



Aspectos metrológicos no monitoramento acústico de ecossistemas terrestres

Massarani, P.M.¹

¹ Laboratório de Ensaios Acústicos, Inmetro, Duque de Caxias, RJ, Brasil, pmmassarani@inmetro.gov.br

Resumo. A metrologia acústica apoia soluções de problemas de controle de ruído. Utilizando métodos de medição, preferencialmente definidos em normas técnicas, são tratados assuntos como emissão sonora de máquinas, ruído em áreas habitadas, acústica de edificações, ruído de sistemas de transporte e psicoacústica entre outros. Trata-se de uma acústica antropocêntrica, na qual o controle é dos ruídos produzidos por humanos para a proteção e bem-estar dos próprios humanos. Outras espécies também utilizam a propagação sonora como meio de sobrevivência e perpetuação nos diferentes biomas do planeta. O monitoramento acústico de ecossistemas permite dar voz às outras espécies quanto às suas sensibilidades diante a mudanças ambientais. A estratégia é a de utilizar estações de gravações instaladas nos biomas e avaliar o equilíbrio ecológico relacionado às atividades sonoras captadas. É uma área de investigação em fase de consolidação, carente ainda de aspectos normativos sólidos necessários para aprimorar iniciativas globais e enfrentar a degradação ambiental da emergência climática. Este trabalho busca identificar aspectos metrológicos do monitoramento acústico de ecossistemas, baseado em uma breve revisão da literatura técnica. São apontados três aspectos a serem tratados mais detalhadamente em trabalhos futuros. O primeiro aspecto apontado é o controle da sensibilidade da unidade de gravação durante a sua utilização por longos tempos em ambientes abertos, sujeitas à intempéries e acidentes naturais. Outro aspecto de importância metrológica é do alcance acústico da monitoração. Por fim, os alvos são os diversos índices acústicos disponíveis na literatura para quantificarem os eventos sonoros presentes nas gravações.

Palavras-chave: metrologia acústica, meio ambiente, ecossistemas, monitoramento passivo.

Metrological aspects in the acoustic monitoring of terrestrial ecosystems

Abstract

Acoustic metrology supports solutions to noise control problems. Using measurement methods, preferably defined in technical standards, issues such as sound emission from machines, noise in inhabited areas, building acoustics, noise from transport systems and psychoacoustics, among others, are dealt with. It is an anthropocentric acoustic, in which the control is of the noise produced by humans for the protection and well-being of humans themselves. Other species also use sound propagation as a means of survival and perpetuation in the different biomes of the planet. Acoustic monitoring of ecosystems allows other species to voice their sensitivities to environmental changes. The strategy is to use recording stations installed in the biomes and evaluate the ecological balance related to the captured sound activities. It is an area of investigation in the consolidation phase, still lacking solid normative aspects needed to improve global initiatives and face the environmental degradation of the climate emergency. This work seeks to identify metrological aspects of acoustic monitoring of ecosystems, based on a brief review of the technical literature. Three aspects are pointed out to be treated in more detail in future works. The first aspect pointed out is the sensitivity control of the recording unit when using it for long periods in open environments, subject to atmospheric disturbances and natural accidents. Another aspect of metrological importance is the acoustic range of the monitoring. Finally, the targets are the various acoustic indices available in the literature to quantify the sound events present in the recordings.

Keywords: acoustic metrology, environment, ecosystems, passive monitoring.

1. Introdução

A legislação brasileira que visa a proteção ambiental de poluição sonora segue a Resolução Conama 001 de 1990 [1], a qual indica a norma ABNT NBR 10151:2019 para medição e avaliação de níveis de pressão sonora. Planejada para avaliação do conforto acústico em áreas habitadas, as exigências da resolução também são aplicadas para avaliação de impactos no meio ambiente causados pelo funcionamento de instalações industriais distantes de maiores áreas de concentração populacional. Licenças ambientais ao funcionamento de plantas industriais ou mineração são baseadas em relatórios de ensaios que apresentam resultados de níveis de pressão sonora nos seus entornos a serem confrontados com os níveis da Tabela 3 da ABNT NBR 10151:2019, em função dos tipos de áreas habitadas e dos períodos diurno e noturno.

Em muitos casos as plantas de mineração estão localizadas em áreas afastadas, com baixa ocupação humana e contendo biomas mais diversos. A aplicação da metodologia da ABNT NBR 10151 em alguns desses casos é inadequado. A atividade sonora nas áreas silvestres de entorno, dependendo do período do dia e da estação do ano, costuma ser prevalentemente biofônica, geradas principalmente por aves, anuros ou insetos. Quando a análise de impacto sonoro ao meio ambiente é aplicada sem nenhuma crítica de pertinência dos critérios da NBR 10151 não é incomum observar uma preocupação de uma planta industrial ou de mineração ser responsabilizada pela ocorrência de níveis altos de pressão sonora provocadas pela atividade natural não-humana do local de registro.

Análises de impacto sonoro ao meio ambiente fundamentadas por procedimentos como o da NBR 10151 são limitadas por uma centralidade para espécie humana. As métricas são definidas dando importância a capacidade auditiva humana, por exemplo aplicando curvas de ponderação em frequência, os períodos diurnos considerados são de vigília e sono dos humanos e a perturbação às atividades é relacionada às doses de exposição. Todo suporte de normalização e metrológico é definido para a nossa espécie.

As paisagens sonoras percebidas são complexas. Além das fontes sonoras antropofônicas, também estão presentes sons de origem geofônicas e biofônicas. Considerar essas fontes sonoras biofônicas não humanas como ruídos intrusivos é egoísta e conduz a soluções incompletas. Uma estratégia alternativa é a de utilizar registros sonoros que monitoram longos períodos de tempo das paisagens sonoras e analisar as relações de funcionamento de ecossistemas por suas variações. Essa estratégia é a base de uma área de investigação que tem se consolidado nas últimas décadas como candidata mais adequada para análises ambientais do impacto sonoro [2].

