



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**MELHORIA NA CAPACIDADE DE DETECÇÃO DA ESTAÇÃO
INFRASSÔNICA DE BRASÍLIA E DISCRIMINAÇÃO DE EVENTOS
TECTÔNICOS DE EXPLOSÕES EM PEDREIRAS, UTILIZANDO A
TECNOLOGIA INFRASSÔNICA**

Dissertação de Mestrado nº 223

DARLAN PORTELA FONTENELE

Brasília-DF, 2023



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DARLAN PORTELA FONTENELE

**MELHORIA NA CAPACIDADE DE DETECÇÃO DA ESTAÇÃO
INFRASSÔNICA DE BRASÍLIA E DISCRIMINAÇÃO DE EVENTOS
TECTÔNICOS DE EXPLOSÕES EM PEDREIRAS, UTILIZANDO A
TECNOLOGIA INFRASSÔNICA**

*Dissertação de Mestrado submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Geociências Aplicadas e Geodinâmica,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Mestre em
Geociências Aplicadas.*

Orientador

Prof. Dr. Lucas Vieira Barros

Universidade de Brasília

Brasília - DF

2023

**MELHORIA NA CAPACIDADE DE DETECÇÃO DA ESTAÇÃO
INFRASSÔNICA DE BRASÍLIA E DISCRIMINAÇÃO DE
EVENTOS TECTÔNICOS DE EXPLOSÕES EM PEDREIRAS,
UTILIZANDO A TECNOLOGIA INFRASSÔNICA**

DARLAN PORTELA FONTENELE

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Lucas Vieira Barros
Universidade de Brasília
Presidente

Dr. Juraci Mário de Carvalho
Universidade de Brasília

Prof. Dr. Ronnie Quintero-Quintero
Observatório Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica
Universidade Nacional da Costa Rica

Brasília - DF
2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

FF683m Fontenele, Darlan Portela
Melhoria na capacidade de detecção da estação
infrassônica de Brasília e discriminação de eventos
tectônicos de explosões em pedreiras, utilizando a
tecnologia infrassônica / Darlan Portela Fontenele;
orientador Lucas Vieira Barros. -- Brasília, 2023.
143 p.

Dissertação(Mestrado em Geociências Aplicadas) --
Universidade de Brasília, 2023.

1. Infrassom. 2. Estação I09BR. 3. PrepCom/CTBTO. 4.
Estações infrassônicas co-localizadas. 5. Discriminação de
evento. I. Barros, Lucas Vieira, orient. II. Título.

À paz no mundo.

AGRADECIMENTOS

É tarefa difícil expressar em palavras a minha profunda gratidão a todos que fizeram parte desta minha jornada até a conclusão deste meu projeto. Quero homenagear todos aqueles que tornaram este sonho possível.

Em primeiro lugar, quero estender meus profundos agradecimentos a Deus, à minha esposa Eliane e aos meus filhos Alan e Bianca, cujo amor inabalável, compreensão e apoio, durante cada desafio e triunfo, foram alicerces desta conquista.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Lucas Vieira Barros, quero deixar a minha enorme gratidão. Sua dedicação incansável e orientação cuidadosa não apenas iluminaram o caminho, mas também deram um significado inestimável a este projeto. Suas lições moldaram não apenas minha formação acadêmica, mas também meu crescimento como profissional. Esta parceria foi, e sempre será, um valioso tesouro em minha vida.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, quero agradecer do fundo do meu coração. Suas palavras de encorajamento, suas contribuições e os preciosos momentos que compartilhamos ficarão guardados com carinho. Especialmente, agradeço a Adriano Pereira Botelho, Daniel Marcos da Silva Pereira, Raphael Ladeira de Assis Republicano, Victor Fontenele Carvalho e Luíz Gustavo Silva Santos. Também quero expressar minha gratidão aos colegas do SIS-UnB e à secretaria do PPGGAG, em especial, à Débora Alexandre Campos, cujo apoio foi fantástico.

Ao Prof. George Sand, pelo empréstimo do equipamento e pelo apoio nos trabalhos de campo em Sete Lagoas. Estendo meus agradecimentos à Eveline Sayão e à Daniele Ingridy Silva, por imensas contribuições nos trabalhos de campo em Sete Lagoas.

À CTBTO, minha gratidão pelos treinamentos e disponibilização de *software* e dados. E a CAPES, agradeço calorosamente, por sua generosidade em contribuir para o avanço da pesquisa em nosso país.

Por fim, quero manifestar o meu reconhecimento ao Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (em particular, ao Prof. Giuliano Sant'Anna Marotta), pelo apoio fundamental que ofereceu, tornando possível a realização deste projeto. Suas contribuições foram inestimáveis e sempre serão lembradas com gratidão.

Nada disso teria sido possível sem o apoio inabalável de todos vocês, e minha gratidão transcende as palavras. Obrigado, do fundo do meu coração, por fazerem parte desta jornada e por tornarem meu sonho uma realidade.

RESUMO

A única estação de infrassom no Brasil, a I09BR, localizada em Brasília e operada pelo Observatório Sismológico (SIS) da Universidade de Brasília, em parceria com a Comissão Preparatório para a Organização do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (PrepCom/CTBTO), apresenta limitações de detecção devido à sua configuração. Com um arranjo de apenas quatro elementos, espaçados entre 1 a 2 km, situados em meio à vegetação rasteira, a estação tem restrições na detecção de eventos locais e regionais. Para melhorar a sensibilidade e padronização da rede do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS), o Secretariado Técnico Provisório da PrepCom/CTBTO está modernizando as estações globais de infrassom, aumentando o número de elementos. A primeira parte do nosso trabalho consiste na identificação de locais adequados para os novos elementos no arranjo da I09BR, com a avaliação de respostas e medição dos níveis de ruído. Simulação feita com um subarranjo de cinco novos elementos, adicionados ao arranjo da estação de infrassom brasileira, mostra melhorias significativas na detecção. Com espaçamentos entre os elementos variando de 150 a 900 metros, a partir do elemento central da estação, o número de detecções aumenta consideravelmente e o *aliasing* espacial diminui, demonstrando o potencial de aprimoramento da Estação I09BR.

Além disso, usou-se a tecnologia de infrassom para discriminar eventos naturais (tectônicos) de eventos artificiais (explosões químicas), mesmo quando próximos. A co-localização de estações sísmicas e de infrassom se mostrou eficaz para distinguir esses eventos. Na segunda parte deste trabalho, apresentamos um método simples e útil para ajudar a discriminar esses dois tipos de eventos, usando estações co-localizadas em Sete Lagoas/MG. Os registros obtidos mostram que eventos tectônicos de baixa magnitude ($M < 3$) não geram sinais infrassônicos.

Palavras-chaves: Infrassom; Estação I09BR; PrepCom/CTBTO; Estações infrassônicas co-localizadas, discriminação de evento

ABSTRACT

The only infrasound station in Brazil, I09BR, located in Brasília and operated by the Seismological Observatory (SIS) of the University of Brasília, in partnership with the Preparatory Commission for the Organization of the Total Nuclear Test Ban Treaty (PrepCom/CTBTO), presents detection limitations due to its configuration. With an array of just four elements, spaced between 1 and 2 km, located amidst low vegetation, the station has limitations in detecting local and regional events. To improve the sensitivity and standardization of the International Monitoring System (IMS) network, the PrepCom/CTBTO Provisional Technical Secretariat is modernizing the global infrasound stations by increasing the number of elements. The first part of our work consists of identifying suitable locations for the new elements in the I09BR array, evaluating responses and measuring noise levels. Simulation carried out with a subarray of five new elements, added to the Brazilian infrasound station array, shows significant improvements in detection. With spacing between elements varying from 150 to 900 meters, from the central element of the station, the number of detections increases considerably and spatial aliasing decreases, demonstrating the improvement potential of Station I09BR.

Additionally, infrasound technology is used to help discriminate natural (tectonic) events from man-made events (chemical explosions), even when they are close together. The co-location of seismic and infrasound stations has proven effective in distinguishing these events. In the second part of this work, we present a simple and useful method to help discriminate these two types of events, using co-located stations in Sete Lagoas/MG. The records obtained show that low-magnitude ($M < 3$) tectonic events do not generate infrasonic signals.

Keywords: Infrasound; I09BR Station; PrepCom/CTBTO; Co-located infrasound stations, event discrimination

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Caminho de propagação das ondas infrassônicas, geradas por uma fonte localizada na origem do gráfico (estrela amarela), em relação às altitudes. São mostradas as camadas atmosféricas e as fases relativas ao caminho de propagação e ângulos de partida dos sinais infrassônicos: Iw , sinais propagados na Troposfera (0-10 km); Is , sinais propagados na Estratosfera (10-40 km); It , sinais propagados na Termosfera (40-120 km); e altitudes de escape dos raios, sinais propagados na Alta termosfera (acima de 120 km), modificada de Brachet et al., 2010.....	3
Figura 2.1	Mapa de localização dos quatro elementos da Estação I09BR (triângulos verdes), no interior do PNB, em Brasília. O quadrado vermelho indica a localização da Estação Central de Registro (CRF), localizada no Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB), onde os dados são recebidos, gravados, analisados e retransmitidos para o Centro Internacional de Dados (IDC), em Viena - Áustria.....	13
Figura 2.2	Estações da Rede do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS) da CTBTO (modificada de CTBTO).....	15
Figura 2.3	Modelo do microbarômetro DASE-MB2000, com um LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear) acoplado a uma cápsula aneroide, utilizado na Estação I09BR (modificada de CEA/DASE, 1998; Martec, 2006).....	16

Figura 2.4	Sistema de Redução de Ruído do Vento (<i>Wind Noise Reduction System – WNRS</i>), presente em cada um dos elementos da I09BR, mostrando as quatro rosetas conectadas ao microbarômetro, localizado no abrigo ao centro, através dos <i>summing manifolds</i> . Observa-se, também, uma torre para antena, que é conectada a um rádio para a transmissão contínua dos dados à Estação Central de Registro (modificada de Blanc e Ceranna, 2009).....	17
Figura 2.5	Diagrama esquemático de um arranjo infrassônico típico de “n” elementos, transmitindo dados a uma Estação Central de Registro (<i>Central Recording Facility – CRF</i>) e, posteriormente, ao Centro Internacional de Dados (<i>International Data Center – IDC</i>), em Viena – Áustria (modificada de Marty, 2019).....	18
Figura 2.6	Curva de resposta em amplitude (acima) e curva de resposta em fase (abaixo) do sensor barográfico utilizado nas estações temporárias. As curvas azuis representam o modelo empregado neste trabalho, com filtro interno de 1 segundo, e as curvas em laranja representam outro modelo, com filtro interno de 20 segundos (<i>RaspberryShake Specifications</i> , 2022).....	21
Figura 2.7	Curva de resposta em amplitude relativa ao ruído eletrônico (self-noise) do sensor barográfico do RS&Boom utilizado neste trabalho (modificada de <i>RaspberryShake Specifications</i> , 2022). São mostradas as curvas de respostas de três equipamentos deste modelo.....	21
Figura 2.8	Modelo de filtro desenvolvido para a redução do ruído do vento. Em A , espuma de poliuretano com tubo plástico inserido ao centro. Em B e C , camada de brita cobrindo a espuma de poliuretano. O tubo plástico inserido à espuma está acoplado à entrada do sensor barográfico, não mostrado na figura.....	23

Figura 2.9	Resultado da primeira fase do teste do filtro. Equipamento R7279 (linha azul) utilizando o filtro e equipamento R6CF7 (linha vermelha) sem utilização do filtro. Observa-se uma redução, em um fator de 10, na amplitude dos dois sinais entre 0,6 e 10 Hz.....	24
Figura 2.10	Resultado da segunda fase do teste do filtro. Ambos os equipamentos, R7279 (linha azul) e equipamento R6CF7 (linha vermelha), não utilizaram o filtro. Observa-se que as curvas estão perfeitamente casadas a partir de 0.1 Hz, demonstrando que os dois equipamentos apresentam a mesma resposta em função do ruído ou sinais detectados nessa faixa de frequência..	24
Figura 2.11	Em A , estão representadas as onze bandas de frequências utilizadas no processamento PMCC para a detecção de eventos infrassônicos. No eixo x, as durações das janelas (em segundos) de cada banda. Em B , curvas de respostas em amplitude dos filtros aplicados no processamento PMCC relativos a cada banda. Em C , as respectivas respostas em fase dos filtros (CEA/DASE, 2016a).....	27
Figura 2.12	Formação do pixel PMCC, à esquerda, e o agrupamento de pixels, de acordo com os atributos semelhantes, à direita, formando uma família PMCC (modificada de CEA/DASE, 2016a).....	28
Figura 2.13	Estações temporárias instaladas no Parque Nacional de Brasília (triângulos vermelhos). Os códigos duplos denotam os elementos que compartilharam os sites da Estação I09BR.....	30
Figura 2.14	Equipamento compartilhando o <i>site</i> do elemento I09H1. Em A , RS&Boom no interior do <i>vault</i> , próximo ao microbarômetro e ao conjunto de baterias. Em B , vista do filtro conectado ao RS&Boom, por meio do tubo plástico. Em C , filtro coberto por camada brita.....	31
Figura 2.15	Instalação típica de um dos elementos temporários. À esquerda, RS&Boom conectado à bateria e ao filtro. À direita, caixa de proteção para os equipamentos, camada de brita que cobriu o filtro e o painel solar.....	31

Figura 2.16	Arranjo de quatro elementos da Estação I09BR e respectivo gráfico polar dos erros estimados de velocidade do sinal (linha vermelha – m/s) e do azimute (linha amarela – graus), para frentes de ondas planas propagando a 340 m/s. A taxa de amostragem do sinal é de 20 sps.....	32
Figura 2.17	Respostas do arranjo, em função do número de ondas e do azimute (K em rad/m), relativo à propagação da frente de onda plana, a uma velocidade de 340 m/s, com frequências de 0,1 a 20 Hz, detectadas pelo arranjo da Estação I09BR, com quatro elementos.....	33
Figura 2.18	Arranjo de nove elementos e respectivo gráfico polar dos erros estimados de velocidade do sinal (linha vermelha – m/s) e do azimute (linha amarela – graus), para frentes de ondas planas propagando a 340 m/s. A taxa de amostragem do sinal é de 20 sps.....	34
Figura 2.19	Respostas do arranjo, em função do número de ondas e do azimute (K em rad/m), relativo à propagação da frente de onda plana, a uma velocidade de 340 m/s, com frequências de 0,1 a 20 Hz, detectada pelo arranjo de nove elementos proposto.....	35
Figura 2.20	Em A , PSD das estações temporárias utilizando o equipamento RS&Boom. Em B , PSD das estações da I09BR utilizando os equipamentos originais do IMS.....	36
Figura 2.21	Deteccões a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 02/06/2023, nas nove estações temporárias. Em A , Janela Superior: azimute e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B , gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimute do registro das detecções. Em C , gráfico polar relativo ao tempo e à velocidade versus azimute do registro das detecções.....	42
Figura 2.22	Deteccões a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 02/06/2023, nas quatro estações temporárias. Em A , Janela Superior: azimute e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B , gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimute do registro das detecções. Em C , gráfico polar relativo ao tempo e à velocidade versus azimute do registro das detecções.....	43

Figura 2.23	Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 02/06/2023, nas quatro estações do IMS (I09BR). Em A , Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B , gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C , gráfico polar relativo ao tempo e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.....	44
Figura 2.24	Registros, em A , correspondentes ao canal de velocidade do vento (LWS) – traço 1, proveniente da estação meteorológica instalada no elemento I09H1 – e aos canais dos sinais de infrassom (BDF), traços 2 a 5, da estação I09BR, referentes a seis dias de dados (01 a 06/10/2018). Em B , detalhe correspondente a um dia de dado (03/10/2018). Observa-se a correlação dos ruídos registrados em função da velocidade do vento presente nos elementos da I09BR.....	45
Figura 2.25	Provável explosão ocorrida em 02/06/2023, às 16h18 UTC, registrada nos nove elementos do arranjo proposto (traços azuis), e as respectivas respostas, apresentadas nas janelas superiores (Speed/Freq e Azimuth/Freq.). Os quatro códigos inseridos nos registros denotam os quatro elementos temporários que compartilharam os mesmos sites dos elementos da estação do IMS I09BR: R6CF7 = I09H2, R6DF9 = I09H4, R6E11 = I09H3 e R7279 = I09H1. No quadro superior, são mostrados detalhes numéricos das respostas obtidas.....	46
Figura 2.26	Provável explosão ocorrida em 02/06/2023, às 16h18 UTC, registrada nos quatro elementos do arranjo da I09BR (traços azuis), e as respectivas respostas, apresentadas nas janelas superiores (Speed/Freq e Azimuth/Freq.). No quadro superior, são mostrados detalhes numéricos das respostas obtidas.....	47
Figura 3.1	Mapa da região do Distrito Federal e de cidades vizinhas, mostrando a área do Parque Nacional de Brasília (PNB), a localização de quatro minas em atividades (estrelas azuis), do arranjo da Estação de Infrassom de Brasília – I09BR – composta por quatro elementos (triângulos verdes) e da Estação Sísmica Primária BDFB, onde foi instalada a estação co-localizada RFFB5 (triângulo vermelho).....	56

Figura 3.2	Registro do evento artificial ocorrido em 08/12/2022, às 20:16:12.6 UTC, detectado por: BDFB (traços 1, 2 e 3); RFFB5 (co-localizado no site BDFB), traço 4 (sinal sísmico) e traço 5 (sinal acústico); e I09BR (traços 6, 7, 8 e 9). Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais sísmicos (3 - 12 Hz) e acústicos (1 - 3 Hz).....	58
Figura 3.3	Mapa da área de estudo em Sete Lagoas. O triângulo verde representa a estação RFFB5. As estrelas azuis representam as minas em operação. Os círculos vermelhos indicam os epicentros dos eventos naturais, ocorridos entre 1931 e 2022 (catálogos IAG-USP e SIS-UnB).....	59
Figura 3.4	Tempo de chegada do sinal acústico após a fase sísmica P, em segundos, referente à S-P.....	61
Figura 3.5	Correlação entre os sinais dos eventos, caracterizados como tectônicos, ocorridos em 24/11/2022 às 02h03 UTC e 28/12/2022 às 03h42 UTC nas estações BSCB e DIAM, pertencentes à Rede Sismográfica Brasileira (RSBR). Em A , detalhe da correlação feita no pacote das ondas de corpo dos dois eventos na Estação BSCB, à esquerda, e detalhe da correlação no pacote das ondas de superfície, à direita. Em B , idem, porém na Estação DIAM. Os números inseridos nas quatro janelas representam os coeficientes de correlação dos sinais. Os sinais registrados foram filtrados na banda de 6-12 Hz.....	63
Figura 3.6	Correlação entre os sinais dos eventos 4, 5, 22 e 23 da Tabela 1, traços 1 a 4 respectivamente, registrados na Estação RFFB5. A figura de baixo mostra o detalhe da correlação dos sinais no pacote das ondas superficiais com o evento de referência (Traço 4). Os sinais registrados foram filtrados na banda de 6-12 Hz.....	64

Figura 3.7	Correlação entre os sinais dos eventos 9, 12, 13, 14 e 20 da Tabela 1, traços 1 a 5 respectivamente, registrados na Estação RFFB5. A figura de baixo mostra o detalhe da correlação dos sinais no pacote das ondas superficiais com o evento de referência (Traço 5). Os sinais registrados foram filtrados na banda de 6-12 Hz.....	65
Figura 3.8	Evento registrado em 18 de novembro de 2022, às 03:30 UTC, pela Estação RFFB5. O traço verde (traço superior) representa a componente vertical sísmica, enquanto o traço azul (traço inferior) representa a componente acústica, Evento #20 Tabela 1. A janela vermelha denota o tempo de registro esperado dos sinais acústicos. Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais acústicos (1 - 3 Hz).....	66
Figura 3.9	Evento registrado em 22 de novembro de 2022, às 03:34 UTC, pela Estação RFFB5. O traço verde (traço superior) representa a componente vertical sísmica, enquanto o traço azul (traço inferior) representa a componente acústica, Evento #22 Tabela 1. A janela vermelha denota o tempo de registro esperado dos sinais acústicos. Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais acústicos (1 - 3 Hz).....	66
Figura 3.10	Evento registrado em 24 de novembro de 2022, às 02:02 UTC, pela Estação RFFB5. O traço verde (traço superior) representa a componente vertical sísmica, enquanto o traço azul (traço inferior) representa a componente acústica, Evento #23 Tabela 1. A janela vermelha denota o tempo de registro esperado dos sinais acústicos. Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais acústicos (1 - 3 Hz).....	67
Figura 3.11	Evento registrado em 19 de outubro de 2022, às 14h16 UTC, pela Estação RFFB5. O traço verde (traço superior) representa a componente vertical sísmica, enquanto o traço azul (traço inferior) representa a componente acústica, Evento #11 na Tabela 1. Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais acústicos (1 - 3 Hz).....	68
Figura 3.12	Evento registrado em 29 de outubro de 2022, às 14h15 UTC, pela Estação RFFB5. O traço verde (traço superior) é a componente vertical sísmica e o traço azul (traço inferior) é a componente acústica, Evento # 17 Tabela 1. Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais acústicos (1 - 3 Hz).....	68

Figura 3.13 Evento registrado em 31 de outubro de 2022, às 14h14 UTC, pela Estação RFFB5. A componente vertical sísmica é representada a verde (traço superior) e a componente acústica a azul (traço inferior), Evento #19 na Tabela 1. Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais acústicos (1 - 3 Hz)..... 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Quantitativo de detecções realizadas pelos arranjos de nove e quatro elementos com equipamento RS&Boom e pelo arranjo de quatro elementos com equipamento IMS, ao longo de 40 dias.....	37
Tabela 2.2	Detecções realizadas pelos arranjos de nove elementos e pelo subarranjo de quatro elementos com equipamento RS&Boom e pelo arranjo com quatro elementos com equipamentos IMS no dia 02/06/2022.....	38
Tabela 3.1	Eventos locais detectados pela Estação RFFB5 no site de Sete Lagoas. Em amarelo, estão os nove eventos que não geraram sinais acústicos e que foram caracterizados como eventos tectônicos.....	60

ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analog Digital Converter
AFRL	Air Force Research Laboratory
ARF	Array Response Function
ARISE	Atmospheric Dynamics Research InfraStructure in Europe
BrJG	Brazilian Journal of Geophysics
CEA-DASE	Commissariat à l'Energie Atomique – Département Analyse Surveillance Environnement
CRF	Central Recording Facility
CTBT	Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty
CTBTO	Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization
EUA	Estados Unidos da América
GCI	Global Communication Infrastructure
GPS	Global Position System
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP)
ICAO	International Civil Aviation Organization
IDC	International Data Center of the International Monitoring System (IMS)
IMS	International Monitoring System
InfraMAP	Infrasound Modeling of Atmospheric Propagation
LACSC	Latin American and Caribbean Seismological Commission
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
NDC	National Data Center
OFIS	Optical Fiber Infrasound Sensor
ONU	Organização das Nações Unidas
PMCC	Progressive Multichannel Correlation Method
PNB	Parque Nacional de Brasília
PrepCom	Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO)
PSD	Power Spectral Density
PTS	Provisional Technical Secretariat

RPDC	República Popular Democrática da Coreia
RSBR	Rede Sismográfica Brasileira
SBGf	Sociedade Brasileira de Geofísica
SIS	Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (UnB)
SnT	Science and Technology Conference
sps	Samples per Second
TNT	Trinitrotolueno
UCSD	University of California San Diego
UnB	Universidade de Brasília
USP	Universidade de São Paulo
UTC	Universal Time Coordinated
WNRS	Wind Noise Reduction System

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	xiii
ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiv

CAPÍTULO 1

Introdução

Introdução.....	1
1.1 O Sinal Infrassônico.....	2
1.2 História e Importância do Monitoramento de Eventos Infrassônicos.....	3
1.3 Referências.....	6

CAPÍTULO 2

Melhoria na Capacidade de Detecção da Estação Infrassônica de Brasília

Resumo.....	9
Abstract.....	10
2.1 Introdução.....	12
2.2 A Rede de Estações do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS)..	14
2.3 A Estação de Infrassom de Brasília – I09BR.....	15
2.3.1 Filtro mecânico utilizado na I09BR.....	16
2.3.2 Transmissão dos dados.....	18
2.4 Materiais e Métodos.....	19

2.4.1 Equipamentos utilizados nas estações temporárias.....	19
2.4.1.1 Filtro utilizado nas estações temporárias.....	22
2.4.2 Função de Resposta de Arranjo.....	25
2.4.3 Método de correlação progressiva multicanal (PMCC).....	25
2.4.3.1 Método do grau médio de correlação estimada de sinal.....	28
2.4.4 Densidade espectral de potência (PSD).....	29
2.5 Instalação das Estações Temporárias no PNB.....	29
2.6 Resultados.....	32
2.6.1 Respostas dos arranjos.....	31
2.6.2 Densidade espectral de potência (PSD) para as estações temporárias e para as estações com equipamentos originais do IMS.....	35
2.6.3 Comparativo das detecções obtidas em função dos arranjos testados.....	36
2.7 Discussão.....	45
2.8 Conclusões.....	48
2.9 Referências.....	49

CAPÍTULO 3

Discriminação de Eventos Tectônicos de Explosões em Pedreiras, Utilizando a Tecnologia Infrassônica

Resumo.....	53
Abstract.....	54
3.1 Introdução.....	55
3.2 Método.....	56
3.2.1 Comparação de Eventos Registrados por RFFB5 no PNB.....	58
3.3 Comparação de Eventos Registrados por RFFB5 no PNB.....	56
3.4 Caso Sete Lagoas.....	59
3.5 Dados.....	60
3.6 Resultados.....	61
3.7 Discussão e Conclusões.....	69

3.8 Referências.....	71
-----------------------------	-----------

CAPÍTULO 4

Discussão e Conclusões

4.1 Discussão.....	73
4.2 Conclusões.....	77
4.3 Referências.....	78

ANEXO 1 – Registros e Respectivas Detecções dos Arranjos.....	79
ANEXO 2 – Curva de Resposta do Microbarômetro MB2000.....	98
ANEXO 3 – Códigos Python Desenvolvidos no Trabalho.....	99
ANEXO 4 – Trabalhos Publicados no Âmbito desta Dissertação.....	104

CAPÍTULO 1

Introdução

Esta dissertação tem dois propósitos distintos: apresentar o estudo para a melhoria na capacidade de detecção da Estação Infrassônica de Brasília I09BR, do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS), e apresentar os resultados do emprego da tecnologia de infrassom na discriminação de terremotos de pequena magnitude e explosões em pedreiras.

O trabalho está organizado em quatro capítulos: no Capítulo 1, é feita uma introdução ao sinal infrassônico, são apresentadas algumas de suas fontes, formas de propagação dos sinais infrassônicos na atmosfera, história e importância do monitoramento de eventos infrassônicos. Introduz o Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty* – CTBT) e sua verificação, com a aplicação do monitoramento infrassônico de explosões nucleares. O Capítulo 2 apresenta as tecnologias de verificação do Tratado CTBT. Apresenta o objetivo, o problema a ser resolvido e a hipótese para a sua solução, que está relacionada à melhoria na capacidade de detecção da Estação I09BR. Também é feita a descrição da estação. Apresenta, ainda, a metodologia, os materiais empregados no estudo, os resultados, discussão e conclusão obtidas acerca do tema. No Capítulo 3, é apresentado o resultado dos estudos realizados para a discriminação de eventos tectônicos de explosões em pedreiras, localizadas na cidade de Sete Lagoas/MG, utilizando a tecnologia de infrassom. No Capítulo 4, são apresentadas discussão e conclusões. O Anexo 1 mostra informações complementares obtidas em função das detecções dos arranjos que foram testados no trabalho. O Anexo 2 contém a curva de resposta do microbarômetro MB2000, utilizado nos elementos do arranjo da I09BR. No Anexo 3, são apresentados dois códigos, desenvolvidos em Python, para determinar a resposta dos arranjos e a confecção dos respectivos mapas. No Anexo 4, são informados os trabalhos publicados no âmbito desta dissertação (artigo, livro, resumos simples e resumos expandidos).

1.1 O Sinal Infrassônico

O infrassom é uma onda mecânica com frequências inferiores a 20 Hz e, portanto, inaudível pelo ser humano. Pode ser gerado por fontes artificiais, como: aviões hipersônicos (Norén-Cosgriff et al., 2022), explosões químicas ou nucleares (Barros et al., 2021), lançamentos de foguetes espaciais (Evers et al., 2018), ou por fontes naturais, como: terremotos (de Groot-Hedlin e Hedlin, 2019), erupções vulcânicas (Matoza et al., 2019), bem como por fenômenos climáticos, como: tornados, tempestades e raios (Waxler e Assink, 2019), meteoritos, desprendimentos de icebergs e geleiras, auroras e *microbaroms*¹ (Waxler e Gilbert, 2006; Campus e Christie, 2010).

As ondas infrassônicas se propagam pela atmosfera e, devido aos seus longos comprimentos de ondas, sofrem baixa atenuação, percorrendo, então, grandes distâncias. Podem ocorrer refrações e reflexões em diferentes camadas da atmosfera, formando guias de onda para a propagação dos sinais infrassônicos (Garcés et al., 1998; Norris et al., 2009; Waxler e Assink, 2019). A refração transcorre nas regiões situadas entre a estratosfera superior e a mesosfera inferior (em altitudes próximas de 50 km), assim como na termosfera (altitudes acima de 100 km), **Fig. 1.1** (Brachet et al., 2010). A propagação do infrassom depende de efeitos meteorológicos, como: ventos, temperatura e estações do ano (Kulichkov, 2009; Norris et al., 2009). As ondas infrassônicas podem ser detectadas por barômetros ou por microbarômetros, aparelhos sensíveis a pequenas variações da pressão atmosférica.

¹ Resultam de interações não lineares das ondas de superfície dos oceanos, viajando em diferentes direções, com a atmosfera.

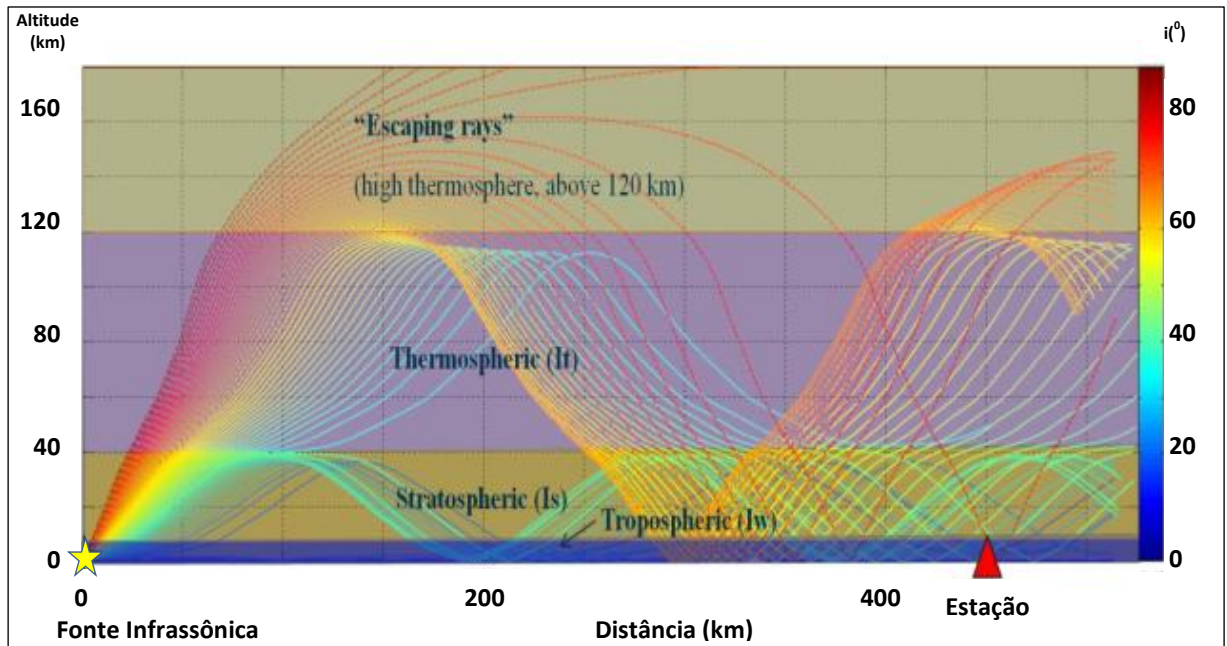


Figura 1.1 – Caminho de propagação das ondas infrassônicas, geradas por uma fonte localizada na origem do gráfico (estrela amarela), em relação às altitudes. São mostradas as camadas atmosféricas e as fases relativas ao caminho de propagação e ângulos de partida dos sinais infrassônicos: I_w , sinais propagados na Troposfera (0-10 km); I_s , sinais propagados na Estratosfera (10-40 km); I_t , sinais propagados na Termosfera (40-120 km); e altitudes de escape dos raios, sinais propagados na Alta termosfera (acima de 120 km), modificada de Brachet et al., 2010.

1.2 História e Importância do Monitoramento de Eventos Infrassônicos

O estudo das ondas sonoras e suas frequências começaram a se desenvolver no século XIX, com pesquisadores como Ernst Chladni (1756-1827) e August Kundt (1839-1894). Seus estudos e experimentos pioneiros abriram caminho para avanços subsequentes na ciência das ondas acústicas e suas aplicações em várias disciplinas. No entanto, a descoberta do infrassom como um campo de estudo específico ocorreu mais tarde.

O monitoramento de eventos infrassônicos contribui para validar e/ou desenvolver modelos de propagação atmosférica, obtidos por meio de observações meteorológicas. Com a detecção de um evento infrassônico, com a localização e o tempo de origem bem conhecidos, considerado, portanto, um evento *Ground Truth* (GT) (Czanik et al., 2021), podem-se fazer inferências sobre as condições atmosféricas predominantes e determinar modelos de propagação das ondas infrassônicas (Simmons, 2019).

O estágio atual dos estudos infrassônicos deve-se à existência do Tratado CTBT e de sua verificação, por meio das estações da rede do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS), que será abordado no Capítulo 2. Esta tecnologia era considerada um experimento ultrassecreto de alguns poucos países para monitorar testes nucleares atmosféricos durante a Guerra Fria. Para torná-la uma ferramenta mais eficaz para o monitoramento de explosões nucleares, como forma de melhorar a verificação do cumprimento do CTBT e de ampliar a sua aplicação, a Comissão Preparatória para a Organização do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (*Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization* – PrepCom/CTBTO), sediada em Viena, Áustria, realizou um redesenho completo do sistema de revisão automática e interativa de infrassom, entre 2004 e 2010, do seu Centro Internacional de Dados (*International Data Center* – IDC). Esse esforço permitiu a detecção do teste nuclear subterrâneo anunciado pela República Popular Democrática da Coreia (RPDC), em 12 de fevereiro de 2013 (Che et al., 2014). Permitiu, ainda, que a tecnologia de infrassom também contribuísse para a detecção de uma série de eventos significativos com impacto global, como: o terremoto de Tohoku, em 2011 (Walker et al., 2013), que causou um tsunami que desencadeou o acidente de Fukushima, no Japão; as erupções vulcânicas de Calbuco, no Chile, em 2015 (Matoza et al., 2018), assim como a de Monte Kelud, na Indonésia, em 2014 (Caudron et al., 2015). Também foi possível a detecção do maior evento de infrassom já registrado: o meteoro que se desfez sobre Chelyabinsk, na Rússia, em 2013 (Tauzin et al., 2013), equivalente a uma explosão de 500 kt de trinitrotolueno (TNT). Além das atividades inerentes ao cumprimento do Tratado CTBT, a PrepCom/CTBTO também participa ativamente em projetos de colaboração internacional com a tecnologia de infrassom, como o projeto europeu de infraestrutura ARISE (*Atmospheric Dynamics Research InfraStructure in Europe*), e com a *International Civil Aviation Organization* (ICAO), na investigação da utilidade dos dados do IMS e produtos do IDC para a comunidade internacional da aviação civil, na identificação e caracterização de erupções vulcânicas (Zerbo, 2019).

Sinais em outras bandas de frequência, além daqueles contidos na banda de frequência do IMS para a detecção de sinais infrassônicos oriundos de explosões nucleares realizados na atmosfera (0,02 – 4 Hz), puderam, então, ser percebidos e estudados. Sinais de período de um dia, por exemplo, podem ser detectados, o que abre caminho para o monitoramento global da gravidade acústica atmosférica e das ondas gravitacionais (Marty et al., 2010). Assim, outros eventos infrassônicos podem ser percebidos e detectados pela rede de infrassom do IMS.

Outra aplicação para os sinais de infrassom envolve a discriminação de eventos tectônicos, de pequena magnitude, de eventos ocasionados por detonações em pedreiras, que é objeto de investigação no Capítulo 3. Esta aplicação pode ajudar na determinação da natureza de eventos sísmicos de pequena magnitude que ocorrem próximos a pedreiras, devido à dificuldade na discriminação, por haver forte similaridade nos registros desses dois tipos de evento.

1.3 Referências

Barros, L., Neri, B.L., Fontenele, D., Albuquerque, D., Quintero, R. and Carvalho, J. (2021). Seismo-Acoustic Signal Analysis and Yield Estimate of the Beirut, Lebanon, Accidental Explosion on August 4, 2020. *Brazilian Journal of Geophysics* 39(4): 629-644, ISSN 0102-261X Doi: 10.22564/rbgf.v39i4.2129

Brachet, N., Brown, D., Le Bras, R., Mialle, P. and Coyne, J. (2010). Infrasound monitoring for atmospheric studies, chapter monitoring the earth's atmosphere with the global IMS infrasound network. Springer, Dordrecht, pp 77–118. ISBN:978-1-4020-9507-8

Campus, P. and Christie, D. (2010). Worldwide observations of infrasonic waves. In: Le Pichon A, Blanc E, Hauchecorne A (eds) *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Springer, Berlin, pp 29–75. Doi 10.1007/978-1-4020-9508-5_6.

Caudron, C., Taisne, B., Garcés, M., Le Pichon, A. and Mialle, P. (2015). On the use of remote infrasound and seismic stations to constrain the eruptive sequence and intensity for the 2014 Kelud eruption, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 6614–6621. doi:10.1002/2015GL064885

Che, I.-Y., Park, J; Kim, I., Kim, T.S. and Lee, H-I. (2014). Infrasound signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophys. J. Int.* (2014) 198, 495–503. doi: 10.1093/gji/ggu150

Czanik, C., Kiszely, M., Mónus, P., Sule, B. and Bondar, I. (2021). Identification of Quarry Blasts Aided by Infrasound Data. *Pure Appl. Geophys.* 178, 2287–2300. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02748-5>

de Groot-Hedlin, C. and Hedlin, M. (2019). Detection of infrasound signals and sources using a dense seismic network. In A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.), *Infrasound monitoring for atmospheric studies: Challenges in middle atmosphere dynamics and societal benefits* (pp. 669–700). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_21

Evers, L.G., Assink, J.D. and Smets, P.S.M. (2018). Infrasound from the 2009 and 2017 DPRK rocket launches. *Geophys. J. Int.* 213, 1785–1791 doi: 10.1093/gji/ggy092

Garcés, M. A., Hansen, R. A. and Lindquist, K. G. (1998). Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere. *Geophysical Journal International*, 135(1), 255–263. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00618.x>

Kulichkov, S. (2009). On the prospects for acoustic sounding of the fine structure of the middle atmosphere. In A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.), *Infrasound monitoring for atmospheric studies* (pp. 511–540). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5_16

Marty, J., Ponceau, D. and Dalaudier, F. (2010). Using the international monitoring system infrasound network to study gravity waves. *Geophys Res Lett* 37:L19802

Matoza, R., Fee, D., Green, D., and Mialle, P. (2019). Volcano infrasound and the international monitoring system. In A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.), *Infrasound monitoring for atmospheric studies: Challenges in middle atmosphere dynamics and societal benefits* (pp. 1023–1077). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_33

Matoza, R. S., Fee, D., Green, D. N., Le Pichon, A., Vergoz, J. and Haney, M. (2018). Local, regional, and remote seismo-acoustic observations of the April 2015 VEI 4 eruption of Calbuco volcano, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 3814–3827. <https://doi.org/10.1002/2017JB015182>

Norén-Cosgriff, K., Belyaev, I. and Løvholt, F. (2022). Building vibration induced by sonic boom - field test in Russia. *Applied Acoustics*, Volume 185, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108422>

Norris, D., Gibson, R., and Bongiovanni, K. (2009). Numerical methods to model infrasonic propagation through realistic specifications of the atmosphere. In A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.), *Infrasound monitoring for atmospheric studies* (pp. 541–573). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5_17

Simmons, A. (2019). Forward to the *Infrasound Monitoring for atmospheric studies*. In: Le Pichon A, Blanc E, Hauchecorne A (eds) *Infrasound Monitoring for atmospheric studies*, 2nd edn. Springer, Dordrecht

Tauzin, B., E. Debayle, C. Quantin, and Coltice, N. (2013), Seismoacoustic coupling induced by the breakup of the 15 February 2013 Chelyabinsk meteor. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3522–3526, doi:10.1002/grl.50683

Walker, K. T., Le Pichon, A., Kim, T.S., de Groot-Hedlin, C., Che, I.-Y and Garcés, M. (2013). An analysis of ground shaking and transmission loss from infrasound generated by the 2011 Tohoku earthquake, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 12,831–12,851, doi:10.1002/2013JD020187

Waxler, R. and Assink, J. (2019). Propagation modeling through realistic atmosphere and benchmarking. In A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.), *Infrasound monitoring for atmospheric studies: Challenges in middle atmosphere dynamics and societal benefits* (pp. 509–549). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_15

Waxler, R. and Gilbert, K. (2006). The radiation of atmospheric microbaroms by ocean waves. *J Acoustic Soc Am* 119:5

Zerbo, L. (2019). Forward to the *Infrasound Monitoring for atmospheric studies*. In: Le Pichon A, Blanc E, Hauchecorne A (eds) *Infrasound Monitoring for atmospheric studies*, 2nd edn. Springer, Dordrecht

CAPÍTULO 2

Melhoria na Capacidade de Detecção da Estação Infrassônica de Brasília

Resumo

A única estação brasileira de infrassom está localizada em Brasília. É mantida e operada pelo Observatório Sismológico (SIS) da Universidade de Brasília (UnB), em parceria com a PrepCom/CTBTO. Está instalada no interior do Parque Nacional de Brasília (PNB) e consiste em um arranjo de quatro elementos dispostos nos vértices de um triângulo, de aproximadamente 2 km de lado, com um elemento no centro.

