios, e por aí vai. Mas se essas instâncias todas estiverem em perfeita sintonia e livre de erros, é provável que a inconsistência esteja na hipótese sobre o buraco negro, o que levantaria sérias dúvidas sobre a teoria da relatividade. Ou seja, a credibilidade é dependente de um julgamento das hipóteses levantadas a partir da teoria, mediante testes e critérios genuinamente apropriados. Esta base filosófica é atribuída a *Karl Popper*, que propôs traçar uma clara distinção entre o *que é ciência* e o *que não é ciência*. Um breve retrospecto histórico nos permite ambientar o surgimento deste princípio: à época em que *Popper* propôs o princípio de falseabilidade, o mundo era inundado por inéditas teorias em história, psicologia e física (*Marx, Freud, Adler e Einstein*), e nas palavras do autor: “*There was a lot of popular nonsense talked about these theories*” (Havia um monte de besteiras populares faladas sobre essas teorias)¹ (*Popper* 1963). A atmosfera na década de 20 era tomada por verdades absolutas à luz dessas teorias, onde praticamente tudo podia ser explicado por elas. *Popper* cita uma passagem na qual apresenta um estudo de caso a *Adler* que, sem examinar o caso e nem ao menos ver o paciente, rapidamente apresenta uma explicação segundo sua teoria. Sua justificativa quanto a certeza do diagnóstico foi: “*Because of my thousandfold experience*” (algo como: Devido a minha imensa experiência). Naquele momento, *Popper* percebeu que, na realidade, *Adler* não havia conseguido confirmar nada a não ser o fato de que aquele caso poderia ser interpretado de acordo com sua teoria.

O que veio a seguir foi a proposta que rompeu definitivamente o científico do não-científico: não é possível fazer ciência a partir de uma proposição que não é testável/falseável². E como a ciência avança com este princípio? Com um pouco de abstração, podemos traçar um paralelo com o processo de separar grãos de feijão de um conjunto de grãos duvidosos. Só prossegue para o cozido aqueles grãos que sejam constatados sadios mediante um critério (no meu caso, atendendo ao crivo de minha mãe, que foi aperfeiçoado conforme sua experiência com minha avó). Grãos defeituosos, pedrinhas e até milho vindos do mesmo saco são descartados do conjunto. Imagine que, através do método científico, aquelas conjecturas improváveis sobre o funcionamento de determinado fenômeno são como os grãos de feijão

desprezados. Cada vez que abrimos um saco de conjecturas e descartamos aquelas menos consistentes, aprimoramos a receita e avançamos no conhecimento científico.



Figura 4. Capas de jornais impressos ao redor do mundo no dia 11 de abril de 2019. Em destaque, a imagem do fenômeno do buraco negro.

Em geral, há uma expectativa de que investigações científicas resultem em leis generalizáveis que expliquem um fenômeno. Contudo, esta é apenas uma das abordagens existentes que permitem a construção do conhecimento – a abordagem *nomotética*. *Charles Darwin*, acreditando equivocadamente empregar um raciocínio indutivo, realizou experimentações de cunho hipotético-dedutivo sobre sua então hipótese sobre a seleção natural, pelas quais levantou evidências sobre o processo adaptativo de seres vivos e da diversificação de espécies ao longo do tempo (Ayala 2009). A seleção natural, também concebida independentemente pelo impetuoso naturalista e precursor da biogeografia *Alfred Russel Wallace*, se tornou uma peça chave na biologia e é tido como o mecanismo central no processo evolutivo das espécies. Sua formulação possui tamanho poder de generalização que pode inclusive transcender aplicações em ciências naturais e contribuir teoricamente a distintas áreas de estudo, como a evolução da própria cultura humana (Mesoudi 2011).