A estratégia não é baseada na percepção sonora de cada espécie presente no ecossistema, mas sim na caracterização da dinâmica dos registros sonoros. Observa-se quão diversos e organizados são os registros sonoros, com diferentes espécies utilizando o ambiente para seus processos naturais, como comunicação, alimentação ou navegação. Pode ser aplicada para diferentes faixas de frequências e diferentes meios de propagação, aéreos ou aquáticos. Os períodos dos dias e as estações do ano são considerados conforme os objetivos da pesquisa para análises de sazonalidade. É possível também comparar atividades naturais registradas em locais de mesmo bioma, porém geograficamente diversas, por exemplo mais próximas ou mais afastadas de alguma fonte antropofônica.

Conforme essa aplicação foi sendo desenvolvida, uma série de definições, métodos e equipamentos têm sido descritos nas publicações técnicas [3]. Equipamentos autônomos estão disponíveis comercialmente para o que é chamado de monitoramento passivo acústico (sigla PAM em língua inglesa para *Passive Acoustic Monitoring*). São compostos de transdutores, que podem ser microfones, transdutores ultrassônicos ou hidrofones com alimentação elétrica por baterias ou pequenos geradores e capacidade de armazenamento de dados. Cada unidade de monitoramento acústico é fixada nos ecossistemas, registrando paisagens sonoras em um alcance que depende da sensibilidade do transdutor, da presença de ruído de fundo e da potência sonora das fontes. Após um determinado período de tempo ter sido coletado, que dependerá da capacidade de armazenamento, da programação de ciclos de gravação e da compressão de dados, os registros são analisados em laboratório.

As análises dos registros sonoros, realizadas posteriormente, podem ser realizadas pela audição dos padrões por especialistas com auxílio de sonogramas e outros eventuais métodos de processamento de sinais. Algumas métricas automáticas foram definidas buscando quantificar as atividades sonoras naturais, fornecendo referências de apoio às análises dos especialistas e eventualmente indicando diagnósticos e indicadores para gestões ambientais [4]. Para alguns casos registros de referência são catalogados para facilitar identificação de emissões sonoras, geralmente na forma de sonogramas típicos, por exemplo se tiverem sido registrados em faixas ultrassônicas [5]. Alguns sistemas utilizam classificação automática mais complexa, baseada em bancos de dados extensos e treinamento para identificação de padrões. Para esse propósito foram criadas redes cooperativas nas quais os pesquisadores alimentam os padrões com reconhecimento comprovados para a criação dos bancos de dados. Os períodos de observação das paisagens sonoras devem ser extensos para serem capazes de melhor avaliar as dinâmicas das fontes biofônicas que podem ser sazonais.

O objetivo deste trabalho é de identificar alguns aspectos metrológicos exclusivos do monitoramento acústico de ecossistemas. Os aspectos metrológicos são tratados a seguir com um propósito de colaboração futura para a área de monitoramento de ecossistemas na perspectiva das paisagens sonoras. A busca por definições metrológicas de suporte é uma demanda identificada na literatura técnica recente [2]. No atual estágio de desenvolvimento do monitoramento passivo de ecossistemas existe um esforço na definição de métodos normalizados e métricas adequadas para a gestão ambiental em alcance nacional e mundial [2]. Diante da amplidão das possibilidades do monitoramento passivo de ecossistemas, optou-se aqui em limitar para os casos de monitoramentos de ecossistemas terrestres, mantendo em mente as diferenças de conceitos com aplicação atual da resolução Conama 001 de 1990 e a norma ABNT NBR 10151.

2. Monitoramento acústico

O monitoramento acústico busca inicialmente capturar registros sonoros de uma determinada área. A expectativa é que tais registros sejam correlacionáveis às paisagens sonoras da área, compostas dos sons típicos gerados pelas fontes sonoras presentes e propagadas no ambiente ao entorno. Considerando-se ser possível distinguir as fontes sonoras em relação às suas origens distintas, é possível, em muitos casos, identificar sons provenientes de atividades naturais produzidos por organismos vivos adaptados para utilizar o meio de propagação sonora como mecanismo de sobrevivência e de perpetuação das espécies. A bem conhecida organização WWF (World Wide Fund For Nature), especificamente a representante do Reino Unido, publicou em 2017 um guia para monitoramento acústico que introduz muito bem o conteúdo [6].

As unidades de captura sonora são compostas de pelo menos um microfone, baterias para alimentação de energia (ou um gerador de energia auxiliar acoplado), um meio de armazenamento de dados e opcionalmente uma unidade de posicionamento por GPS. Além das autonomias de alimentação e armazenamento, as unidades devem ser robustas contra condições atmosféricas, ou sejam umidade excessiva e isolamento, assim como terem proteção contra contaminantes naturais (insetos, aves e fungos).

As unidades de gravação sonora são posicionadas conforme um planejamento que considera o objetivo do monitoramento. Alguns modelos de unidades de gravação disponíveis comercialmente estão apresentados na Figura 1. Várias unidades podem ser usadas, distantes entre si, para estender a área de observação, identificar alvos específicos ou identificar possíveis influências interferentes (de atividades humanas por exemplo), ver Figura 2. Em alguns casos é possível acompanhar alterações de ecossistemas ao longo de tempo longo, observando-se prováveis impactos após anos de mudanças ambientais provocadas por diversas razões. A área de cobertura de observação prevista considera a sensibilidade do microfone, a potência de emissão de um alvo, os ruídos de fundo presentes e as perdas de propagação causadas pelo terreno e vegetação. Um planejamento de gravação pode considerar prováveis sazonalidades de atividades sonoras biológicas, sejam de um dia ou entre as estações do, e reduzir a necessidade de espaço de armazenamento através de programações dos tempos de início e de interrupção de gravação. A rotina de gravação programada e a capacidade de armazenamento das unidades estabelecem rotinas de manutenção das unidades, para verificações de funcionamento e coleta dos dados já armazenados.