A capacidade de detecção de uma estação de infrassom depende, fundamentalmente, da sua localização, do seu número de elementos e de sua respectiva conformação espacial, bem como das técnicas/ferramentas de processamento dos sinais. A estação de infrassom brasileira (I09BR) não possui boa detectabilidade para eventos locais e regionais ($D \leq 1000$ km), devido ao fato de o seu arranjo possuir apenas quatro elementos, ter uma abertura maior que 2 km, e distância mínima entre elementos de 1 km, bem como por estar localizada em um ambiente com vegetação predominantemente rasteira (área de cerrado). A baixa densidade de árvores favorece a incidência de ventos, e, portanto, o aumento do ruído, que mascara possíveis detecções, a depender da intensidade do ruído. O Secretariado Técnico Provisório (*Provisional Technical Secretariat* – PTS) da PrepCom/CTBTO está fazendo a modernização das estações da rede global de infrassom do Sistema de Monitoramento Internacional (*International Monitoring System* – IMS), com vistas à melhoria da sensibilidade e à padronização da rede, aumentando de quatro para oito (ou nove) o número de elementos dos arranjos. Ao SIS – UnB, que tem contrato de parceria com a CTBTO, cabe cooperar na definição de locais apropriados para os novos elementos do arranjo. Isto implica na determinação da resposta do novo arranjo e de medir o nível de ruído em cada novo ponto. As ferramentas computacionais utilizadas neste trabalho são do pacote NDC-in-a-Box (DTK-GPMCC), disponibilizado pela PrepCom/CTBTO aos países signatários do Tratado CTBT para detecção, leitura e análise de sinais infrassônicos.

Os resultados obtidos com a realização de simulações de diferentes configurações de arranjos, adicionando ao arranjo da I09BR um subarranjo de cinco novos elementos, distribuídos dentro e nas cercanias da área triangular da Estação I09BR, indicam uma melhora

no ganho da estação. As interdistâncias com os novos elementos variam de 150 a 900 metros a partir do elemento central da I09BR (I09H1). Considerando a relação entre as novas interdistâncias e os respectivos comprimentos de ondas de sinais infrassônicos que podem ser detectados, verificou-se um aumento expressivo no número de detecções com o novo arranjo proposto, além de uma importante diminuição do efeito do *aliasing* espacial.

Palavras-chaves: Infrassom, PTS/CTBTO, IMS, Capacidade de Detecção, Resposta de Arranjo.

Abstract

The only Brazilian infrasound station is located in Brasília. It is maintained and operated by the Seismological Observatory (SIS) of the University of Brasília (UnB), in partnership with the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization – PrepCom/CTBTO). It is installed inside the Brasília National Park (PNB) and consists of an array of four elements arranged at the vertices of a triangle, approximately 2 km aperture, with one element in the center.

The detection capacity of an infrasound station depends, fundamentally, on its location, its number of elements and their respective spatial configuration, as well as the signal processing techniques/tools. The Brazilian infrasound station (I09BR) does not have good detectability for local and regional events ($D \leq 1000$ km), due to the fact that its array has only four elements, an aperture greater than 2 km, and a minimum distance between elements of 1 km, as well as being located in an environment with predominantly low vegetation (savannah area). The low density of trees favors the incidence of winds and, therefore, increased noise. The Provisional Technical Secretariat (PTS) of PrepCom/CTBTO is modernizing the stations of the global infrasound network of the International Monitoring System (IMS), with a view to improving the sensitivity and standardization of the network, increasing the number of elements in the arrays from four to eight (or nine). SIS – UnB, which has a partnership contract with CTBTO, is responsible for cooperating in defining appropriate locations for the new elements of the array. This involves determining the response of the new array and measuring the noise level at each new point in the array. The computational tools used in this work are from the NDC-in-a-Box (DTK-GPMCC) package, made available by PrepCom/CTBTO to signatory countries of the CTBT Treaty

(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty) for detection, reading and analysis of signals infrasonic.

The results obtained by carrying out simulations of different array configurations, adding to the I09BR array a subarray of five new elements, distributed within and around the triangular area of Station I09BR, indicate an improvement in the station's gain. The interdistances of the new elements vary from 150 to 900 meters from the central element of I09BR (I09H1). Considering the relationship between the new interdistances and the respective wavelengths of infrasonic signals that may be detected, there was a significant increase in the number of detections with the new proposed array, in addition to an important reduction in the effect of spatial aliasing.

Keywords: Infrasound, PTS/CTBTO, IMS, Detection Capacity, Array Response.

2.1 Introdução

Em várias áreas de aplicações, como sismologia, astronomia, geodésica, etc., arranjos de sensores são utilizados para caracterizar chegadas de frentes de ondas. A quantidade, o espaçamento e a distribuição desses sensores, dentre outros fatores, afetam a resolução espacial e a sensibilidade do arranjo, Ruigrok et al., 2017. A amostragem discreta do tempo e do espaço da frente de ondas impõe algumas restrições na largura da banda de frequência e nos respectivos comprimentos de onda que podem ser bem resolvidos pelo arranjo, de acordo com o teorema de amostragem de Nyquist. No caso da amostragem espacial, para um dado comprimento de onda λ a ser amostrado sem ambiguidade pelo arranjo, o espaçamento entre elementos, com distância “d” na direção do raio, deve ser menor que $\lambda/2$. Além disso, a resolução para o número de onda k correspondente a este comprimento de onda, $k = 2\pi/\lambda$, requer que o tamanho do arranjo “D” seja, no mínimo, λ . Estas duas condições podem ser escritas como $2d < \lambda < D$, Havskov et al., 2010.

O poder de detecção de estações infrassônicas formadas por arranjos de quatro elementos, como é o caso da Estação de Infrassom de Brasília, denominada I09BR, é limitado, devido a efeitos de *aliasing* espacial, caracterizado pela identificação errônea da frequência, resultando em distorção ou erro na informação contida no sinal (Campus e Christie, 2010). O *aliasing* espacial ocorre quando o espaçamento entre os sensores é muito grande em relação à frequência espacial (número de ondas) do sinal incidente. Isso significa que o arranjo de sensores não é capaz de distinguir as variações espaciais de alta frequência presente na frente de ondas. Como resultado, as informações são erroneamente representadas, e as características do sinal podem ser distorcidas ou perdidas.

Os quatro elementos do arranjo da Estação I09BR estão dispostos nos vértices de um triângulo e com um elemento próximo ao centro. A abertura máxima (distância entre elementos) é de cerca de 2 km e a mínima é de cerca de 1 km. Localizam-se em área de cerrado, com vegetação típica deste bioma, no interior do Parque Nacional de Brasília (PNB), uma área de preservação ambiental permanente, **Fig. 2.1** (Barros e Fontenele, 2002).

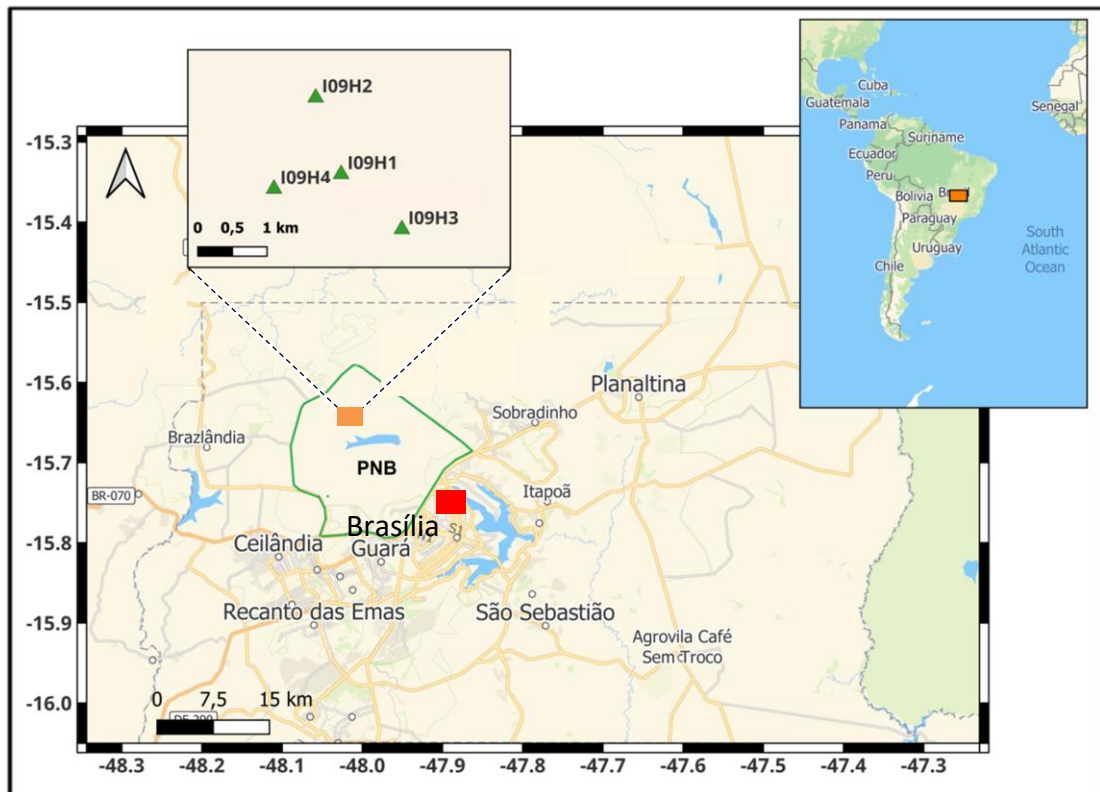


Figura 2.1 – Mapa de localização dos quatro elementos da Estação I09BR (triângulos verdes), no interior do PNB, em Brasília. O quadrado vermelho indica a localização da Estação Central de Registro (CRF), localizada no Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS-UnB), onde os dados são recebidos, gravados, analisados e retransmitidos para o Centro Internacional de Dados (IDC), em Viena - Áustria.

A PrepCom/CTBTO decidiu por uma modernização dos arranjos de quatro elementos (aumentando para oito ou nove o número de elementos), direcionada para a diminuição do *aliasing* espacial e do aumento, consequentemente, da detectabilidade de suas estações. Apesar de o poder de detecção da I09BR estar comprometido por esse efeito, a estação está em conformidade com o estabelecido no CTBT, que determina que explosões nucleares atmosféricas, com rendimento equivalente a, no mínimo, 1 kt de TNT, realizadas na atmosfera, devem ser detectadas por, pelo menos, duas estações de infrassom, em qualquer lugar do planeta e a qualquer tempo (Le Pichon et al., 2009, 2012, 2019; Green e Bowers, 2010), de forma a se obter uma estimativa do azimuth da frente de ondas e de outros parâmetros relativos aos sinais infrassônicos.

Estudos têm mostrado que além do *aliasing* espacial, outros fatores podem interferir na detectabilidade de uma estação, como: o nível de ruído de fundo em cada elemento e as características dos instrumentos empregados (Marty, 2019). O elemento I09H2, por estar

instalado no interior de uma área com alta densidade de árvores, possui um nível de ruído de fundo menor que os demais elementos do arranjo da I09BR, por estarem em áreas com menor densidade de vegetação de grande porte.

Este trabalho propõe um arranjo de nove elementos, escolhido a partir do modelamento de diferentes geometrias, adicionando cinco novos elementos à Estação I09BR e mantendo os quatro elementos originais. Essa escolha visou a uma maior sensibilidade do arranjo, de forma a maximizar a capacidade de detecção de eventos infrassônicos. Adicionalmente, foram realizadas medidas dos níveis de ruído de fundo em todos os novos elementos.

O novo arranjo com nove elementos possibilitará outra vantagem, relacionada à redundância na capacidade operacional, ao aumentar a garantia do cumprimento da missão das estações do IMS na verificação do CTBT, definida para atender ao requisito de operacionalidade com ao menos 70% do número de elementos em funcionamento. Deste modo, tendo uma quantidade maior de elementos, a disponibilidade de informações será incrementada, mesmo em caso da perda de um ou dois deles (Carter, 2011).

2.2 A Rede de Estações do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS)

Uma rede de monitoramento global de testes nucleares clandestinos foi criada com o propósito de verificar o cumprimento do CTBT. Esse Tratado foi aprovado pela Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU), em 1996, e aberto para assinaturas, naquele mesmo ano, pelos Estados Parte (Barros et al., 2020). Essa rede é mantida pela PrepCom/CTBTO e engloba sensores de quatro tecnologias distintas: infrassônica, sísmica, de radionuclídeos e de hidroacústica, que formam, então, o IMS, composto por 337 instalações (**Fig. 2.2**). O Brasil, que assinou e ratificou o Tratado, participa do CTBT no âmbito de três tecnologias da rede do IMS: sísmica, de radionuclídeos e de infrassom. Brasília possui a única estação brasileira de infrassom, a I09BR, já apresentada previamente.

Atualmente, das sessenta estações infrassônicas que foram planejadas para o IMS, cinquenta e três estão em pleno funcionamento.

O número total de estações, bem como as configurações espaciais, foi definido por um grupo de especialistas, ao longo de muitas reuniões e conferências realizadas em Genebra, três anos antes da abertura para assinatura do CTBT (*Conference on Disarmament*, 1995). O PTS

é o responsável pela implantação, manutenção e a modernização das estações pertencentes a esse sistema.

Até hoje, nenhum teste nuclear atmosférico foi registrado pela rede de infrassom do IMS, considerando-se que o último teste nuclear atmosférico, realizado pela China, em 16 de outubro de 1980, ocorreu bem antes do estabelecimento da primeira estação de infrassom pertencente ao sistema. Contudo, outras estações de infrassom já existiam em alguns países, como é o caso da rede de infrassom americana, em Montana, *The Large Aperture Microbarograph Array* (LAMA), que funcionou nos anos 1960; uma rede de pequena abertura na Suécia, que operou no início dos anos 1970; diversas outras redes na Holanda, que operaram nos anos 1990; dentre outras.

A crescente aplicação civil e científica dos dados das estações de infrassom do IMS corrobora para a sustentabilidade dessa rede. Isto garante que a tecnologia de infrassom permaneça no estado da arte para fins de verificação do CTBT.

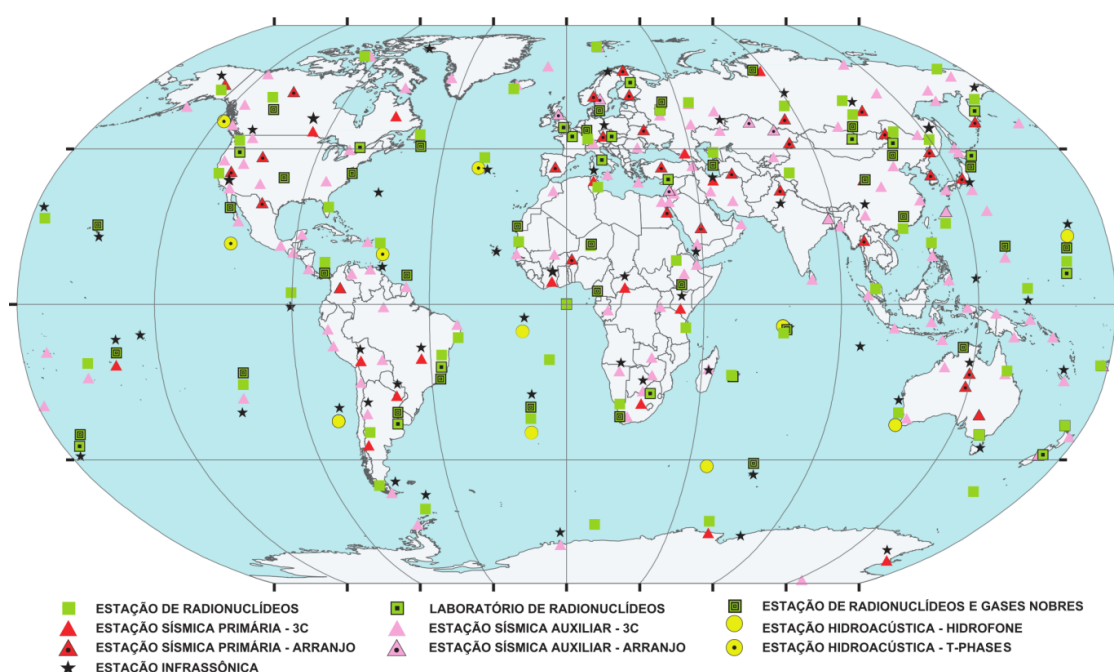


Figura 2.2 – Estações da Rede do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS) da CTBTO (modificada de CTBTO).

2.3 A Estação de Infrassom de Brasília – I09BR

Cada um dos quatro elementos do arranjo da I09BR contém um sensor de infrassom (microbarômetro), **Fig. 2.3**, com quatro portas de entrada, capaz de perceber as mudanças de

micro pressão atmosférica local. Cada microbarômetro é conectado, via cabo, a um sistema de aquisição de dados (digitalizador de 24 bits, configurado para uma taxa de amostragem de 20 amostras por segundo, com sincronização de tempo por GPS e com autenticador de dados). Apenas no elemento central do arranjo (elemento I09H1), encontra-se um sistema com equipamentos meteorológicos, composto por anemômetro ultrassônico, sensor de temperatura e barômetro absoluto.

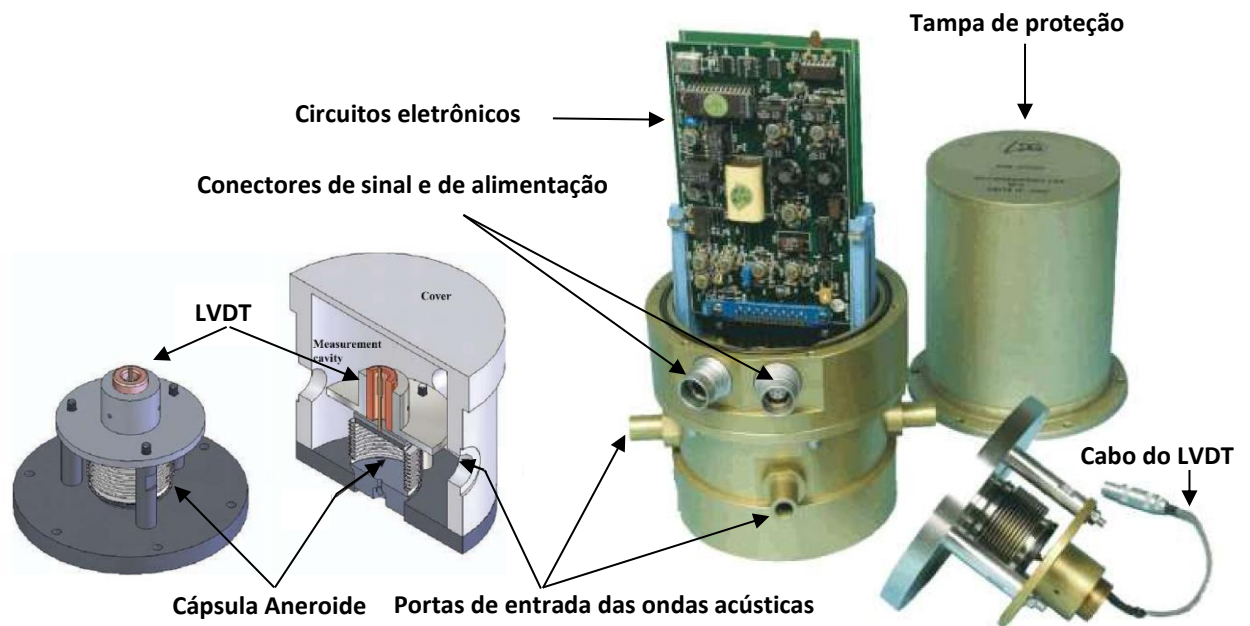


Figura 2.3 – Modelo do microbarômetro DASE-MB2000, com um LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear) acoplado a uma cápsula aneroide, utilizado na Estação I09BR (modificada de CEA/DASE, 1998; Martec, 2006).

2.3.1 Filtro mecânico utilizado na I09BR

Os sinais captados pelo microbarômetro são previamente submetidos a um processo de filtragem mecânica, através de um conjunto de quatro rosetas. Cada roseta é formada por dezenas de tubos acoplados a um miolo central, semelhante, na forma, a uma margarida. Essas rosetas têm como objetivo eliminar (destruir) os sinais incoerentes gerados pelo vento ou outras perturbações atmosféricas e preservar os sinais coerentes originados de eventos infrassônicos (Alcoverro, 1998; Alcoverro e Le Pichon, 2005). Esse conjunto de rosetas forma o Sistema de Redução de Ruído do Vento (*Wind Noise Reduction System – WNRS*), conforme ilustrado na **Fig. 2.4**.

Cada roseta é composta por 24 tubos, cuja uma das extremidades está conectada a um miolo central chamado *summing manifold* (SM). As extremidades opostas funcionam como portas de entrada de baixa impedância. O *summing manifold* tem a função de combinar acusticamente os sinais presentes nas entradas dos tubos, que representam as variações da pressão atmosférica local. O sinal acústico resultante é direcionado para uma das quatro portas de entrada do microbarômetro, por meio de um tubo localizado na parte inferior do SM. Porém, antes de chegar ao microbarômetro, os sinais passam por um supressor de ressonância, que são pequenos dispositivos conectados à saída dos quatro SM, que produzem ressonâncias mais planas nas respostas de frequência do conjunto de tubos (Hedlin e Alcoverro 2005).

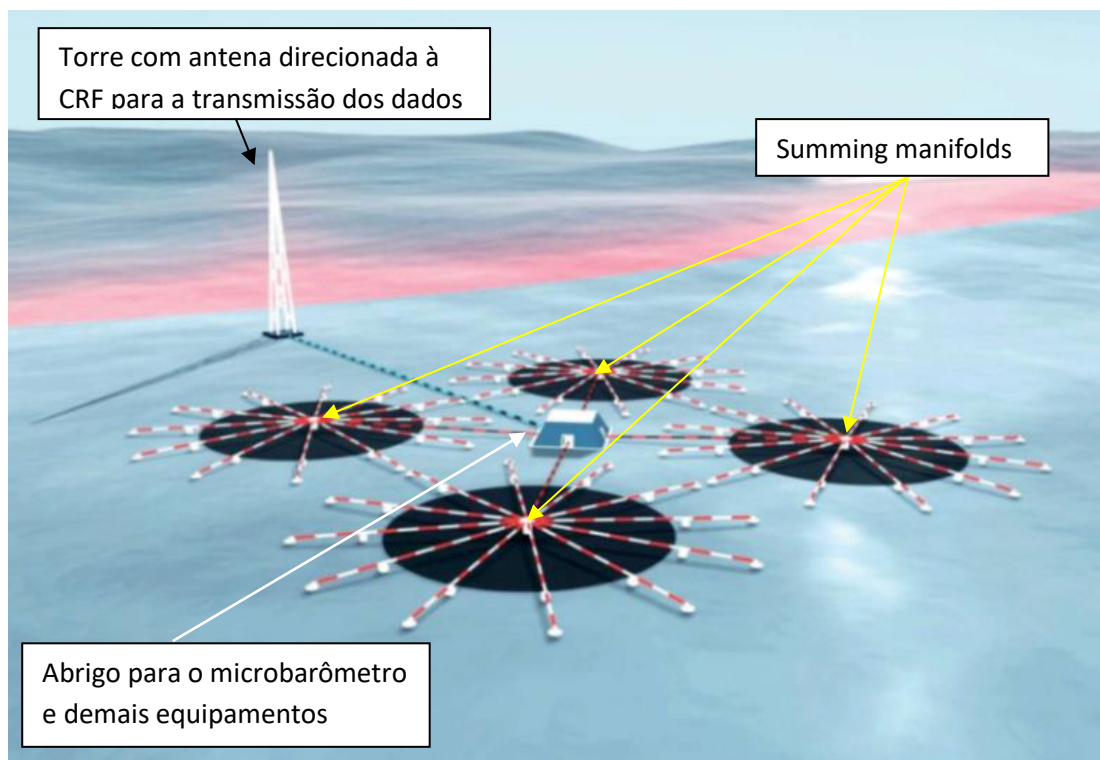


Figura 2.4 – Sistema de Redução de Ruído do Vento (*Wind Noise Reduction System – WNRS*), presente em cada um dos elementos da I09BR, mostrando as quatro rosetas conectadas ao microbarômetro, localizado no abrigo ao centro, através dos *summing manifolds*. Observa-se, também, uma torre para antena, que é conectada a um rádio para a transmissão contínua dos dados à Estação Central de Registro (modificada de Blanc e Ceranna, 2009).

2.3.2 Transmissão dos dados

Os dados dos quatro elementos do arranjo são transmitidos por meio de *links* de rádios, em tempo real, para o SIS-UnB, onde se localiza a Estação Central de Registro e Análise de Dados (*Central Recording Facility – CRF*), local de onde esses dados são reenviados ao IDC, por meio da Infraestrutura de Comunicação Global (*Global Communication Infrastructure – GCI*), **Fig. 2.5**, que é um sistema de transmissão que utiliza uma rede específica de seis satélites geoestacionários. No IDC, os dados são processados em tempo quase real, com algoritmos de detecção automática, para a extração de parâmetros de sinais infrassônicos das estações (Mialle et al., 2019).

Todos os equipamentos eletrônicos existentes nos quatro elementos são alimentados por sistemas de energia fotovoltaica independentes, compostos por painéis fotovoltaicos, baterias e controlador de carga.

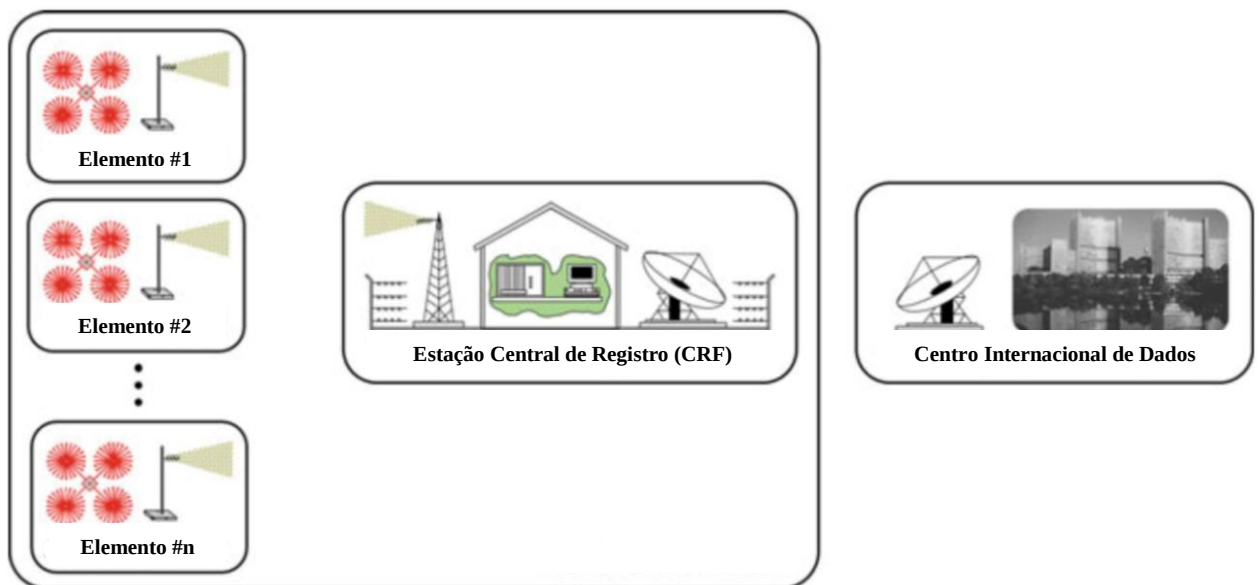


Figura 2.5 – Diagrama esquemático de um arranjo infrassônico típico de “n” elementos, transmitindo dados a uma Estação Central de Registro (*Central Recording Facility – CRF*) e, posteriormente, ao Centro Internacional de Dados (*International Data Center – IDC*), em Viena – Áustria (modificada de Marty, 2019).

2.4 Materiais e Métodos

Neste trabalho, foram realizadas modelagens de dezenas de arranjos infrassônicos com nove elementos, utilizando o pacote de *softwares* NDC-in-a-Box, distribuído pela PrepCom/CTBTO aos Estados Parte. Dentro do NDC-in-a-Box, foram usadas funcionalidades adicionadas ao programa DTK-GPMCC, desenvolvido pela *Commissariat à l'Energie Atomique – Département Analyse Surveillance Environnement* (CEA-DASE, 2016a), que permite, além da análise dos sinais infrassônicos, que sejam obtidos parâmetros de funcionamento da estação (arranjo), incluindo resposta do arranjo e incertezas associadas ao azimute e à velocidade dos sinais infrassônicos. A escolha do melhor arranjo teve como base o que apresentou a melhor resposta em função dos erros estimados de velocidade e de azimute, bem como o que melhor resolveu o problema do *aliasing* espacial.

O DTK-GPMCC contém um banco de dados com informações de todas as estações de infrassom do IMS, relativas à geometria, ao número de elementos, à resposta de arranjo e às incertezas associadas à velocidade do traço e ao azimute.

Os métodos adotados neste trabalho, e explicados nesta seção, envolvem, dentre outros, a aplicação da Função de Resposta de Arranjo (*Array Response Function* - ARF), que calcula a sensibilidade do arranjo, em função da quantidade e da distribuição dos elementos, e o seu comportamento, em função da frequência (número de ondas) da frente de onda, que para efeitos práticos neste estudo, consideraremos como sendo plana, atingindo o arranjo.

A densidade espectral de potência (*Power Spectral Density* - PSD) foi aplicada para conhecer a resposta das estações empregadas nos diferentes arranjos, em função da amplitude dos sinais nas diversas frequências registradas, visando saber os níveis de ruídos presentes nos registros dessas estações.

O método de correlação progressiva multicanal (*Progressive Multichannel Correlation Method* - PMCC), que é baseado no método do grau médio de correlação estimada de sinal, foi utilizado para avaliar os resultados obtidos, comparando os diferentes arranjos empregados.

2.4.1 Equipamentos utilizados nas estações temporárias

Como forma de provar ou de validar a melhoria da resposta do arranjo teórico (modelado), comparada ao arranjo atual de quatro elementos da Estação I09BR, foram

utilizados nove equipamentos do fabricante Raspberry Shake Company, modelo RS&Boom, constituído de um sensor barográfico (transdutor de micropressão acústica) e de um sensor sísmico vertical de período curto, conectados a uma mesma placa digitalizadora, acoplada a um computador Raspberry Pi 3, modelo B, tudo integrado em uma pequena caixa plástica IP67, de 160x90x90 mm. O equipamento foi escolhido por ter custo acessível, ser entregue em curto espaço de tempo e por ter características técnicas adequadas aos experimentos realizados neste trabalho, como baixo consumo de energia, baixo nível de ruído interno e banda de frequência, **figuras 2.6 e 2.7** (RaspberryShake Specifications, 2022).

O sensor barográfico e o respectivo digitalizador possuem as seguintes características principais:

- Transdutor diferencial de pressão, com temperatura compensada;
- Banda de frequência de operação de 1 a 44 Hz;
- Sensibilidade de 56.000 counts/Pascal +/- 10%;
- Clip level estimado +/- 8.388.608 counts (24 bits)
- Faixa de temperatura de operação compensada de 0 a 50° C;
- Máxima temperatura de operação -25° a 85° C (restante das partes eletrônicas é limitada a 0-60° C);
- Taxa de amostragem de 100 sps;
- Faixa dinâmica do ADC 144 dB (24 bits)
- Faixa dinâmica efetiva 126 dB (21 bits) de 1 a 20 Hz @ 100 sps
- Correção de tempo por meio de receptor GPS

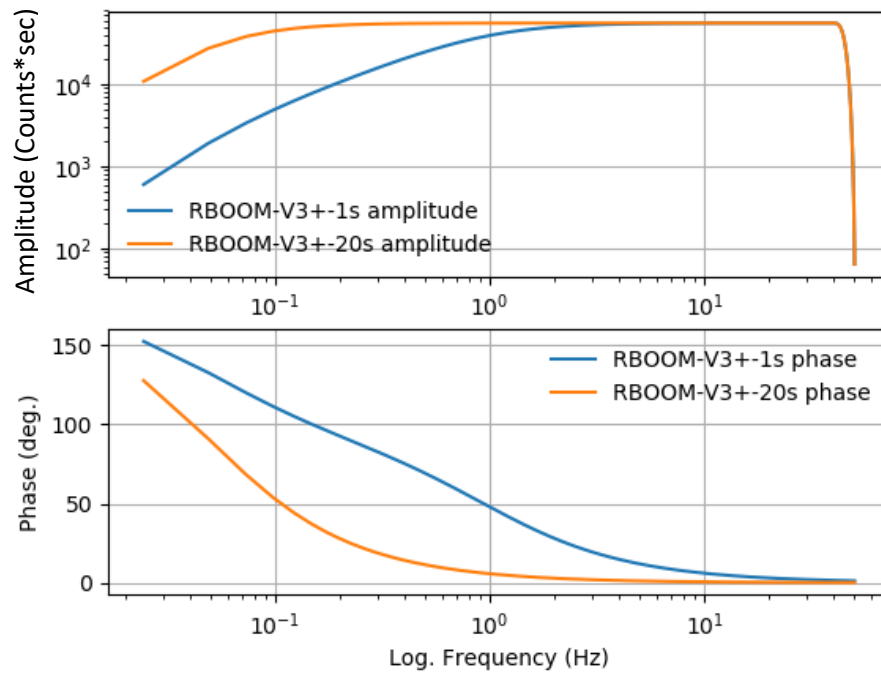


Figura 2.6 – Curva de resposta em amplitude (acima) e curva de resposta em fase (abaixo) do sensor barográfico utilizado nas estações temporárias. As curvas azuis representam o modelo empregado neste trabalho, com filtro interno de 1 segundo, e as curvas em laranja representam outro modelo, com filtro interno de 20 segundos (RaspberryShake Specifications, 2022).

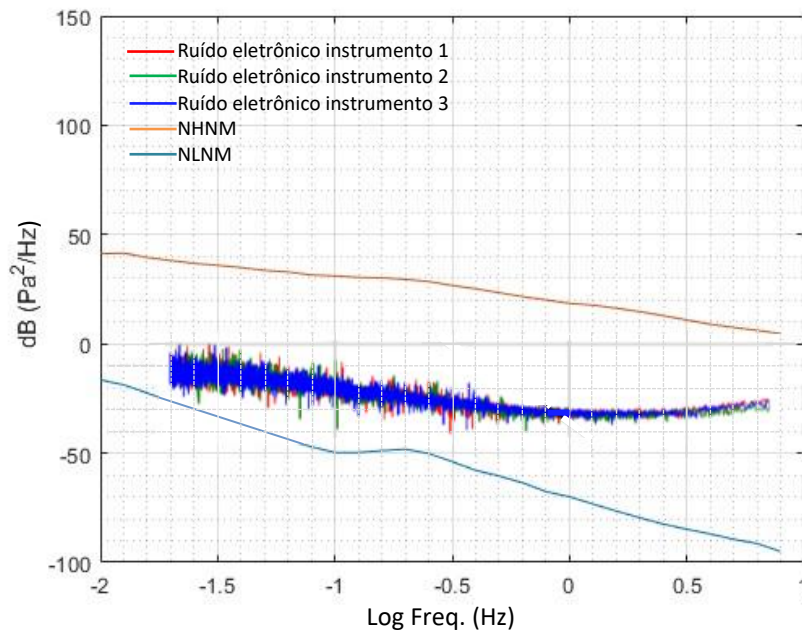


Figura 2.7 – Curva de resposta em amplitude relativa ao ruído eletrônico (*self-noise*) do sensor barográfico do RS&Boom utilizado neste trabalho (modificada de RaspberryShake Specifications, 2022). São mostradas as curvas de respostas de três equipamentos deste modelo.

2.4.1.1 Filtro utilizado nas estações temporárias

Para atenuar os ruídos causados pelo vento, foi desenvolvido um filtro mecânico para ser acoplado aos equipamentos das estações temporárias, constituído por uma espuma de poliuretano (esponja), com cerca de 10 x 10 x 10 cm, coberta por camada de brita de malha número 1, granulometria de cerca de 19 mm, com um tubo plástico inserido ao centro, de 1/4" de diâmetro e 1 metro de comprimento (**Fig. 2.8**), cuja a outra extremidade foi acoplada à entrada do sensor barográfico.

Para avaliar a resposta do filtro, foi realizado teste utilizando dois dos nove equipamentos disponibilizados para este trabalho (números de série R7279 e R6CF7). Os equipamentos foram instalados em um mesmo local, nas dependências do SIS-UnB, por períodos de três dias para cada fase do teste. Na primeira fase, o equipamento R7279 operou com o filtro acoplado ao sensor barográfico, enquanto que o equipamento R6CF7 operou sem filtro. Na segunda fase, ambos os equipamentos operaram sem o filtro.

Os resultados comparativos são apresentados nesta seção e mostram a diferença entre a utilização e a não utilização do filtro, **figuras 2.9 e 2.10**.

No gráfico da **Fig. 2.9**, observa-se que existe uma diferença entre as curvas, na faixa de 0,6 a 10 Hz, de um fator de 10 na resposta em amplitude, relativa ao nível do ruído local. A curva que representa o equipamento que utilizou o filtro denota que o nível de ruído é menor. Além disso, é possível observar alguns picos de amplitude após 15 Hz, como indicados nas **figuras 2.9 e 2.10**. Esses picos podem ser inerentes ao comportamento do equipamento, porém, não representam um problema, uma vez que estão, na maior parte, fora da faixa de frequência dos sinais de interesse deste trabalho. A faixa de frequência dos equipamentos é maior que as faixas de frequências das curvas de NHNM e NLNM, devido à resposta dos equipamentos ser de até 44 Hz.

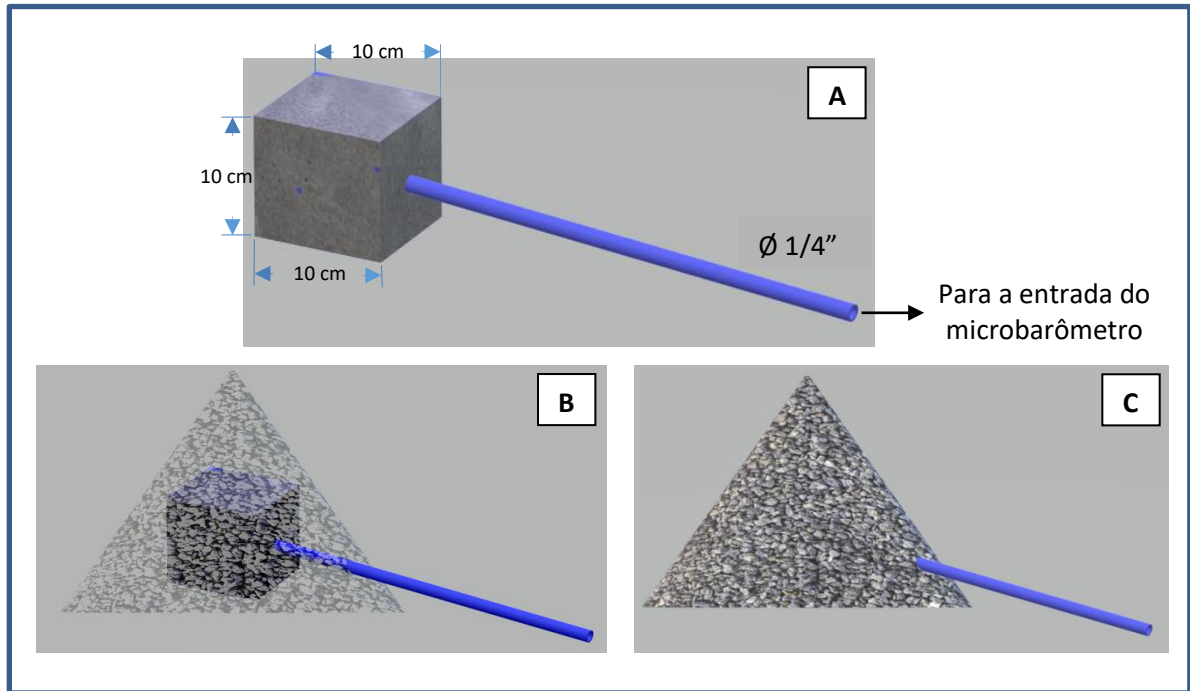


Figura 2.8 – Modelo de filtro desenvolvido para a redução do ruído do vento. Em **A**, espuma de poliuretano com tubo plástico inserido ao centro. Em **B** e **C**, camada de brita cobrindo a espuma de poliuretano. O tubo plástico inserido à espuma está acoplado à entrada do sensor barográfico, não mostrado na figura.