“When radium was discovered, no one knew that it would prove useful in hospitals. The work was one of pure science. And this is a proof that scientific work must not be considered from the point of view of the direct usefulness of it” – Marie Curie

Em contraste a essa abordagem que objetiva leis e princípios gerais, a abordagem *ideográfica* tem um enfoque na particularidade dos estudos de caso. Na

abrangente área de ciências da vida, a história natural é a área dedicada ao descobrimento, descrição e classificação dos aspectos singulares da biodiversidade (tanto a atual quanto a extinta) (Cotterill & Foissner 2009). Praticamente todos os aspectos biológicos de um organismo foram (ou serão) descritos através de sistemáticas observações de suas características diagnósticas, dos locais onde se abriga e se reproduz, da estrutura social, entre outras características. De maneira irônica, a prática da história natural é atualmente vista como retrógrada por alguns ecólogos, quando seu papel é imprescindível para embasar estudos orientados a outros níveis de organização, como populações e comunidades. Além disso, o conjunto de observações sobre a performance dos organismos é fundamental para persuadir suposições gerais, que por sua vez, é um aspecto nomotético (Bartholomew 1986). *Edward Osborne Wilson* sugere a pesquisadores incipientes que o processo iterativo de observação/experimentação ante um objeto de estudo é fundamental para levantar hipóteses que posteriormente possam ser formalmente testadas (Wilson 2014).

Portanto, é notável que há diversas formas de se construir o conhecimento nas áreas científicas, seja pela busca de leis gerais, seja por exaustiva descrição de fenômenos particulares, contanto que uma conduta legítima seja transversal a ambas as práticas. Ao final, esses dois extremos (nomotético-ideográfico) acabam sendo retroalimentados quando o objetivo em comum é a busca do conhecimento.

¹ *Popper* pôde ver o “ovo da serpente” se formando, e conseguiu lançar sua perspicaz forma de discernir as fake-news da época. “[...] qualquer um que fizer o mínimo esforço poderá ver o que nos espera no futuro. É como um ovo de serpente. Através das membranas finas pode-se distinguir o réptil já perfeitamente formado.” Hans Vergerus em *O ovo da Serpente*, de Ingmar Bergman.

² Uma consequência desta revolução entre científico e não científico foi o descrédito às teorias propostas por Freud sobre os sonhos e sobre o nosso subconsciente, uma vez que elas não eram testáveis, especialmente pelas limitações metodológicas da época. Atualmente, neurocientistas conseguem traçar impressionantes semelhanças entre mecanismos cerebrais e as ideias psicanalíticas propostas por Freud.

1.1.2 A ECOLOGIA COMO ELA É...

“Generalizations in biology are almost invariably of a probabilistic nature. As one wit has formulated it, there is only one universal law in biology: ‘All biological laws have exceptions.’ This probabilistic conceptualization contrasts strikingly with the view during the early period of the scientific revolution that causation in nature is regulated by laws that can be stated in mathematical terms. Actually, this idea occurred apparently first to Pythagoras. It has remained a dominant idea, particularly in the physical sciences, up to the present day. Again and again it was made the basis of some comprehensive philosophy, but taking very different forms in the hands of various authors. With Plato it gave rise to essentialism, with Galileo to a mechanistic world picture, and with Descartes to the deductive method. All three philosophies had a fundamental impact on biology.”- Ernst Mayr

Na ecologia, buscamos entender as interações entre diferentes organismos e suas relações com o meio em que vivem, de forma a revelar os motivos que levam as espécies a atingir determinadas abundâncias e a possuir suas respectivas distribuições no espaço e no tempo (*adaptado de Begon et al. 2006*). Para tanto, os elementos fundamentais de estudo são particularmente complexos: indivíduos pertencentes a diferentes espécies, em variados estágios de desenvolvimento, em um dentre muitos estados comportamentais determinado tanto pelo ambiente quanto por outros organismos em seu entorno, os quais igualmente estão sujeitos aos mesmos fatores.