Figura 1: Alguns modelos de estações de monitoramento oferecidas comercialmente.

Os arquivos de áudio coletados são processados posteriormente. Nesse estágio são demandados especialistas para identificação auditiva com auxílio de ferramentas de processamento de sinais. Os sons interferentes são distinguidos dos sons alvos de atividades ecológicas pelas suas características temporais e espectrais. Alguns índices acústicos, ou métricas, são definidos para estabelecerem relações ecológicas, como o grau de biodiversidade por exemplo. Outros meios para apoio nas análises ou validação podem ser necessários, tais como levantamento de espécies presentes na área de escuta e utilização de padrões de referência catalogados para identificação.

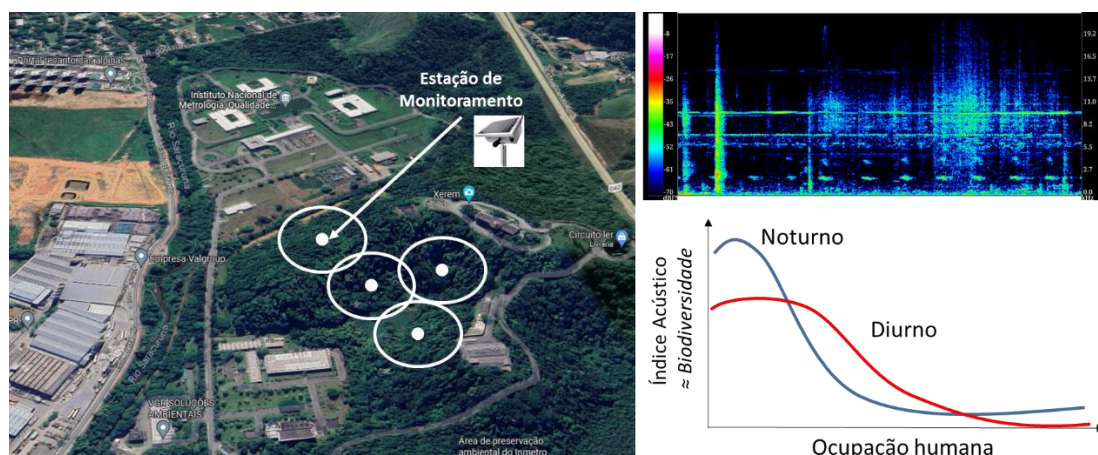


Figura 2: Plano de monitoramento, processamento das gravações e interpretação ecológica de métricas.

3. Exemplos no Brasil

O monitoramento acústico de ecossistemas não é novidade no Brasil. A seguir são descritas algumas aplicações de monitoramento acústico em diversos biomas brasileiros que demonstram o amplo leque de problemas ecológicos originais que podem ser tratados.

As diferenças sazonais de biodiversidade na Caatinga, no estado do Rio Grande do Norte, foram analisadas em períodos do dia e em duas estações típicas do bioma, a estação de seca e a estação de chuvas [7]. Observou-se que durante os dias a predominância é de aves, enquanto que nas noites ocorreu uma predominância de insetos. Maiores atividades biofônicas ocorreram durante a estação de chuvas, enquanto que na estação de seca os sons de ventos predominaram nas gravações.

Padrões diários de vocalização do Bugio-vermelho-das-Guianas foram identificados na floresta amazônica, Roraima [8]. Relações entre paisagem sonora e estruturas de vegetação na Amazônia, também em Roraima, foram apontadas em [9], observando-se habitats naturais e modificados pela ação humana agrupados em três categorias: áreas desmatadas, florestas inundadas e florestas não inundadas.

A Sociedade Brasileira para o Estudo de Quirópteros (SBEQ) publicou documento com diretrizes para estudos de impacto de parques eólicos sobre morcegos [10], no qual um dos métodos recomendados é a realização de monitoramento acústico em áreas determinadas antes do início das obras de instalação das turbinas.

Em recente artigo [11] é proposto um monitoramento acústico para detectar a presença de gado ilegal em áreas protegidas no Pantanal, Mato Grosso.

Impactos do funcionamento de uma mina de minério de ferro na biodiversidade da mata atlântica, Minas Gerais, foram observados em [12, 13 e 14]. Para extrair evidências do impacto ecológico são apresentados índices acústicos de áreas próximas à mina em comparação com índices obtidos em uma área de preservação mais distante [12]. Especificamente também foram evidenciados que as atividades da mina de minério de ferro alteram os padrões de vocalização de primatas, Macaco Titi [13] e Saguí-de-tufos-pretos [14].

A utilização de índices acústicos para observação da riqueza biofônica de insetos, anuros, pássaros e mamíferos de áreas de cerrado da Serra da Canastra, Minas Gerais, foi analisada em [15].

As paisagens sonoras biofônicas foram utilizadas para revelarem em [16] marcadores-chave de degradação por queimadas e por exploração madeireira na floresta amazônica de Mato Grosso.

Em [17] são apontadas alterações nas paisagens sonoras que revelam impactos dos incêndios florestais naturais na fauna do Cerrado em Minas Gerais.

O impacto de saguis exóticos na diversidade acústica de aves foi apresentado em [18] analisando dados de monitoramento na Floresta da Tijuca, Rio de Janeiro. A Floresta da Tijuca é uma área de vegetação secundário de replantio da mata atlântica e compõem uma imensa natural urbana da cidade do Rio de Janeiro. Um aspecto curioso do trabalho é a exclusão proposital de áreas de observação de interesse dentro da Floresta da Tijuca por questões de segurança, temendo assaltos e sequestros.

Visando referências para futuras análises de impacto ambiental em áreas bem preservadas da floresta amazônica no Pará em [19] foi avaliada a riqueza sonora gerada por espécies de aves.