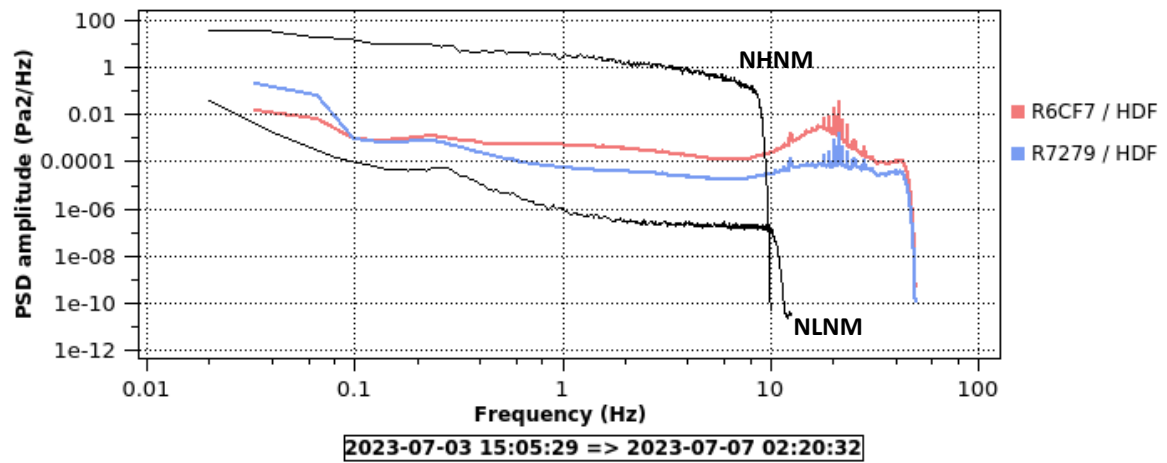


Figura 2.9 – Resultado da primeira fase do teste do filtro. Equipamento R7279 (linha azul) utilizando o filtro e equipamento R6CF7 (linha vermelha) sem utilização do filtro. Observa-se uma redução, em um fator de 10, na amplitude dos dois sinais entre 0,6 e 10 Hz.

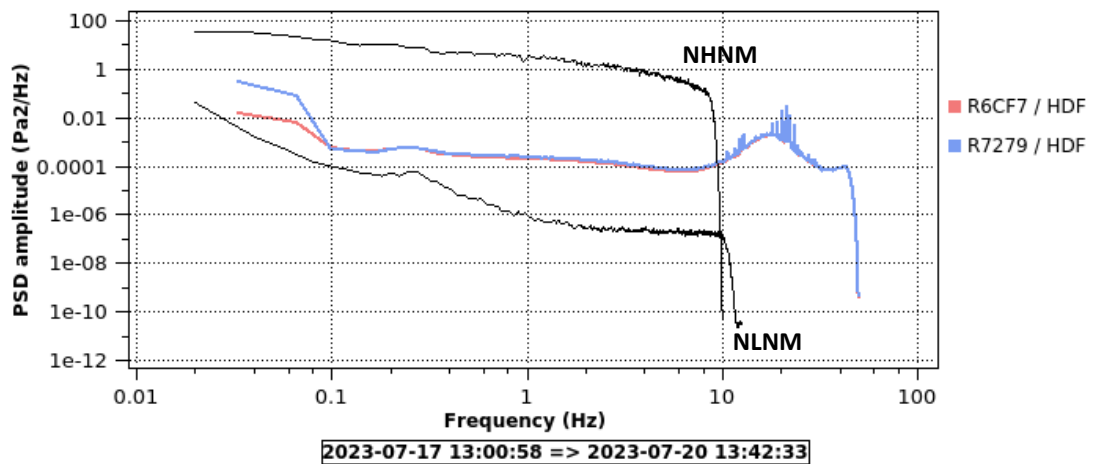


Figura 2.10 – Resultado da segunda fase do teste do filtro. Ambos os equipamentos, R7279 (linha azul) e equipamento R6CF7 (linha vermelha), não utilizaram o filtro. Observa-se que as curvas estão perfeitamente casadas a partir de 0.1 Hz, demonstrando que os dois equipamentos apresentam a mesma resposta em função do ruído ou sinais detectados nessa faixa de frequência.

2.4.2 Função de resposta de arranjo

A função de resposta do arranjo (*Array Response Function* - ARF), ou função de transferência do arranjo, descreve a sensibilidade e o comportamento, no domínio do número de ondas, em função da passagem de uma onda plana no arranjo (Ruigrok et al., 2017), conforme abaixo:

$$ARF(f, c, k_x, k_y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e^{j2\pi f \left(\frac{k_x \cdot \Delta x_{ij}}{c} + \frac{k_y \cdot \Delta y_{ij}}{c} \right)}.$$

Onde:

$ARF(f, c, k_x, k_y)$ é a *Array Response Function* em função da frequência f , velocidade da onda c , vetor de onda k_x e vetor de onda k_y .

$\sum_{i=1}^N$ e $\sum_{j=1}^N$ são somatórios onde i e j variam de 1 a N (número de sensores do arranjo).

j é a unidade imaginária.

f - frequência (Hz).

c - velocidade de propagação (m/s).

k_x e k_y - componentes do vetor da onda.

Δx_{ij} e Δy_{ij} - diferenças de posição entre os sensores i e j no arranjo (m).

2.4.3 Método de correlação progressiva multicanal (*Progressive Multichannel Correlation method* - PMCC)

Cansi (1995) apresentou um método novo (*Progressive Multichannel Correlation Method* – PMCC) para a detecção e a localização automática de eventos sísmicos, a partir de arranjos com diferentes aberturas e diferentes quantidades de estações. O método se fundamenta em um estudo progressivo de inter-relações de estações (pares de sensores), em função da correlação de sinais, visando obter uma consistência em um conjunto de tempos de atraso (*time-delay*) para as fases sísmicas presentes em um sinal investigado.

Este método não requer uma forte similaridade entre os sinais registrados pelas estações e consegue perceber sinais correlacionados mesmo com baixas amplitudes. Contudo,

as fases investigadas devem obedecer ao critério de distância espacial entre as estações, que deve ser menor que o comprimento de onda do sinal da fase sísmica esperada.

O método inicia o processamento utilizando subarranjos, com aberturas menores (distâncias menores entre elementos), por não apresentarem ambiguidades, dependendo do comprimento de onda do sinal estudado. À medida que se obtém uma consistência nos parâmetros (azimute e velocidade), estações mais distantes são adicionadas (desde que satisfaçam ao tempo de atraso teórico calculado previamente), aumentando-se, com isto, a precisão da localização e a remoção de falsas detecções, que podem ocorrer de possíveis sinais oriundos de ruídos registrados nos subarranjos.

Na versão inicial deste método, o processamento utilizava uma mesma janela de tempo para todas as estações (com duração fixa e apropriada ao período do sinal investigado, com um deslocamento escalonado pré-definido, bem como com diferentes faixas de frequência), que percorre os sinais na busca das diferentes frequências associadas às fases sísmicas registradas.

Le Pichon et al. (2009) menciona que várias melhorias foram realizadas no método nos últimos 5 anos, a partir de trabalhos e pesquisas no CEA-DASE, culminando com o desenvolvimento do programa DTK-GPMCC, que provou ser eficiente na detecção de sinais infrassônicos coerentes de baixa amplitude em um ambiente de ruídos incoerentes. Com isto, o processamento foi aprimorado, com a aplicação de janelas de tempos variados e com múltiplas bandas de frequências sendo executadas em um único processamento computacional. Além dessa melhoria, várias outras funcionalidades foram adicionadas, tornando mais eficiente esse método e menos custoso em tempo de processamento.

Segundo Brachet et al. (2010), no DTK-GPMCC, o processamento dos sinais gerados pelas estações, produzidos no domínio do tempo, é realizado no domínio da frequência, por meio da Transformada de Fourier. Nesses sinais, o ruído de fundo é caracterizado por uma rápida variação na amplitude e na fase de um sensor para outro, mesmo que esses sensores estejam mais próximos do que o comprimento de onda do sinal investigado (Bowman et al., 2005; Brown et al., 2012; Marty et al., 2021). Ao contrário do ruído, que é um sinal incoerente, o sinal (coerente) se propaga através dos elementos do arranjo sem qualquer deformação (Matoza et al., 2013). No caso de uma onda planar, a única diferença de sinal observada em diferentes sensores é um tempo de atraso (*time-delay*), dependendo das posições relativas dos sensores. A função de correlação é usada para medir esse tempo de atraso entre dois registros. No caso de uma onda se propagando sem distorção, o tempo de

atraso é o mesmo para todas as frequências do sinal. O cálculo do tempo de atraso não é feito no domínio da frequência, mas no domínio do tempo. Em uma determinada janela de tempo, a correlação (com valores variando de -1 a 1) mede a similaridade dos sinais deslocados no tempo. O tempo de atraso entre sinais é obtido a partir do valor máximo encontrado da função de correlação. O método permite que uma decisão seja tomada, caso haja um mesmo sinal em um conjunto simultâneo de registros, independentemente de qualquer informação sobre registros anteriores.

O processamento dos sinais, por meio do DTK-GPMCC, é realizado a partir da escolha de onze faixas de frequências consecutivas e simultâneas, variando de 0,07 a 4,0 Hz (próximas à banda de frequência do IMS), em janelas de tempo adjacentes, cobrindo todo o período do sinal analisado. A duração de cada janela de tempo depende inversamente da faixa de frequência. De forma prática, utilizam-se janelas de tempo de 60 segundos para as frequências mais baixas e 30 segundos para as frequências mais altas, **Fig. 2.11**.

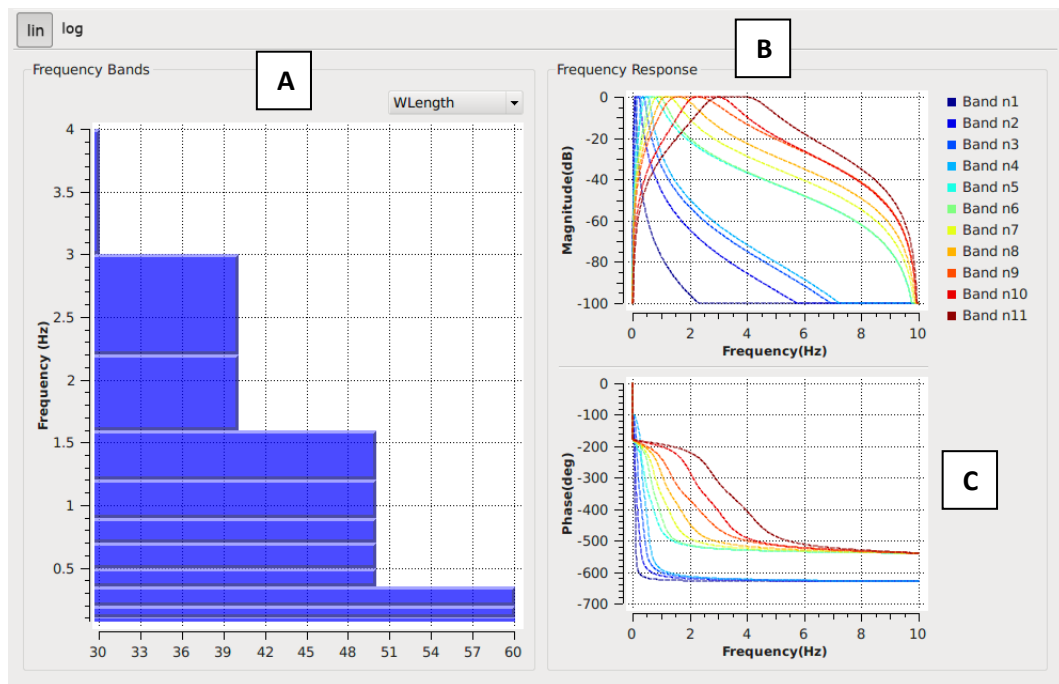


Figura 2.11 – Em **A**, estão representadas as onze bandas de frequências utilizadas no processamento PMCC para a detecção de eventos infrassônicos. No eixo x, as durações das janelas (em segundos) de cada banda. Em **B**, curvas de respostas em amplitude dos filtros aplicados no processamento PMCC relativos a cada banda. Em **C**, as respectivas respostas em fase dos filtros (CEA/DASE, 2016a).

O DTK-GPMCC utiliza filtros de frequência Chebyshev de segunda e de terceira ordem. O primeiro estágio do processo produz detecções elementares, designadas pixels

PMCC, que satisfazem aos critérios de correlação e de consistência. O estágio seguinte é o agrupamento dos pixels que possuem similaridade nos atributos do sinal investigado, relativos ao tempo de registro, à frequência, ao *backazimute* e à velocidade horizontal do traço do registro do sinal. Agrupamentos de pixels constituem as famílias PMCC. Normalmente, para que uma família seja considerada, é determinada uma quantidade de, pelo menos, sete pixels agrupados, **Fig. 2.12**.

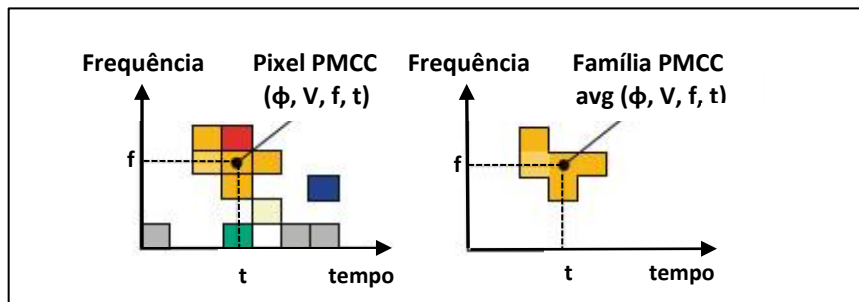


Figura 2.12 – Formação do pixel PMCC, à esquerda, e o agrupamento de pixels, de acordo com os atributos semelhantes, à direita, formando uma família PMCC (modificada de CEA/DASE, 2016a).

2.4.3.1 Método do grau médio de correlação estimada de sinal

O método PMCC de Cansi (1995) é derivado do modelo da perda de coerência proposto por Mack e Flinn (1971). O grau de correlação de sinal entre os elementos de um arranjo depende criticamente do seu tamanho e do seu projeto. A capacidade de detecção de pequenas explosões nucleares pode ser limitada em arranjos de grande abertura (acima de 1 km) e com um pequeno número de elementos, devido ao baixo grau de correlação dos sinais entre os elementos (Campus e Christie, 2010).

O modelo de Mack e Flinn fornece uma boa descrição da diminuição observada na correlação de sinal entre dois sensores infrassônicos: quando a distância entre os sensores é aumentada; quando há dependência da correlação na orientação do par de sensores em relação à frente de onda; e quando ocorre uma rápida diminuição da correlação com o aumento da frequência. Este método funciona bem se existirem pares de elementos do arranjo separados por um intervalo de distâncias diferentes e de estarem alinhados – ao longo e perpendicularmente – à frente de onda. O método é menos útil quando os dados são provenientes de um arranjo com um número pequeno de elementos, onde poucos pares de elementos, se houver, estão alinhados, de forma normal e perpendicular, à direção de propagação da onda.

2.4.4 Densidade espectral de potência (*Power Spectral Density* - PSD)

Essencialmente, o PSD é empregado para compreender o nível do ruído de fundo presente em cada elemento. A turbulência causada pelos ventos representa uma das principais fontes desse ruído. Fontes antropogênicas também podem ser geradoras de ruídos, como cidades, fábricas, parques industriais, etc. Qualquer uma dessas fontes pode prejudicar a detecção eficiente de uma estação. Diariamente, foram realizadas observações do nível de ruído de fundo nos registros de cada um dos nove elementos, seguindo a metodologia proposta por McNamara e Buland (2004). Esse procedimento é fundamental para entender a influência desses ruídos na detectabilidade do arranjo.

2.5 Instalação das Estações Temporárias no PNB

As nove estações (elementos) operaram no PNB durante um período de 40 dias, **Figs. 2.13 a 2.15**, Quatro dessas estações compartilharam os sites da Estação I09BR (**Fig. 2.14**) e operaram conjuntamente. Essa configuração permite realizar comparações quanto ao número de detecções obtidas a partir dos arranjos (e subarranjos) com diferentes números de elementos e diferentes equipamentos.

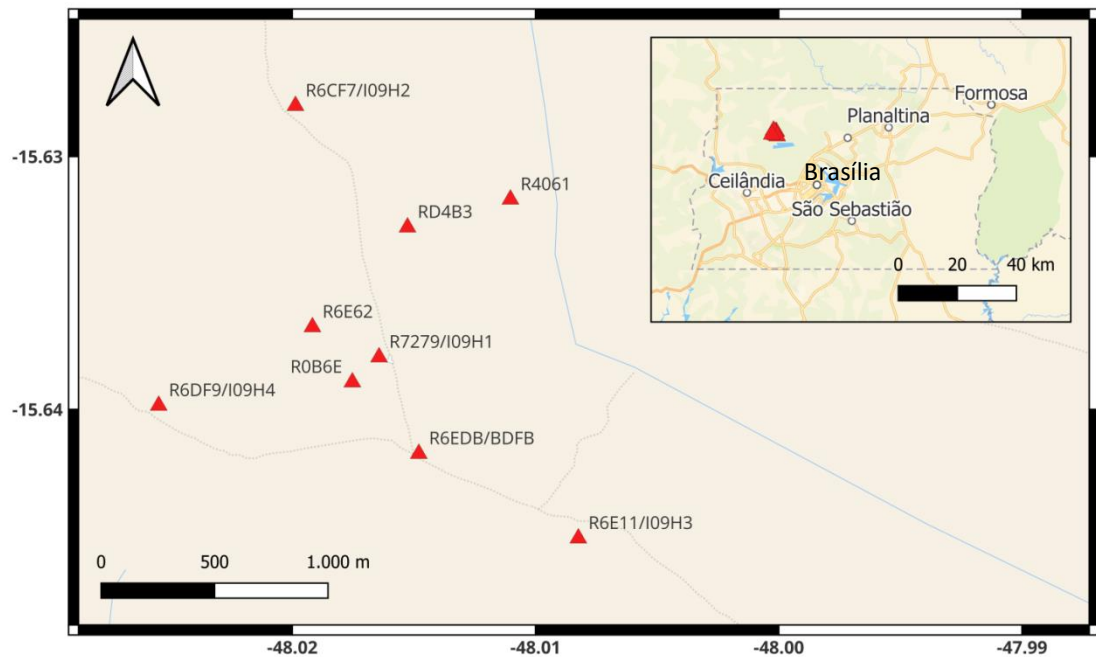


Figura 2.13 – Estações temporárias instaladas no Parque Nacional de Brasília (triângulos vermelhos). A escolha da localização dos elementos teve como base o arranjo que apresentou a melhor resposta em função das incertezas estimadas de velocidade e de azimuth, bem como o arranjo que melhor resolveu o problema do *aliasing* espacial, a partir das dezenas de modelagens realizadas. Os códigos duplos denotam os elementos que compartilharam os sites da Estação I09BR.

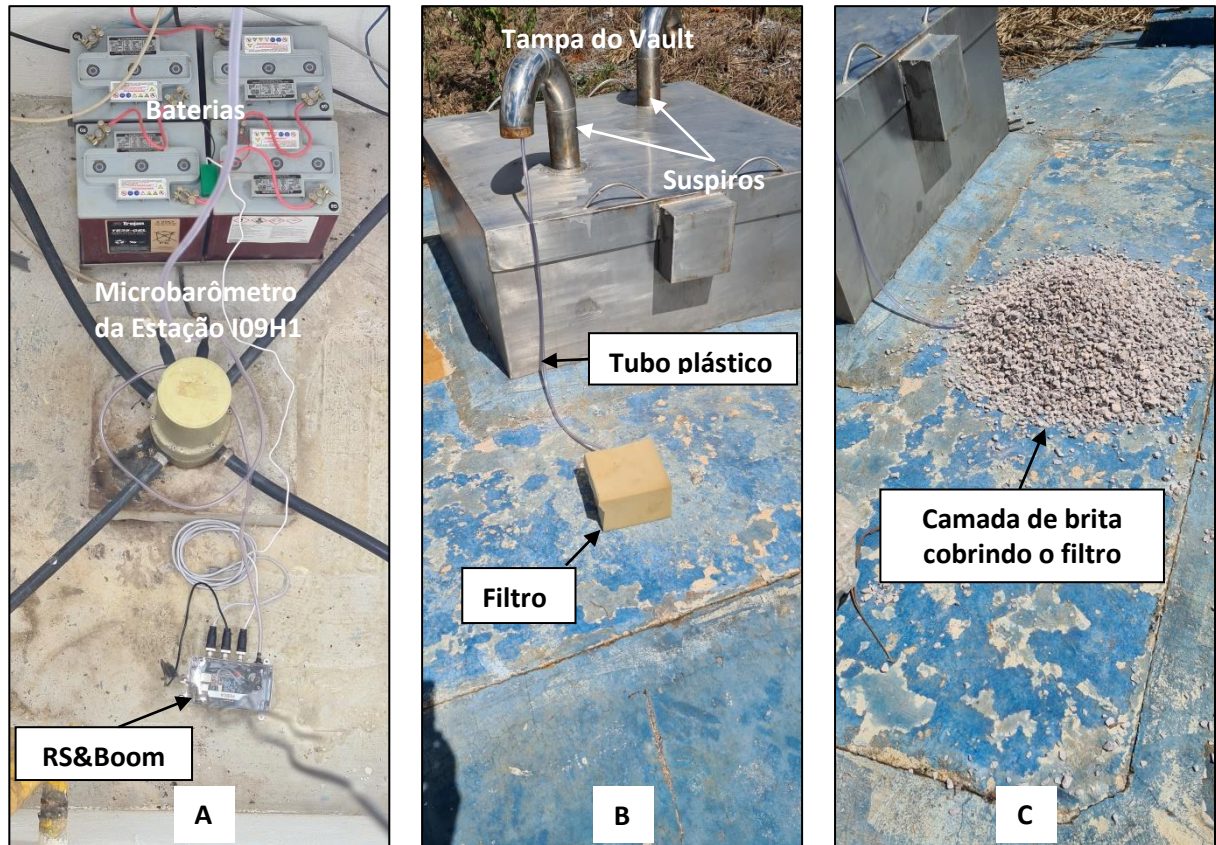


Figura 2.14 – Equipamento compartilhando o site do elemento I09H1. Em **A**, RS&Boom no interior do vault, próximo ao microbarômetro e ao conjunto de baterias. Em **B**, vista do filtro conectado ao RS&Boom, por meio do tubo plástico. Em **C**, filtro coberto por camada brita.



Figura 2.15 – Instalação típica de um dos elementos temporários. À esquerda, RS&Boom conectado à bateria e ao filtro. À direita, caixa de proteção para os equipamentos, camada de brita que cobriu o filtro e o painel solar.

2.6 Resultados

2.6.1 Respostas dos arranjos

As **figuras 2.16 a 2.19** mostram as respostas do atual arranjo da Estação I09BR e do arranjo proposto de nove elementos, relativas às incertezas, em função da geometria e do número de elementos, bem como a sensibilidade dos arranjos, em função do número de ondas, e de seu comportamento, em função da distribuição dos elementos. As **figuras 2.17 e 2.19** apresentam a ARF dos arranjos de 4 e de 9 elementos. Observa-se que, para o arranjo de 4 elementos, a partir de 4 Hz, começam a surgir lóbulos laterais com muita energia (artefatos) que representam o problema do *aliasing* espacial. O mesmo não se observa com o arranjo de 9 elementos.

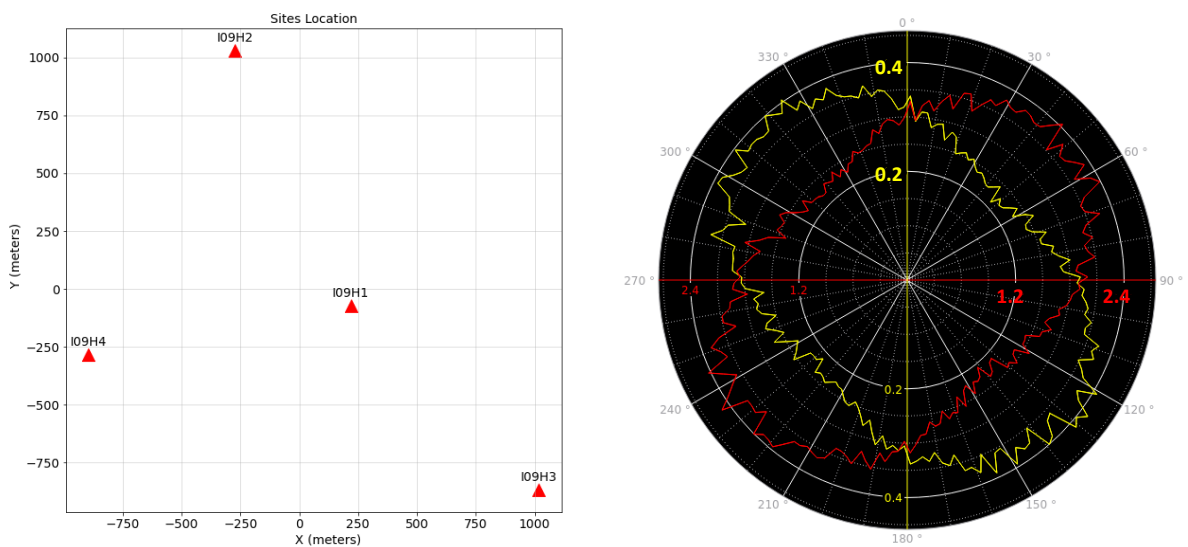


Figura 2.16 – À esquerda, arranjo de quatro elementos da Estação I09BR e, à direita, respectivo gráfico polar dos erros estimados de velocidade do sinal (linha vermelha – m/s) e do azimute (linha amarela – graus), para frentes de ondas planas propagando a 340 m/s. A taxa de amostragem do sinal é de 20 sps.

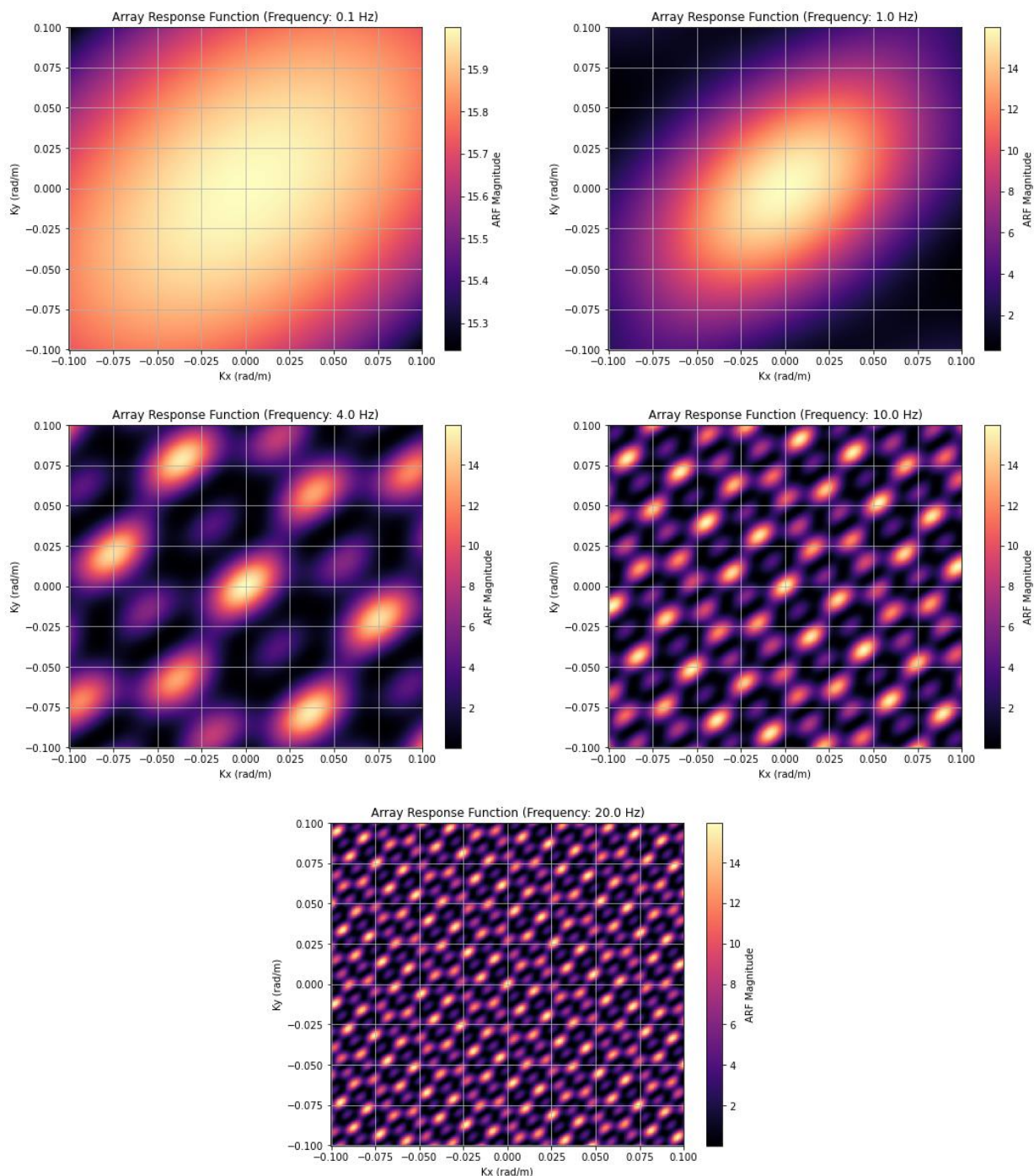


Figura 2.17 – Respostas do arranjo, em função do número de ondas e do azimuth (K em rad/m), relativo à propagação da frente de onda plana, a uma velocidade de 340 m/s, com frequências de 0,1 a 20 Hz, detectadas pelo arranjo da Estação I09BR, com quatro elementos.

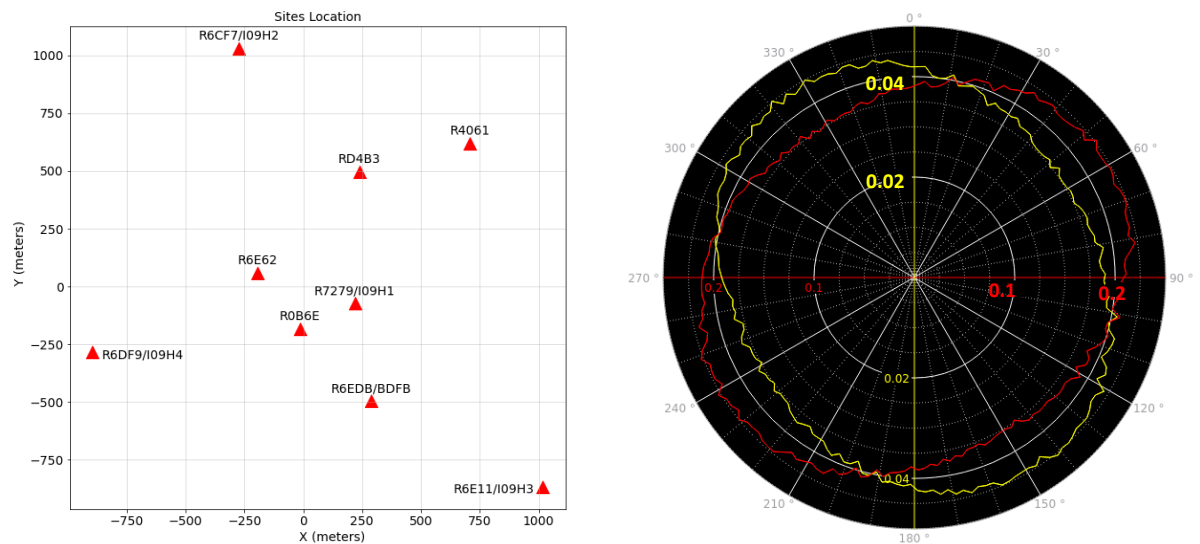


Figura 2.18 – Arranjo de nove elementos e respectivo gráfico polar dos erros estimados de velocidade do sinal (linha vermelha – m/s) e do azimuth (linha amarela – graus), para frentes de ondas planas propagando a 340 m/s. A taxa de amostragem do sinal é de 20 sps.

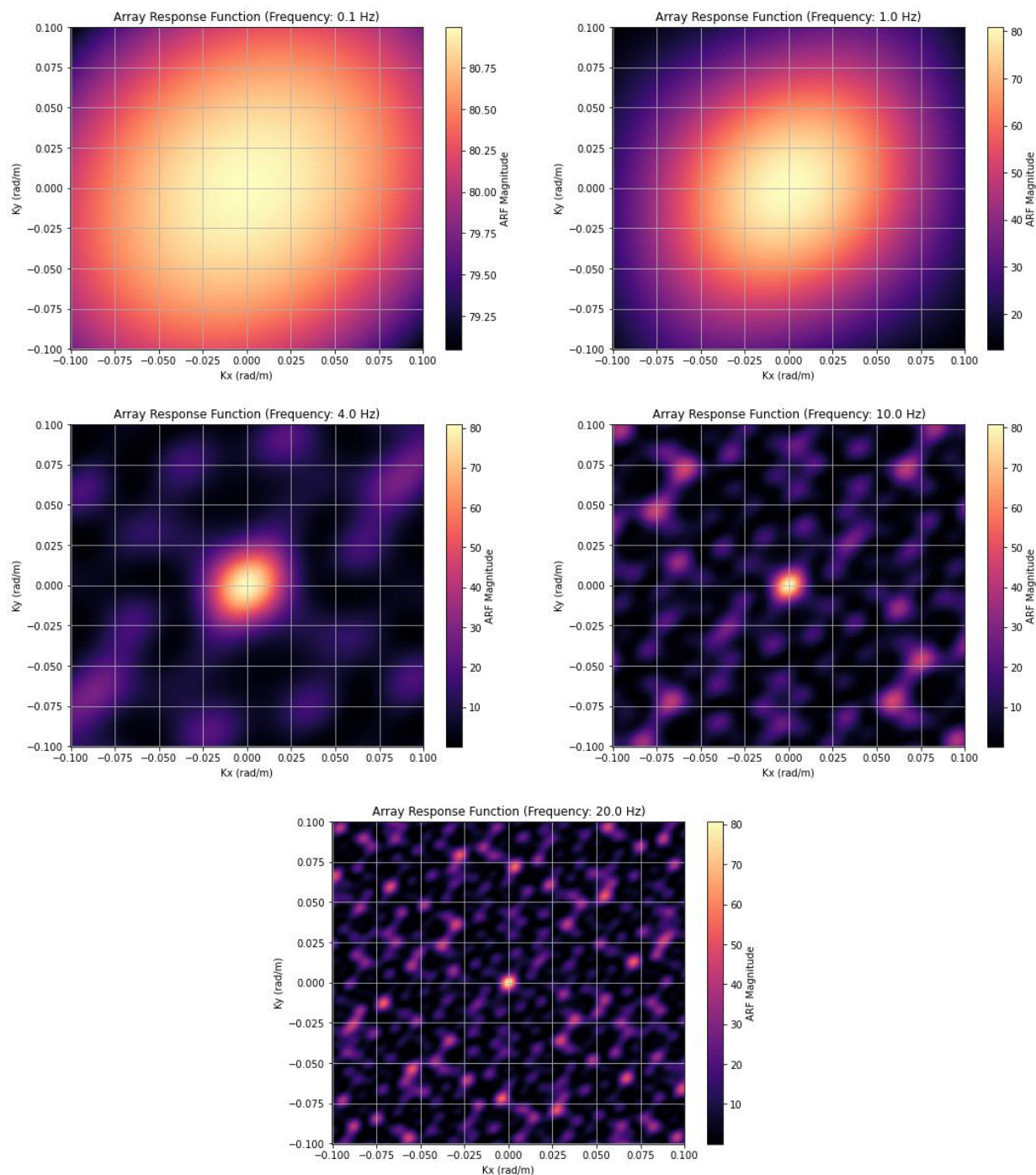


Figura 2.19 – Respostas do arranjo, em função do número de ondas e do azimuth (K em rad/m), relativo à propagação da frente de onda plana, a uma velocidade de 340 m/s, com frequências de 0,1 a 20 Hz, detectada pelo arranjo de nove elementos proposto.

2.6.2 Densidade espectral de potência (Power Spectral Density - PSD) para as estações temporárias e para as estações com equipamentos originais do IMS

Abaixo, são mostradas as respostas do PSD dos equipamentos instalados nos nove pontos no PNB, além do PSD dos equipamentos originais instalados nos elementos da Estação I09BR, **Fig. 2.20**, no dia 02/06/2022, relativas a 24 horas de registro. Observa-se que em “A” o nível de ruído de fundo é maior que em “B”. Isto se deve à eficiência do filtro mecânico empregado nos elementos da Estação I09BR, que é muito superior ao filtro utilizado nas estações temporárias, além da melhor qualidade dos equipamentos da I09BR.

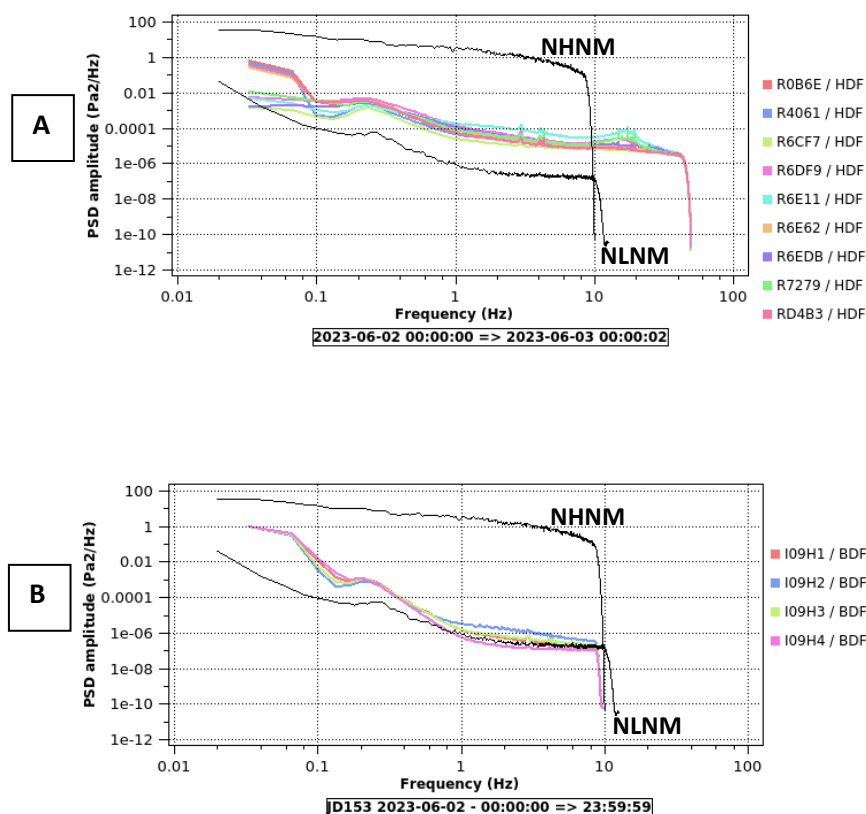


Figura 2.20 – Em A, PSD das estações temporárias utilizando o equipamento RS&Boom. Em B, PSD das estações da I09BR utilizando os equipamentos originais do IMS.

2.6.3 Comparativo das detecções obtidas em função dos arranjos testados

As **figuras 2.21 a 2.23** mostram os registros e as respectivas detecções com os arranjos de nove e do subarranjo de quatro elementos no dia 02 de junho de 2022, no PNB. Adicionalmente, são mostrados os registros e as detecções obtidas pela I09BR, utilizando os equipamentos originais fornecidos pelo IMS, no mesmo período. O mesmo também pode ser visto no Anexo 1, porém em outros dias, de registros obtidos por esses arranjos no PNB.

A **Tabela 2.1** apresenta o quantitativo de detecções pelos arranjos no período de 19/05 a 27/06/2022 e a **Tabela 2.2** lista as detecções realizadas no dia 02/06/2022 por cada arranjo.

Tabela 2.1 – Quantitativo de detecções realizadas pelos arranjos de nove e quatro elementos com equipamento RS&Boom e pelo arranjo de quatro elementos com equipamento IMS, ao longo de 40 dias.

#	Dia	Arranjo nove elementos (A9) com equipamento RS&Boom	Arranjo quatro elementos (A4) com equipamento RS&Boom	Arranjo quatro elementos com equipamento IMS	Proporção do número de detecções A9/A4
1	139	125	47	70	2.7
2	140	40	8	34	5.0
3	141	67	21	30	3.2
4	142	163	18	53	9.1
5	143	140	43	67	3.3
6	144	63	72	94	0.9
7	145	110	23	50	4.8
8	146	132	8	50	16.5
9	147	51	6	86	8.5
10	148	95	19	131	5.0
11	149	35	12	95	2.9
12	150	37	10	106	3.7
13	151	66	13	115	5.1
14	152	199	11	119	18.1
15	153	144	35	61	4.1
16	154	142	7	37	20.3
17	155	62	1	55	62.0
18	156	160	12	76	13.3
19	157	134	8	87	16.8
20	158	182	15	77	12.1
21	159	120	6	66	20.0
22	160	132	8	74	16.5
23	161	128	9	103	14.2
24	162	7	2	122	3.5
25	163	69	6	134	11.5
26	164	22	6	64	3.7
27	165	36	2	105	18.0
28	166	32	28	76	1.1
29	167	17	7	60	2.4
30	168	6	1	76	6.0
31	169	43	5	146	8.6

Tabela 2.1 – Continuação.