O ambiente físico no qual os organismos se encontram pode ser delimitado por diversos recortes espaciais, desde escalas extremamente locais, até escalas de amplo alcance geográfico, como por exemplo, i) um espaço de 30 x 30 cm em uma área de floresta de terra firme na Amazônia, ii) uma faixa de 1 km em uma floresta de várzea à beira do Rio Amazonas e iii) toda a floresta de várzea da bacia do rio Amazonas (dentro de 7 milhões de km²). Podemos esperar que, em cada uma dessas escalas, diferentes fatores estejam associados a ocorrência de diferentes espécies. Imagine a organização populacional na escala do seu bairro, do seu estado e do nosso país. Sabemos que houve no Brasil um processo histórico envolvendo o fluxo de europeus para o interior do país, estabelecendo colônias com mão de obra escravizada africana e acompanhado da dizimação de populações nativas indígenas. Isso reflete hoje em um país amplamente estratificado, onde classes desfavorecidas são predominantemente

constituídas por negros e indígenas. No período de República, o país foi arbitrariamente esquadrihado em diferentes unidades administrativas que passaram por profundas alterações até a determinação de unidades federativas, que hoje confluem em determinados aspectos culturais (como festividades e culinária em comum). Finalmente, a organização territorial urbana pode ocorrer de forma planejada ou de maneira desordenada e que, por influência da especulação imobiliária, especulação imobiliária, gentrificação, renda e recursos econômico financeiro dos habitantes, determina os padrões e qualidade de vida dos bairros.³

Já sob uma perspectiva ecológica, os diferentes fatores relacionados a organização dos organismos no espaço e no tempo operam em função da escala em questão. Em uma escala temporal retrospectiva, houve eventos históricos determinantes no caminho da evolução das espécies, como processos geológicos, climáticos ou eventos imprevisíveis, como o asteroide que se chocou ao nosso planeta há 66.038 milhões de anos atrás e levou os dinossauros à extinção⁴. Em escalas mais regionais, fatores associados a diferentes tipos de vegetação condicionados a diferentes altitudes, ou arranjos de forma mais ou menos conectada (como exemplo, áreas de floresta contíguas em biomas distintos como Mata Atlântica e Cerrado) resultam em diferentes padrões de diversidade das espécies, por exemplo. Já em escalas mais próximas à nossa percepção, os principais fatores ecológicos são mais pontuais aos locais de observação, como o ambiente de entorno e a presença de competidores e de predadores. Portanto, a complexidade de elementos envolvidos na ecologia é descomunal em seus pormenores.

"The problem of relating phenomena across scales is the central problem in biology and in all of science" – Simon Levin

Devido a tamanha quantidade de fatores associados aos padrões observados na natureza, há em geral poucas generalizações em forma de leis universais em ecologia se comparado às leis da termodinâmica na física, por exemplo. Por esta razão, a ecologia começou a ser criticada como uma ciência "fraca" (Lawton 1999). Particularmente, é comum encontrar discrepâncias entre estudos sobre o mesmo objeto, especialmente devido a dificuldade em controlar todas as propriedades capazes de interferir nos estudos: variação entre indivíduos, dificuldade em identificar atributos fenotípicos com causalidade ecológica, dificuldade em classificar e medir o ambiente de maneira adequada, relações não-lineares, um número alto de variáveis que podem interagir entre si, falta de correspondência entre experimentos

laboratoriais e de campo e inconsistência de resultados entre laboratórios (Pigliucci 2002). Em geral, essas são as mesmas críticas destinadas a caracterizar a psicologia como ciência “fraca”. No entanto, com respaldo na seção anterior, estaria correto julgar a importância de uma área científica pela sua falta de generalizações ou leis universais?

Como vimos anteriormente, não existe apenas uma forma categórica de se construir o conhecimento. O conjunto de estudos de casos (abordagem ideográfica) pode permitir estabelecer generalizações e criar hipóteses plausíveis a serem testadas. Daniel Simberloff argumenta que, sob a ótica de problemas ambientais, em muitas situações é mais conveniente analisar e entender o aspecto idiossincrático das comunidades ecológicas do que derivar leis gerais sobre seu funcionamento. Logo, um rol de “estudos de caso” pode ajudar a resolver problemas de maneira eficiente e pragmática e levantar potenciais generalizações que possam guiar futuros estudos (Simberloff 2004).