4. Aspectos metrológicos

Apesar das técnicas de monitoramento acústico para análises ecológicas já terem sido aplicadas em tantos e diversos casos no Brasil e no mundo, a fase de consolidação dessa linha de investigação é

recente e muitos aspectos metrológicos ainda precisam ser resolvidos [2]. A seguir são comentados resumidamente três dos aspectos pinçados de em revisão da literatura, ou sejam aspectos relativos aos equipamentos de gravação, aos métodos de coleta de dados e os esforços na definição de métricas a partir de índices acústicos.

4.1 Equipamentos

A oferta comercial de modelos de equipamentos para a gravação de sinais acústicos para monitoramento é diversa. Algumas das especificações dos equipamentos têm impactos mais de praticidade, tais como custo, capacidade de armazenamento, autonomia, programação de intervalos de gravações, compressão de áudio, proteção diante condições atmosféricas, quantidade de canais de gravação e acessórios. A qualidade das gravações acústicas digitais utilizadas para auxílio das análises ecológicas depende da resposta dos transdutores, da capacidade dos circuitos eletrônicos encarregados da digitalização dos sinais analógicos (por exemplo respostas de filtros, resolução em bits dos conversores A/D e frequência de amostragem) e de gravação dos sinais digitais nas mídias específicas. Os índices acústicos indicados na literatura como métricas dos monitoramentos não são rastreados a uma grandeza fundamental, tal como a pressão sonora, pois são definidos para indicar variações relativas de níveis nos sinais como descrito no item 4.3 a seguir.

Os microfones das unidades de gravação são os transdutores da pressão sonora que constitui uma paisagem sonora nos monitoramentos terrestres. Os sinais digitais armazenados são registros no domínio do tempo de tensão elétrica após a transdução de pressão sonora realizada pelo microfone, sendo, portanto, dependentes da sua sensibilidade característica. A sensibilidade depende da frequência dos sinais, porém os microfones são projetados para terem respostas planas em uma faixa de frequência de interesse. Assim, a seleção de uma unidade de gravação deve considerar a curva de resposta em frequência da sensibilidade do microfone diante do propósito de observação da paisagem sonora a ser registrada. Além da sensibilidade, os sistemas de gravação têm capacidades próprias de registro das variações de níveis presentes, ou sejam registrarem eventos sonoros em uma faixa dinâmica incluindo ocorrências de níveis altos sem distorções e ocorrências de baixos níveis livres de mascaramento por ruídos próprios. A qualidade do registro de um evento sonoro dentro da faixa dinâmica depende da relação entre o nível do sinal do evento e o nível de ruído concorrente, denominada relação sinal e ruído e representado pelo símbolo S/N (do inglês *Signal/Noise*). Entretanto, estimativas das relações S/N dos eventos acústicos são realizadas em regiões tempo-frequência, pois os sinais podem conter componentes modulados em amplitude, componentes modulados na frequência, componentes de banda larga ou em combinações de múltiplas componentes. Os ruídos interferentes ou de mascaramento também podem ser variáveis nos domínios do tempo e da frequência. O desconhecimento das posições das fontes sonoras relativas às unidades de gravação também influencia na intensidade dos sinais.

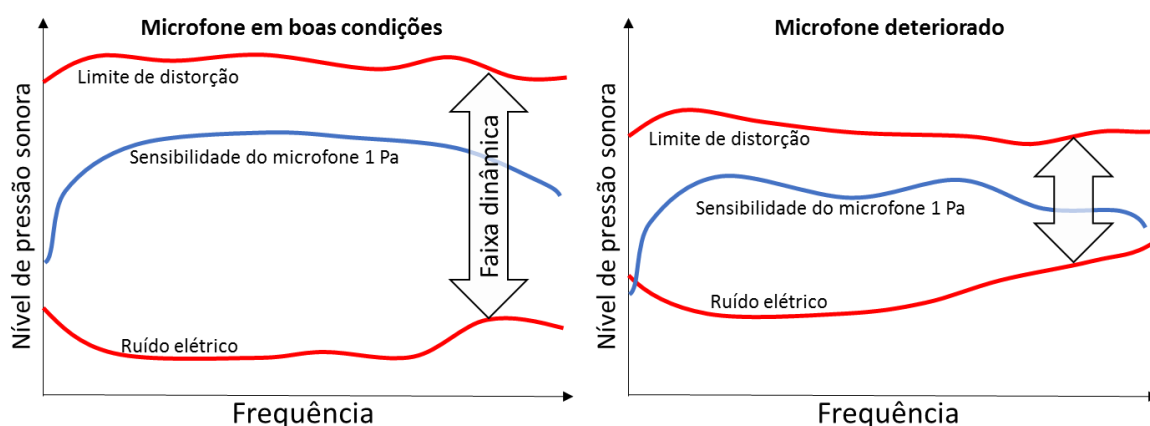


Figura 3: Redução da faixa dinâmica entre casos de microfone em boas condições e após deterioração.

As condições de funcionamento das unidades de gravação precisam ser verificadas, principalmente a capacidade de captação de áudio na faixa dinâmica planejada, para garantir a qualidade dos resultados. Além das verificações das unidades antes de serem postas em serviço, é conveniente verificar também a manutenção das condições de funcionamento ao término de uma utilização após de um longo período de exposição em condições climáticas agressivas. Checagens intermediárias em campo, durante os períodos de operação, podem minimizar os riscos de perdas de registros adequados de eventos sonoros. A Figura 3 apresenta um caso hipotético de redução da faixa dinâmica de áudio quando um microfone sofreu deterioração. A faixa dinâmica pode ser interpretada como um intervalo de níveis sonoros úteis, limitados inferiormente pelos ruídos elétricos e limitados superiormente pelos níveis limites de distorção de sinal. A curva de sensibilidade do microfone é a referência para os níveis alvos. Quando um microfone é deteriorado a sensibilidade pode ser reduzida, o nível de ruído elétrico pode aumentar, o limite de distorção pode diminuir ou pode ocorrer uma sobreposição de todos os efeitos. Eventos captados com um microfone em boas condições podem registrar todas as suas variações dinâmicas de níveis. Se, no decorrer de um período de observação, o microfone sofrer uma redução da faixa dinâmica por deterioração os registros podem indicar falsamente menores dinâmicas de níveis de eventos sonoros semelhantes. Os calibradores sonoros utilizados nos ajustes dos sonômetros podem ser utilizados nas checagens das unidades de gravação se houver compatibilidade com os microfones.