32	170	38	4	101	9.5
33	171	17	2	27	8.5
34	172	30	9	47	3.3
35	173	26	6	58	4.3
36	174	38	12	61	3.2
37	175	166	16	83	10.4
38	176	155	13	76	11.9
39	177	122	11	45	11.1
40	178	103	5	64	20.6
Valor médio					10.1

Tabela 2.2 – Detecções realizadas pelos arranjos de nove elementos e pelo subarranjo de quatro elementos com equipamento RS&Boom e pelo arranjo com quatro elementos com equipamentos IMS no dia 02/06/2022.

#	Arranjo nove elementos com RS&Boom	Arranjo quatro elementos com RS&Boom	Arranjo quatro elementos I09BR IMS
1	00:00:20	02:03:31	00:00:30
2	00:20:40	02:56:11	00:34:00
3	00:26:30	03:40:11	02:03:10
4	00:34:10	03:44:11	02:10:10
5	00:46:50	03:49:21	02:19:00
6	00:49:00	03:55:41	02:38:10
7	00:55:50	04:10:11	03:30:50
8	00:56:00	04:13:51	05:03:50
9	01:01:00	04:32:41	05:40:10
10	01:08:10	04:33:11	08:28:50
11	01:13:30	04:56:31	10:31:40
12	01:18:20	06:18:21	11:19:50
13	01:19:10	06:32:51	11:25:10
14	01:23:40	06:49:01	11:43:30
15	01:25:00	06:52:31	11:53:50
16	01:27:10	06:56:51	11:59:10
17	01:56:00	07:02:41	12:07:50
18	02:01:10	07:11:31	12:45:20
19	02:03:00	07:31:01	12:52:50
20	02:05:50	07:36:31	12:57:30

Tabela 2.2 – Continuação.

21	02:10:30	08:33:41	13:04:30
22	02:13:30	08:43:51	13:09:40
23	02:27:50	09:02:41	13:14:10
24	02:35:00	09:07:51	13:59:20
25	02:36:40	09:14:01	14:10:20
26	02:41:00	09:21:41	14:49:00
27	02:44:20	09:33:01	14:58:40
28	02:47:10	09:56:31	15:05:30
29	02:47:20	10:11:01	15:09:50
30	02:48:30	10:14:31	15:12:30
31	02:55:50	10:19:21	15:17:10
32	04:01:50	16:18:21	15:31:00
33	04:28:40	19:49:31	15:38:40
34	04:29:10	20:48:01	15:47:00
35	04:30:10	20:48:11	15:54:20
36	04:35:00		16:09:00
37	04:39:40		16:18:20
38	04:49:10		16:24:50
39	04:53:50		16:39:10
40	04:58:30		16:51:50
41	05:03:50		16:56:40
42	05:11:40		17:07:10
43	05:14:00		17:18:10
44	05:16:50		17:25:00
45	05:20:10		17:32:40
46	05:25:20		17:41:30
47	05:29:40		17:46:20
48	05:35:00		18:17:10
49	05:35:30		18:22:10
50	05:35:30		18:31:50
51	05:40:40		18:36:20
52	05:45:00		19:13:10
53	05:49:40		19:49:10
54	05:54:30		19:49:30
55	05:59:00		19:58:40
56	06:13:10		20:48:00
57	06:24:00		20:52:10
58	06:53:30		21:04:50
59	07:01:50		21:36:30
60	07:18:50		22:40:30
61	07:19:10		23:46:50

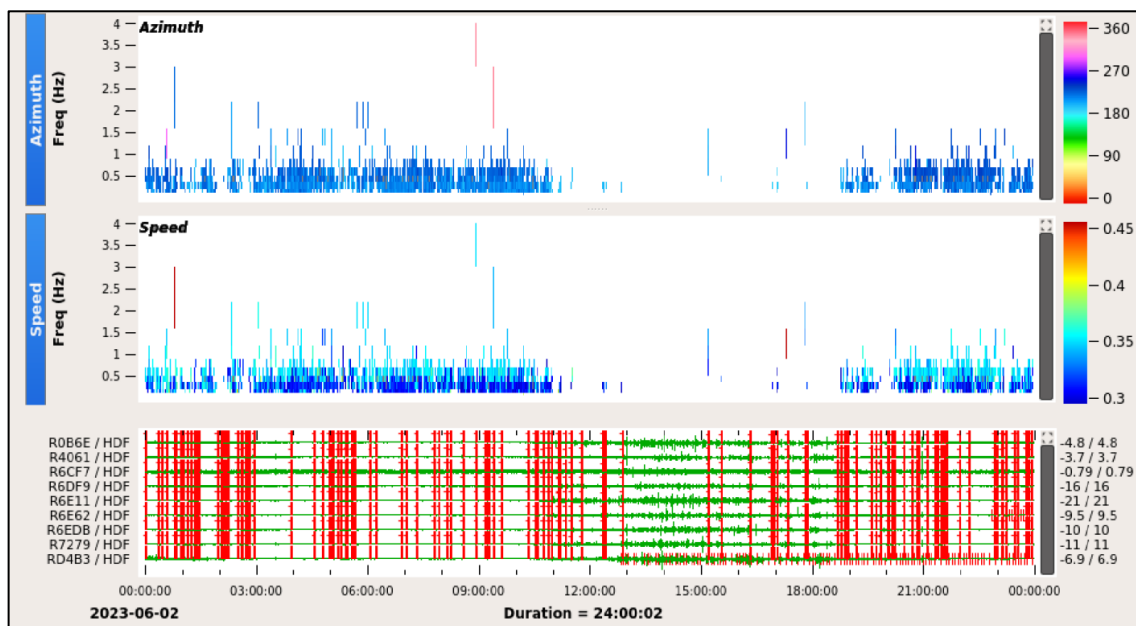
Tabela 2.2 – Continuação.

62	07:46:50
63	07:47:10
64	08:06:40
65	08:12:40
66	08:15:20
67	08:24:10
68	08:28:20
69	08:33:30
70	08:55:30
71	09:01:40
72	09:04:10
73	09:13:00
74	09:15:40
75	09:16:50
76	09:25:10
77	09:25:40
78	09:31:10
79	10:30:40
80	10:34:40
81	10:43:30
82	10:51:10
83	10:56:50
84	11:07:40
85	11:08:50
86	11:11:00
87	11:18:50
88	11:28:50
89	11:45:10
90	12:20:20
91	12:24:30
92	12:50:40
93	15:11:40
94	15:31:40
95	16:18:20
96	16:52:20
97	16:56:00
98	17:03:00
99	17:18:10
100	17:46:40
101	17:50:30
102	18:39:30

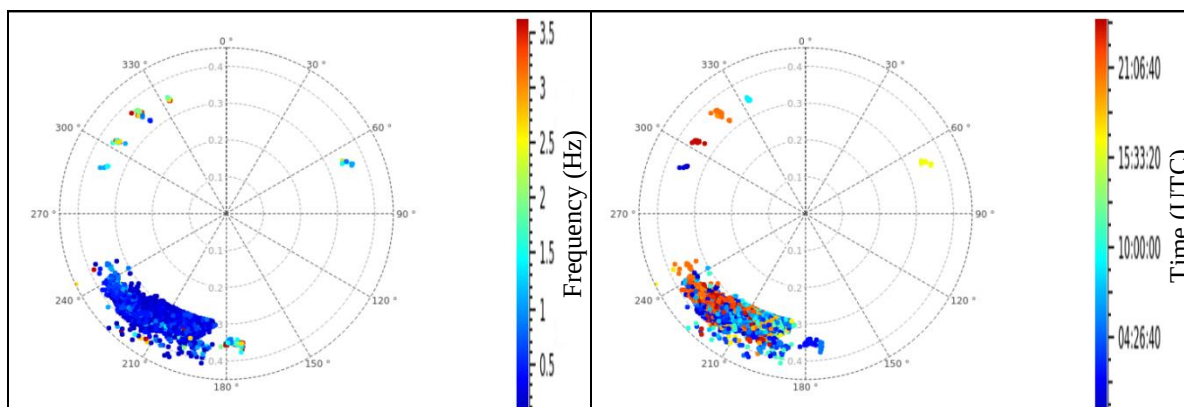
Tabela 2.2 – Continuação.

103	18:45:10
104	18:51:40
105	18:54:40
106	18:55:00
107	18:55:50
108	18:57:10
109	19:09:40
110	19:35:00
111	19:42:50
112	19:49:30
113	20:01:10
114	20:02:40
115	20:08:10
116	20:10:40
117	20:12:10
118	20:12:10
119	20:28:10
120	20:40:20
121	20:48:00
122	20:52:10
123	21:04:50
124	21:18:20
125	21:18:40
126	21:22:40
127	21:28:20
128	21:31:50
129	21:33:30
130	21:36:40
131	21:57:10
132	22:12:40
133	22:54:40
134	22:58:00
135	23:04:50
136	23:07:30
137	23:12:10
138	23:13:30
139	23:25:20
140	23:31:40
141	23:44:40
142	23:46:30
143	23:49:10
144	23:55:00

Dia 153 (02/06/2023 - 6ª feira) – 9 estações temporárias



A

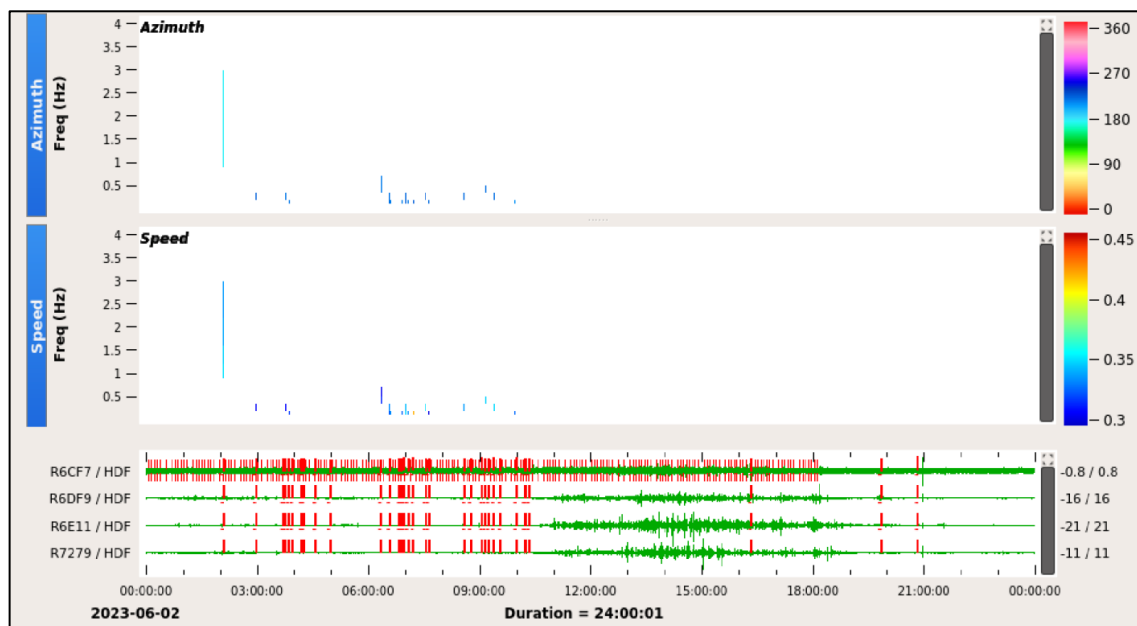


B

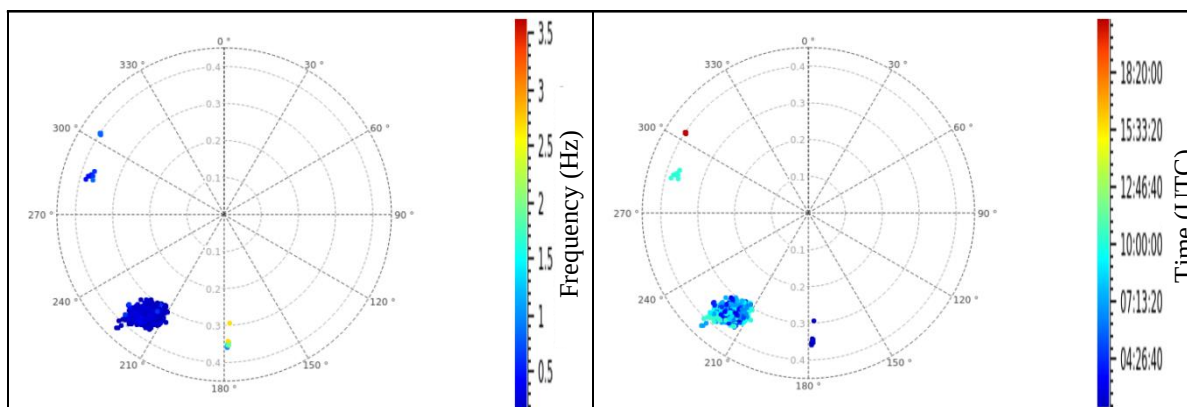
C

Figura 2.21 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 02/06/2023, nas nove estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 153 (02/06/2023 - 6ª feira) – 4 estações temporárias



A

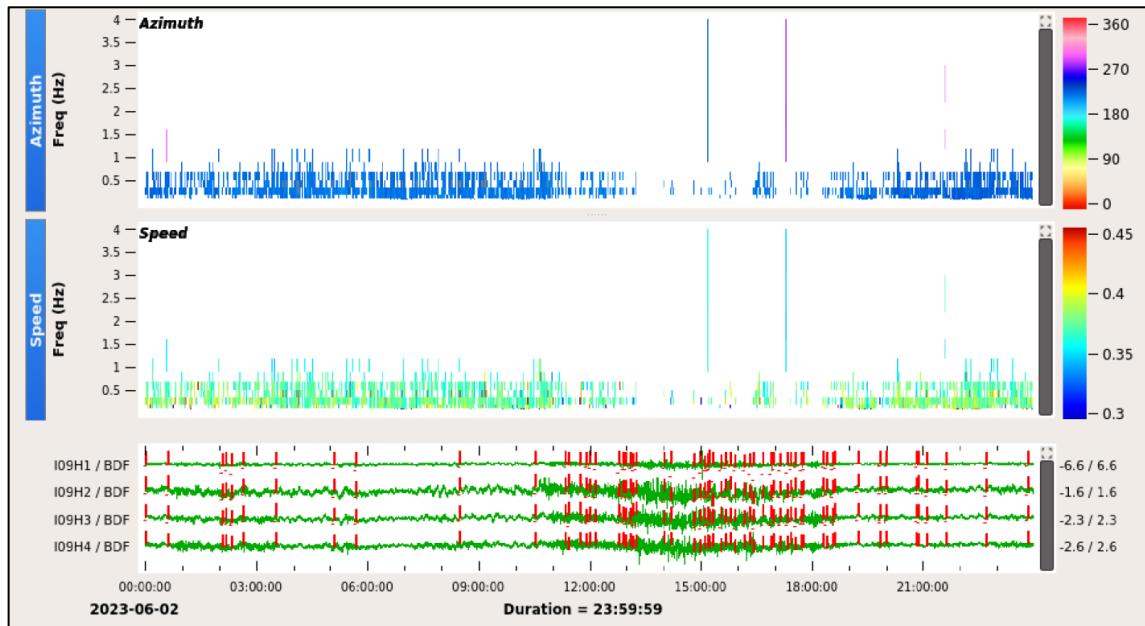


B

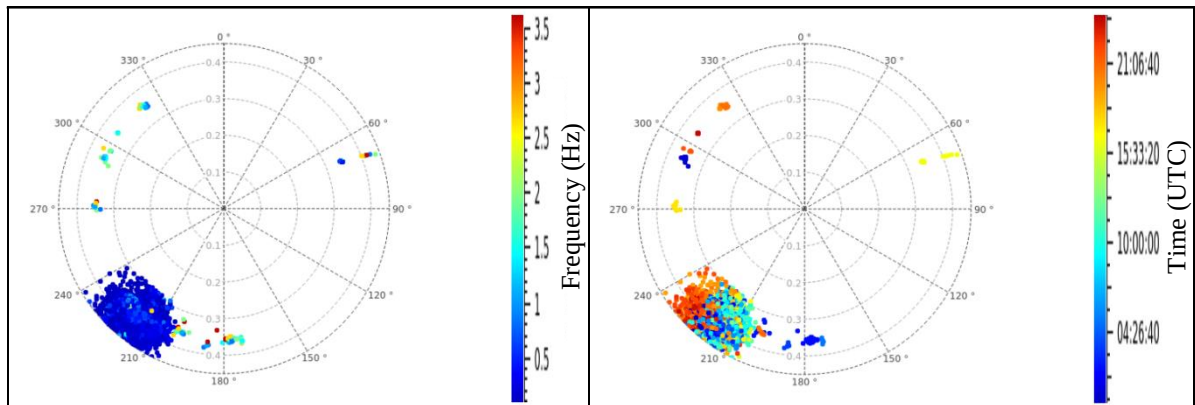
C

Figura 2.22 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 02/06/2023, nas quatro estações temporárias. Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 153 (02/06/2023 - 6ª feira) – 4 estações do IMS (I09BR)



A



B

C

Figura 2.23 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 02/06/2023, nas quatro estações do IMS (I09BR). Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

2.7 Discussão

Abaixo (**Fig. 2.24-A**), são observados registros na I09BR relativos a sete dias de dados. Observam-se que os sinais de maior amplitude são ruídos ocasionados pelos ventos, pois são coincidentes com os registros do sensor de velocidade dos ventos, instalado no elemento I09H1 (canal superior: I09H1/LWS). Na **Fig. 2.24-B**, é detalhado um dia de dados. Nota-se com mais clareza o pico do registro ocorrido no dia 03/10/2018, às 18h49 UTC. Percebe-se que o vento ocorre com maior predominância e intensidade no período diurno. Diante deste padrão de ruídos, infere-se que isto ocorre em qualquer dia, ao longo do ano, na I09BR e que isto reflete um comportamento meteorológico normal.

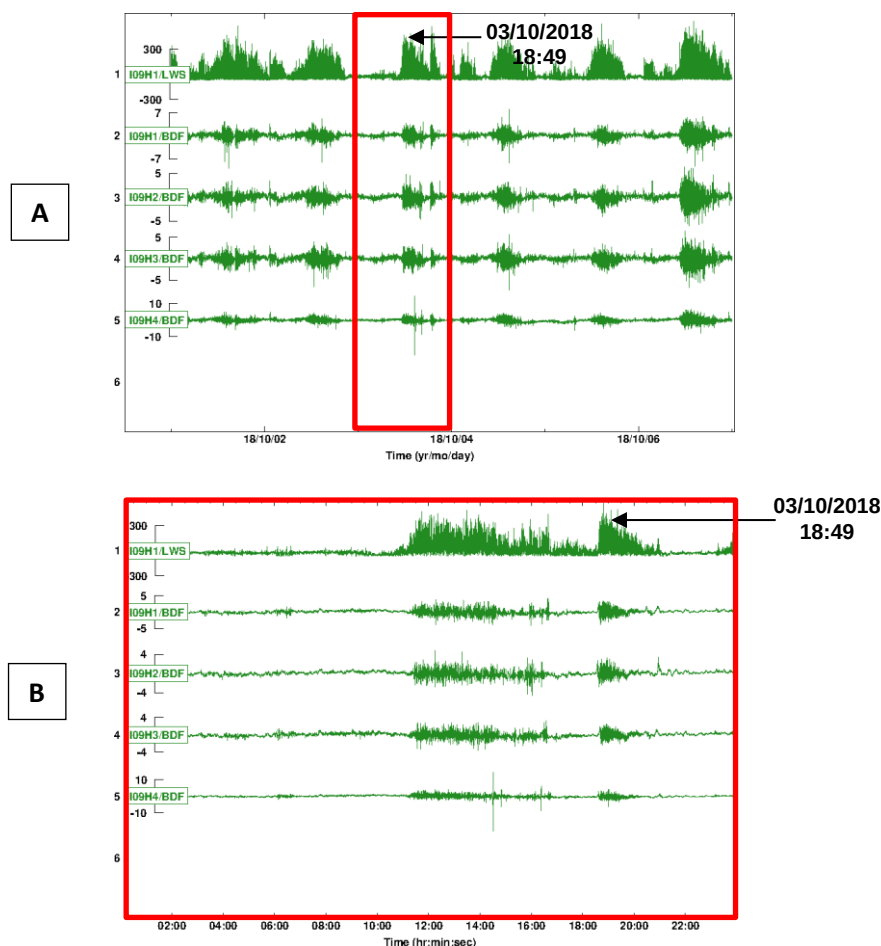


Figura 2.24 – Registros, em **A**, correspondentes ao canal de velocidade do vento (LWS) – traço 1, proveniente da estação meteorológica instalada no elemento I09H1 – e aos canais dos sinais de infrassom (BDF), traços 2 a 5, da estação I09BR, referentes a seis dias de dados (01 a 06/10/2018). Em **B**, detalhe correspondente a um dia de dado (03/10/2018). Observa-se a correlação dos ruídos registrados em função da velocidade do vento presente nos elementos da I09BR.

A seguir, apresentamos os resultados obtidos a partir do processamento dos dados do arranjo de nove elementos proposto neste trabalho (**Fig. 2.25**) e do arranjo da I09BR (**Fig. 2.26**), utilizando o DTK-GPMCC. Em ambos os casos, exibimos o registro do mesmo evento ocorrido em 02 de junho de 2023, às 16h18 UTC. É possível notar diferenças devido aos erros e incertezas inerentes a cada arranjo. Foi aplicado o filtro Butterworth de terceira ordem com faixa de frequência de 1-3 Hz nos dois resultados.

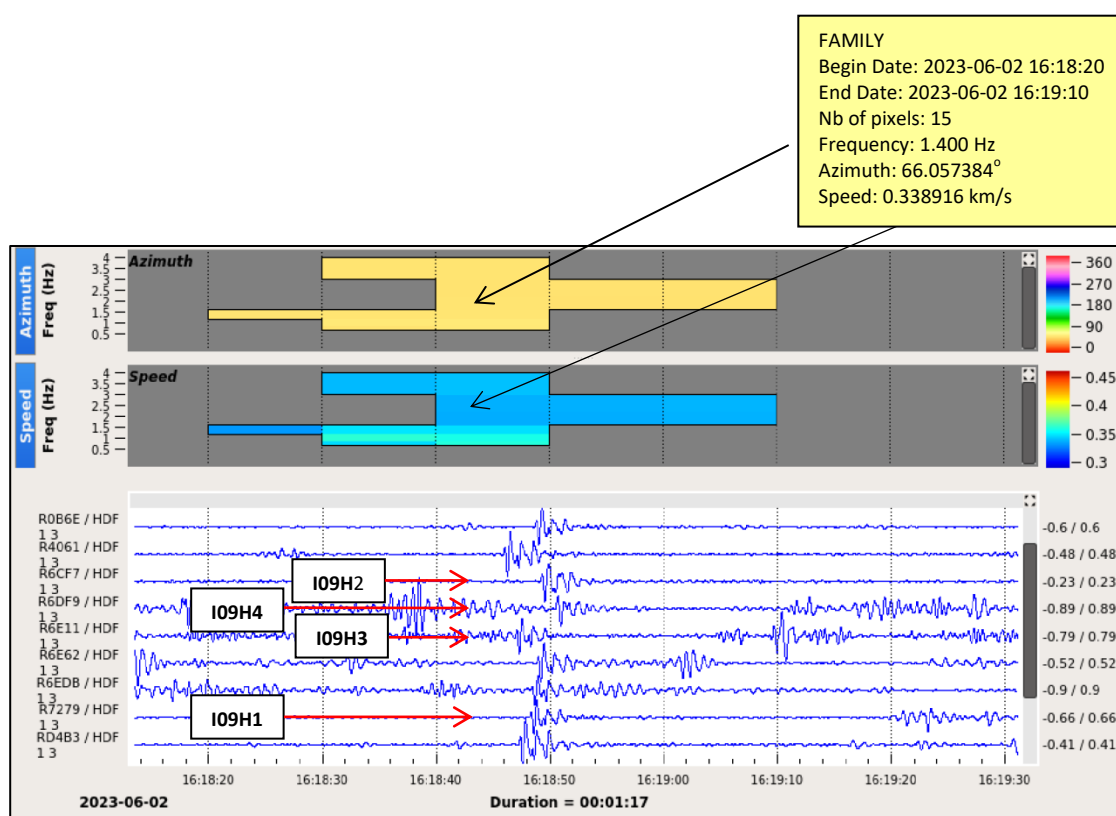


Figura 2.25 – Provável explosão ocorrida em 02/06/2023, às 16h18 UTC, registrada nos nove elementos do arranjo proposto (traços azuis), e as respectivas respostas, apresentadas nas janelas superiores (Speed/Freq e Azimuth/Freq.). Os quatro códigos inseridos nos registros denotam os quatro elementos temporários que compartilharam os mesmos sites dos elementos da estação do IMS I09BR: R6CF7 = I09H2, R6DF9 = I09H4, R6E11 = I09H3 e R7279 = I09H1. No quadro superior, são mostrados detalhes numéricos das respostas obtidas.

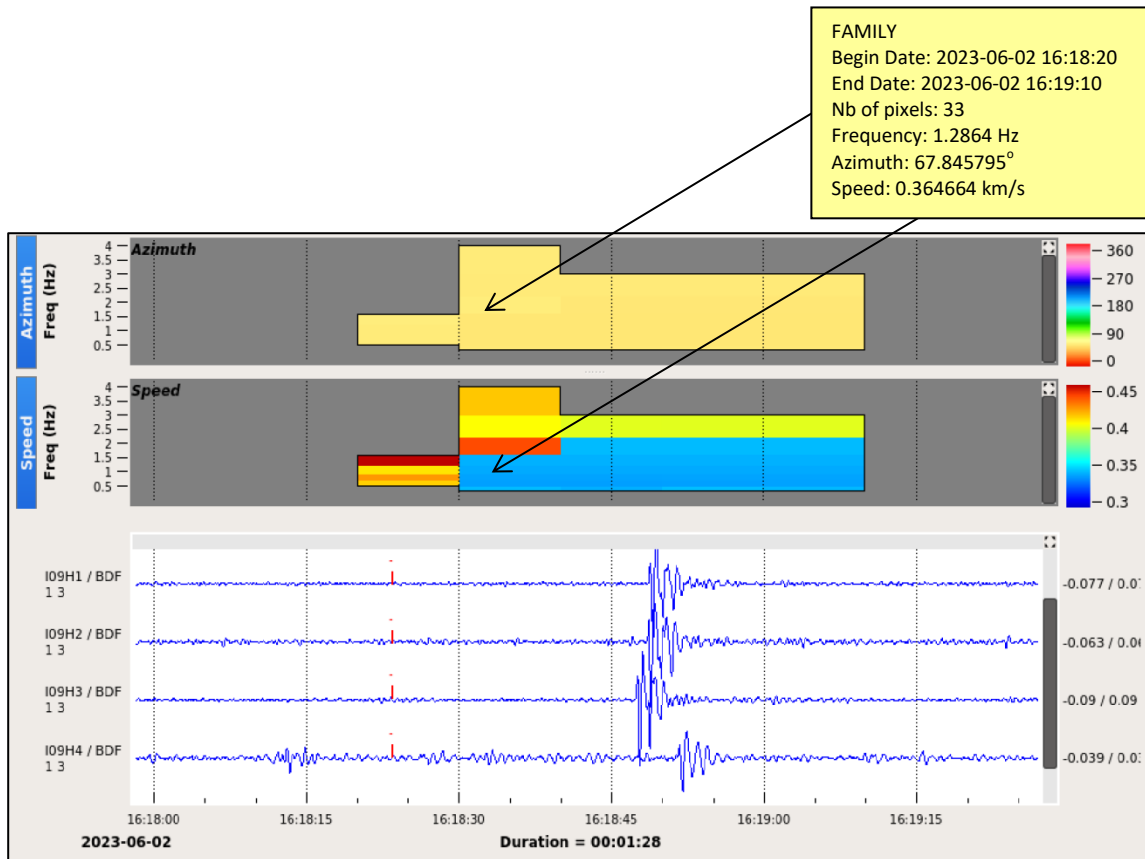


Figura 2.26 –Provável explosão ocorrida em 02/06/2023, às 16h18 UTC, registrada nos quatro elementos do arranjo da I09BR (traços azuis), e as respectivas respostas, apresentadas nas janelas superiores (Speed/Freq e Azimuth/Freq.). No quadro superior, são mostrados detalhes numéricos das respostas obtidas.

2.8 Conclusões

A inclusão do subarranjo de cinco elementos, como proposto neste estudo, evidencia uma notável melhoria na capacidade de detecção da Estação de Infrassom I09BR. Essa conclusão é sustentada por meio de uma análise comparativa entre os resultados do arranjo de nove elementos e o subarranjo de quatro elementos que foi implantado nos locais da I09BR. Os equipamentos empregados nos nove elementos temporários são de menor resolução, comparativamente aos empregados nos elementos originais da I09BR. Os dados demonstram claramente um aumento significativo no número de detecções alcançadas pelo arranjo de nove elementos, mesmo tendo equipamentos de menor qualidade.

Adicionalmente, realizou-se outra análise comparativa com os resultados obtidos do subarranjo temporário de quatro elementos utilizando RS&Boom, que compartilharam os sites da I09BR, em contraposição aos dados da I09BR durante o mesmo período. Esse estudo revelou uma notável diferença no número de detecções, com uma quantidade significativamente maior registrada pela I09BR. Essa discrepância pode ser atribuída à eficácia do filtro mecânico (ver Seção 2.3.1) e da melhor reposta dos equipamentos IMS empregados na I09BR. Em vista disso, conclui-se que a adoção, nos novos elementos, desse mesmo filtro e mesmos equipamentos adotados pelo IMS resultará em um aumento ainda mais considerável na quantidade de detecções.

O filtro mecânico desenvolvido para este trabalho proporcionou uma diminuição no nível do ruído de fundo nos elementos. Isto favoreceu a detecção de mais eventos, que seriam mascarados pela presença do ruído.

De forma simples e direta, o ganho (sensibilidade) relativo ao arranjo de nove elementos é cinco vezes maior que o ganho referente ao arranjo de quatro elementos, ao observamos o valor máximo alcançado no ARF de ambos os arranjos.

O aprimoramento da resposta do arranjo resultará em um aumento na capacidade de detecção da única estação brasileira de infrassom. Isso, por sua vez, ampliará a quantidade de eventos registrados, estendendo o âmbito das pesquisas para além dos objetivos definidos no Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBT), que se concentra no monitoramento de testes nucleares clandestinos.

A detecção de outros eventos, de possíveis novas fontes, além dos detectados atualmente pelo arranjo da I09BR, será objeto de estudo em trabalhos futuros.

2.9 Referências

Alcoverro, B. and Le Pichon, A. (2005). Design and optimization of a noise reduction system for infrasonic measurements using elements with low acoustic impedance. *J Acoust Soc Am* 117(4):1717–1727

Alcoverro, B. (1998). Acoustic filters design and experimental results. *Proceedings Workshop on Infrasound*. DASE, Commissariat à l’Energie, Bruyères-le-Châtel, France

Barros, L., Neri, B., Carvalho, J. and Fontenele, D. (2020). *A Participação brasileira na verificação do tratado de proibição total de testes nucleares*, 1. ed. – Tubarão (SC): Copiart, 2020. 152p.

Barros, L. and Fontenele, D. (2002). *IS09 Infrasound Station – International Monitoring System, FINAL REPORT Site Preparation, Construction and Installation*, Seismological Observatory of the University of Brasília, September 2002, 254 p.

Blanc, E and Ceranna, L. (2009). *ISS 09 - Science for Security*, CTBTO.

Brachet, N., Brown, D., Le Bras, R., Mialle, P. and Coyne, J. (2010). *Infrasound monitoring for atmospheric studies, chapter monitoring the earth’s atmosphere with the global IMS infrasound network*. Springer, Dordrecht, pp 77–118. ISBN:978-1-4020-9507-8

Bowman, J. R., Baker, G. E., and Bahavar, M. (2005). Ambient infrasound noise. *Geophysical Research Letters*, 32(9), L09803. <https://doi.org/10.1029/2005GL022486>

Brown, D., Ceranna, L., Prior, M., Mialle, P., and Le Bras, R. J. (2012). The idc seismic, hydroacoustic and infrasound global low and high noise models. *Pure and Applied Geophysics*, 171(3–5), 361–375. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0573-6>

Campus, P. and Christie, D. (2010). Worldwide observations of infrasonic waves. In: Le Pichon A, Blanc E, Hauchecorne A (eds) *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Springer, Berlin, pp 29–75. Doi 10.1007/978-1-4020-9508-5_6.

Cansi, Y. (1995). An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method. *Geophysical Research Letters*, 22(9), 1021–1024. <https://doi.org/10.1029/95GL00468>

Carter, J. (2011). Waveform data availability and pts performance monitoring: updates and progress. WGB 37 – Waveform Expert Group

CEA/DASE (1998). Microbarometer MB2000 – Technical Manual

CEA/DASE (2016a). DKT-GPMCC – User Manual. *DTK-GPMCC Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)*.

Conference on Disarmament (1995). Report of the infrasound expert group to the AdHoc committee on a nuclear test ban working group on verification (CD/NTB/WP.283). Geneva 2009. Operational manual for infrasound monitoring and the international exchange of infrasound data – draft (CTBT/WGB/TL-11,17/17/Rev.5

CTBTO - International Monitoring System. Available at https://www.ctbto.org/sites/default/files/2022-07/ims_map_front_back_august_2021_webfriendly.pdf. Accessed on april/2023.

Green, D. and Bowers, D. (2010). Estimating the detection capability of the international Monitoring system infrasound network. *J Geophys Res* 115(D18):D18116

Havskov, J. and Ottemöller, L. (2010). Array processing. *Routine Data Processing in Earthquake Seismology: With Sample Data, Exercises and Software*, 283-297

Hedlin, M., and Alcoverro, B. (2005). The use of impedance matching capillaries for reducing resonance in rosette infrasonic spatial filters. *J.Acoust. Soc.Amer.*, 117, 1880–1888, doi:10.1121/ 1.1760778.

Le Pichon, A., Ceranna, L., Vergoz, J. and Tailpied, D. (2019). Modeling the detection capability of the global IMS infrasound network. In: Le Pichon A, Blanc E, Hauchecorne A (eds) *Infrasound monitoring for atmospheric studies*, 2nd edn. Springer, Dordrecht, pp 593–604

Le Pichon, A., Ceranna, L. and Vergoz, J. (2012). Incorporating numerical modeling into estimates of the detection capability of the IMS infrasound network. *J Geophys Res* 117:D05121

Le Pichon, A., Vergoz, J., Blanc, E., Guilbert, J., Ceranna, L., Evers, L. and Brachet, N. (2009). Assessing the performance of the International Monitoring System infrasound network: geographical coverage and temporal variabilities. *J Geophys Res* 114, D08112, doi:10.1029/2008JD010907

Mack, H. and Flinn, E. (1971). Analysis of the spatial coherence of short-period acoustic-gravity waves in the atmosphere. *Geophys J R astr Soc* 26:255–269

Martec (2006). *Microbarometer MB2005 – User Manual*

Marty, J., Doury, B., and Kramer, A. (2021). Low and high broadband spectral models of atmospheric pressure fluctuation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38(10), 1813–1822. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0006.1>

Marty, J. (2019). The IMS infrasound network: current status and technological developments. In: Le Pichon A, Blanc E, Hauchecorne A (eds) *Infrasound monitoring for atmospheric studies*, 2nd edn. Springer, Dordrecht, pp 3–62. Doi: 10.1007/978-3-319-75140-5_1

Matoza, R., Landès, M., Le Pichon, A., Ceranna, L., and Brown, D. (2013). Coherent ambient infrasound recorded by the international monitoring system. *Geophysical Research Letters*, 40(2), 429–433. <https://doi.org/10.1029/2012GL054329>

McNamara, D. E. and Buland, R. P. (2004). Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4), 1517–1527. <https://doi.org/10.1785/012003001>

Mialle, P., Brown, D. and Arora, N. (2019). Advances in operational processing at the international data centre. In: Le Pichon A, Blanc E, Hauchecorne A (eds) *Infrasound Monitoring for atmospheric studies*, 2nd edn. Springer, Dordrecht, pp 209–248

RaspberryShake Specifications (2022). Acessado de <https://raspberrysshake.org/wp-content/uploads/2020/07/Specifications-ShakeBoom.pdf>, em marco de 2023.

Ruigrok, E. and Gibbons, S. (2017). Cross-correlation beamforming. *Journal of Seismology*, May 2017. Doi 10.1007/s10950-016-9612-6

CAPÍTULO 3

Discriminação de Eventos Tectônicos de Explosões em Pedreiras, Utilizando a Tecnologia Infrassônica

Resumo

Discriminar eventos naturais (tectônicos) de eventos artificiais (explosões) não é uma tarefa fácil e direta, principalmente quando ambas as fontes são pequenas e muito próximas uma da outra. Recentemente, enfrentamos esse problema em mais de um local no Brasil onde existem pedreiras para desmonte de rochas e fontes sísmicas tectônicas, provavelmente desencadeadas pelo estresse liberado pela remoção de rochas. Isto levanta muitas dúvidas sobre a origem e a natureza desses eventos co-localizados.

O objetivo deste trabalho é discriminar eventos tectônicos de explosões em pedreiras, utilizando uma estação sísmica e uma estação infrassônica, co-localizadas na cidade de Sete Lagoas/MG. Nessa região, ocorrem, frequentemente, eventos naturais e antropogênicos de baixa magnitude, que podem ser confundidos entre si. A discriminação desses eventos é importante para a compreensão dos processos antropogênicos que podem afetar a sismicidade, bem como para a avaliação de riscos e danos ambientais. Para realizar a discriminação, utilizamos o *software* Geotool, fornecido pela Organização do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBTO), para análise dos dados sísmicos e infrassônicos, por meio da identificação de fases sísmicas e de registros infrassônicos, além de servir para realizar correlações de sinais e determinar magnitudes.

Os registros obtidos dessas estações co-localizadas mostraram que eventos tectônicos de baixa magnitude ($M < 3$) não geram sinais infrassônicos, e que isto pode ser utilizado como um discriminante para distinguir eventos cuja natureza seja duvidosa.

Palavras-chaves: Explosões em pedreiras, Eventos tectônicos, Infrassom, Discriminação

Abstract

Discriminating natural events (tectonics) from artificial events (explosions) is not an easy and straightforward task, especially when both sources are small and very close to each other. Recently, we faced this problem in more than one location in Brazil where there are quarries for dismantling rocks and tectonic seismic sources, probably triggered by the stress released by the removal of rocks. This raises many questions about the origin and nature of these co-located events.

The objective of this work is to discriminate tectonic events from explosions in quarries, using a seismic station and an infrasonic station, co-located in the city of Sete Lagoas/MG. In this region, natural and anthropogenic events of low magnitude frequently occur, which can be confused with each other. The discrimination of these events is important for understanding the anthropogenic processes that can affect the seismicity, as well as for the assessment of environmental risks and damages. To carry out the discrimination, we used the Geotool software, provided by the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), to analyze seismic and infrasonic data, through the identification of seismic phases and infrasonic records, in addition to serving to carry out sign correlations and determine seismic magnitudes.

The records obtained from these co-located stations showed that low magnitude tectonic events ($M < 3$) do not generate infrasonic signals, and that this can be used as a discriminant to distinguish events whose nature is doubtful.

Keywords: Quarry explosions, Tectonic events, Infrasonic, Discrimination

3.1 Introdução

Geralmente, as empresas de mineração não fornecem informações sobre o tempo de origem, a carga explosiva e o tempo de atraso das detonações. Esta falta de informação pode dificultar a análise e a classificação precisa do evento quanto a sua natureza, se tectônico ou artificial.

Vários métodos têm sido empregados para diferenciar explosões de pedreiras e microterremotos rasos em registros sísmicos. Esses métodos incluem análise espectral (Postema, 1996; Korrat et al., 2023); razão da amplitude máxima P/S, em várias bandas de frequência (Hissely, 2022; Wang et al., 2020); análise e medição de parâmetros de fonte sísmica, como frequência de esquina e momento sísmico (Saadalla et al., 2023); e comparação de medições de magnitude para eventos sísmicos registrados localmente, como magnitude local e magnitude de coda da onda (Holt, 2021). Ao utilizar esses métodos, os pesquisadores podem determinar se um evento é um pequeno terremoto ou uma explosão química subterrânea (Seismological Society of America, 2020).

Pesquisas demonstraram que explosões de mineração realizadas a céu aberto geram sinais infrassônicos que podem auxiliar na diferenciação entre pequenos terremotos e explosões de mineração (ReVelle et al., 2004; Che et al., 2010; Czanik, 2021). Em um estudo realizado na Romênia, a análise sismoacústica foi usada para fazer distinção entre explosões de pedreiras e terremotos locais (Ghica et al., 2016).

Nossa pesquisa começou utilizando dados de duas estações da rede do Sistema Internacional de Monitoramento (IMS) no Brasil: a estação de infrassom I09BR, que consiste em um arranjo de quatro elementos com abertura de 2 km, e a estação sísmica primária BDFB. Estas estações foram utilizadas para monitorar detonações em minas localizadas em um raio de aproximadamente 28 km, próximas ao Parque Nacional de Brasília (PNB), onde estão instaladas essas estações IMS. Adicionalmente, foi utilizada uma estação temporária (RFFB5), composta por um equipamento com sensor sísmico, com componente vertical de período curto, e com sensor acústico, co-localizada na estação BDFB (**Fig. 3.1**). Essa estação temporária permaneceu operando por 20 dias e foi utilizada para comparar seus dados com os das estações I09BR e BDFB (**Fig. 3.2**). Várias explosões foram detectadas durante esse período e nenhum evento natural foi registrado. Além de haver as estações IMS, base de comparação de nossos dados gerados pela estação co-localizada (RFFB5), a escolha do PNB

foi devido à facilidade de acesso, à distância para Brasília e à segurança para manter equipamento instalado em seu interior.