³ Há ainda a escala de seu próprio quarteirão ou rua e todos os potenciais conflitos entre vizinhos, cenário cotidiano retratado com primazia em “O som ao redor”, de Kleber Mendonça Filho.

⁴ Evento simbolicamente representado no desconcertante ato ao som de *Le Sacre du printemps* de Stravinsky no filme Fantasia).

1.4 REFERÊNCIAS

- Adler, P.B., HilleRisLambers, J. & Levine, J.M. (2007) A niche for neutrality. *Ecology Letters*, **10**, 95-104.
- Ayala, F.J. (2009) Darwin and the scientific method. In *the light of evolution: volume iii: two centuries of Darwin* (eds J.C. Avise & F.J. Ayala), pp. 267-286. National Academies Press, Washington DC.
- Bartholomew, G.A. (1986) The role of natural history in contemporary biology. *BioScience*, **36**, 324-329.
- Begon, M., Townsend, C.R. & Harper, J.L. (2006) *Ecology: From individuals to ecosystems* Wiley-Blackwell, Oxford, Eng.
- Bernal, X.E., Rand, A.S. & Ryan, M.J. (2006) Acoustic preferences and localization performance of blood-sucking flies (*Corethrella* Coquillett) to túngara frog calls. *Behavioral Ecology*, **17**, 709-715.
- Bertness, M.D. & Callaway, R. (1994) Positive interactions in communities. *Trends in Ecology & Evolution*, **9**, 191-193.
- Bradbury, J.W. & Vehrencamp, S.L. (2011) *Principles of animal communication, second edition*. Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Browning, E., Gibb, R., Glover-Kapfer, P. & Jones, K.E. (2017) *Passive acoustic monitoring in ecology and conservation*. WWF-UK Woking, United Kingdom.
- Brumm, H. (2013) *Animal Communication and Noise*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Bruno, J.F., Stachowicz, J.J. & Bertness, M.D. (2003) Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology & Evolution*, **18**, 119-125.
- Chek, A.A., Bogart, J.P. & Loughheed, S.C. (2003) Mating signal partitioning in multi-species assemblages: a null model test using frogs. *Ecology Letters*, **6**, 235-247.
- Connor, E.F. & Simberloff, D. (1979) The assembly of species communities: chance or competition? *Ecology*, **60**, 1132-1140.
- Cotterill, F.P.D. & Foissner, W. (2009) A pervasive denigration of natural history misconstrues how biodiversity inventories and taxonomy underpin scientific knowledge. *Biodiversity and Conservation*, **19**, 291.
- Diamond, J.M. (1975) Assembly of species communities. *Ecology and evolution of communities* (eds M.L. Cody & J.M. Diamond), pp. 342-444. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Duellman, W.E. & Pyles, R.A. (1983) Acoustic resource partitioning in anuran communities. *Copeia*, **1983**, 639-649.
- Estes, L., Elsen, P.R., Treuer, T., Ahmed, L., Caylor, K., Chang, J., Choi, J.J. & Ellis, E.C. (2018) The spatial and temporal domains of modern ecology. *Nature Ecology & Evolution*, **2**, 819-826.
- Etienne, R.S. & Alonso, D. (2007) Neutral community theory: how stochasticity and dispersal-limitation can explain species coexistence. *Journal of Statistical Physics*, **128**, 485-510.
- Ey, E. & Fischer, J. (2009) The “acoustic adaptation hypothesis”—a review of the evidence from birds, anurans and mammals. *Bioacoustics*, **19**, 21-48.
- Gaston, K.J. (2019) Nighttime ecology: the “nocturnal problem” revisited. *The American Naturalist*, **193**, 481-502.
- Gause, G.F. (1932) Experimental studies on the struggle for existence. *Journal of Experimental Biology*, **9**, 389-402.
- Gerhardt, H.C. (1994) The evolution of vocalization in frogs and toads. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **25**, 293-324.
- Gerhardt, H.C. (2001) Acoustic communication in two groups of closely related treefrogs. *Advances in the Study of Behavior*, pp. 99-167. Academic Press.
- Gerhardt, H.C. & Huber, F. (2002) *Acoustic communication in insects and anurans: common problems and diverse solutions*. Chicago University Press, Chicago, IL.
- Gibb, R., Browning, E., Glover-Kapfer, P. & Jones, K.E. (2019) Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, **10**, 169-185.
- Gil, M.A., Baskett, M.L. & Schreiber, S.J. (2019) Social information drives ecological outcomes among competing species. *Ecology*, **100**, e02835.
- Gil, M.A., Hein, A.M., Spiegel, O., Baskett, M.L. & Sih, A. (2018) Social information links individual behavior to population and community dynamics. *Trends in Ecology & Evolution*, **33**, 535-548.