4.2 Métodos de coleta de dados

Os monitoramentos acústicos atendem propósitos diversos, definidos pelos objetivos das análises dos ecossistemas. Tais objetivos definirão o número de posições de gravação, as alturas de microfones e as rotinas de gravação. Em pesquisas isoladas os métodos de coleta são específicos, que são detalhadamente descritos nos relatórios de resultados ou artigos. A literatura recente [2] ainda aponta como desafio futuro a definição de procedimentos gerais para estimar a capacidade de detecção de espécies e de protocolos para determinar rotinas de gravação adequadas. Como o monitoramento acústico de ecossistemas tem um potencial de ser uma ferramenta de apoio para iniciativas globais de proteção ambiental, por exemplo para enfrentar a emergência climática, existe um interesse na adoção de procedimentos padronizados e monitoramento coordenado de múltiplos táxons e regiões usando estações de monitoramento comuns [2].

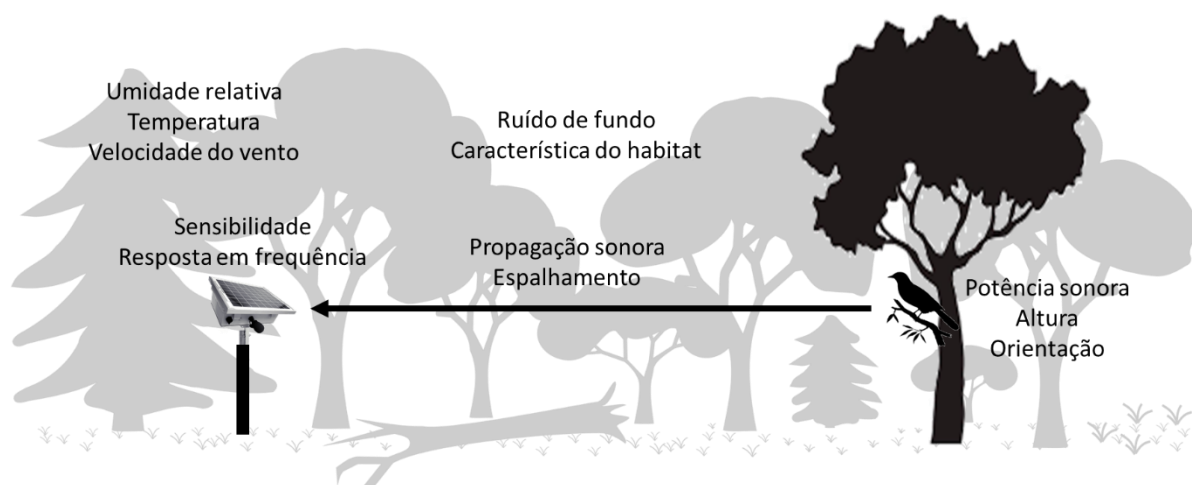


Figura 4: Fatores considerados para estimativas de distância de detecção.

Um aspecto metrológico que pode ter impacto em resultados dos monitoramentos é a estimativa das distâncias de detecção acústica das unidades de gravação. Genericamente, a distância de detecção é a distância limite na qual um evento sonoro não é mais reconhecível. Depende da fonte geradora, das perdas nas trajetórias de propagação, da sensibilidade do microfone e do ruído de fundo (Figura 4). As fontes podem ser múltiplas e em diferentes posições, sendo que cada espécie sonora tem seu próprio

mecanismo de geração moldado pelas pressões evolutivas. Cada indivíduo sonoro tem capacidade de geração com potência sonora que pode ser variada e dependente da orientação em relação ao ponto de captação. O caminho de propagação depende da topologia do terreno e da vegetação presente como obstáculos de reflexão, difração e espalhamento sonoros. As condições ambientais alteram a propagação e variam durante os dias e durante as estações do ano. Alguns métodos para estimativa dos alcances das unidades de gravação são apresentados na literatura, como [20 e 21], descrevendo medições em campo que utilizam alto-falantes posicionados em várias distâncias ao microfone e alimentados com sinais de excitação de referência. Entretanto, os fatores influentes ao alcance acústico podem ser momentâneos, gerando incertezas de difícil previsão.

4.3 Índices acústicos

As gravações coletadas no monitoramento podem conter milhares de horas, com trechos com diferentes níveis de atividade biológica. A presença de fauna sonora é determinada por escuta manual, demandando-se longos tempos de análises realizadas por especialistas. Para agilizar a tarefa é conveniente classificar previamente as paisagens sonoras correlacionando-se as propriedades acústicas com as propriedades de dinâmica dos sinais. Esse é o papel dos índices acústicos descritos na literatura [22]. No atual estágio de desenvolvimento da área ainda não foi apontando um determinado índice acústico universalmente aceito como métrica da saúde dos ecossistemas sonoros. A maioria dos autores utilizam mais de um índice acústico em cada pesquisa específica [4].