As proximidades do PNB são desprovidas de eventos naturais, o que impede o alcance do objetivo deste estudo, que é desenvolver um método para distinguir eventos naturais de explosões. Para resolver esta limitação, selecionamos a cidade de Sete Lagoas/MG como nosso local de pesquisa, pois lá ocorrem eventos tectônicos de baixa magnitude e também explosões originadas de pedreiras.

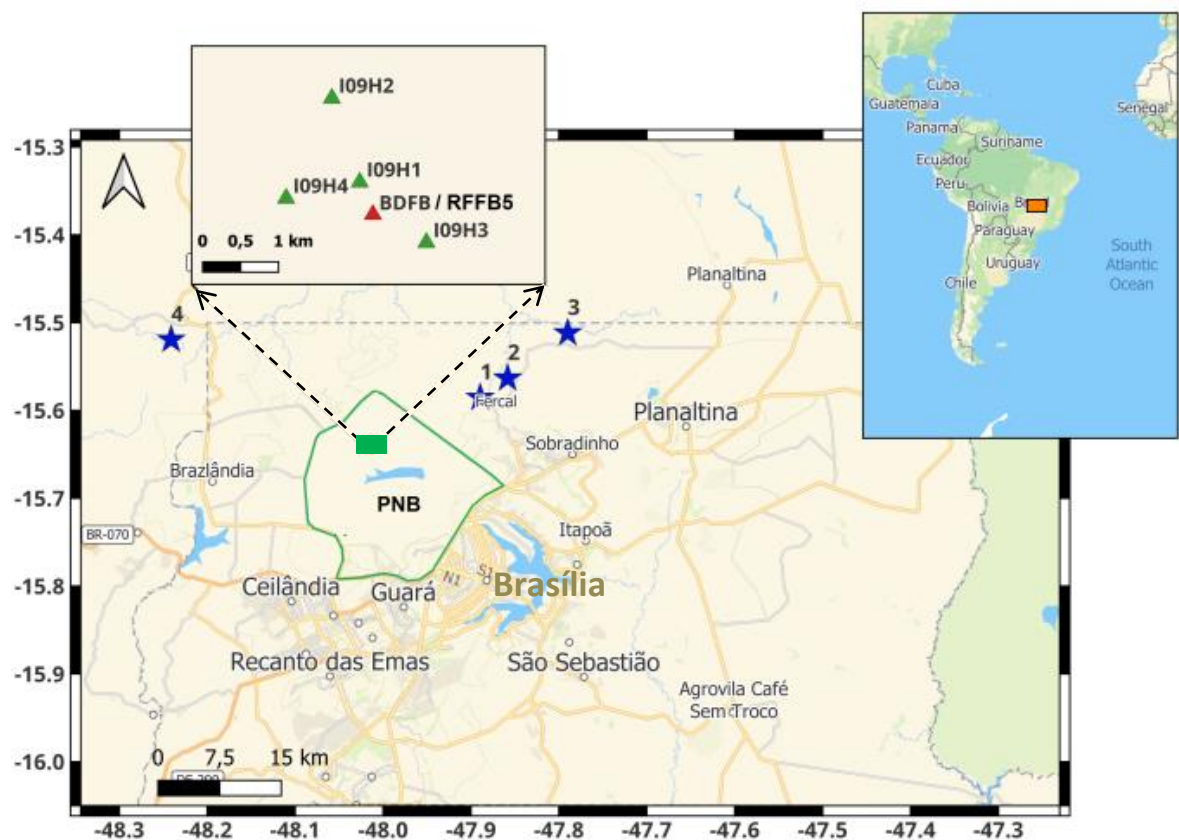


Figura 3.1 – Mapa da região do Distrito Federal e de cidades vizinhas, mostrando a área do Parque Nacional de Brasília (PNB), a localização de quatro minas em atividades (estrelas azuis), do arranjo da Estação de Infrassom de Brasília – I09BR – composta por quatro elementos (triângulos verdes) e da Estação Sísmica Primária BDFB, onde foi instalada a estação co-localizada RFFB5 (triângulo vermelho).

3.2 Método

Neste estudo, utilizamos uma estação sísmica e uma estação infrassônica co-localizadas para monitorar eventos naturais e antrópicos nas proximidades da cidade de Sete

Lagoas/MG. Nosso principal foco de pesquisa é a detecção de sinais infrassônicos, especialmente aqueles associados a terremotos de baixa magnitude.

Mutschlecner e Whitaker (2005) destacaram que a ausência de ondas acústicas pode explicar a natureza de eventos de origem duvidosa. A pesquisa deles demonstra que terremotos de pequena magnitude não produzem sinais infrassônicos, uma vez que a geração de infrassom atmosférico requer um limiar mínimo de aceleração de superfície de pico entre 10 e 20 cm/s²

Arrowsmith et al. (2011) mostram que terremotos de baixa magnitude parecem ser fontes relativamente pobres de infrassom. Isso indica que o infrassom pode ser empregado como um discriminante para identificar o tipo de fonte.

Para realizar a discriminação entre eventos naturais (tectônicos) e artificiais (explosões em pedreiras), utilizamos o *software* Geotool, fornecido pela Organização do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBTO), para análise dos dados sísmicos e infrassônicos, por meio da identificação de fases sísmicas e de registros infrassônicos, além de servir para realizar correlações de sinais e determinar magnitudes.

Adicionalmente, para verificar a qualidade e a sensibilidade do equipamento empregado nos estudos de discriminação, denominado RFFB5, foi realizado um teste no interior do Parque Nacional de Brasília (PNB), previamente aos trabalhos em Sete Lagoas e que será detalhado na seção seguinte.

Para diminuir o ruído provocado pelos ventos e que pode comprometer os registros na estação RFFB5, foi utilizado o filtro mecânico desenvolvido no trabalho, conforme o Capítulo 2 desta dissertação, Seção 2.4.1.1.

Foi desenvolvida uma equação empírica para a determinação da magnitude de duração dos eventos sísmicos registrados por RFFB5 em Sete Lagoas, conforme pode ser observada na Seção 3.5.

Uma informação extremamente importante a ser considerada é o horário de ocorrência dos eventos registrados em Sete Lagoas. Isto foi utilizado para corroborar na classificação da natureza dos eventos. De acordo com a Lei nº 3595, de 19 de dezembro de 1985, dispõe sobre a proteção contra poluição sonora no município de Sete Lagoas, fica proibida qualquer atividade de desmonte de rochas em mineradoras que envolva uso de explosivos em horário noturno.

3.2.1 Comparação de Eventos Registrados por RFFB5 no PNB

RFFB5 ficou co-localizada com BDFB antes do início das pesquisas na cidade de Sete Lagoas e registrou eventos ao longo de um período de 20 dias. A **Fig. 3.2** apresenta os registros de uma detonação ocorrida na Mina nº 2 (**Fig. 3.1**), situada a cerca de 19 km de BDFB, em 08/12/2022, às 20:16 UTC, detectada por I09BR, por BDFB e por RFFB5. Como pode ser claramente observado, os sinais sísmicos e acústicos registrados por RFFB5 são bem correlacionados com os registrados, respectivamente, por BDFB e I09BR. É importante destacar que I09BR utiliza um eficiente filtro mecânico para reduzir o ruído do vento, enquanto que RFFB5 não empregou este mesmo filtro. Além disso, o sismômetro da BDFB é um instrumento de banda larga, instalado em um poço a 100 metros de profundidade, enquanto que RFFB5 estava instalado na superfície.

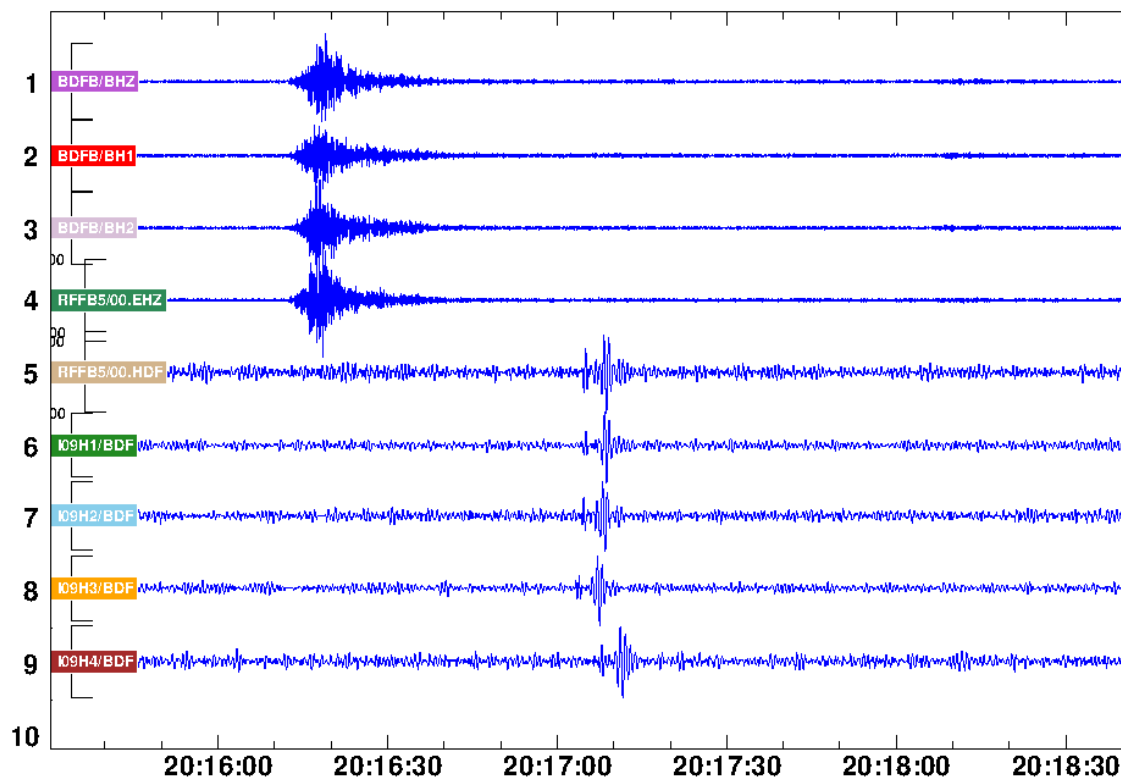


Figura 3.2 – Registro do evento artificial ocorrido em 08/12/2022, às 20:16:12.6 UTC, detectado por: BDFB (traços 1, 2 e 3); RFFB5 (co-localizado no site BDFB), traço 4 (sinal sísmico) e traço 5 (sinal acústico); e I09BR (traços 6, 7, 8 e 9). Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais sísmicos (3 - 12 Hz) e acústicos (1 - 3 Hz).

3.4 Caso Sete Lagoas

Sete Lagoas (SL) é um município localizado na região sudeste do Brasil, no Estado de Minas Gerais. Nas proximidades de SL, existem dez minas de exploração de minérios que estão em operação há várias décadas. Recentemente, moradores de Sete Lagoas relataram distúrbios que diferem das vibrações e sons típicos produzidos por detonações nessas minas. Esses distúrbios têm durações mais longas e são de natureza diferente do que essas pessoas estão acostumadas a experimentar.

Em setembro de 2022, passamos a monitorar esses eventos por meio da Estação RFFB5, instalada em uma área intermediária entre as minas e os epicentros dos eventos ocorridos ao longo dos anos, conforme mostra a **Fig. 3.3**. O maior evento documentado na região foi um terremoto de magnitude 3.5, ocorrido em 1931 (catálogos IAG-USP e SIS-UnB). É importante observar que todos os eventos plotados no mapa ocorreram antes da instalação de RFFB5. O período de monitoramento da estação durou aproximadamente dois meses, registrando vinte e cinco eventos locais, que serão discriminados neste trabalho.

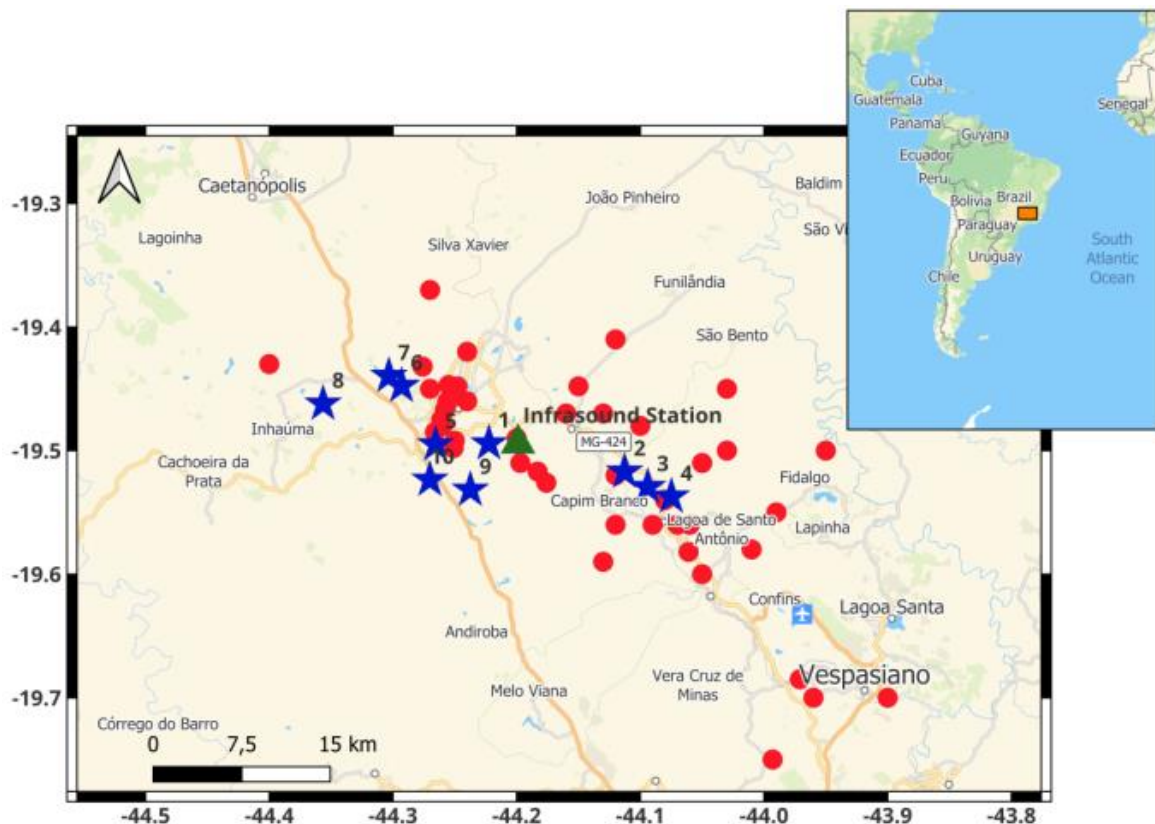


Figura 3.3 – Mapa da área de estudo em Sete Lagoas. O triângulo verde representa a estação RFFB5. As estrelas azuis representam as minas em operação. Os círculos vermelhos indicam os epicentros dos eventos naturais, ocorridos entre 1931 e 2022 (catálogos IAG-USP e SIS-UnB).

Capítulo 3 - Discriminação de Eventos Tectônicos de Explosões em Pedreiras, Utilizando a Tecnologia Infrassônica

3.5 Dados

Os vinte e cinco eventos locais registrados por RFFB5, **Tabela 1**, ocorreram a uma distância inferior a 12 km. Isto sugere que todos podem ser explosões ou sismos naturais, considerando que em um raio com esta mesma distância estão todas as possíveis fontes. Deste total, a estação detectou sinais sísmicos e acústicos em 16 eventos. Para os 9 eventos restantes, a estação detectou apenas sinais sísmicos.

Tabela 1 – Eventos locais detectados pela Estação RFFB5 no site de Sete Lagoas. Em amarelo, estão os nove eventos que não geraram sinais acústicos e que foram caracterizados como eventos tectônicos.

#	Data (dd/mm/aaaa)	Hora do	S-P do evento (s)	Magnitude (M _D)	Ocorrência	A	B
		registro da			do registro		
		onda P (hh:mm:ss)			de sinal acústico		
UTC							
1	03/10/2022	18:13:46	1.41	1.8	yes	26.40	27.80
2	03/10/2022	18:15:06	1.32	1.8	yes	24.60	25.79
3	04/10/2022	20:14:35	0.93	2.1	yes	20.50	17.07
4	07/10/2022	12:59:06	0.81	1.7	no	-	14.38
5	07/10/2022	20:11:17	0.82	1.8	no	-	14.61
6	10/10/2022	14:07:40	0.46	1.9	yes	6.90	6.55
7	11/10/2022	14:45:17	1.03	1.8	yes	19.10	19.30
8	14/10/2022	16:33:30	1.54	1.8	yes	30.00	30.71
9	16/10/2022	12:18:22	1.3	2.0	no	-	25.34
10	17/10/2022	18:27:36	1.30	1.8	yes	26.10	25.34
11	19/10/2022	14:16:51	0.46	1.9	yes	7.00	6.55
12	20/10/2022	21:57:14	1.30	1.9	no	-	26.34
13	20/10/2022	22:08:47	1.30	1.8	no	-	26.34
14	20/10/2022	22:43:17	1.30	1.8	no	-	26.34
15	21/10/2022	14:46:09	0.97	1.8	yes	19.20	17.96
16	21/10/2022	16:30:39	1.42	1.8	yes	29.80	28.03
17	29/10/2022	14:15:27	1.00	1.7	yes	19.30	18.63
18	29/10/2022	14:25:54	1.10	1.8	yes	19.50	20.87
19	31/10/2022	14:14:07	0.64	2.0	yes	6.60	10.58
20	18/11/2022	03:30:38	1.29	1.9	no	-	25.12
21	21/11/2022	19:08:44	1.38	1.7	yes	25.80	27.13
22	22/11/2022	03:34:02	0.84	1.8	no	-	15.05
23	24/11/2022	02:02:37	0.75	2.2	no	-	13.04
24	28/11/2022	16:04:46	1.20	1.9	yes	24.50	23.11
25	29/11/2022	20:21:48	1.10	2.2	yes	21.00	20.87

A) Diferença observada do tempo do registro da primeira onda do sinal acústico, após o registro da onda P (s).

B) Diferença teórica do tempo do registro da primeira onda do sinal acústico, após o registro da onda P (s).

As magnitudes de duração (M_D) foram determinadas conforme a fórmula apresentada abaixo e cujas constantes foram definidas especialmente para a Estação RFFB5, instalada no site de Sete lagoas:

$$M_D = a \log (D) + b.$$

Onde: **a** e **b** são constantes para um dado instrumento e localização da estação. **D** é a duração do registro do sinal sísmico.

Para os dados obtidos a partir de RFFB5, instalado em Sete Lagoas, **a** = 0,6667 e **b** = 0,8112.

Utilizando a velocidade média de propagação das ondas acústicas na atmosfera inferida, relacionando S – P e os sinais acústicos observados (Tabela 1), empregamos a equação $y = 22,369x - 3,7368$, derivada da análise por regressão linear (**Fig. 3.4**), para determinarmos os tempos de chegada teóricos das ondas acústicas na Estação RFFB5 para os vinte e cinco eventos detectados, em condições climáticas e distâncias semelhantes. Foi arbitrada uma janela com duração de 15 segundos para evidenciar a ocorrência do sinal acústico, conforme visto na próxima seção.

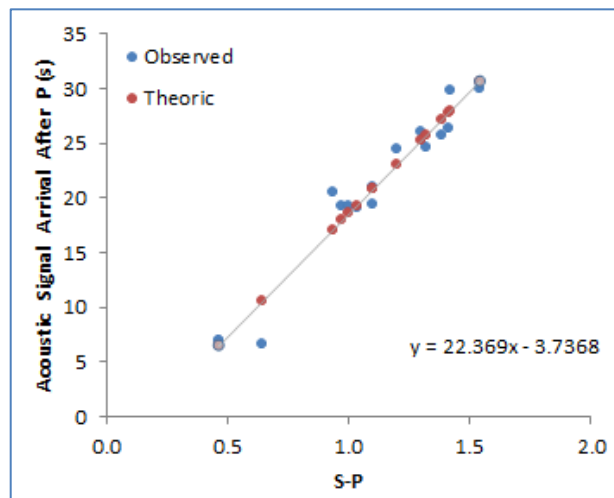


Figura 3.4 – Tempo de chegada do sinal acústico após a fase sísmica P, em segundos, referente à S-P.

3.6 Resultados

Durante o período de monitoramento no site de Sete Lagoas, a Estação RFFB5 registrou sinais sísmicos de nove eventos locais que não produziram sinais acústicos, eventos indicados em amarelo na Tabela 1.

Os eventos nº 20, 22 e 23 ocorreram fora do horário normal de trabalho, quando não costumam haver detonações em minas. Esta característica, por si só, bastaria para assegurar a origem desses três eventos, ou seja, serem de origem tectônica. Contudo, os demais eventos ocorreram em horários compatíveis com horários em que poderia haver detonações nas pedreiras próximas à estação.

Para comprovar que os nove eventos são de origem tectônica, foi necessário a obtenção de dados de outras estações, no caso, da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR). De acordo com Nogueira (2023), utilizando dados da RSBR, o Evento 23 (**Tabela 1**), de 24/11/2022, ocorrido às 02:02:37 UTC, magnitude 2.2 M_D , foi caracterizado como tectônico. Apenas este evento foi registrado por estações da RSBR, devido às baixas magnitudes e as distâncias das estações em relação aos demais eventos.

Para corroborar a origem deste evento, buscou-se o evento de 28/12/2022, 2.9 mR (IAG-USP), 03:42:00 UTC, também caracterizado como tectônico por essa mesma agência. Este evento foi registrado pelas estações da RSBR (BSCB – Bom Sucesso, e DIAM – Diamantina), entretanto, não registrado por RFFB5. O evento ocorreu em Sete Lagoas, em horário fora dos que são realizadas detonações em pedreiras e com uma magnitude mais expressiva e provavelmente não compatível com magnitude das explosões realizadas nas pedreiras da região, haja vista a proximidade com as áreas urbanas. Em seguida, foi realizada uma análise, por meio da correlação de sinais, para inferir se ambos os eventos seriam originados da mesma fonte, **Fig. 3.5**. As observações de similitude entre os sinais e dos coeficientes altos de correlação permitem inferir se estes dois eventos são provenientes de uma mesma fonte. A alta semelhança nas formas de onda entre eventos é uma ocorrência comum quando eles compartilham os mesmos caminhos de propagação e mecanismos focais (Chiu e Snyder, 2015). As análises permitiram verificar que ambos os eventos são provenientes da mesma fonte.

Extrapolando este resultado para os demais eventos, é possível perceber boa correlação do Evento 23 (**Tabela 1**) com três outros eventos (**Eventos 4, 5 e 22 da Tabela 1**), **Fig. 3.6**. Os outros cinco eventos (**Eventos 9, 12, 13, 14 e 20 da Tabela 1**) são correlacionáveis entre si, **Fig. 3.7**, mas não são correlacionáveis com o Evento 23, que representa a nossa referência. Contudo, podemos indicar o Evento 20 (**Tabela 1**) como uma nova referência, haja vista ter ocorrido fora do horário de explosões em pedreiras. Diante disto, os quatro eventos correlacionados com a nova referência são provenientes da mesma

fonte. Conclui-se, portanto, que os nove eventos são de origem natural, provenientes de duas fontes distintas.

As **figuras 3.8 a 3.10** mostram os registros de três eventos na Estação RFFB5, nos quais foram detectados apenas sinais sísmicos (componente sísmica) e nenhum sinal acústico relativo registrado na componente acústica da estação.

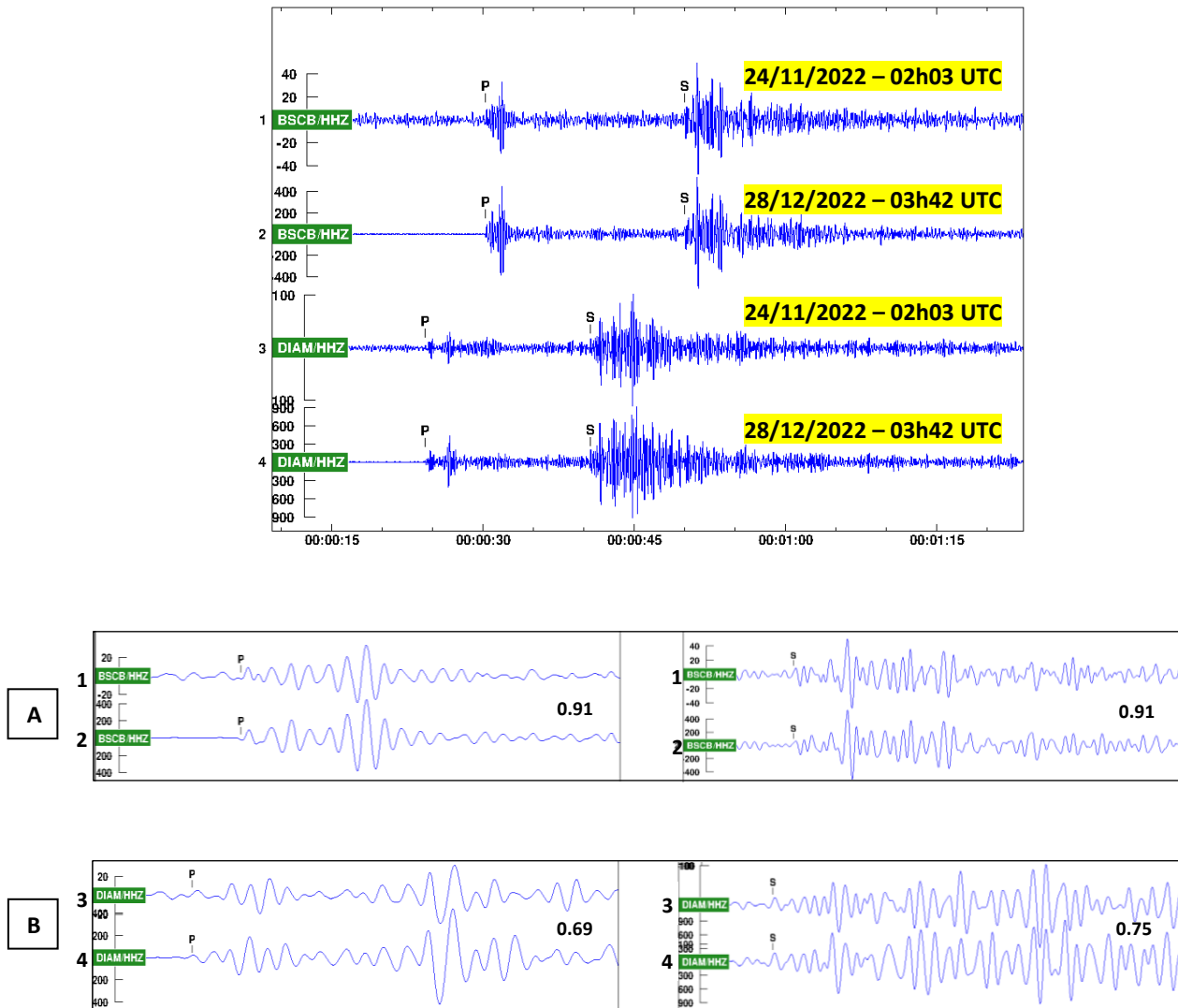


Figura 3.5 – Correlação entre os sinais dos eventos, caracterizados como tectônicos, ocorridos em 24/11/2022 às 02h03 UTC e 28/12/2022 às 03h42 UTC nas estações BSCB e DIAM, pertencentes à Rede Sismográfica Brasileira (RSBR). Em **A**, detalhe da correlação feita no pacote das ondas de corpo dos dois eventos na Estação BSCB, à esquerda, e detalhe da correlação no pacote das ondas de superfície, à direita. Em **B**, idem, porém na Estação DIAM. Os números inseridos nas quatro janelas representam os coeficientes de correlação dos sinais. Os sinais registrados foram filtrados na banda de 6-12 Hz.

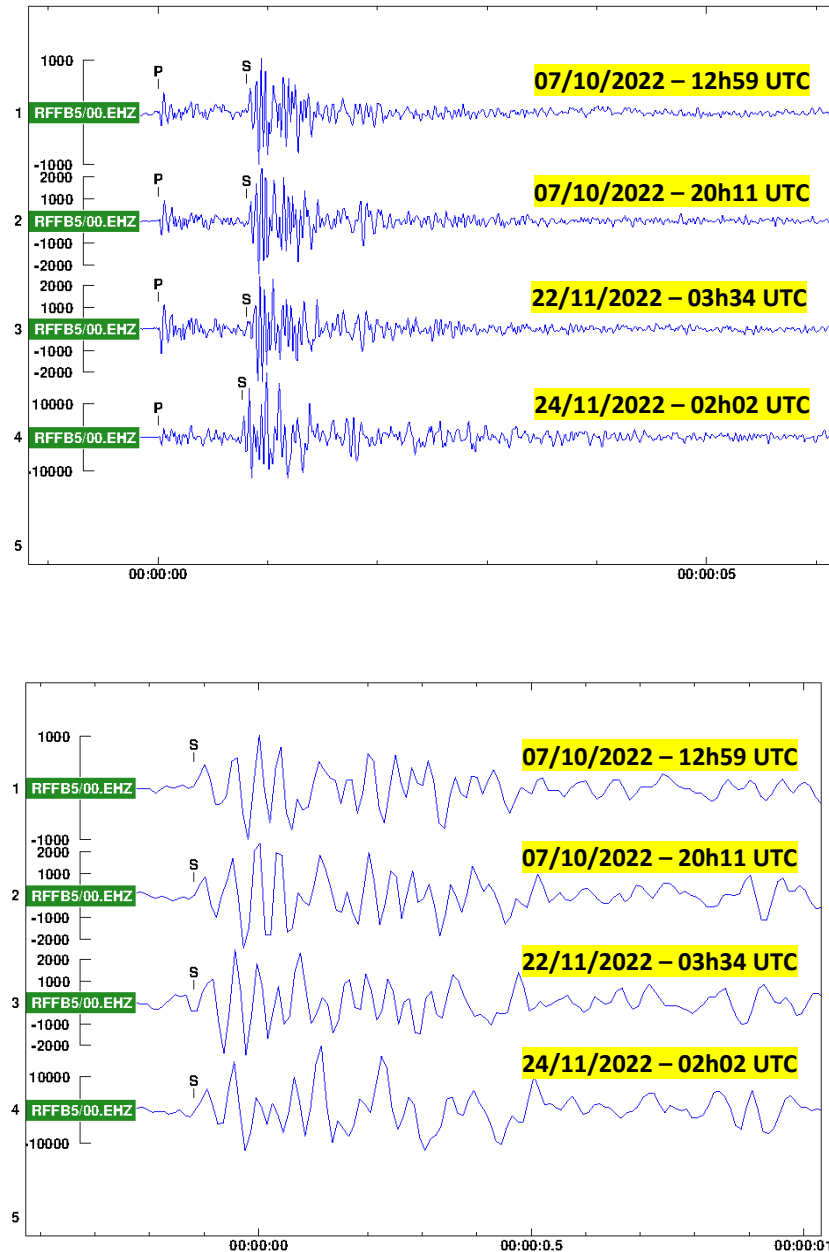


Figura 3.6 – Correlação entre os sinais dos eventos 4, 5, 22 e 23 da Tabela 1, traços 1 a 4 respectivamente, registrados na Estação RFFB5. A figura de baixo mostra o detalhe da correlação dos sinais no pacote das ondas superficiais com o evento de referência (Traço 4). Os sinais registrados foram filtrados na banda de 6-12 Hz.

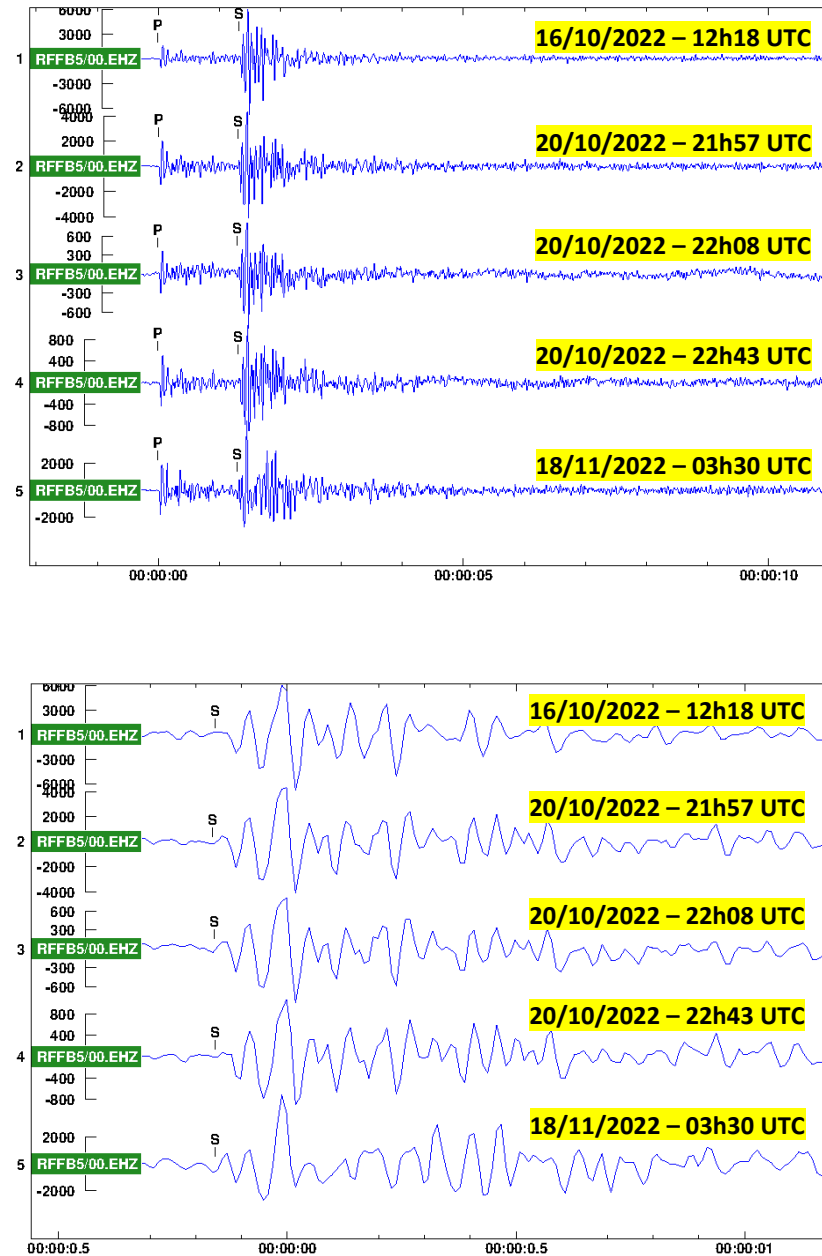


Figura 3.7 – Correlação entre os sinais dos eventos 9, 12, 13, 14 e 20 da Tabela 1, traços 1 a 5 respectivamente, registrados na Estação RFFB5. A figura de baixo mostra o detalhe da correlação dos sinais no pacote das ondas superficiais com o evento de referência (Traço 5). Os sinais registrados foram filtrados na banda de 6-12 Hz.

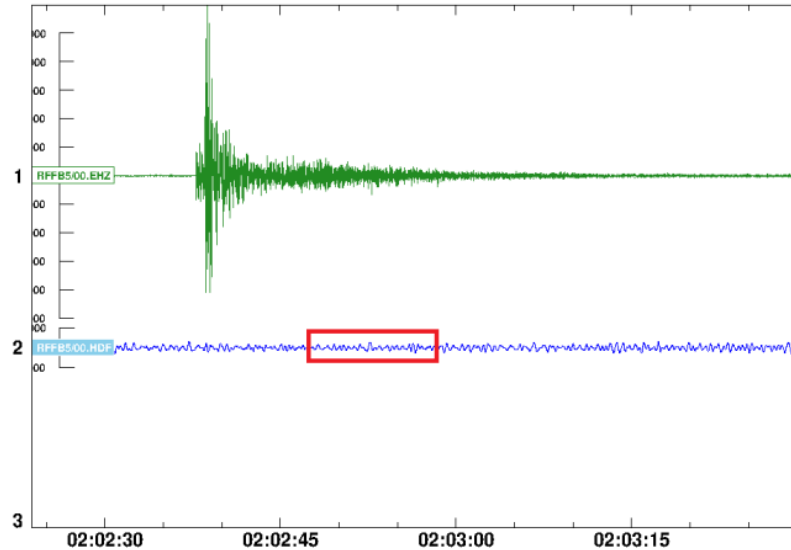


Figura 3.10 – Evento registrado em 24 de novembro de 2022, às 02:02 UTC, pela Estação RFFB5. O traço verde (traço superior) representa a componente vertical sísmica, enquanto o traço azul (traço inferior) representa a componente acústica, Evento #23 Tabela 1. A janela vermelha denota o tempo de registro esperado dos sinais acústicos. Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais acústicos (1 - 3 Hz).

As **figuras 3.11 a 3.13** mostram três exemplos de eventos que geraram sinais sísmicos e acústicos (Eventos 11, 17 e 19 da Tabela 1). Todos os três eventos foram detonações em minas, que ocorreram em momentos consistentes com explosões em pedreiras.

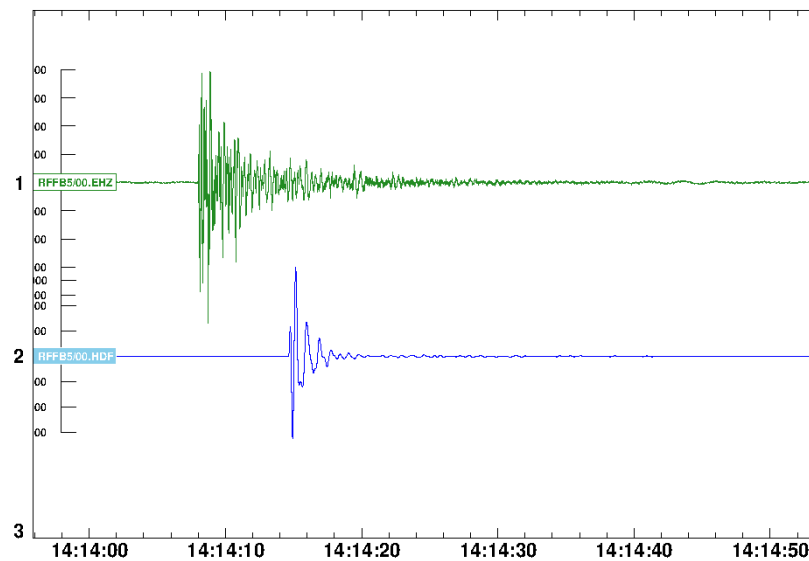


Figura 3.13 – Evento registrado em 31 de outubro de 2022, às 14h14 UTC, pela Estação RFFB5. A componente vertical sísmica é representada a verde (traço superior) e a componente acústica a azul (traço inferior), Evento #19 na Tabela 1. Foi utilizado Filtro Butterworth de 4ª ordem para os sinais acústicos (1 - 3 Hz).

3.7 Discussão e Conclusões

Este trabalho citou alguns métodos abordados por diferentes autores para fazer uma diferenciação entre explosões em pedreiras e eventos tectônicos rasos de pequena magnitude ($M < 3$). O trabalho constatou a escassez de informações importantes, que deveriam ser fornecidas pelas mineradoras, tais como horário de ocorrência, quantidade de explosivos utilizados e intervalo de tempo entre as detonações, que podem dificultar a análise e a classificação precisa de eventos. Além disso, introduziu uma abordagem alternativa, tema de nosso estudo, que envolve o uso de estações sísmica e infrassônica co-localizadas para diferenciar eventos locais naturais e artificiais com epicentros próximos uns dos outros.

Explosões em minas geram sinais sísmicos e acústicos, que podem ser detectados por estações de infrassom. A detectabilidade desses sinais depende de vários fatores, como distância, carga explosiva e condições meteorológicas.

O estudo apresentou nove eventos que não produziram sinais acústicos e que foram classificados como tectônicos. A ausência de sinais acústicos detectáveis em eventos locais serve como um discriminador útil, permitindo classificar a natureza dos eventos como tectônicos ou desencadeados pela mina, quando ocorrem dentro da mina.

A utilização de uma estação sísmica e uma infrassônica co-localizadas fornece um método eficaz para diferenciar eventos locais naturais e artificiais.

As estações de infrassom são valiosas em situações em que há incerteza quanto à natureza de um evento. Elas podem fornecer informações confiáveis e contribuir para a caracterização precisa do evento, especialmente nos casos em que dados cruciais não são fornecidos pelas empresas de mineração.

É importante notar que a detectabilidade dos sinais sismo-acústicos é influenciada por vários fatores, incluindo magnitude do evento, distância e condições meteorológicas. O estudo de caso realizado em Sete Lagoas revelou que terremotos de baixa magnitude não produzem sinais acústicos, mesmo com uma estação de infrassom próxima à fonte (~5 km). Portanto, embora a estação sísmica e a infrassônica co-localizadas ofereçam vantagens significativas, é necessário considerar fatores adicionais, como as variações nas características do evento e na detectabilidade do sinal. A forma de lidar com esses fatores é implantar um ou dois arranjos de infrassom de 4 elementos nas proximidades das minas sob investigação, a fim de caracterizar a fonte.