- Goutte, S., Dubois, A., Howard, S.D., Márquez, R., Rowley, J.J.L., Dehling, J.M., Grandcolas, P., Xiong, R.C. & Legendre, F. (2018) How the environment shapes animal signals: a test of the acoustic adaptation hypothesis in frogs. *Journal of Evolutionary Biology*, **31**, 148-158.
- HilleRisLambers, J., Adler, P.B., Harpole, W.S., Levine, J.M. & Mayfield, M.M. (2012) Rethinking community assembly through the lens of coexistence theory. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **43**, 227-248.
- Hödl, W. (1977) Call differences and calling site segregation in anuran species from central Amazonian floating meadows. *Oecologia*, **28**, 351-363.
- Hödl W & A, A. (2001) Visual signaling in anuran amphibians. *Anuran communication* (ed. M.J. Ryan), pp. 121-141. Smithsonian Institution Press, Washington, DC.
- Hubbell, S.P. (2001) *The unified neutral theory of biodiversity and biogeography*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Hutchinson, G.E. (1957) Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, **22**, 415-427.
- Kneitel, J.M. & Chase, J.M. (2004) Trade-offs in community ecology: linking spatial scales and species coexistence. *Ecology Letters*, **7**, 69-80.
- Kuhn, T. (1962) *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Lawton, J.H. (1999) Are there general laws in ecology? *Oikos*, **84**, 177-192.
- Leibold, M.A., Holyoak, M., Mouquet, N., Amarasekare, P., Chase, J.M., Hoopes, M.F., Holt, R.D., Shurin, J.B., Law, R., Tilman, D., Loreau, M. & Gonzalez, A. (2004) The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology. *Ecology Letters*, **7**, 601-613.
- Leibold, M.A. & McPeck, M.A. (2006) Coexistence of the niche and neutral perspectives in community ecology. *Ecology*, **87**, 1399-1410.
- Levin, S.A. (1992) The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, **73**, 1943-1967.
- MacArthur, R. & Levins, R. (1967) The limiting similarity, convergence, and divergence of coexisting species. *The American Naturalist*, **101**, 377-385.
- MacArthur, R. & Wilson, E.O. (1967) *The theory of island biogeography*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Marvin, D.C., Koh, L.P., Lynam, A.J., Wich, S., Davies, A.B., Krishnamurthy, R., Stokes, E., Starkey, R. & Asner, G.P. (2016) Integrating technologies for scalable ecology and conservation. *Global Ecology and Conservation*, **7**, 262-275.
- McGill, B.J., Dornelas, M., Gotelli, N.J. & Magurran, A.E. (2015) Fifteen forms of biodiversity trend in the Anthropocene. *Trends in Ecology & Evolution*, **30**, 104-113.
- McGill, B.J., Enquist, B.J., Weiher, E. & Westoby, M. (2006) Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology & Evolution*, **21**, 178-185.
- Mesoudi, A. (2011) *Cultural evolution: How darwinian theory can explain human culture and synthesize the social sciences* University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Morton, E.S. (1975) Ecological sources of selection on avian sounds. *The American Naturalist*, **109**, 17-34.
- Narins, P.M. (1990) Seismic communication in anuran amphibians: white-lipped frogs thump the ground as they chirp. *BioScience*, **40**, 268-274.
- Parejo, D. & Avilés, J.M. (2016) Social information use by competitors: resolving the enigma of species coexistence in animals? *Ecosphere*, **7**, e01295.
- Pettorelli, N., Laurance, W.F., O'Brien, T.G., Wegmann, M., Nagendra, H. & Turner, W. (2014) Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, **51**, 839-848.
- Phelps, S.M., Rand, A.S. & Ryan, M.J. (2006) The mixed-species chorus as public information: túngara frogs eavesdrop on a heterospecific. *Behavioral Ecology*, **18**, 108-114.
- Pigliucci, M. (2002) Are ecology and evolutionary biology "soft" sciences? *Annales Zoologici Fennici*, **39**, 87-98.
- Pimm, S.L., Alibhai, S., Bergl, R., Dehgan, A., Giri, C., Jewell, Z., Joppa, L., Kays, R. & Loarie, S. (2015) Emerging technologies to conserve biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, **30**, 685-696.
- Popper, K.R. (1963) Science as falsification. *Conjectures and Refutations* (ed. K.R. Popper), pp. 33-39. Routledge and Keagan Paul, London, IN.