As características dinâmicas dos sinais sonoros gravados são usualmente identificadas por sonogramas, ou representações no domínio conjunto do tempo e da frequência, ver Figura 5. Um sonograma representa por mapas de cores os níveis espectrais obtidos por FFT de trechos selecionados por funções janelas deslizantes na duração do sinal no tempo. Eventos sonoros constantes ou transitórios são revelados em padrões característicos nos sonogramas. Os índices acústicos buscam quantificar a dinâmica dos eventos nos sonogramas, após delimitar-se bandas de frequência e intervalos de tempo, conforme exemplificado na Figura 5.

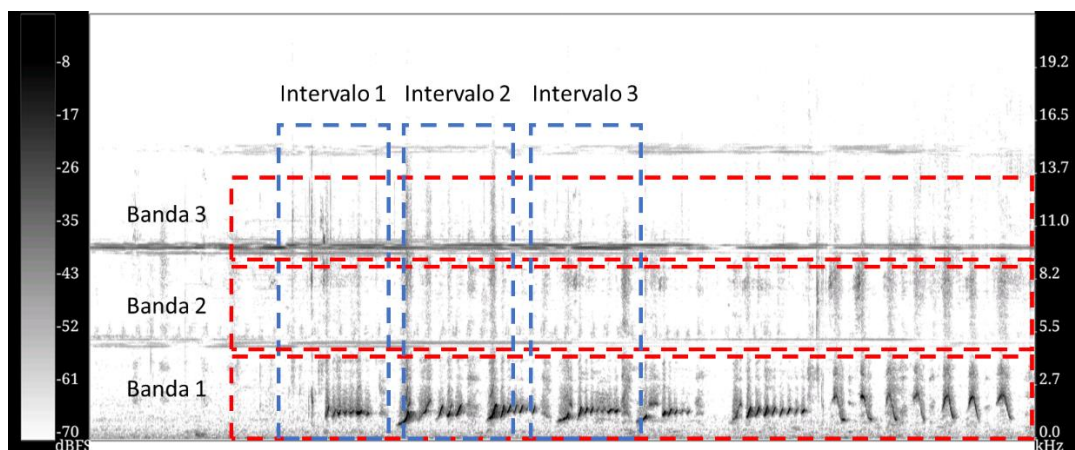


Figura 5: Separação de intervalos de tempo e bandas de frequência de um sonograma para cálculo de índices acústicos.

Atualmente existem mais de 60 índices acústicos disponíveis para apoio nos levantamentos de ecossistemas [22]. A Tabela 1 apresenta como exemplo 5 desses índices com as siglas e as descrições sumárias de cada um. As definições dos índices disponíveis na literatura são mais conceituais e não buscam definições com propósitos de padronização. Autores utilizam para os seus cálculos quase sempre as mesmas rotinas públicas abertas [23 e 24]. Ainda assim os resultados podem ser diversos e dependem de parâmetros de entrada para os cálculos, tais como os recortes de amostragem dos sinais, as larguras de banda, os intervalos de tempo e valores de limiares. Os próprios sonogramas, a partir dos quais são extraídos os índices, estão sujeitos a variações nas suas formações por uma série de FFTs (formas e duração de janelas temporais).

Para avaliar a utilidade dos valores fornecidos por índices acústicos diante da finalidade do monitoramento são realizadas contagens diretas dos indivíduos em campo. Alternativamente, especialistas treinados podem identificar espécies analisando gravações, pela visualização de sonogramas e pela audição dos áudios. Uma outra estratégia utilizada é pela utilização de gravações de referência, obtidas por mixagem de gravações reais de eventos sonoros com gravações reais de ruído de fundo [25]. As gravações de referência podem ser confeccionadas para avaliar o desempenho de diferentes índices acústicos em relação a diversos parâmetros do monitoramento acústico, tais como o número de espécies, a relação S/N dos eventos e a sensibilidade a variações nas frequências de emissão.

Tabela 1: Descrições de 5 índices acústicos utilizados na literatura [Bradfer].

Índice acústico	Descrição
Acoustic Complexity Index (ACI)	Em cada banda de frequência, contabiliza as diferenças de níveis entre intervalos de tempo consecutivos. O valor do índice é a soma de todas as diferenças de cada banda.
Acoustic Diversity Index (ADI)	Considera a soma das proporções de som em cada banda ponderadas pelos logaritmos das mesmas proporções. Um sinal uniforme (ruidoso em todas as bandas de frequência ou completamente silencioso) fornecerá um valor alto, enquanto um tom puro (ou seja, toda a energia em uma banda de frequência) estará mais próximo de 0.
Bioacoustic Index (Bio)	Função da amplitude e do número de bandas de frequência ocupadas entre 2 e 11 kHz. O valor é relativo à banda de frequência de 1 kHz de largura mais silenciosa; valores mais altos indicam maior disparidade entre as bandas mais altas e mais silenciosas.
Acoustic entropy (H)	Aumenta com uma maior uniformidade de amplitude entre bandas de frequência e/ou intervalos de tempo. Retorna um valor entre 1 (um sinal uniforme, com ruído nas bandas de frequência ou completamente silencioso) e 0 (um tom puro com toda a energia em uma banda de frequência).
Normalized Difference Soundscape Index (NDSI)	Baseia-se em uma divisão teórica de faixas de frequência entre antropofonia (1–2 kHz) e biofonia (2–11 kHz). A proporção dos dois componentes dá valores entre -1 a +1, com +1 indicando ausência de antropofonia na paisagem sonora.

5. Considerações finais

Este trabalho descreve aspectos gerais das metodologias encontradas em buscas bibliográficas sobre o monitoramento acústico de ecossistemas. O assunto representa uma interessante inversão de perspectiva para avaliação de impacto de poluição sonora no meio ambiente em relação a perspectiva instituída cujos os alvos são as áreas habitadas por população humana. Possibilita literalmente ouvir as vozes de outras espécies vivas que compartilham suas existências no planeta. O meio de propagação sonora aéreo como se conhece hoje, dependente da composição atmosférica, foi ele próprio construído há milhões de anos por seres vivos, habitantes daqui muito tempo antes da espécie humana surgir. Os seres vivos se adaptaram evolutivamente para utilizarem os sons e assim aumentarem as chances de sobrevivência e de perpetuação das espécies.