No geral, a sinergia de monitoramento sísmico e de infrassom fornece uma abordagem abrangente e confiável para classificar eventos. Ela aprimora nossa compreensão a respeito de eventos naturais e artificiais, contribuindo para a classificação destes eventos.

3.8 Referências

- Arrowsmith, S.J., Whitaker, R.W. and Stead, R.J. (2011). Infrasound as a depth discriminant. Los Alamos National Lab NM.
- Che, I-Y. and Jeon, J-S. (2010), The discrimination of man-made explosions from earthquakes using seismo-acoustic analysis in the Korean Peninsula. Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010-12623, 2010 EGU General Assembly 2010.
- Chimpliganond, C. N. (2002). Caracterização da sismicidade induzida no reservatório de Nova Ponte, Minas Gerais, Brasil, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília.
- Chiu, K., Snyder D. B (2015). Regional seismic wave propagation (Lg & Sn phases) in the Amerasia Basin and High Arctic, Polar Science, 2015, vol. 9, p. 130.
- Czanik, C., Kiszely, M., Mónus, P., Süle, B. and Bondar, I. (2021). Identification of Quarry Blasts Aided by Infrasound Data. Pure and Applied Geophysics 178 (2021), 2287–2300 <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02748-5>.
- Ghica, D.V., Popa, M., Grecu, B. and Radulian, M. (2016). Identification of blasting sources in the Dobrogea seismogenic region, Romania, using seismo-acoustic signals. Physics and Chemistry of the Earth 95 (2016) 125 - 134. journal homepage: www.elsevier.com/locate/pce.
- Holt, Monique Maria (2021). Seismic Discrimination of Earthquakes and Explosions Using Comparisons of Local Magnitude (M L) and Coda Magnitude (M C). Diss. The University of Utah.
- Kiszely, M., Süle, B., Péter, P.M. and Bondár, I. (2023). Discrimination between local earthquakes and quarry blasts in the Vértes Mountains, Hungary. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica: A Quarterly of the Hungarian Academy of Sciences. pp. 1-17. ISSN 2213-5812 (print); 2213-5820 (online) (In Press).

Korrat, I.M., Lethy, A.; Elgabry, M.N.; Hussein, H.M. and Othman, A.S. (2022). Discrimination between small earthquakes and quarry blasts in Egypt using spectral source characteristics. *Pure Appl. Geophys.* 179 (2022), 599–618, <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02953-w>.

Mutschlecner, J.P. and Whitaker, R.W. (2005). Infrasound from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 110, doi:10.1029/2004JD005067.

Nogueira, J. A. A. (2023). Relative location of regional epicenters in Brazil and source parameters. Dissertação de mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG, Universidade de São Paulo - USP.

Postema, M.A.B. (1996). Discrimination between quarry blasts and micro-earthquakes using spectral analysis, applied to local Israeli events, Dissertation in Geophysics University of Utrecht, 41p.

Revelle, D.O., Whitaker, R.W., Mutschlecner, J.P. and Renwald, M. (2004). Discrimination of earthquakes and mining blasts using infrasound, in *Proceedings of the 26th Seismic Research Review—Trends in Nuclear Explosion Monitoring*, LA-UR-04-5801, Vol. 2, pp. 669-679.

Saadalla, H.; Abdelhafez, H.E. and Hayashida, T. (2023). Discrimination between earthquakes and quarry blasts in the Aswan region, southern Egypt, using P-wave source spectra, *J. Seismol* (2023) 27:279–289, <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10143-x>.

Seismological Society of America. "Magnitude comparison distinguishes small earthquakes from chemical explosions in US west." *Science Daily*. Science Daily, 13 October 2020. www.sciencedaily.com/releases/2020/10/201013124143.htm.

Wang, R.; Schmandt, B. & Kiser, E. (2020). Seismic discrimination of controlled explosions and earthquakes near Mount St. Helens using P/S ratios. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2020JB020338. <https://doi.org/10.1029/2020JB020338>.

CAPÍTULO 4

Discussão e Conclusões

4.1 Discussão

A tecnologia de infrassom é pouco explorada pela comunidade científica, particularmente no Brasil, pois não existem grupos que desenvolvam trabalhos nesta área. Talvez sejamos o único grupo que faça pesquisas com o infrassom no país.

Existem aplicações importantes do infrassom que podem ser mais exploradas, como é o caso do tema abordado sobre a discriminação de eventos tectônicos de eventos artificiais (explosões em pedreiras). Contudo, são necessários novos estudos, em outras regiões do país, de forma a testar melhor e a expandir o método abordado. Para tanto, para uma maior clareza na eficácia do método, é preciso obter parâmetros de fonte adicionais, além do azimuth e da frequência predominante. Isto para identificar e caracterizar com mais precisão as fontes estudadas. Neste sentido, indicamos a implantação de pelo menos dois arranjos de infrassom, com no mínimo quatro elementos cada, em torno da área a ser investigada. Este tema está em desenvolvimento e será aprofundado em um próximo trabalho.

A adição de novos elementos na I09BR aumenta a sensibilidade do arranjo e, com isto, favorece o aumento do número de detecções. Contudo, os novos elementos têm que estar distribuídos de forma a otimizar a resposta do arranjo. Não basta apenas adicionar elementos, precisa haver o cuidado de seguir algumas regras práticas, como: evitar o alinhamento de mais que dois pontos; terem uma distribuição azimuthal balanceada, de forma a diminuir o gap azimuthal e perceber sinais de forma omnidirecional; escolher distâncias entre os elementos que permitam resolver diferentes comprimentos de ondas, visando à detecção de eventos em faixas mais amplas de frequências. Também é necessário observar questões de ordem ambientais, pois o arranjo está dentro de uma área de proteção ambiental permanente. Deste modo, escolher locais mais próximos a acessos já existentes, pode diminuir o impacto de novas construções em áreas preservadas.

Existe apenas uma única estação de infrassom no Brasil, e isto é fator limitante no desenvolvimento de pesquisas. Mais estações distribuídas nas regiões do país possibilitariam estudos mais abrangentes, com a detecção de sinais de outras fontes geradoras de infrassom. Isto, por exemplo, enriqueceria os modelos atmosféricos inferidos da propagação de sinais infrassônicos, pois seriam desenvolvidos em escalas regionais.

A abrangência da aplicação da tecnologia de infrassom é muito ampla, envolvendo múltiplas disciplinas, como: a meteorologia, estudando fenômenos atmosféricos, incluindo tempestades, tornados e o comportamento da atmosfera em altitudes elevadas; astronomia, ao detectar a entrada de meteoros na atmosfera e ajudar a mapear sua trajetória; a vulcanologia, fornecendo informações valiosas para alertas precoces e estudos geofísicos; a sismologia, complementando a detecção de terremotos e permitir a identificação de explosões e, principalmente, a segurança nuclear, área de extrema importância, pois impulsionou o infrassom ao utilizar a tecnologia no monitoramento de explosões nucleares clandestinas. Também é aplicada na aviação civil, com a identificação e caracterização de erupções vulcânicas, que podem representar riscos para a aviação.

Para efeitos práticos e de grande relevância na sociedade, podemos destacar esforços de instituições de pesquisas e também de indústrias na aplicação da tecnologia do infrassom:

1. Universidade Estadual de Oklahoma:

Elbing (2018), engenheiro de mecânica de fluidos, começou a rastrear tornados com infrassom como um projeto paralelo. Ele conseguiu prever um twister em maio de 2017, feito que aumentou suas pesquisas na área.

2. Universidade do Alabama, Instituto de Clima Severo:

Goudeau et al. (2018) implantaram vários conjuntos de sensores em todo o norte do Alabama, capazes de observar assinaturas acústicas na faixa de infrassom (0-20 Hz). Os arranjos foram colocados para detectar emissões infrassônicas que se supõe ser o resultado de atividades de tornados e para rastrear e identificar tempestades de tornados.

3. Universidade da Califórnia (UC, 2023), San Diego:

Estuda a radiação e a dispersão do som, com ênfase em sons de baixa frequência relacionados aos processos da Terra. O Laboratório de Acústica Atmosférica também realiza pesquisas em diversas áreas de infrassons, incluindo estudos de fontes, modelagem de propagação, processamento de arranjos e redução de ruído do vento. O Laboratório também opera/mantém dois arranjos do Sistema Internacional de

Monitoramento e três arranjos de pesquisa temporárias, localizadas ao longo da Costa Oeste dos EUA. Também desenvolveu um sensor infrassônico usando fibras ópticas como elementos sensores distribuídos, Zumberg et al., 2006. O projeto abordou as limitações dos filtros de tubo padrão usados na época, incluindo a maximização da relação sinal-ruído. O sistema pode ajudar a estimar o azimute do sinal e a velocidade da fase. A vantagem do Sensor Infrassônico de Fibra Óptica (OFIS) é que ele mede as variações de pressão ao longo de seu comprimento, e não uma soma acústica da pressão em muitos pontos.

4. Universidade do Havaí (UH, 2023):

O Laboratório de Pesquisa Aplicada da Universidade do Havaí está desenvolvendo novas maneiras de ouvir o que nos rodeia usando sensores de infrassons. Os sensores podem detectar sinais de baixa frequência que podem indicar a presença de fenômenos humanos ou naturais distantes, geralmente indistintos, que vão desde clima, atividade vulcânica e ondas. O Laboratório de Infrassom da Universidade do Havaí usa microfones muito sensíveis para ouvir sons de baixa frequência na atmosfera. O laboratório opera estações de escuta como parte do Sistema Internacional de Monitoramento. Também realiza pesquisas em processos de fontes acústicas, propagação, instrumentação, processamento de sinais de arranjos e desenvolvimento de *software*.

5. Universidade do Alasca Fairbanks, Instituto Geofísico:

Olson (2012) pesquisou e coletou informações sobre choques atmosféricos e estrondos sônicos provenientes da passagem de aviões supersônicos, com a intenção de mostrar a riqueza do conjunto único de sinais que ocorre na banda infrassônica de baixa frequência.

6. Tecnologias BBN (Industria):

Gibson et al. (2002), BBN Technologies, desenvolveu um kit de ferramentas de *software* que integra modelos de propagação de infrassom e caracterizações da atmosfera superior. Os modelos de propagação acústica consistem em um modelo de teoria dos raios 3-D; um modelo de modo normal; e um modelo de equação parabólica 2-D de onda contínua. Os modelos podem ser aplicados para prever as características de propagação necessárias para estimar os tempos de viagem, rumos e amplitudes de locais potenciais de eventos em todo o mundo. O *software* foi desenvolvido para modelar o desempenho de localização de uma rede de sensores infrassons. A BBN

Technologies foi patrocinada pela Diretoria de Veículos Espaciais do Laboratório de Pesquisa da Força Aérea dos EUA (AFRL) para atualizar o kit de ferramentas de análise *Infrasound Modeling of Atmospheric Propagation* (InfraMAP), para permitir novas opções, como forma de especificar o ambiente de propagação. Atualizações atmosféricas quase em tempo real, incluindo os resultados de modelos numéricos de previsão do tempo, complementam a caracterização climatológica básica da temperatura, vento e composição do ar, Gibson et al., 2004.

4.2 Conclusões

Melhorar o poder de detecção da única estação existente no Brasil ampliará a quantidade de detecções de sinais infrassônicos nessa estação. Contudo, para poder localizar as fontes que geraram esses sinais, é necessária a instalação de outros arranjos, distribuídos localmente e regionalmente no país, o que possibilitaria mapear essas fontes.

A colaboração internacional, como a parceria com a PrepCom/CTBTO, pode facilitar a aquisição de conhecimento e tecnologia nessa área.

A pesquisa em infrassom pode se expandir para investigar novas aplicações, como monitoramento ambiental, previsão de desastres naturais e até mesmo vigilância de atividades geológicas.

Novos estudos e pesquisas em infrassom, como o mostrado aqui sobre discriminação de eventos tectônicos de explosões em pedreiras, podem abrir oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de detecção e processamento de sinais infrassônicos.

A tecnologia de infrassom tem um potencial significativo e ainda inexplorado em diversas áreas, e seu desenvolvimento pode contribuir para avanços científicos, tecnológicos e de segurança em todo o mundo. Portanto, investir em pesquisa e expansão dessa tecnologia é de grande interesse e relevância.

4.3 Referências

Elbing, B. R.; Petrin, C. E. and Van Den Broeke, M. S. (2018). Infrasound measurements from a tornado in Oklahoma. In Proceedings of Meetings on Acoustics (Vol. 33, No. 1). AIP Publishing.

Gibson, R. G., and D. E. Norris (2004). Integration of Infrasound Propagation Models and Near-Real-Time Atmospheric Characterizations. BBN Technologies, Arlington, VA, ADA430625, Distribution A.

Gibson, R. G.; and D. Norris (2002). Development of an Infrasound Propagation Modeling Tool Kit. BBN Technologies, Arlington, VA, ADA411914, Distribution A.

Goudeau, B.; K. R. Knupp; W. G. Frazier; R. Waxler; C. Talmadge and C. Hetzer (2018). An Analysis of Tornado-Emitted Infrasound During the VORTEX-SE Field Campaign. University of Alabama, Huntsville, AL, 11.

Olson, J. (2012). Infrasound Rocket Signatures. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Wailea, Hawaii.

UC (2023). Laboratory for Atmospheric Acoustics. Welcome to the Laboratory for Atmospheric Acoustics. Available at <https://l2a.ucsd.edu/>. Accessed on october/2023.

UH (2023). University of Hawaii. Infrasound Laboratory of University of Hawaii. Available at <https://www.isla.hawaii.edu>. Accessse on october/2023.

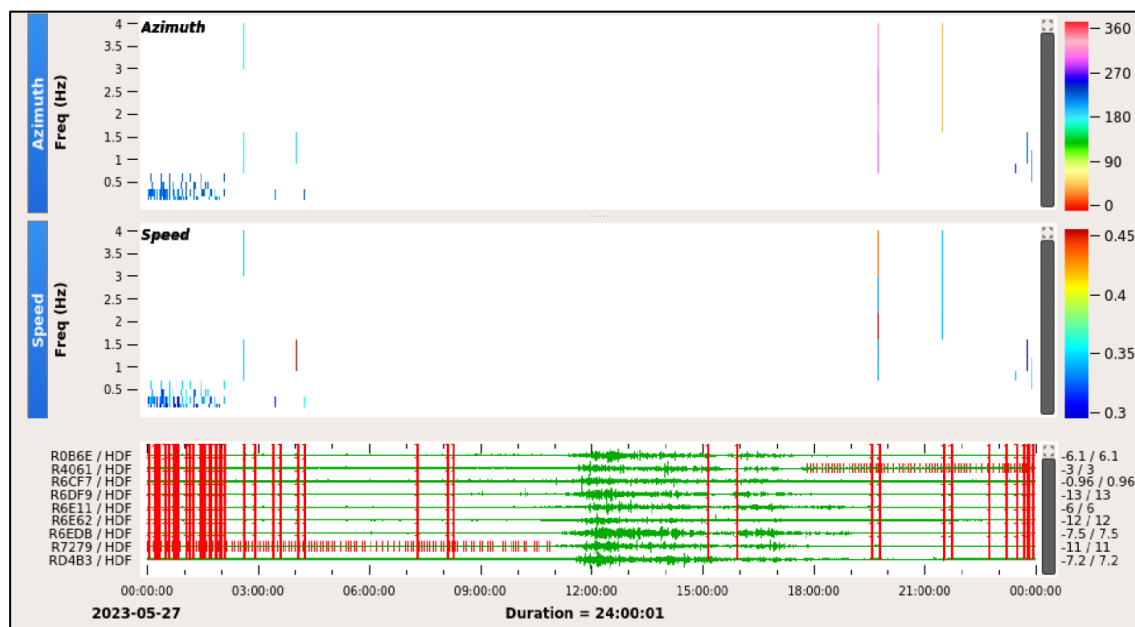
Zumberg, M. A., and J. Berger (2006). An Optical Fiber Infrasound Sensor. University of California Regents, Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, CA, ADA456389, Distribution A.

ANEXO 1

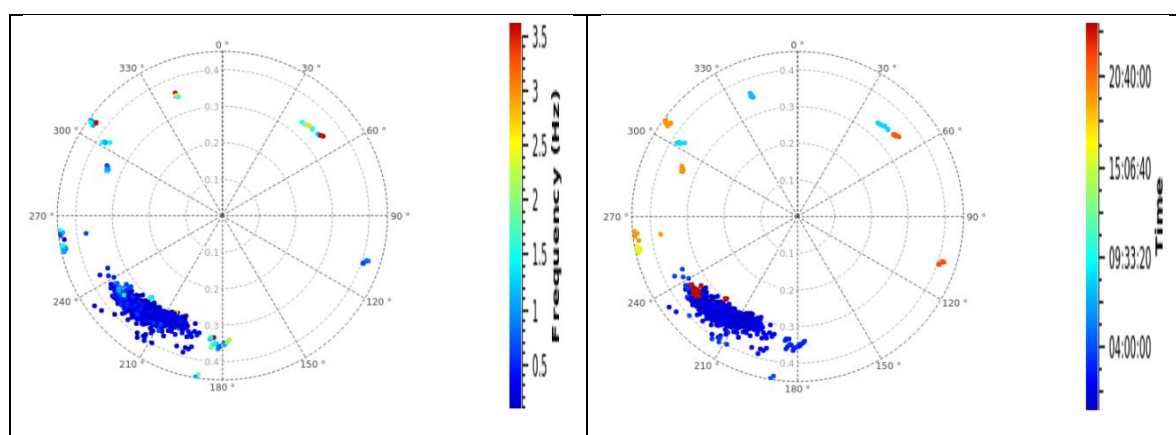
Registros e Respektivas Detecções dos Arranjos

A seguir, são mostradas as **figuras A.1.1 a A.1.18** relativas a seis dias de registros e respectivas detecções em dois arranjos diferentes, utilizando, ambos, o equipamento do fabricante Raspberryshake, modelo RS&Boom: um com nove elementos temporários e outro com quatro elementos temporários no Parque Nacional de Brasília. Também são mostrados os registros e detecções com os equipamentos originais do arranjo atual da Estação I09BR, visando fazer comparações com os arranjos temporários.

Dia 147 (27/05/2023 - sábado) – 9 estações temporárias



A

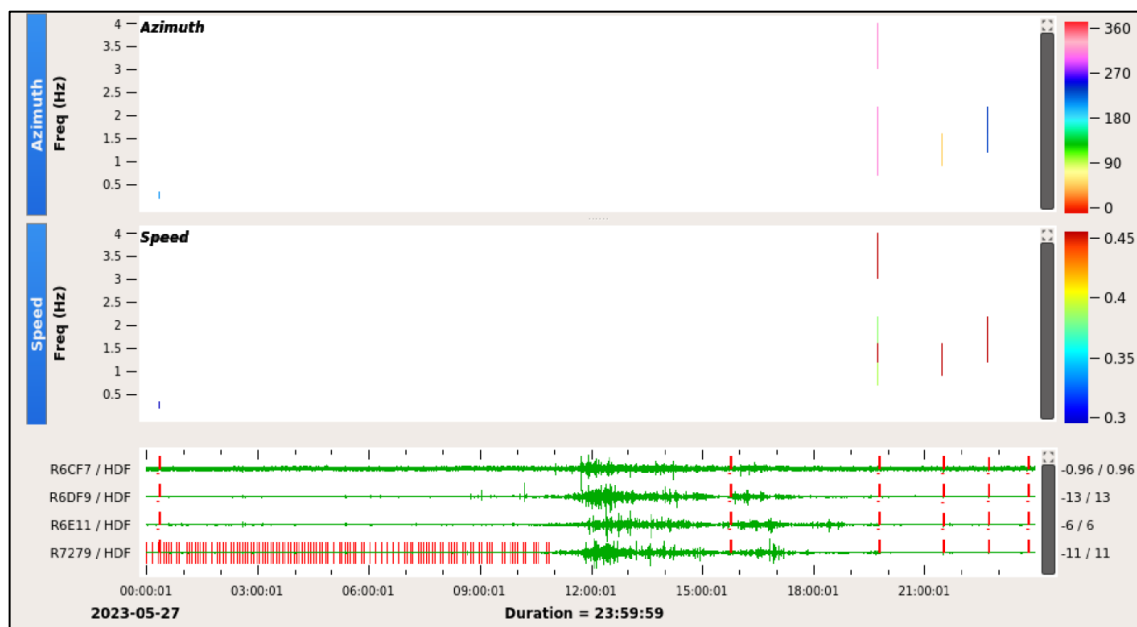


B

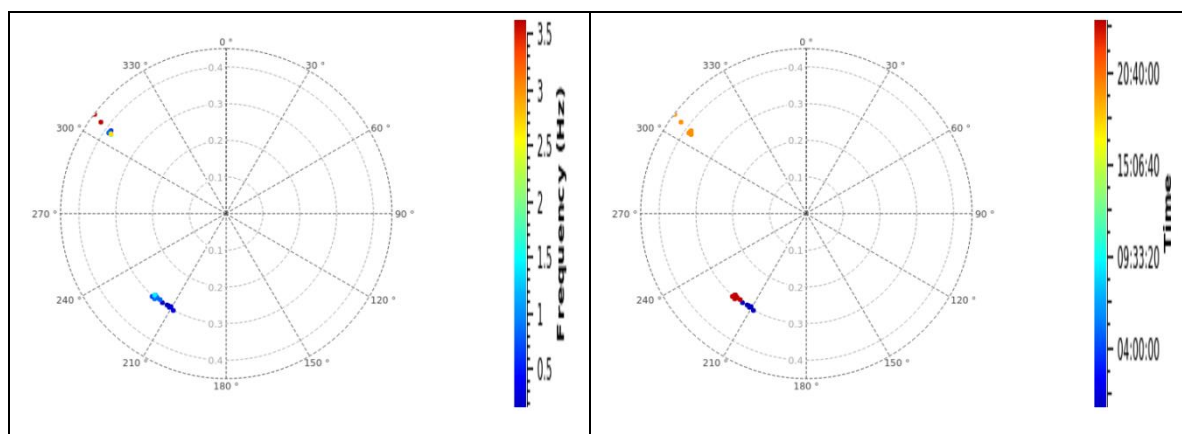
C

Figura A.1.1 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 27/05/2023, nas nove estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 147 (27/05/2023 - sábado) – 4 estações temporárias



A

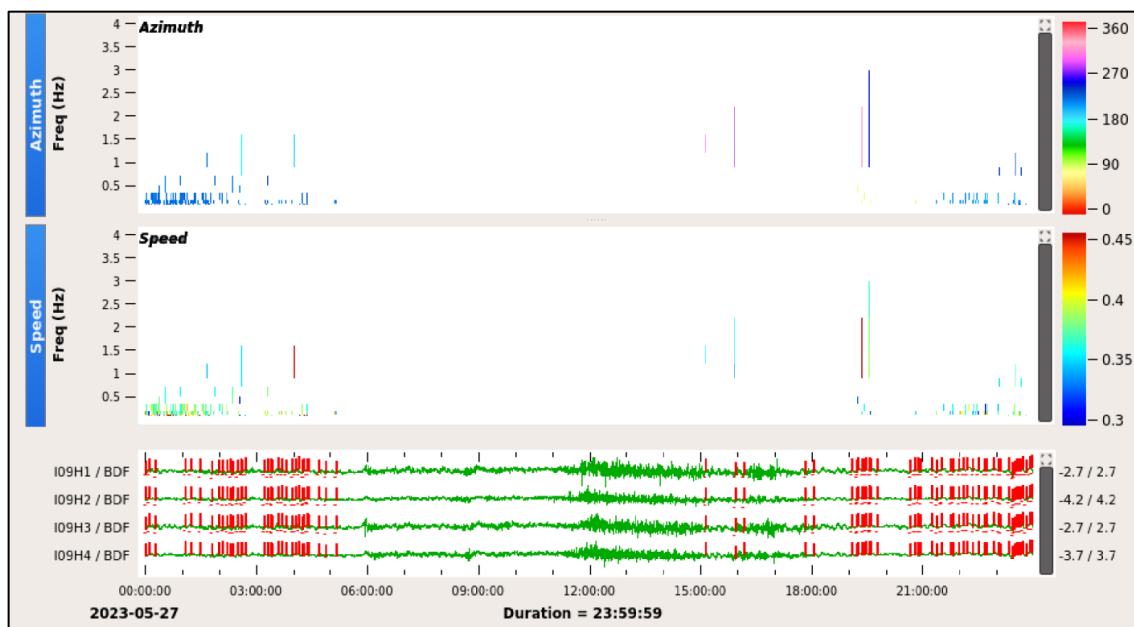


B

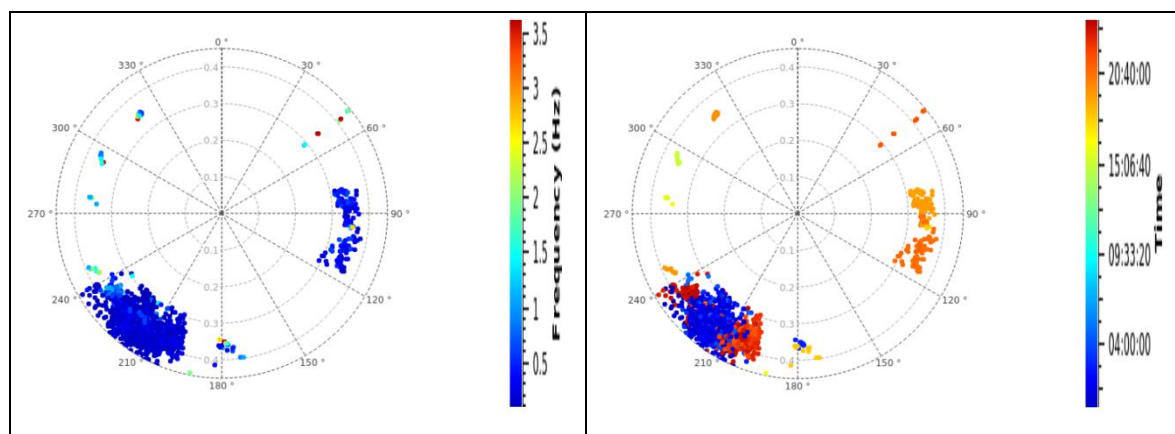
C

Figura A.1.2 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 27/05/2023, nas quatro estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 147 (27/05/2023 - sábado) – 4 estações do IMS (I09BR)



A

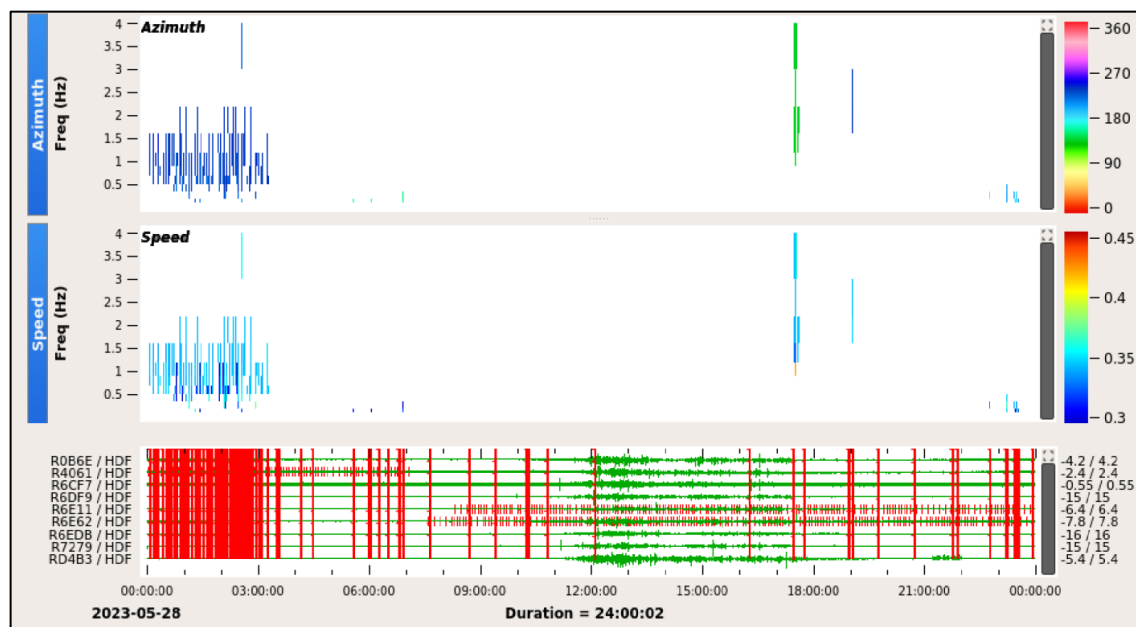


B

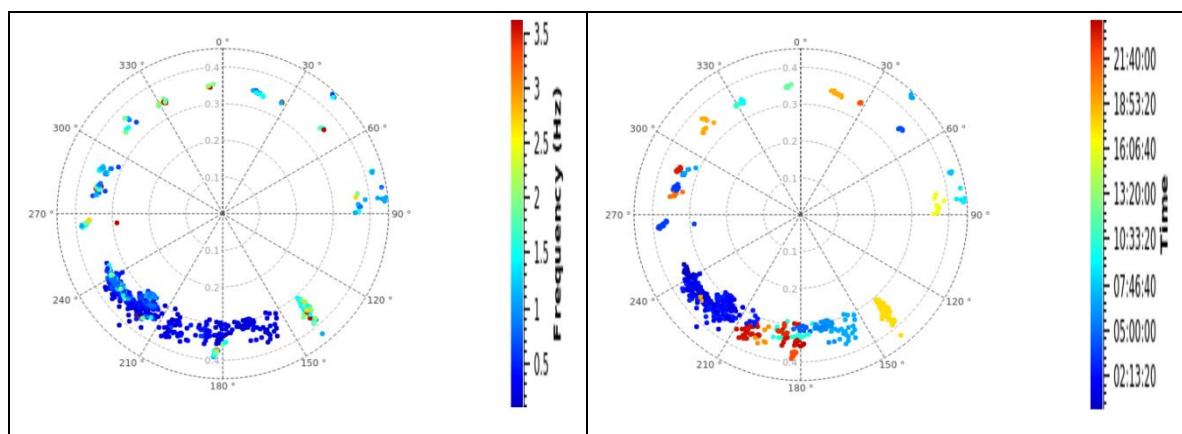
C

Figura A.1.3 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 27/05/2023, nas quatro estações do IMS (I09BR). Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 148 (28/05/2023 - domingo) – 9 estações temporárias



A

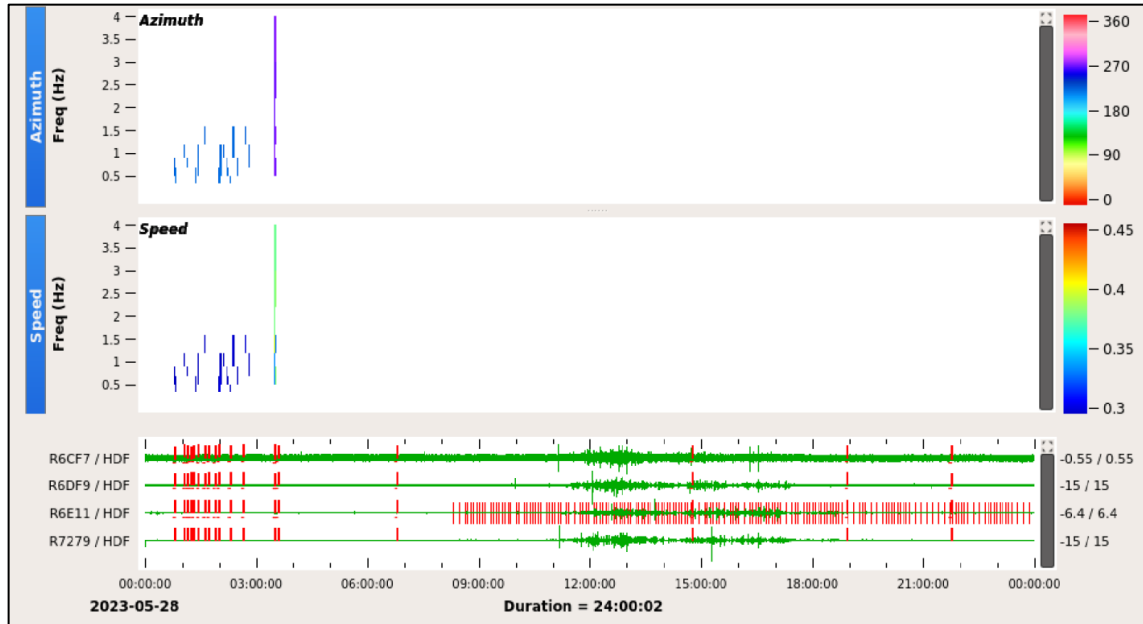


B

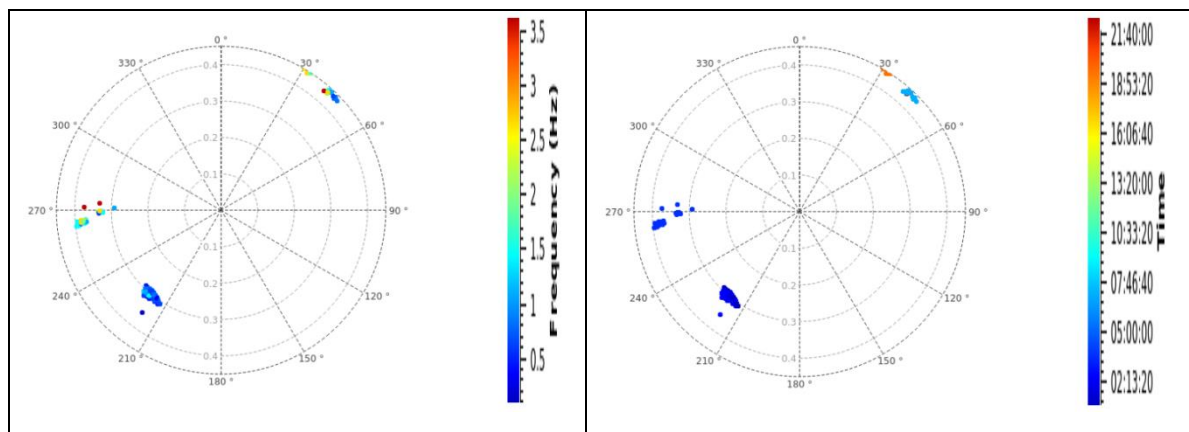
C

Figura A.1.4 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 28/05/2023, nas nove estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 148 (28/05/2023 - domingo) – 4 estações temporárias



A

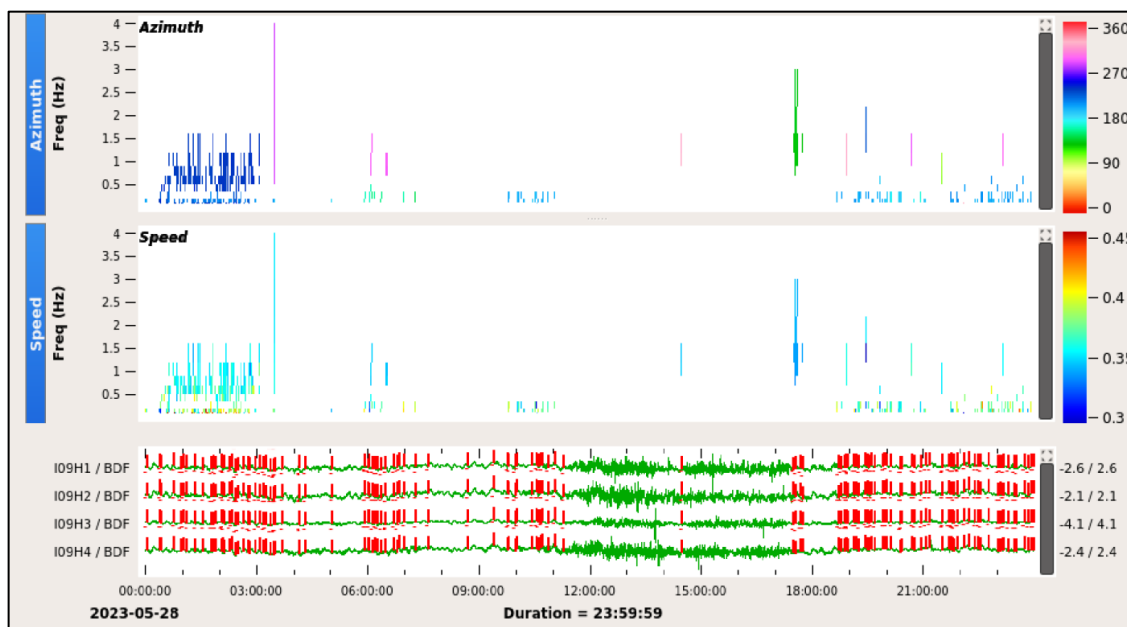


B

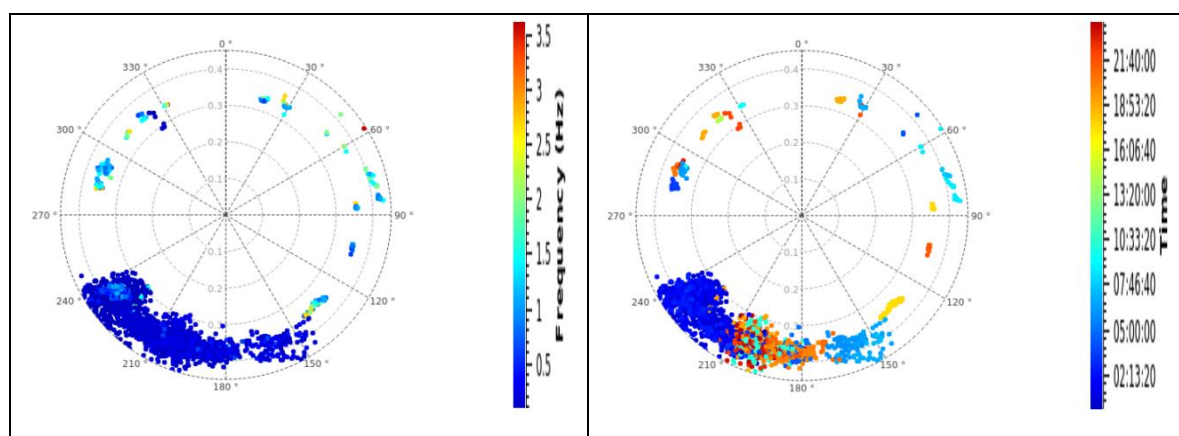
C

Figura A.1.5 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 28/05/2023, nas quatro estações temporárias. Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 148 (28/05/2023 - domingo) – 4 estações do IMS (I09BR)



A

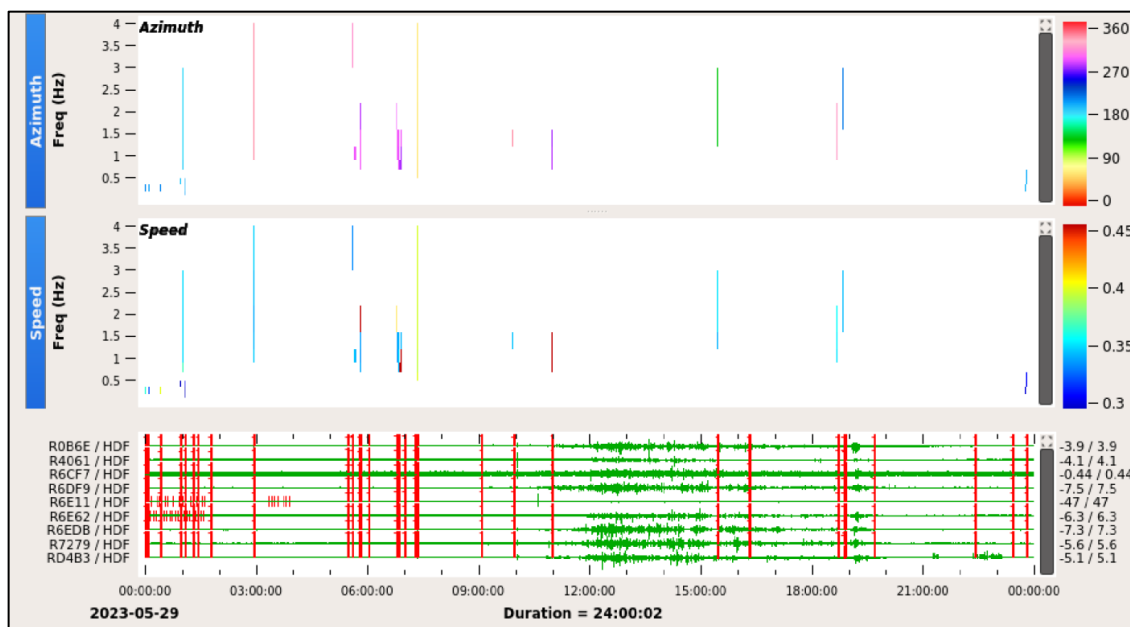


B

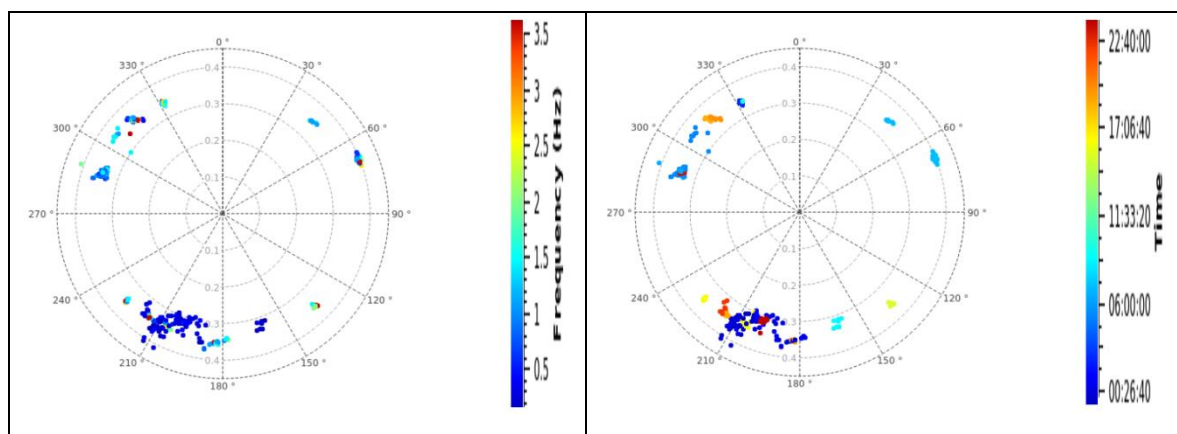
C

Figura A.1.6 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 28/05/2023, nas quatro estações do IMS (I09BR). Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 149 (29/05/2023 - 2ª feira) – 9 estações temporárias