- Porter, J.H., Nagy, E., Kratz, T.K., Hanson, P., Collins, S.L. & Arzberger, P. (2009) New eyes on the world: Advanced sensors for ecology. *BioScience*, **59**, 385-397.
- Rahbek, C. (2005) The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. *Ecology Letters*, **8**, 224-239.
- Ricklefs, R.E. (1987) Community diversity: relative roles of local and regional processes. *Science*, **235**, 167-171.
- Ricklefs, Robert E. (2008) Disintegration of the ecological community. *The American Naturalist*, **172**, 741-750.
- Ricklefs, R.E. (2012) Naturalists, natural history, and the nature of biological diversity. *The American Naturalist*, **179**, 423-435.
- Ryan, M.J. (1988) Constraints and patterns in the evolution of anuran acoustic communication. *The evolution of the amphibian auditory system* (eds B. Fritzsch, M.J. Ryan, W. Wilczynski, T.E. Hetherington & W. Walkowiak), pp. 632-677. Wiley, New York, NY.
- Schmidt, K.A., Dall, S.R.X. & Van Gils, J.A. (2010) The ecology of information: an overview on the ecological significance of making informed decisions. *Oikos*, **119**, 304-316.
- Schwartz, J.J. & Bee, M.A. (2013) Anuran acoustic signal production in noisy environments. *Animal Communication and Noise* (ed. H. Brumm), pp. 91-132. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Simberloff, D. (2004) Community ecology: is it time to move on? *The American Naturalist*, **163**, 787-799.
- Sutherland, W.J., Freckleton, R.P., Godfray, H.C.J., Beissinger, S.R., Benton, T., Cameron, D.D., Carmel, Y., Coomes, D.A., Coulson, T., Emmerson, M.C., Hails, R.S., Hays, G.C., Hodgson, D.J., Hutchings, M.J., Johnson, D., Jones, J.P.G., Keeling, M.J., Kokko, H., Kunin, W.E., Lambin, X., Lewis, O.T., Malhi, Y., Mieszkowska, N., Milner-Gulland, E.J., Norris, K., Phillimore, A.B., Purves, D.W., Reid, J.M., Reuman, D.C., Thompson, K., Travis, J.M.J., Turnbull, L.A., Wardle, D.A. & Wiegand, T. (2013) Identification of 100 fundamental ecological questions. *Journal of Ecology*, **101**, 58-67.
- Taylor, R.C. & Ryan, M.J. (2013) Interactions of multisensory components perceptually rescue túngara frog mating signals. *Science*, **341**, 273-274.
- Tuttle, M.D. & Ryan, M.J. (1981) Bat predation and the evolution of frog vocalizations in the neotropics. *Science*, **214**, 677-678.
- Veits, M., Khait, I., Obolski, U., Zinger, E., Boonman, A., Goldshtein, A., Saban, K., Seltzer, R., Ben-Dor, U., Estlein, P., Kabat, A., Peretz, D., Ratzersdorfer, I., Krylov, S., Chamovitz, D., Sapir, Y., Yovel, Y. & Hadany, L. (2019) Flowers respond to pollinator sound within minutes by increasing nectar sugar concentration. *Ecology Letters*, **22**, 1483-1492.
- Vellend, M. (2016) *The theory of ecological communities*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Viana, D.S. & Chase, J.M. (2019) Spatial scale modulates the inference of metacommunity assembly processes. *Ecology*, **100**, e02576.
- Webb, C.O., Ackerly, D.D., McPeck, M.A. & Donoghue, M.J. (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **33**, 475-505.
- Weber, M.G., Wagner, C.E., Best, R.J., Harmon, L.J. & Matthews, B. (2017) Evolution in a community context: on integrating ecological interactions and macroevolution. *Trends in Ecology & Evolution*, **32**, 291-304.
- Wells, K.D. (2007) *The ecology and behavior of amphibians*. University Of Chicago Press Chicago, IL.
- Wiens, J.A. (1989) Spatial scaling in ecology. *Functional Ecology*, **3**, 385-397.
- Wilson, E.O. (2014) *Letters to a young scientist*. Liveright Publishing Corporation.