O monitoramento acústico de ecossistemas é uma área sedutora e suas finalidades de preservações são importantes diante de um futuro de emergência climática. É estimulante esbarrar na ampla literatura técnica existente, apesar da área ter uma existência formal recente de menos de 20 anos. Alguns artigos da bibliografia têm títulos sugestivos e interrogativos, possuindo termos interessantes como: “A Orquestra da Caatinga”, “O som do ilegal” e “O que insetos, anuros, pássaros e mamíferos têm a dizer sobre a paisagem sonora?”. Sugestivos também são alguns nomes escolhidos para os índices acústicos, tais como: “Índice de Entropia Acústica”, “Riqueza Acústica”, “Índice de Diversidade Acústica”, “Índice de Dissimilaridade Acústica”, “Uniformidade Acústica” e “Índice Bioacústico”.

Talvez por ser uma área muito recente, os especialistas em monitoramento acústico de ecossistemas ainda não examinaram com grande profundidade aspectos metrológicos envolvidos nas medições utilizadas. Não foram encontradas, na breve revisão bibliográfica realizada para este trabalho, a existência de normas técnicas ou temas metrológicos tais como: rastreabilidade, calibração, validação de métodos, incerteza de medição, amostragem, materiais de referência, ensaios de proficiência, acreditação e métodos para a garantia da validade dos resultados.

Visando contribuir com o desenvolvimento da área de conhecimento e vislumbrando o seu potencial de utilização como método de avaliação de impactos ao meio ambiente, este trabalho buscou alguns aspectos metrológicos a serem tratados com mais profundidade em trabalhos futuros. A instrumentação para captação das gravações foi um dos aspectos. A faixa dinâmica delimitada entre o ruído elétrico do equipamento e o limite de distorção é um aspecto importante, já que as detecções de eventos sonoros dependem das variações de níveis de pressão sonora. Diante da exposição dos equipamentos aos biomas e aos longos períodos de tempo de monitoração, é importante controlar a manutenção da faixa dinâmica da unidade de gravação pelo controle da sensibilidade do microfone através de checagens intermediárias através de calibradores sonoros ou outro tipo de referência sonora. Outro aspecto metrológico identificado a ter influência nos resultados é estimativa da distância de detecção acústica das unidades de gravação. São descritos na literatura métodos experimentais para a sua estimativa, porém a execução dessas medições em todos os casos de monitoração de ecossistemas demanda grande esforço. Simulações de propagação sonora por modelos computacionais, tendo como base perfis topográficos e estimativa da distribuição de vegetação, das áreas de monitoramento são potenciais alternativas a serem investigadas. O terceiro aspecto metrológico apontado neste trabalho é relativo aos índices acústicos. É de interesse investigar a diversidade de índices existentes, para selecionar alguns deles de maior uso, e identificar neles as fontes de incerteza. A faixa dinâmica de sensibilidade da unidade de gravação e a área de amostragem das escutas têm influência na incerteza dos índices.

Referências

1. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 001, de 08 de março de 1990. <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-080390.PDF>.
2. SUGAI, Larissa S. M.; SILVA, Thiago S. F.; RIBEIRO JR, José W.; LLUSIA, Diego. *Terrestrial Passive Acoustic Monitoring: Review and Perspectives*. BioScience. Volume 69, Issue 1, January 2019, Pages 15–25, <https://doi.org/10.1093/biosci/biy147>.
3. ROSS, Samuel R. P.-J.; O'CONNELL, Darren P.; DEICHMANN, Jessica L.; DESJONQUÈRES, Camille; GASC, Amandine; PHILLIPS, Jennifer N.; SETHI, Sarab S.; WOOD, Connor M.; BURIVALOVA, Zuzana. *Passive acoustic monitoring provides a fresh perspective on fundamental ecological questions*. Functional Ecology, 37, 959–975. 2023. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14275>.
4. SUEUR, Jérôme; FARINA, Almo; GASC, Amandine; PIERETTI, Nadia; PAVOINE, Sandrine, *Acoustic Indices for Biodiversity Assessment and Landscape Investigation*. ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA, Vol. 100, 772 – 781. 2014. DOI 10.3813/AAA.918757
5. LÓPEZ-BAUCELLS, Adrià; ROCHA, Ricardo; BOBROWIEC, Paulo; BERNARD, Enrico; PALMEIRIM, Jorge; MEYER, Christoph. *Field Guide to Amazonian Bats*. Manaus: Editora INPA, 2016.
6. BROWNING, Ella; GIBB, Rory; GLOVER-KAPFER, Paul; JONES, Kate E. *Passive acoustic monitoring in ecology and conservation*. WWF Conservation Technology Series 1(2). 2017. WWF-UK, Woking, United Kingdom.
7. OLIVEIRA, Eliziane G.; RIBEIRO, Milton C.; ROE, Paul; SOUSA-LIMA, Renata S. *The Caatinga Orchestra: Acoustic indices track temporal changes in a seasonally dry tropical forest*. Ecological Indicators Volume 129, October 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107897>.
8. DO NASCIMENTO, Leandro A.; PÉREZ-GRANADOS, Cristian; BEARD, Karen H. *Passive Acoustic Monitoring and Automatic Detection of Diel Patterns and Acoustic Structure of Howler Monkey Roars*. Diversity 2021, 13, 566. <https://doi.org/10.3390/d13110566>.
9. DO NASCIMENTO, Leandro A.; CAMPOS-CERQUEIRA, Marconi; BEARD, Karen H. *Acoustic metrics predict habitat type and vegetation structure in the Amazon*. Ecological Indicators. Volume 117, 2020, 106679, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106679>.