A

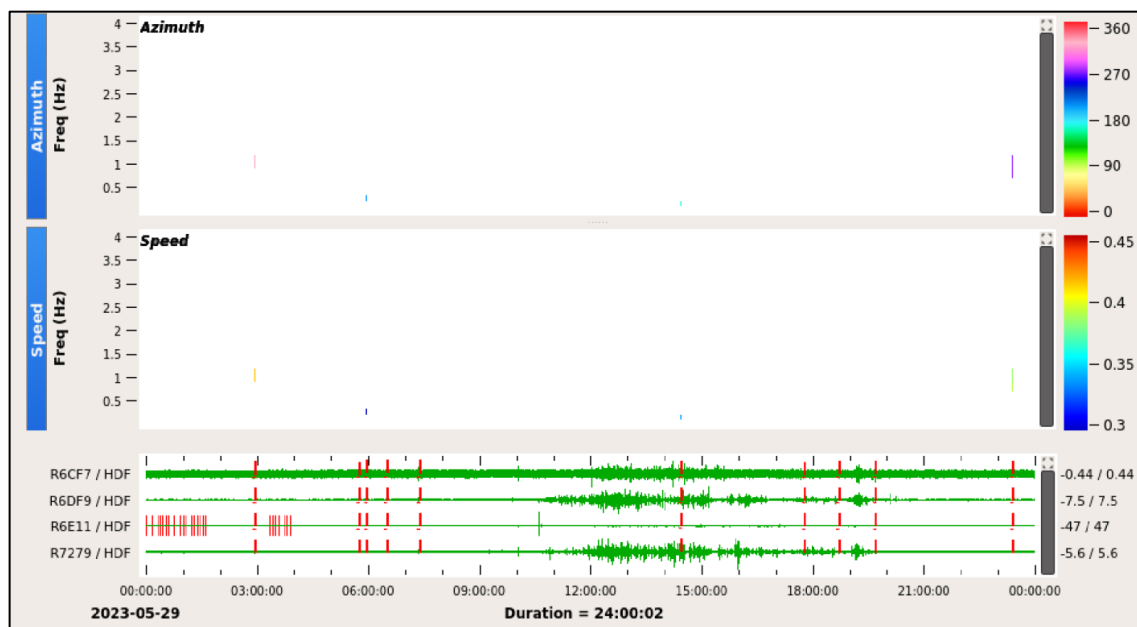


B

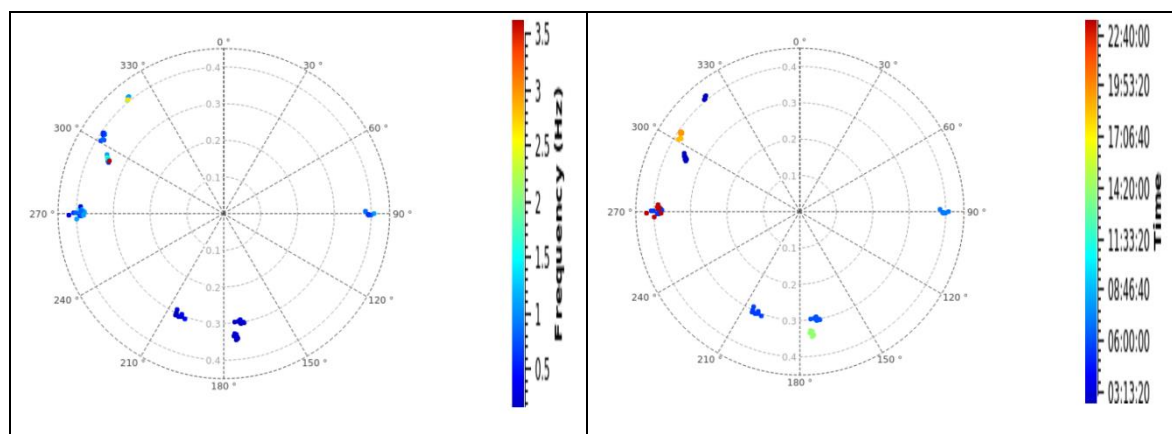
C

Figura A.1.7 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 29/05/2023, nas nove estações temporárias. Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 149 (29/05/2023 - 2ª feira) – 4 estações temporárias



A

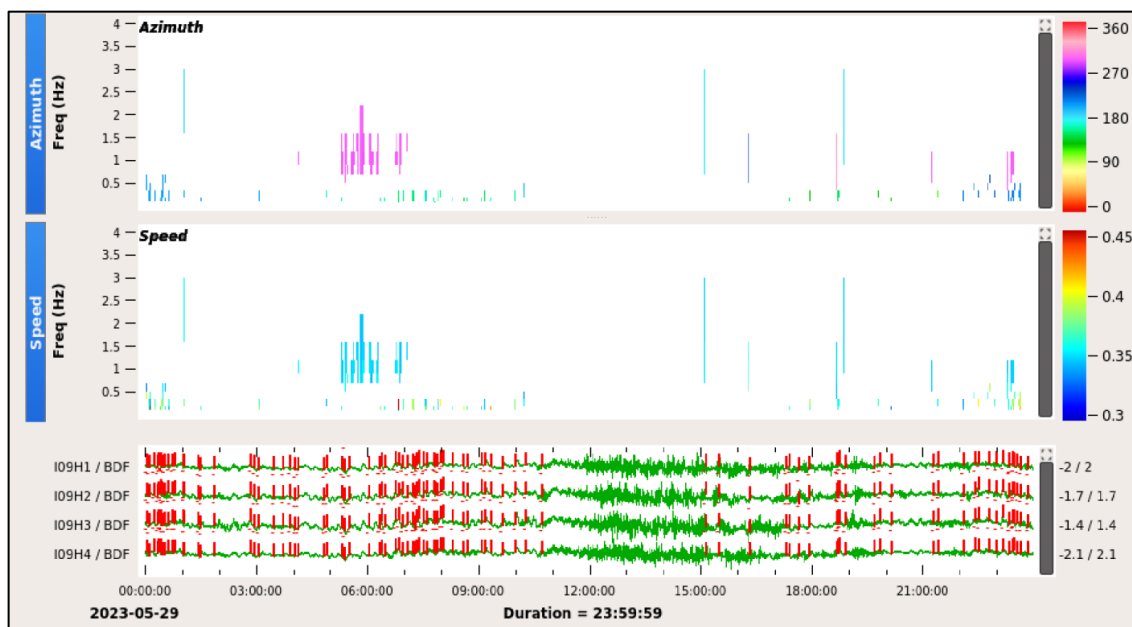


B

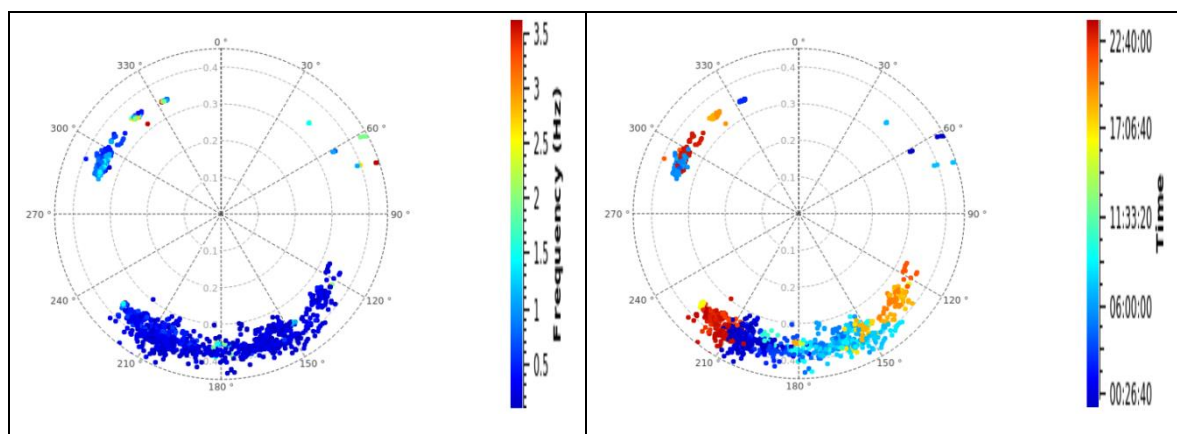
C

Figura A.1.8 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 29/05/2023, nas quatro estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 149 (29/05/2023 - 2ª feira) – 4 estações do IMS (I09BR)



A

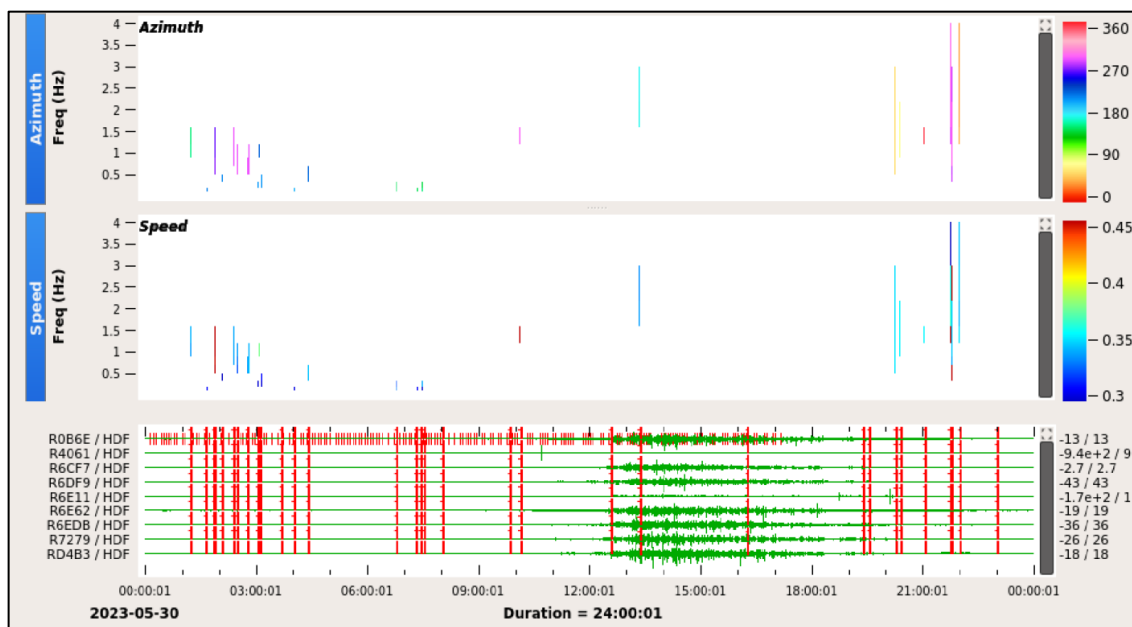


B

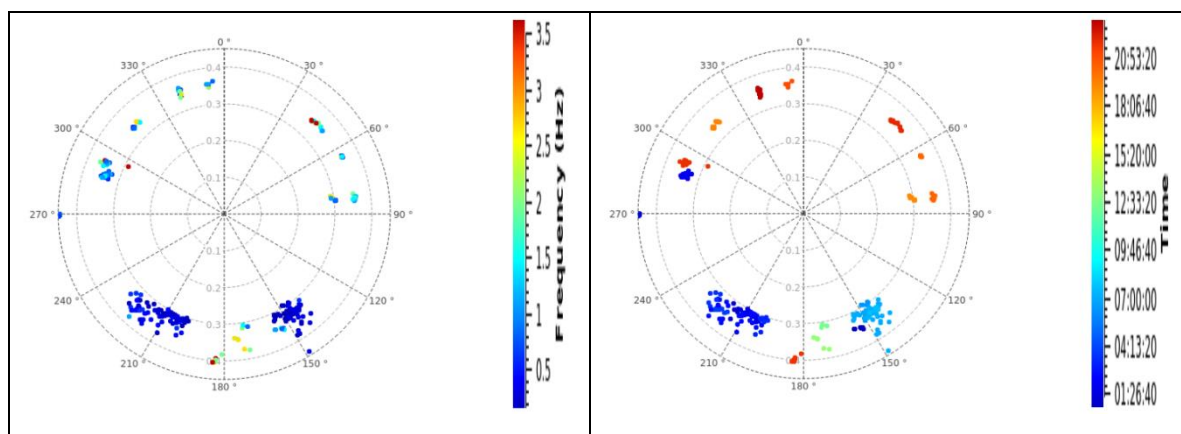
C

Figura A.1.9 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 29/05/2023, nas quatro estações do IMS (I09BR). Em A, Janela Superior: azimute e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimute do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimute do registro das detecções.

Dia 150 (30/05/2023 - 3ª feira) – 9 estações temporárias



A

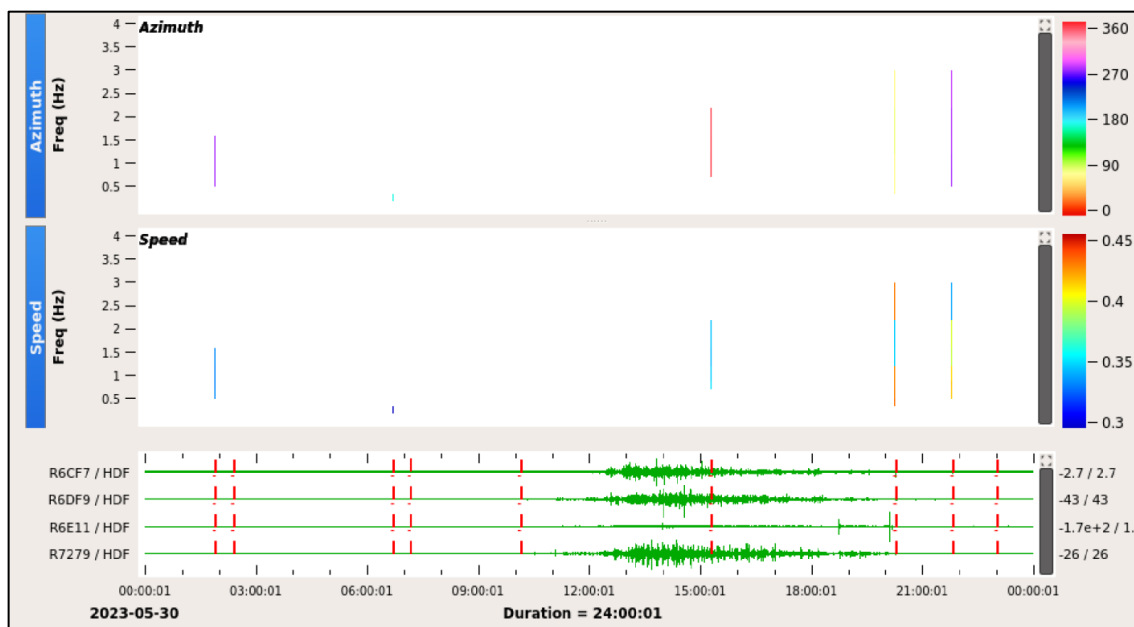


B

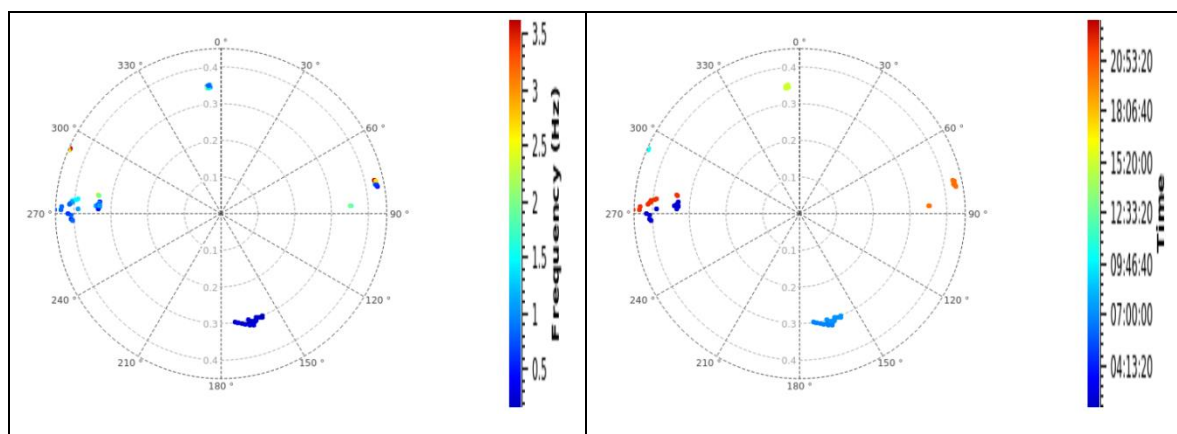
C

Figura A.1.10 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 30/05/2023, nas nove estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 150 (30/05/2023 - 3ª feira) – 4 estações temporárias



A

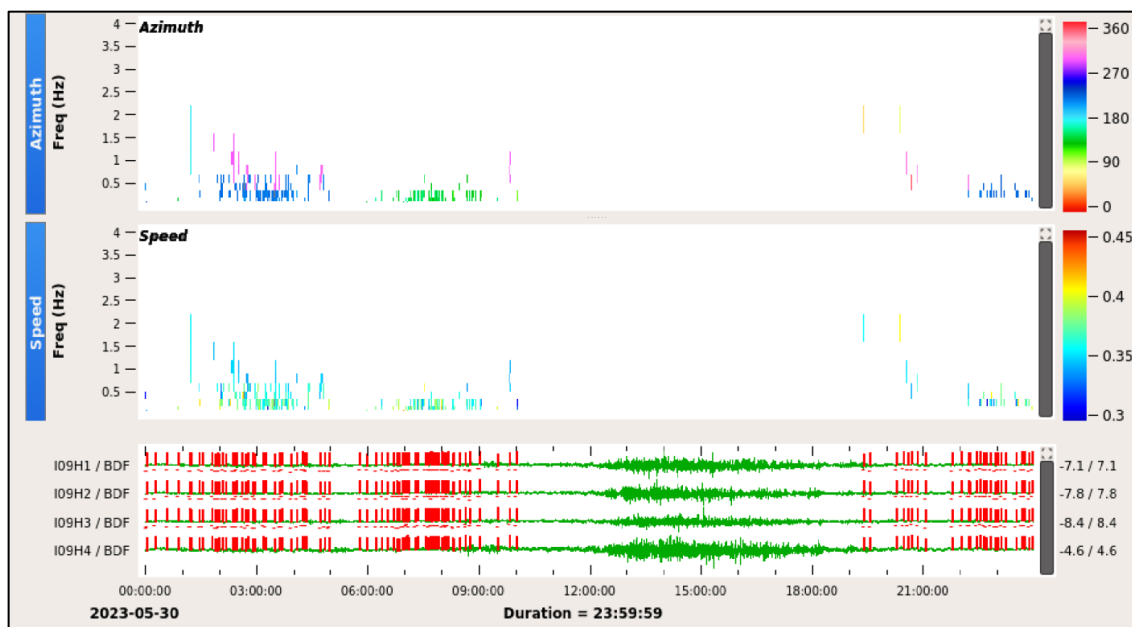


B

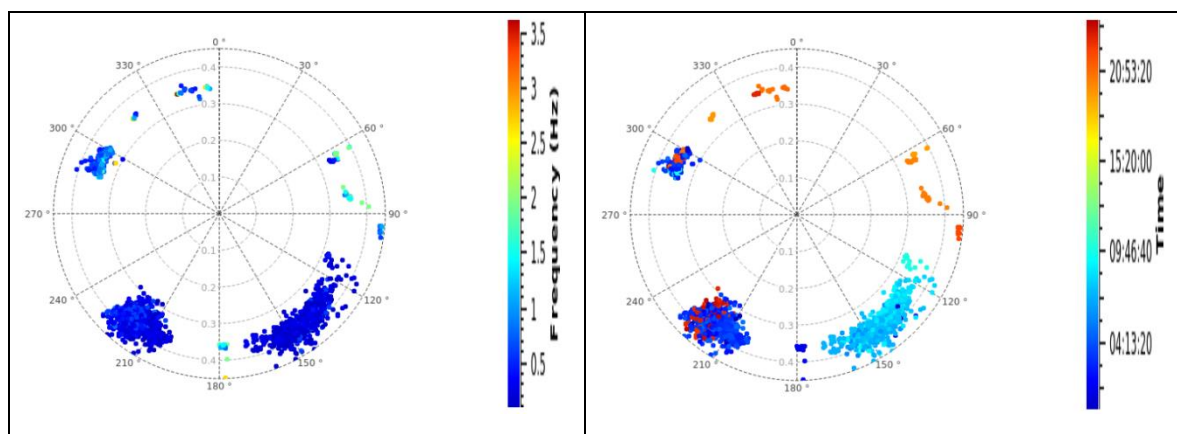
C

Figura A.1.11 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 30/05/2023, nas quatro estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 150 (30/05/2023 - 3ª feira) – 4 estações do IMS (I09BR)



A

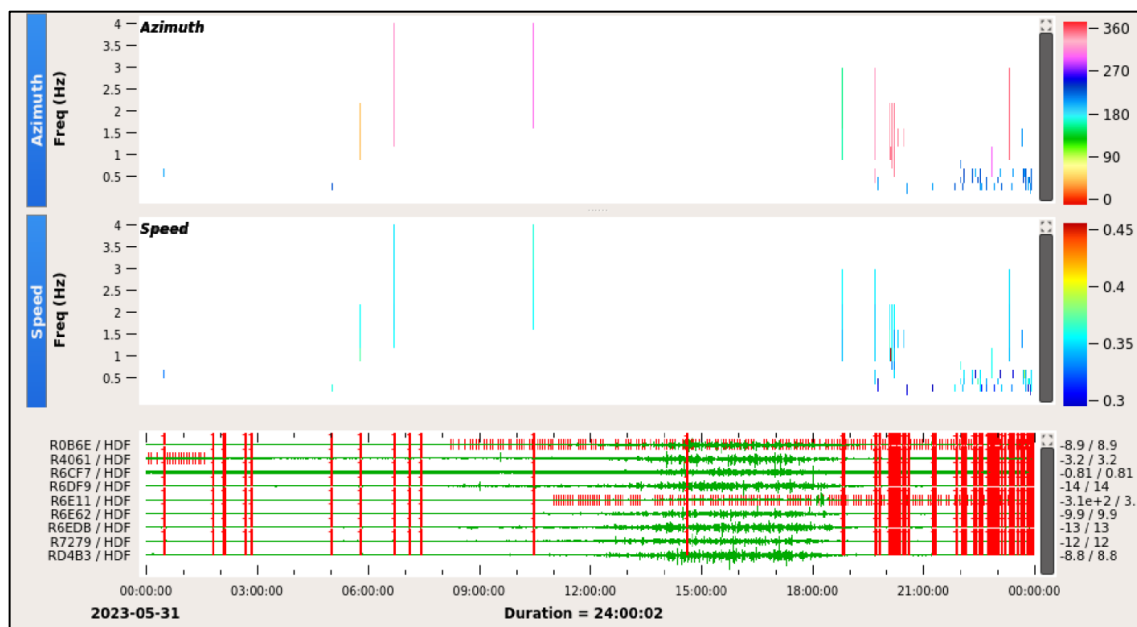


B

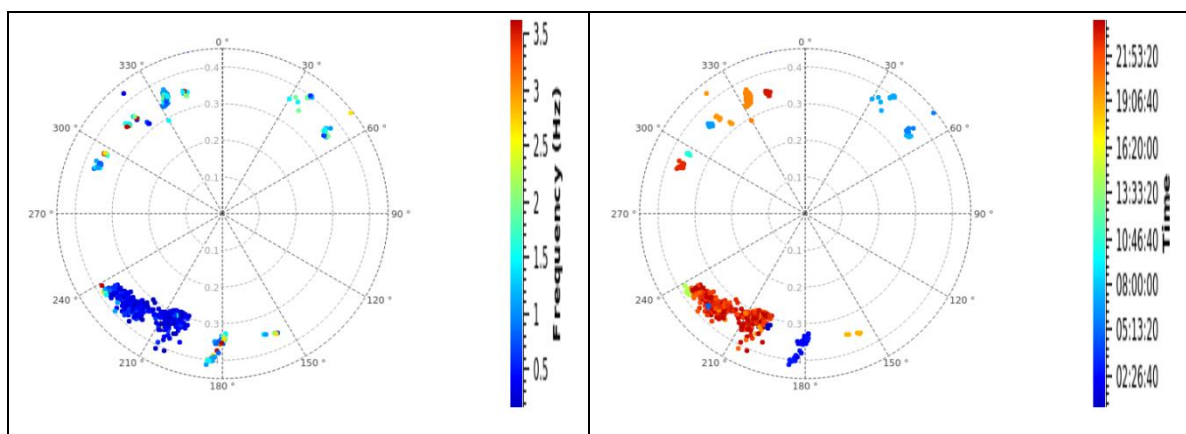
C

Figura A.1.12 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 30/05/2023, nas quatro estações do IMS (I09BR). Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 151 (31/05/2023 - 4ª feira) – 9 estações temporárias



A

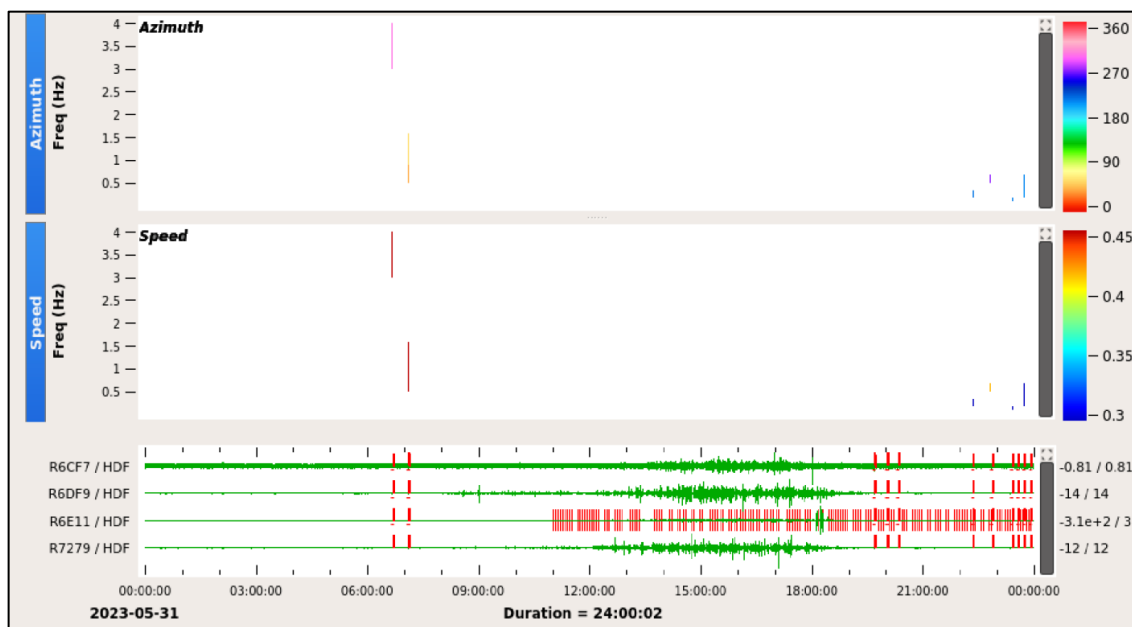


B

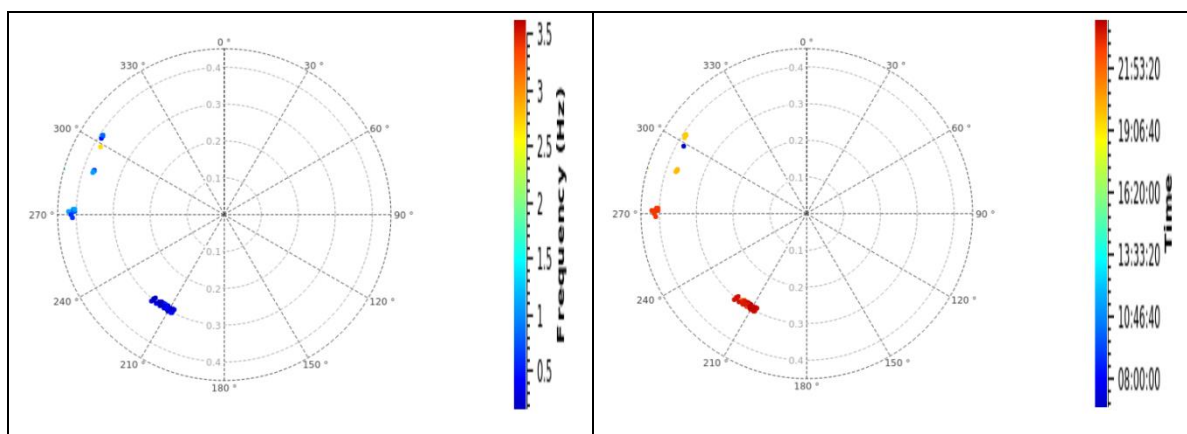
C

Figura A.1.13 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 31/05/2023, nas nove estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 151 (31/05/2023 - 4ª feira) – 4 estações temporárias



A

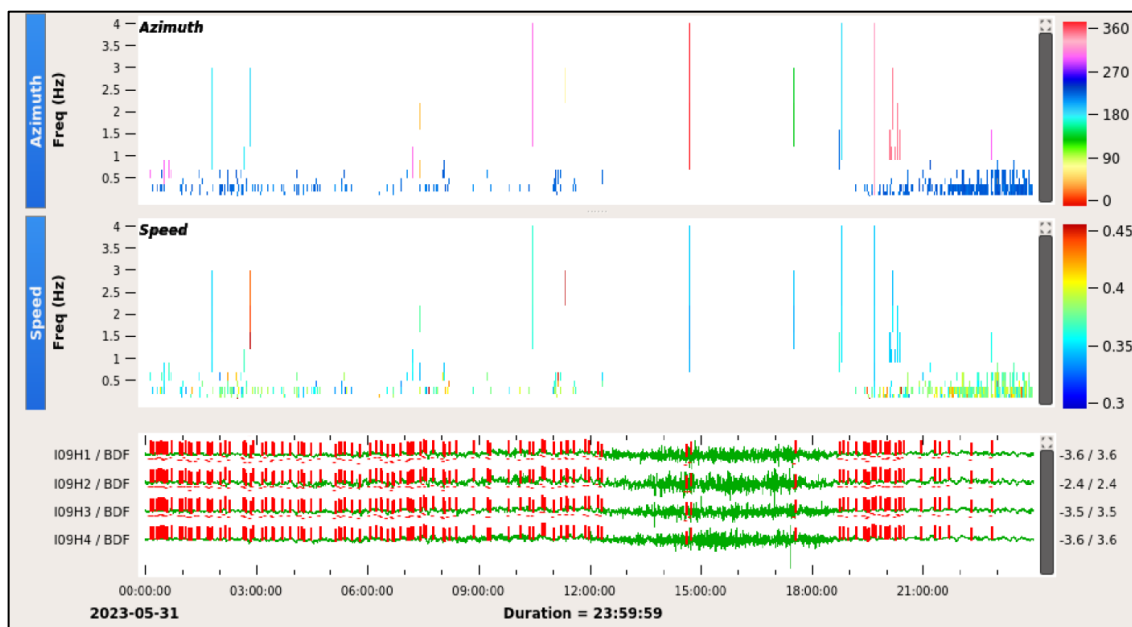


B

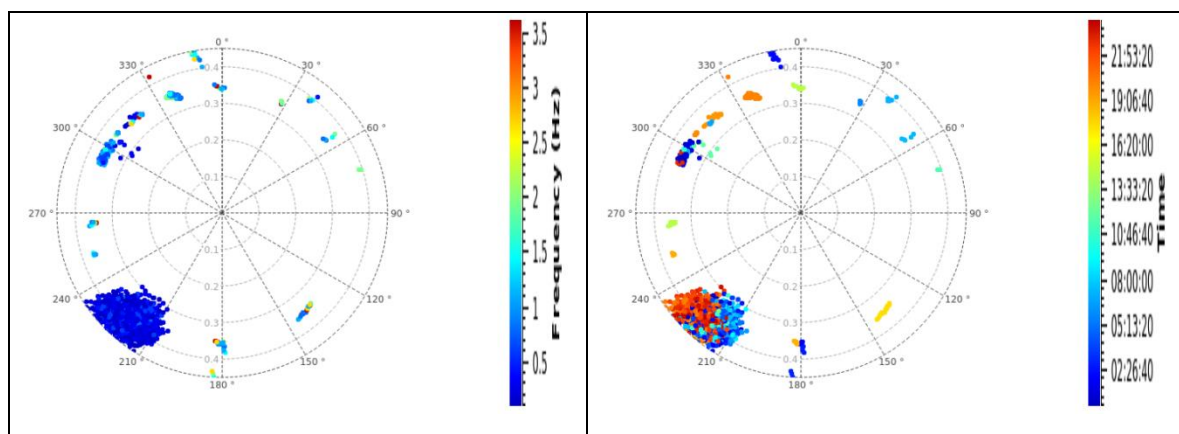
C

Figura A.1.14 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 31/05/2023, nas quatro estações temporárias. Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 151 (31/05/2023 - 4ª feira) – 4 estações do IMS (I09BR)



A

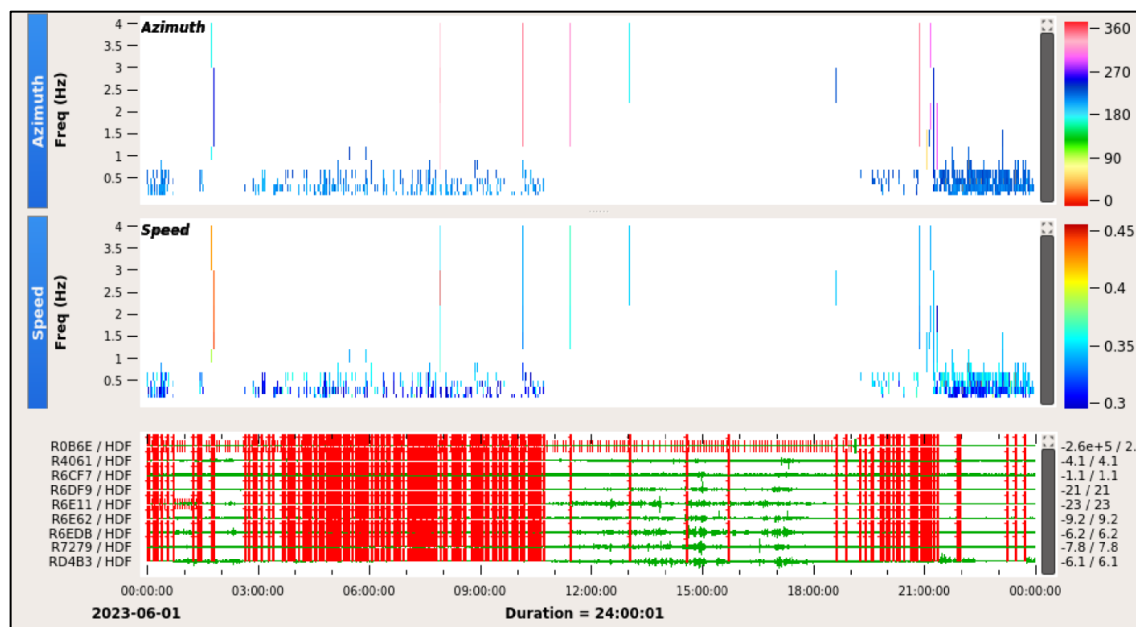


B

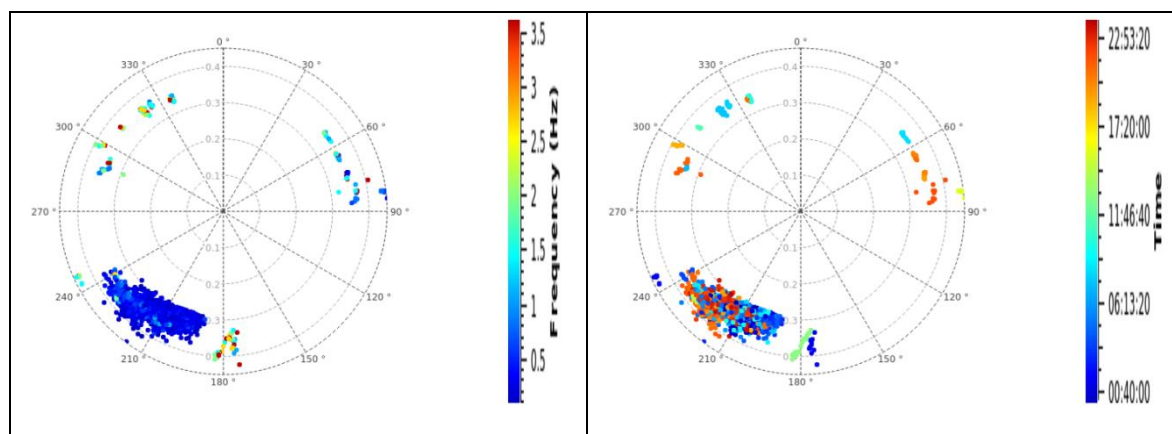
C

Figura A.1.15 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 31/05/2023, nas quatro estações do IMS (I09BR). Em A, Janela Superior: azimute e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimute do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimute do registro das detecções.