7. CONCLUSÃO GERAL

A dimensão acústica está em plena reverberação na ecologia. Diversos grupos biológicos utilizam a modalidade acústica de comunicação para mediar interações sociais e competitivas, sendo os coros matinais de aves e noturnos de anuros representações particulares desse fenômeno. Dado que os sons presentes na natureza constituem uma rica fonte de informação sobre a biodiversidade, seu monitoramento amplia a capacidade de entender e acompanhar mudanças nos ecossistemas. De forma pragmática, um som pode ser associado a uma espécie e a um estado comportamental. Com isso, técnicas de monitoramento acústico que registram dados com alta frequência por longos períodos permitem quantificar os mais diferentes sons em gravações acústicas ambientais e atribuí-los a uma localidade geográfica, servindo de base para uma miríade de questões ecológicas. Assim, os dois primeiros capítulos desta tese foram revisões sobre a literatura utilizando o monitoramento acústico em ambientes terrestres, onde pudemos tanto colocar em perspectiva a trajetória de aplicações para diversas linhas investigativas em ecologia como sintetizar práticas associadas ao desenho experimental e por fim fornecer diretrizes para futuros trabalhos.

A partir da otimização da tomada de dados com gravadores autônomos, a literatura em monitoramento acústico de ambientes terrestres ascendeu notavelmente na última década. Dentre os estudos que utilizaram esta técnica, vimos a ampliação e o aprofundamento de linhas investigativas clássicas em ecologia bem como a criação de novas linhas, como a ecoacústica, que traz uma visão holística sobre paisagens sonoras. Podemos dizer que o uso do monitoramento acústico caminha para ser consolidado como um método efetivo e de ótimo custo-benefício para monitorar animais. Invariavelmente, existem desafios relacionados à otimização da análise de volumosas quantidades de dados e ao manejo destas coleções para viabilizar análises integrativas e de larga escala, cuja conciliação é atualmente fundamental para entender e mitigar a resposta da biodiversidade a mudanças de habitat e ao aquecimento global.