10. DE BARROS, Marília A. S.; BERNARD, Enrico; PEREIRA, Maria J. R.; RUI, Ana M.; FALCÃO, Fábio C.; LUZ, Júlia L. *Diretrizes para estudos de impacto de parques eólicos sobre morcegos no Brasil*. Laboratório de Ciência Aplicada à Conservação da Biodiversidade Departamento de Zoologia – UFPB. Sociedade Brasileira para o Estudo de Quirópteros (SBEQ). 2017. <https://www.sbeq.net/licenciamento>.
11. PÉREZ-GRANADOS, Cristian; SCHUCHMANN, Karl-L. *The sound of the illegal: Applying bioacoustics for long-term monitoring of illegal cattle in protected areas*. Ecological Informatics, Volume 74, 2023, 101981, ISSN 1574-9541, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.101981>.
12. DUARTE, Marina H.L.; SOUSA-LIMA, Renata S.; YOUNG, Robert J.; FARINA, Almo; VASCONCELOS, Marcelo; RODRIGUES, Marcos; PIERETTI, Nadia. *The impact of noise from open-cast mining on Atlantic forest biophony*. Biological Conservation, Volume 191, 2015, Pages 623-631, ISSN 0006-3207, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.08.006>.
13. DUARTE, Marina H.L.; KAIZER, Mariane C.; YOUNG, Robert J.; RODRIGUES, Marcos; SOUSA-LIMA, Renata S. *Mining noise affects loud call structures and emission patterns of wild black-fronted titi monkeys*. Primates 59, 89–97 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10329-017-0629-4>.
14. BITTENCOURT, Esther; VASCONCELLOS, Angélica d.S.; SOUSA-LIMA, Renata S.; YOUNG, Robert J.; DUARTE, Marina H.L. *Acoustic Monitoring of Black-Tufted Marmosets in a Tropical Forest Disturbed by Mining Noise*. Animals 2023, 13, 352. <https://doi.org/10.3390/ani13030352>.
15. SOUSA-LIMA, Renata S.; FERREIRA, Luane M.; OLIVEIRA, Eliziane G.; LOPES, Lara C.; BRITO Marcos R.; BAUMGARTEN, Júlio; RODRIGUES, Flávio H. *What do insects, anurans, birds, and mammals have to say about soundscape indices in a tropical savanna*. Journal of Ecoacoustics. 2. (2018). <https://doi.org/10.22261/JEA.PVH6YZ>.
16. RAPPAPORT, Danielle I.; SWAIN, Anshuman; FAGAN, William F.; DUBAYAH, Ralph; MORTON, Douglas C. *Animal soundscapes reveal key markers of Amazon forest degradation from fire and logging*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 119, e2102878119 (2022). doi: 10.1073/pnas.2102878119.
17. DUARTE, Marina H.L.; SOUSA-LIMA, Renata S.; YOUNG, Robert J.; VASCONCELOS, Marcelo F.; BITTENCOURT, Esther; Scarpelli, M.D.A.; FARINA, Almo; PIERETTI, Nadia. *Changes on soundscapes reveal impacts of wildfires in the fauna of a Brazilian savanna*. Science of The Total Environment, Volume 769, 2021, 144988, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144988>.
18. ZALUAR, Marina T.; TARDIN, Rodrigo; LLUSIA, Diego; NIEMEYER, Julia; RIBEIRO, Milton C.; VALE, Mariana M. *Impact of invasive marmosets (Primates, Callitrichidae) on bird acoustic diversity in a large neotropical urban forest*. (2022) Biological Invasions, 24 (6), pp. 1725 - 1737, <https://doi.org/10.1007/s10530-022-02748-z>
19. METCALF, Oliver C.; BARLOW, Jos; MARSDEN, Stuart; GOMES DE MOURA, Nárgila; BERENGUER, Erika; FERREIRA, Joice; LEES, Alexander C. *Optimizing tropical forest bird surveys using passive acoustic monitoring and high temporal resolution sampling*. Remote Sens Ecol Conserv, 8: 45-56. (2022). <https://doi.org/10.1002/rse2.227>.
20. HAUPERT, Sylvain; SÈBE, Frédéric; SUEUR, Jérôme. *Physics-based model to predict the acoustic detection distance of terrestrial autonomous recording units over the diel cycle and across seasons: Insights from an Alpine and a Neotropical forest*. Methods Ecol. Evol. 2023, 614–630. doi:10.1111/2041-210X.14020.
21. LLUSIA, Diego; MÁRQUEZ, Rafael; BOWKER, Richard. *Terrestrial sound monitoring systems, a methodology for quantitative calibration*. Bioacoustics, 20(3), 277– 286. (2011).
22. BRADFER-LAWRENCE, Tom; GARDNER, Nick; BUNNEFELD, Lynsey; BUNNEFELD, Nils; WILLIS, Stephen G.; DENT, Dayse H. *Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research*. Methods Ecol Evol. 2019; 10:1796–1807. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13254>.
23. SUEUR, Jérôme; AUBIN, Thierry; SIMONIS, Caroline. *SEEWAVE, a free modular tool for sound analysis and synthesis*. Bioacoustics, 18:2, 213-226, 2008. DOI: 10.1080/09524622.2008.9753600. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753600>.
24. VILLANUEVA-RIVERA, Luis J. PIJANOWSKI, Bryan C. *Soundscape Ecology*. 2022. <http://ljvillanueva.github.io/soundecology/>
25. ZHAO, Zhao; xu, Zhi-yong; BELLISARIO, Kristen; ZENG, Rui-wen; LI, Ning; ZHOU, Wen-yang; PIJANOWSKI, Bryan C. *How well do acoustic indices measure biodiversity? Computational experiments to determine effect of sound unit shape, vocalization intensity, and frequency of vocalization occurrence on performance of acoustic indices*. Ecological Indicators, Volume 107, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105588>.