Por outro lado, são muitas as maneiras como os dados podem ser tomados no monitoramento acústico, sendo fundamental o planejamento do desenho amostral para assegurar uma eficiente amostragem acústica. A iniciar por garantir adequada representação espacial da área de estudo. Já em cada unidade amostral, o ideal é

averiguar a área de detecção do gravador acústico e considerar a necessidade de utilizar sub-réplicas dentro da unidade. Planejar a amostragem temporal requer lembrar que quanto mais tempo o gravador estiver ligado, maior será o consumo de energia, a quantidade de dados registrados e, conseqüentemente, menor será a autonomia. Em contrapartida, aumentar a autonomia com um menor número de programações automáticas de ligar/desligar implica em diminuir a capacidade de detecção de alguns animais. Portanto, podemos tentar destinar as gravações a períodos diários com maior probabilidade de detecção dos organismos, e ainda realizar gravações de forma cíclica com determinada frequência e tempo de gravação. Para verificar a eficiência de diferentes desenhos de amostragem temporal podemos comparar dados de gravações feitas em 24 horas com aqueles dos diferentes desenhos e estimar o quanto de informação está sendo conservada ou perdida. Por fim, de acordo com os ganhos e perdas desses diferentes desenhos podemos relacioná-los aos gastos financeiros/logísticos e tomar uma decisão bem informada. Essas diretrizes aumentam a contundência das inferências ecológicas viabilizadas por meio do monitoramento acústico. Além de que, a sistematização dos registros acústicos permite agregar múltiplos estudos e organismos, auxiliando a integração de escalas e subsidiando sínteses sobre as dinâmicas da biodiversidade no planeta.

Os capítulos seguintes foram destinados a investigar a organização de comunidades por meio de monitoramento acústico. Para tanto, realizamos uma campanha para monitorar 39 comunidades de anuros com alta precisão temporal, distribuídas ao longo de um gradiente de vegetação em uma escala de paisagem. No capítulo 3, investigamos se as comunidades possuíam características acústicas compatíveis com predições de que os sinais acústicos das espécies refletem mecanismos para diminuir a interferência frente ao barulho de fundo vindo de outras espécies ou de variáveis associadas a estrutura vegetacional. Nossos resultados, no entanto, não corroboraram essas hipóteses clássicas e apontaram para outra direção, onde as comunidades se beneficiam de informação social, vindo da vocalização das espécies. Essa é, na verdade, uma perspectiva que tem obtido crescente espaço em explicações sobre como os organismos se distribuem no espaço, a qual buscamos corroborar com nossa abordagem.

Finalmente, no capítulo 4 abordamos um aspecto que frequentemente parece passar batido: a precisão temporal das comunidades. Encontramos que, em geral, o padrão de decaimento de espécies vocalmente ativas ao longo da noite é preponderante nas comunidades estudadas. Além disso, observamos que

comunidades localizadas em habitats aquáticos temporários apresentaram menor similaridade temporal ao longo da noite do que aquelas localizadas em lagoas permanentes. Verificamos que as comunidades possuem maior consistência na variação de atividade noturna quando localizadas em áreas com vegetação terrestre localmente homogênea, dominada por gramíneas e inseridas em paisagens predominantemente abertas, enquanto as comunidades em áreas localmente mais heterogêneas em vegetação e inseridas em paisagens com maior proporção de áreas florestadas apresentam menor consistência. Deste modo, discutimos que diferenças em curto prazo no padrão de atividade de espécies podem influenciar interações competitivas no espaço por partição temporal, destacando a importância de incluir espaço e, igualmente, tempo em abordagens de ecologia de comunidades.

Finalmente, espero que as revisões aqui apresentadas sejam utilizadas como referenciais rumo a padronização e melhores práticas em monitoramento acústico. Concluo a tese com expectativas de que futuros estudos possam aproximar vertentes comportamentais e sensoriais dos organismos ao entendimento de comunidades ecológicas. Os coros animais têm-se revelado orquestrado por diversos mecanismos ecológicos e comportamentais atuando em distintas escalas que acabam influenciando a coesão de um conjunto de organismos vocalmente ativos. Por meio de novas abordagens e com o advento de novas tecnologias, podemos atualizar paradigmas sobre a estruturação das comunidades e adicionar fatores sociais e ecológicos, cuja adequada representação requer a inclusão explícita de diferentes escalas temporais e espaciais.