Dia 152 (01/06/2023 - 5ª feira) – 9 estações temporárias



A

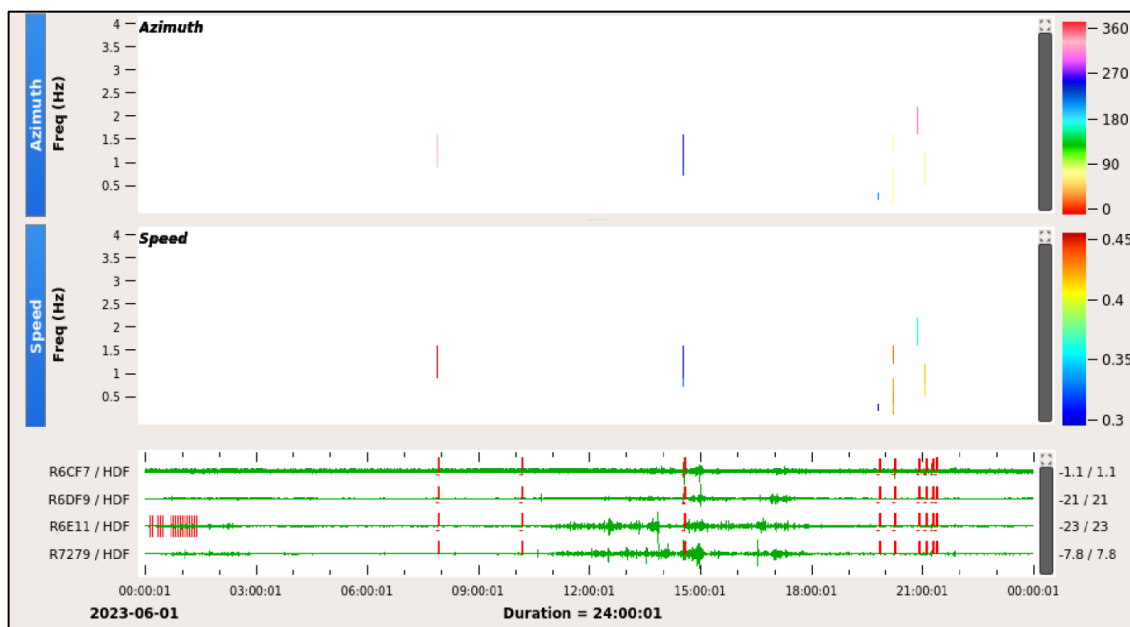


B

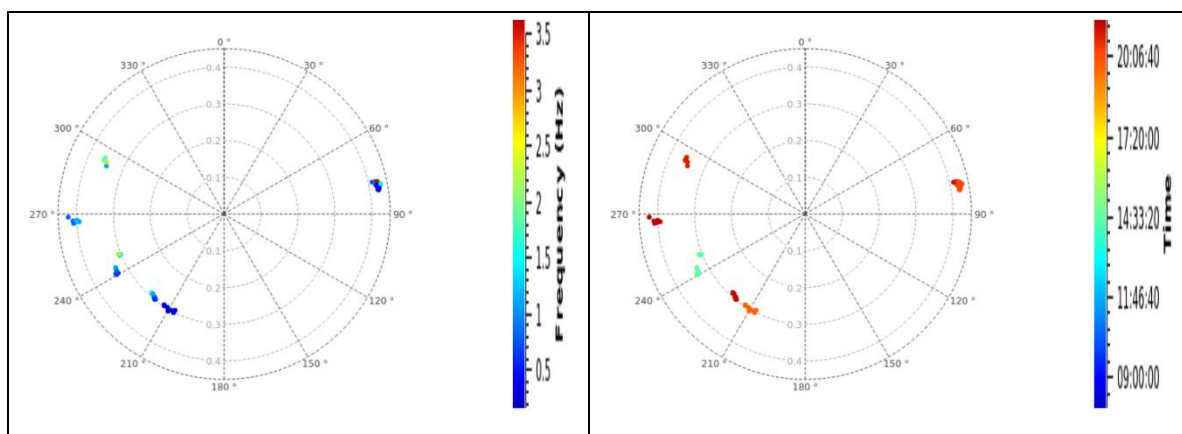
C

Figura A.1.16 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 01/06/2023, nas nove estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 152 (01/06/2023 - 5ª feira) – 4 estações temporárias



A

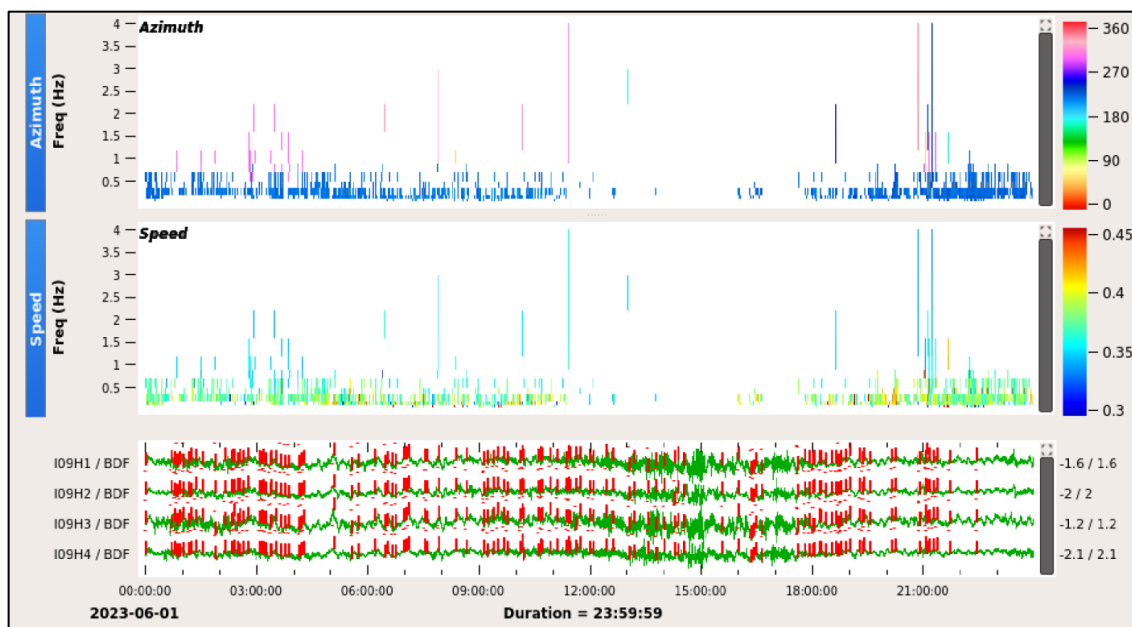


B

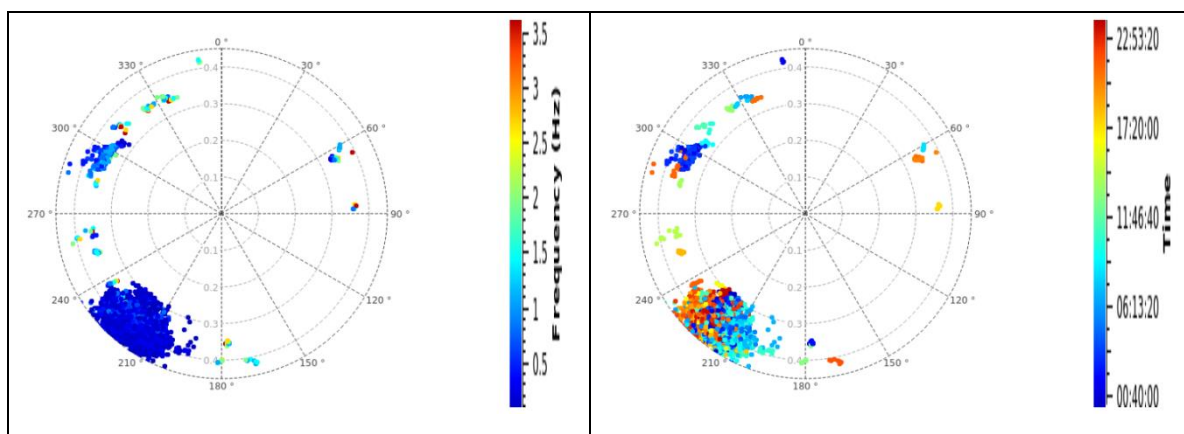
C

Figura A.1.17 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 01/06/2023, nas quatro estações temporárias. Em **A**, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em **B**, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em **C**, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

Dia 152 (01/06/2023 - 5ª feira) – 4 estações do IMS (I09BR)



A



B

C

Figura A.1.18 – Detecções a partir dos sinais processados referentes a 24 horas de registro, no dia 01/06/2023, nas quatro estações do IMS (I09BR). Em A, Janela Superior: azimuth e frequência; Janela Intermediária: frequência e velocidade; Janela Inferior: traços dos sinais infrassônicos no domínio do tempo. Em B, gráfico polar relativo à frequência e velocidade versus azimuth do registro das detecções. Em C, gráfico polar relativo ao tempo (hora em UTC) e à velocidade versus azimuth do registro das detecções.

ANEXO 2

Curva de Resposta do Microbarômetro MB2000

Neste anexo, é apresentada a curva de resposta (pressão versus frequência), **Fig. A2.1**, do microbarômetro fabricado na França, marca Temex Telecom, modelo MB2000, utilizado nos quatro elementos que compõem o arranjo da Estação de Infrassom I09BR do IMS.

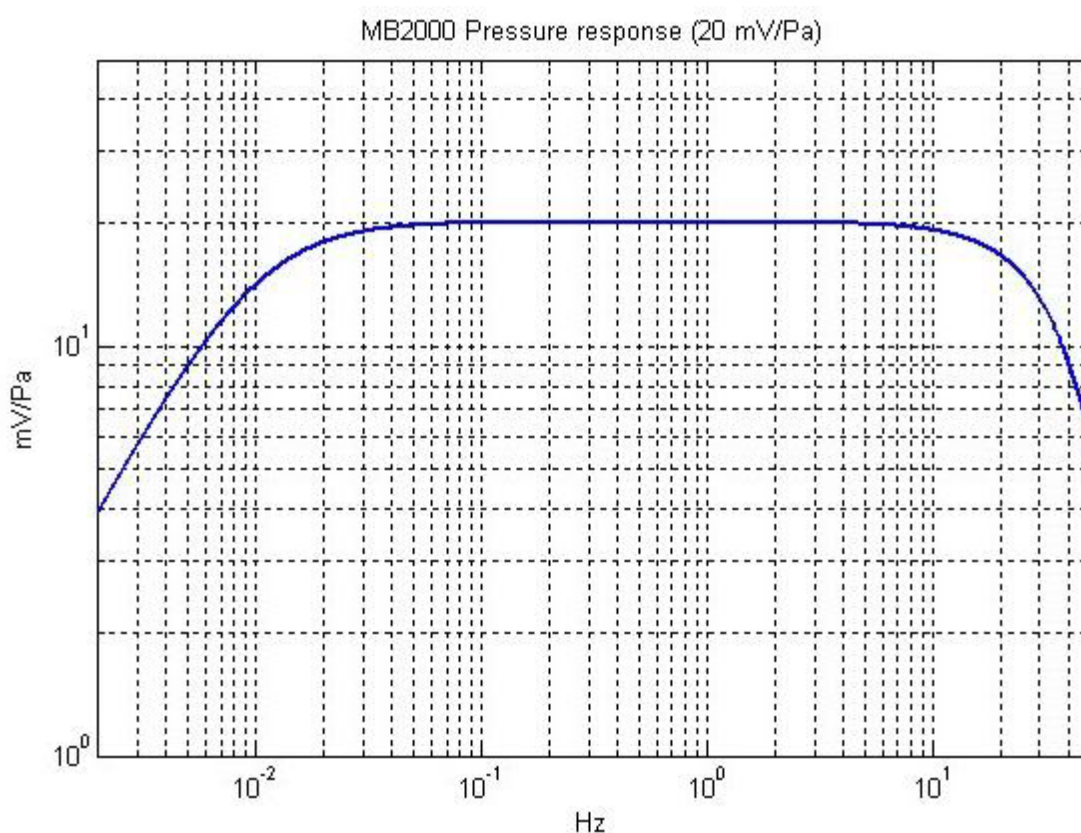


Figura A2.1 - Curva de resposta, pressão versus frequência, do microbarômetro MB2000, utilizado na Estação de Infrassom I09BR (CEA/DAM, 2009).

ANEXO 3

Códigos Python Desenvolvidos no Trabalho

Código para calcular o *Array Response Function* (ARF)

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Coordenadas dos sensores em dnorth e dest (em metros)
sensor_coordinates = [
    (618.780, 707.214),
    (496.047, 237.533),
    (59.103, -195.726),
    (-182.839, -13.875),
    (-496.425, 289.677),
    (-73.149, 218.943),
    (1030.313, -273.993),
    (-867.906, 1017.726),
    (-284.781, -896.946)
]

# Frequência da onda em Hz (você pode modificar esse valor)
f = 20.0 # Frequência de XX Hz

# Velocidade de propagação da onda em m/s
c = 340.0

# Número de ondas (K) no eixo horizontal (Kx) e vertical (Ky) - Aumente para suavizar
num_waves = 500
kx_values = np.linspace(-0.1, 0.1, num_waves) # Variação de -0.05 a 0.05 rad/m
ky_values = np.linspace(-0.1, 0.1, num_waves) # Variação de -0.05 a 0.05 rad/m
```

```
# Função para calcular a Array Response Function (ARF)
def calculate_arf(sensor_coordinates, f, c, kx, ky):
    arf = np.zeros((len(sensor_coordinates), len(sensor_coordinates)), dtype=complex)

    for i in range(len(sensor_coordinates)):
        for j in range(len(sensor_coordinates)):
            delta_x = sensor_coordinates[j][1] - sensor_coordinates[i][1] # Distância em dest
(metros)
            delta_y = sensor_coordinates[j][0] - sensor_coordinates[i][0] # Distância em dnorth
(metros)
            arf[i, j] = np.exp(1j * 2 * np.pi * f * (kx * delta_x + ky * delta_y) / c)

    return arf

# Calcular a ARF para os valores de Kx e Ky
arf_values = np.zeros((num_waves, num_waves), dtype=complex)
for i in range(num_waves):
    for j in range(num_waves):
        arf = calculate_arf(sensor_coordinates, f, c, kx_values[i], ky_values[j])
        arf_values[i, j] = np.abs(np.sum(arf))

# Calcular e imprimir a magnitude máxima da ARF
max_magnitude = np.max(np.abs(arf_values))
print("Magnitude Máxima da ARF:", max_magnitude)

# Plotar a ARF em função de Kx e Ky
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.pcolormesh(kx_values, ky_values, np.abs(arf_values), cmap='magma')
plt.colorbar(label='ARF Magnitude')
plt.xlabel('Kx (rad/m)')
plt.ylabel('Ky (rad/m)')
plt.title(f'Array Response Function (Frequency: {f} Hz)')
```

```
plt.grid()
plt.show()
```

Código para criar Mapas com triângulos, eixos, tamanho de fontes, intensidade do grid e posicionamento dos nomes das estações

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Coordenadas das localizações e seus nomes
locations = [
    ((618.780, 707.214), "R4061"),
    ((496.047, 237.533), "RD4B3"),
    ((59.103, -195.726), "R6E62"),
    ((-182.839, -13.875), "R0B6E"),
    ((-496.425, 289.677), "R6EDB/BDFB"),
    ((-73.149, 218.943), "R7279/I09H1"),
    ((1030.313, -273.993), "R6CF7/I09H2"),
    ((-867.906, 1017.726), "R6E11/I09H3"),
    ((-284.781, -896.946), "R6DF9/I09H4")
]

# Coordenadas XY personalizadas para reposicionar o nome do elemento 9
custom_text_positions = {
    "R6DF9/I09H4": (-680.781, -350.946),
    "R6E11/I09H3": (810.906, -930.726)# Ajuste as coordenadas XY conforme necessário
}

# Separar as coordenadas em latitude e longitude
latitudes, longitudes = zip(*[coord for coord, _ in locations])
names = [name for _, name in locations]
```

```
# Tamanho dos triângulos
triangle_size = 200

# Tamanho da fonte para números e letras
font_size = 14

# Criar uma figura e um eixo para o mapa
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 10))

# Plotar as localizações no mapa com triângulos maiores e fonte maior
scatter = ax.scatter(longitudes, latitudes, c='red', marker='^', s=triangle_size,
label='Localizações')
for i, name in enumerate(names):
    # Use as coordenadas personalizadas se disponíveis, caso contrário, use as coordenadas
    padrão
    text_position = custom_text_positions.get(name, (longitudes[i], latitudes[i]))

    ax.annotate(name, text_position, textcoords="offset points", xytext=(0, 10), ha='center',
                fontsize=font_size) # Ajuste do tamanho da fonte e posição do nome

# Configurar o mapa
ax.set_xlabel('Axis X (meters)', fontsize=font_size) # Ajuste do tamanho da fonte
ax.set_ylabel('Axis Y (meters)', fontsize=font_size) # Ajuste do tamanho da fonte
ax.set_title('Sites Location', fontsize=font_size) # Ajuste do tamanho da fonte

# Configurar a intensidade do grid (alpha)
ax.grid(True, alpha=0.5)

# Ajuste do tamanho da fonte para os números nas marcações dos eixos
ax.tick_params(axis='both', labelsize=font_size)

# Exibir o mapa
```

```
# plt.legend()  
# plt.show()
```

ANEXO 4

Trabalhos Publicados no Âmbito desta Dissertação

Neste anexo, são apresentadas as produções científicas publicadas no âmbito desta dissertação. Ao todo, foram produzidos treze trabalhos:

- 1 livro
- 1 artigo publicado em revista com corpo editorial
- 6 resumos expandidos publicados em anais de congresso nacional
- 5 resumos simples publicados em anais de congressos internacionais

Ao final, é anexada a primeira página de cada trabalho.

A.4.1 Livro

A.4.1.1 - Título: A Participação brasileira na verificação do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares.

Autores: Lucas Vieira Barros, Brandow Lee Neri, Juraci Mário de Carvalho e Darlan Portela Fontenele.

ISBN: 978-65-86387-20-9

Data: 20/11/2020

Disponível em: http://obsis.unb.br/portalsis/?pg=viewNotice&id_notice=38

A.4.2 Artigo

A.4.2.1 - Título: Seismo-acoustic signal analysis and yield estimate of the Beirut, Lebanon accidental explosion on August 4, 2020.

Autores: Lucas Vieira Barros, Brandow Lee Neri, Darlan Portela Fontenele, Diogo Albuquerque Farrapo, Ronnie Quintero Quintero e Juraci Mário de Carvalho.

Revista: Brazilian Journal of Geophysics Data: 2021

4.3 Resumos publicados em evento nacional (expandidos)

A.4.3.1 - Título: **Infrasound technology applied to the discrimination of small magnitudes earthquakes and quarry blasts in southeast Brazil**

Autores: Darlan Portela Fontenele e Lucas Vieira Barros

Evento: 18th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro

Data: 08 – 16/ 10/2023

Disponível em:

https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/17th_CISBGf/181220210528203352Resumo_Darlan_Portela_Fontenele.pdf

A.4.3.2 - Título: **Peru earthquake, 8.0 Mw, registered by IMS infrasound stations Network.**

Autores: Darlan Portela Fontenele, Lucas Vieira Barros, Brandow Lee Neri, Juraci Mario Carvalho, Diogo Farrapo Albuquerque e Matheus Fernandes da Cruz.

Evento: 4th Brazilian Seismology Symposium. Rio de Janeiro Data: 08 – 11/ 11/2021

Disponível em:

https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/17th_CISBGf/181220210528203352Resumo_Darlan_Portela_Fontenele.pdf

A.4.3.3 - Título: **University of Brasilia studies explosions occurred in Beirut – Lebanon.**

Autores: Lucas Vieira Barros, Brandow Lee Neri, Darlan Portela Fontenele, Ronnie Quintero, Diogo Farrapo Albuquerque e Juraci Mario de Carvalho.

Evento: 4th Brazilian Seismology Symposium. Rio de Janeiro Data: 08 – 11/ 11/2021

Disponível em:

https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/17th_CISBGf/186920210615211632bln-beirute-final_.pdf

A.4.3.4 - Título: The establishment of a Brazilian Nacional Data Center (NDC) for a better Comprehensive Nuclear Test-Ban-Treaty verification regime.

Autores: Lucas Vieira Barros, Brandow Lee Neri, Juraci Mario de Carvalho e Darlan Portela Fontenele.

Evento: 4th Brazilian Seismology Symposium. Rio de Janeiro Data: 08 – 11/ 11/2021

Disponível em:

https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/17th_CISBGf/186920210614230159article-th-establishment-of-a-brazilianNDCforabetterCTBTverificationregime.pdf

A.4.3.5 - Título: Preliminary analysis of infrasound generated by the meteoroid explosion over Japon November 29, 2020 detected by IMS stations.

Autores: Diogo Farrapo Albuquerque, Lucas Vieira Barros, Brandow Lee Neri, Matheus Fernandes da Cruz e Darlan Portela Fontenele.

Evento: 4th Brazilian Seismology Symposium. Rio de Janeiro Data: 08 – 11/ 11/2021

Disponível em:

https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/17th_CISBGf/101920210305011054Preliminary_analysis_of_infrasound.pdf

A.4.3.6 - Título: Analysis of infrasonic signals generated by an accidental explosio on July, 3 2020 at a fireworks factory in Turkey.

Autores: Matheus Fernandes da Cruz, Brandow Lee Neri, Diogo Farrapo Albuquerque, Darlan Portela Fontenele e Lucas Vieira Barros.

Evento: 4th Brazilian Seismology Symposium. Rio de Janeiro Data: 08 – 11/ 11/2021

Disponível em:

https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/17th_CISBGf/101920210305011054Preliminary_analysis_of_infrasound.pdf

A.4.4 Resumos publicados em eventos internacionais (simples)

A.4.4.1 - Título: Infrasound technology applied to the discrimination of chemical explosions from tectonic events.

Autores: Darlan Portela Fontenel e Lucas Vieira Barros.

Evento: Science and Technology Conference 2023 (SnT2023). Viena – Áustria Data: 20/06/2023

A.4.4.2 - Título: Geomagnetic storms with infrasound observation data from International Monitoring System stations located in South America.

Autores: Arthur Macêdo, Lucas Vieira Barros e Darlan Portela Fontenele.

Evento: Science and Technology Conference 2023 (SnT2023). Viena - Áustria Data: 20/06/2023

A.4.4.3 - Título: An attempt to discriminate chemical explosions from natural events using infrasound technology.

Autores: Darlan Portela Fontenele, Lucas Vieira Barrose Juraci mário de Carvalho.

Evento: Infrasound Technology Workshop 2022. Ponta Delgada – Portugal Data: 30/01/2023

A.4.4.4 - Título: Infrasound technology in the discrimination of chemical explosions from natural events.

Autores: Darlan Portela Fontenele, Lucas Vieira Barros e Juraci Mário de Carvalho.

Evento: IV assembly of the Latin American and Caribbean Seismological Commission. Quito – Equador Data: 03/10/2022

A.4.4.5 - Título: Monitoring changes in mine blast detection during COVID-19 shutdown in Brasilia using the I09BR infrasound station.

Autores: Brandow Lee Neri, Lucas Vieira Barros, Arthur Siqueira Macedo, Leticia Guedes Assunção e Darlan Portela Fontenele.

Evento: AGU Fall Meeting 2021 Data: 17/12/2021

Disponível em: <https://agu.confex.com/agu/fm21/meetingapp.cgi/Paper/938618>

A.4.1.1



A.4.2.1

Brazilian Journal of Geophysics



Brazilian Journal of Geophysics (2021) X(X): X-X

© 2021 Brazilian Geophysical Society

ISSN 0102-261X

DOI: 00.0000/xxxx.0000.00.000

Seismo-acoustic signal analysis and yield estimate of the Beirut, Lebanon accidental explosion on August 4, 2020

August 4, 2020, Beirut, Lebanon chemical explosion and Seismoacoustic signal analysis

Análise sismoacústica de sinais e estimativa de rendimento da explosão accidental em Beirute, Líbano em 4 de agosto de 2020

Area: Solid Earth Geophysics

Received: submission date; Accepted: date; Published: date

ABSTRACT. The Beirut, Lebanon explosions occurred on August 4, 2020, one of the largest non-nuclear blasts in the history detected by the IMS infrasound and seismic stations, a network designated to detect and locate nuclear explosion in violation of the CTBT. The explosion was registered by five infrasound and three seismic stations located up to 6,000 km and 2,400 km distance from the source, respectively. These IMS data, complemented by data from seven ocean bottom opened access data stations, were accessed by the SIS - UnB to estimate epicenter, magnitudes ($m_b = 3.6$ and $M_w = 3.3$), and explosive yield. The explosion location was determined by both technologies. Infrasound 33.864°N and 34.311°E . Seismic location 33.859°N and 35.567°E . The yield was calculated using two approaches: the seismic P-wave magnitude and maximum amplitude of the infrasound signal, resulting in 0.401 kt and 1.48 kt of TNT equivalent, respectively. The aim of this work is testing the performance of the IMS network in the detection, location, and characterization of an explosion, develop researchers' skills and capacity to accurately locate events of CTBT interest. Additionally, we intend to share the importance of the CTBT and arouse interest in the use of IMS data.

Keywords: accidental explosion; seismic event detection; infrasound event detection; CTBTO; nuclear explosion detection.

RESUMO. A explosão de Beirute, Líbano, em 4 de agosto de 2020, uma das maiores explosões não nucleares da história, foi detectada pelas estações infrassônicas e sísmicas do IMS, uma rede designada para detectar e localizar explosões nucleares em violação ao CTBT. A explosão foi registrada por cinco estações de infrassom e três estações sísmicas localizadas a até 6.000 km e 2.400 km de distância da fonte, respectivamente. Esses dados, complementados por sete estações de fundo oceânico, foram acessados pelo SIS - UnB para estimar epicentro, magnitudes ($m_b = 3,6$ e $M_w = 3,3$) e rendimento explosivo. O local da explosão foi determinado por ambas as tecnologias. Infrassom 33.864°N e 34.311°E e sísmica 33.859°N e 35.567°E . O rendimento foi calculado usando duas abordagens: a magnitude da onda P e a amplitude máxima do sinal infrassônico, resultando em 0,401 kt e 1,48 kt equivalente em TNT, respectivamente. O objetivo deste trabalho é testar o desempenho da rede IMS na detecção, localização e caracterização de uma explosão, desenvolver habilidades e capacidade dos pesquisadores para localizar com precisão eventos de interesse do CTBT. Adicionalmente, pretendemos compartilhar a importância do CTBT e despertar o interesse de pesquisadores no uso dos dados do IMS.

Palavras-chave: Explosão em Beirute; Explosão accidental; Grandes explosões químicas.

INTRODUCTION

The devastating chemical explosion occurred at the Beirut harbor on August 4, 2020, at 18:08 (local

A.4.3.1



Infrasound technology applied to the discrimination of small magnitudes earthquakes and quarry blasts in southeast Brazil

Darian Portela Fontenele* and Lucas Vieira Barros, Seismological Observatory of the University of Brasilia – Brazil

Copyright 2023, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at 18th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 October 2023.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 18th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Discriminating natural events (tectonic) from artificial events (explosions) is not an easy and straightforward task, especially when both sources are small and very close to each other. Recently, we have faced this problem in more than one place where there are quarries for rock blasting and tectonic seismic sources, probably triggered by the stress released from rock removal. This raises a great deal of doubt about the origin and nature of these co-located events.

There are several known discriminants and, even using them, doubt can persist. The strictest forward is to use information on the origin time, explosive charge and delay time of the detonations, but this is not always provided by mine companies. Other concerns are related to the polarity of the first P-wave arrival, which, for explosions, must be impulsive and upward. This is not always observed. The signal frequency content is also used to determine the signal complexity. The explosions, being generally shallow, generate surface waves with a high energy. However, this also happens in the case of shallow natural earthquakes, which is almost always observed in intraplate regions, especially for triggered earthquakes.

In this work, we make an attempt to present a useful straightforward method to help discriminate these two types of events, using an infrasound and a seismic co-located stations to monitor blasting in quarries and natural events at close sites. The records obtained from these stations show that low-magnitude tectonic events do not generate infrasonic signals.

Introduction

Mine companies often do not provide crucial information about the origin time, explosive charge, and delay time of detonations. This lack of information can hinder accurate event analysis and classification.

Various methods have been employed to differentiate between quarry blasts and shallow micro-earthquakes in seismic recordings. These methods include spectral analysis (Postema, 1996; Korrat et al., 2023), maximum P/S amplitude ratios in various frequency bands (Hissely, 2022; Wang et al., 2020), analysis and measurement of seismic source parameters such as corner frequency and seismic moment (Saadalla et al., 2023), and comparing magnitude measurements for seismic events recorded locally, such as local magnitude and coda wave magnitude. By utilizing these methods, researchers can determine whether an event is a small earthquake or a single-fire buried chemical explosion (Seismological Society of America, 2020).

Researches have demonstrated that mining blasts generate infrasonic signals and these can assist in differentiating between small earthquakes and mining blasts (ReVelle et al., 2004; Che et al., 2010; Czanik, 2021). In a study conducted in Romania, seismo-acoustic analysis was used to distinguish between quarry blasts and local earthquakes (Ghica et al., 2016).

Our research began by utilizing data from two IMS stations in Brazil: the I09BR infrasound station, which consists of a 4-element array with a 2 km aperture, and the BDFB primary seismic station. These stations were used to monitor detonations in mines located within a radius of approximately 28 km, near the Brasilia National Park (PNB), where the stations are located (Fig. 1). In addition, we used a temporary station (RFFB5), which consisted of a short period (SP) seismic component and an acoustic sensor, co-located at the BDFB station (inserted on Fig. 1). This temporary station remained operating for 20 days and it was used to compare its data with that of the I09BR and BDFB stations, for the same events recorded at all of these stations (Fig. 2). Several explosions were detected during this period, and no natural events were recorded.

The PNB vicinities are devoid of natural events, whose prevent to achieve the objective of this study, which is to develop a method for distinguishing between natural events and explosions. To address this limitation, we have selected Sete Lagoas city as our research location, as it experiences both low-magnitude earthquakes and man-made events in its vicinity.

A.4.3.2



Peru earthquake, 8.0 Mw, registered by IMS infrasound stations Network

Darlan P. Fontenele, Lucas V. Barros, Brandow L. Neri, Juraci M. Carvalho, Diogo F. Albuquerque e Matheus F. Cruz
University of Brasília – UnB.

Copyright 2021, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 August 2021.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Earthquakes are usually recorded by seismographic stations, but they can also be detected by infrasound stations. In this work, the existing synergy between seismic and infrasonic technologies is used to detect major earthquakes, exploring the capacity of an infrasound station to also detect, besides acoustic waves, ground vibrations produced by earthquakes. The infrasound is a sound in the frequency range below the limit of human hearing. The perception (or detection) of infrasound signals is made by microbarometers, which detect small variations of pressure in the atmosphere caused by natural or anthropogenic phenomena. Originally, infrasonic technology was developed to monitor atmospheric nuclear explosions. This technology made a significant progress since the first nuclear explosions in the atmosphere. Recently, with the Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty (CTBT), infrasonic technology has become even more important, with the implementation of the International Monitoring System (IMS), a global network deployed by an organization linked to the United Nations. The IMS network is part of the Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), whose main purpose is to enforce the CTBT Treaty by the signatory countries. This global network is composed by 321 stations with sensors from four technologies, each one suitable for detecting nuclear explosions in a given environment.

Computational tools used in this work are from the NDC-in-a-Box package (DTK-GPMCC and DTK-DIVA), made available by CTBTO to the signatory countries for reading, detect and analysis seismic and infrasonic signals.

It was used data from the M8 Peru earthquake of May 26, 2019. Detections related to this event were investigated in the ten nearest infrasound stations of the IMS Network surrounding the epicenter. However, the event was recorded only at 4 stations, all of them located at epicentral distances up to about 3,000 km. The wave parameters obtained by the infrasound stations are compatible with those obtained from seismic stations.

Introduction

The International Monitoring System (IMS) Network was created as part of the obligations to comply with the Total Nuclear Test-Ban Treaty - CTBT, which was opened for signature in July 1996 at the United Nations (UN) headquarter. The Treaty will enter into force with the signature and ratification of all CTBT Annex 2 countries.

The IMS Network was designed to cover the entire planet, monitoring all possible environments for carrying out nuclear tests above 1 kt: land surface, water masses and atmosphere.

A specific monitoring technology is used for each environment, which can use mutual synergy to improve the detection, discrimination and location of a nuclear test.

Countries that sign and ratify the Treaty must fulfill obligations inherent in the Treaty. Among them, the maintenance of the IMS stations installed within their territories, in addition to the transmission of the data generated by these stations to the International Data Center (IDC), located in Vienna - Austria.

For the materialization of the Treaty, the Provisional Technical Secretariat (PTS) was created, with the mission to implement and maintain the IMS Network and the IDC before the treaty comes into force.

The technologies used to monitor the nuclear tests are: seismic, hydroacoustic and infrasound, in addition to that, a fourth technology (Radionuclides), with the mission to confirm the occurrence of a nuclear test (Marty, 2019). A brief description of each technology is below.

Seismic technology (170 stations) is used to detect nuclear tests under (and also above) the Earth's surface and can also detect explosions inside the oceans, depending on the distances (Barros et al, 2020).

Hydroacoustic technology (11 stations) is used to detect explosions under the aquatic masses. They are high sensitivity stations and cover all oceans (Brown, 2014).

The infrasound technology (60 stations) is used to detect nuclear tests at the atmosphere. It can also detect subsurface explosions, as well in the oceans, depending on the power of the explosive yield (Dahlman et al, 2011). Fig. 1.

Finally, **radionuclide technology** is based on stations and laboratories for analyzing atomic particles that are released by nuclear explosions. These particles spread in

A.4.3.3



University of Brasilia studies explosions occurred in Beirut – Lebanon

Authors, Entities Lucas Vieira Barros¹, Brandon Lee Neri¹, Darlan Portela Fontenele¹, Ronnie Quintero², Diogo Farrapo Albuquerque¹ and Juraci Mario de Carvalho¹. ¹Seismological Observatory, University of Brasília; ²Ovscori, Universidad Nacional, Costa Rica.

Copyright 2021, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 8-11 November 2021.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The Beirut, Lebanon chemical explosion on August 4, 2020, is one of the largest non-nuclear blasts in history and was recorded by the infrasound and seismic stations of the International Monitoring System (IMS), a global network designated to detect clandestine nuclear explosion in violation to the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT). The explosion was detected by infrasound and seismic stations located up to 6,000 and 2,400 km from the source, respectively. Data from 5 infrasound and 3 seismic stations of the IMS and stored at IDC-CTBTO was accessed by the Seismological Observatory of the University of Brasilia (SIS-UnB) and used to calculate hypocenter, magnitudes, and explosive yield. An attempt to determine the CMT was made, but it is not shown in this study. This introductory work aims to test the performance of the IMS network in the detection, location and characterization of an explosion and develop authors' skills and capacity to accurately locate events of CTBT interest. Additionally, we intend to share the importance of the CTBT and arouse interest in the use of IMS data for civil and scientific applications.

Introduction

A devastating chemical explosion occurred at the Beirut harbor on August 4, 2020, at 18:08 (local time) or 12:08 (UTC), killing 207 people, leaving around 7,500 injured, 300,000 homeless and 15 billion dollars loss (Reuters, 2020). Within a radius of 800 meters from the source, almost everything was destroyed: ships anchored at the port were sunk, buildings and houses collapsed, cars destroyed etc. (Fig. 1). The shock waves were felt in Turkey, Syria, and Palestine, and it was heard in Nicosia, Cyprus, more than 240 km away from the source. After the explosion, a large cloud of black smoke washed over the port area.

The explosion was caused by the detonation of 2750 tons of ammonium nitrate that had been stored in a warehouse in the port since 2013. Ammonium nitrate is a fertilizer used in agriculture, but that can burn up when subjected to temperatures of about 300 Celsius. A fire in a neighboring warehouse triggered the first small detonation, which triggered the second big explosion of nitrate. Considering an efficiency of about 50%, this explosion had a yield equivalent to a nuclear explosion with more than 1 kt of TNT, enough to generate seismic

waves with energy equivalent to a magnitude 4 earthquake, considering a subsurface explosion, which was not the case. Even so, the USGS estimated a magnitude of 3.3 mb. In this work, we estimated magnitudes equal to 3.3 Mw and 3.6 mb.



Figure 1: Images before and after the explosion at the Beirut Port. As you can see, everything was destroyed in a radius of 400 m from the explosion point.

A big nuclear test, of about hundreds of kilotons, can generate energy capable of spreading throughout the planet, in the form of disturbances detectable by a certain type of geophysical sensors. In this sense, it was designed the International Monitoring System composed by sensors of four technologies, each one suitable for detection in one of three possible environments: atmosphere, subsurface and underwater masses.

The Seismological Observatory of the University of Brasilia (SIS-UnB) collaborates with the United Nations Organization CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban-Treat Organization), based in Vienna - Austria, which aims to verify the compliance with the CTBT. The Brazilian government participates in this organization with data from its IMS stations installed within its borders as well as the result of the data analysis and interpretation obtained by the analysts and experts. Any nuclear explosion, whether underground, underwater or in the atmosphere, with a power equivalent to at least 1 kiloton of TNT (Trinitrotoluene), at any time and place, can be detected by this network.

In this work, we present the Beirut chemical explosion sources parameters (epicentral location, magnitudes and yield) determined using infrasound and seismic data. But before that, we would like briefly present the CTBT Treaty, its verification regime and the seismic and infrasound technologies used. We also aim to arouse interest of Latin American researchers in the use of IMS technologies. However, under a confidentiality clause, the IMS data can be used by all States Parties.

A.4.3.4



The establishment of a Brazilian Nacional Data Center (NDC) for a better Comprehensive Nuclear Test-Ban-Treaty verification regime

Lucas Vieira Barros¹, Bradow Lee Neri¹, Juraci Mario de Carvalho¹ and Darlan Portela Fontenele¹

¹Seismological Observatory, University of Brasília, Brazil

Copyright 2021, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 August 2021.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The Comprehensive Nuclear Test-Ban-Treaty (CTBT) prohibits conducting nuclear tests on a global scale. Although not yet in force, it has an International Monitoring System (IMS) based on geophysical sensors, capable of globally detect any nuclear test equal or greater than 1 kt (kiloton) of TNT. The Sensors of the global IMS network use four technologies: Seismic; Infrasound; Hydroacoustics and Radionuclides. Data from the IMS network are transmitted to the International Data Center (IDC), located at the United Nations in Vienna – Austria. The IDC has the mission of processing, analyzing and issue bulletins/reports on any event of interest to treaty compliance. But, only the State Parties, through their NDCs and National Authorities (NA), can declare an event to be suspicious and possible linked to a clandestine nuclear explosion. The Brazil, despite of having already signed and ratified the Comprehensive Nuclear Tests-Ban-Treaty (CTBT), does not have yet an established NDC, which is a center with expertise in verification technologies operating under the guidance of the National Authority. The NA is the main Point of Contact of a State Party to the CTBT, International Data Center and other States Parties. Therefore, a NDC plays a key role in overseeing compliance with the CTBT. Brazil contributes with data from three technologies: Seismic, Infrasound and Radionuclides. The Seismological Observatory (SIS) of the University of Brasília (UnB) contributes with data from two stations, a primary seismic station and an infrasound station, both located inside the Brasília National Park (PNB). Data from these stations are transmitted to the (SIS – UnB), where they are recorded, analyzed and retransmitted to the IDC. The other IMS stations in Brazil are: two auxiliary seismic stations, located in the states of Rio Grande do Norte and Amazonas; two radionuclide stations, located in Rio de Janeiro and Recife (planned), and a radionuclide laboratory, located at the Institute of Radioprotection and Dosimetry (IRD), also at the city of Rio de Janeiro. In this text, we present a description of a NDC, with definition, attributions and requirements for its assembly and operation.

Introduction

Brazil's National Data Center (NDC) has not yet been formally established, although, according to the CTBT, NDCs can be created in any State Party. A NDC is an

organization with expertise in verification technologies that functions as part of (or under the guidance of) a National Authority.

The CTBT Treaty consists of 1 preamble, 17 articles, 2 annexes and 1 protocol with 2 annexes. The text of the Resolution adopted by the CTBT Signatory Countries or States Parties also integrates the Treaty, establishing the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization - PrepCom/CTBTO, with the objective of carrying out the necessary preparations for the effective implementation of the CTBT and guaranteeing the operationalization of the Treaty's verification regime, upon its entry into force, which is subject to ratification by the 44 countries listed in Annex 2 of the CTBT.

Brazil signed the Treaty on 9/26/1996, ratified it on 7/24/1998 and participates in its verification under three technologies: seismic, infrasound and radionuclides. A treaty, when in force, is an agreement between States with the obligations of each State Party governed by international law. The Vienna Convention on the Law of Treaties provides that all States Parties to a treaty must contribute to the achievement of its objectives and purposes. These are obligations of Brazil to the CTBT (as well as those of other States Parties), in addition to the commitment not to carry out any type of nuclear explosion, to prohibit and prevent any nuclear test anywhere under its jurisdiction or control, to contribute to the Treaty verification with data from your stations and participate in the investigation and identification of suspicious events.

The identification of suspected clandestine test events will occur through the analysis and interpretation of signals detected by geophysical sensors of four specific technologies, capable of detecting any nuclear test with a power greater than or equivalent to 1 kiloton (kt) of TNT (trinitrotoluene). After detecting, locating, and identifying a suspicious event, an on-site inspection is carried out to confirm whether a nuclear test has taken place.

In June 2019, on the fourth Science and Technology Conference (SnT4/2019) promoted by the CTBTO, in Vienna - Austria, the Brazilians participating in this event were invited by the ambassador of the Brazilian Permanent Mission to the UN in Vienna, minister Marcel Fortuna Biato, for a meeting, when we had the opportunity to discuss the creation of a NDC in Brazil. After this event, the authors of this article wrote the book: The Brazilian Participation in the Verification of the Comprehensive Nuclear Test-Ban-Treaty (http://obsis.unb.br/portalsis/?pg=viewNotice&id_notice=38). This book is based mainly in the authors experiences in more than 20 years working with seismic and infrasound technologies. The book presents the most relevant parts of the CTBT, emphasizing the obligations of a State Party in its verification, with emphasis on the Brazilian participation

A.4.3.5



Preliminary analysis of infrasound generated by the meteoroid explosion over Japan on November 29, 2020 detected by IMS stations

Diogo Farrapo Albuquerque, Lucas Vieira Barros, Brandow Lee Neri, Matheus Fernandes da Cruz and Darlan Portela Fontenele, University of Brasília (UnB).

Copyright 2021, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 August 2021.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The explosive fragmentation of large meteoroids is one of the strongest sources of infrasonic waves. In the absence of nuclear tests since 1980, bolide explosions are now the strongest infrasound sources available to calibrate and test the sensitivity of the International Monitoring System (IMS) infrasound instruments. Besides, it is important to detect meteoroid explosions using infrasound arrays to estimate their potential destruction and the frequency of occurrence. In order to extract wave attributes that may be used to test the sensitivity of IMS instruments, we applied the Progressive Multi-Channel Cross-correlation (PMCC) to the infrasound records generated by the meteoroid explosion over Japan on November 29, 2020. We obtained reliable results for only two stations: I30JP (Japan) and I45RU (Russia). The PMCC algorithm returned one family of 107 pixels with a mean back-azimuth of $243.3 \pm 1.3^\circ$ for I30JP and 344 pixels with $160.6 \pm 1.0^\circ$ for I45RU. The meteoroid explosion was located near to Shingu, Japan, with a yield of less than 1 kt, which suggests that events generating energies < 1 kt should be detected by IMS.

Introduction

Our planet is continuously bombarded by meteoroids of different sizes, ranging from dust grains to hundreds of meters in diameter. Although rarer, the latter group has the potential to cause mass extinctions and long term climate perturbations (Silber and Brown, 2019). Meteors are the luminous effect caused by ionization of the material due to collision with atmosphere. Meteorites are the fragments that makes to the Earth's surface (Matsuura and Picazzo, 2003; Pilger et al., 2019).

The explosive fragmentation of large meteoroids is one of the strongest sources of infrasonic waves. The most energetic event ever recorded by the International Monitoring System (IMS) was the 2013 Chelyabinsk bolide, quantified having an equivalent explosive yield of up to 500 kt of TNT. The infrasonic waves generated by the explosion were detected by infrasound stations at long orthodrome distances (above 20,000 km) and after complete circumnavigations of the globe (up to 87,000 km) (Pilger et al., 2019).

The IMS was built to monitor nuclear tests in the atmosphere, on the surface and in the underground for the implementation of the Comprehensive Test Ban Treaty (CTBT). The IMS comprises 302 certified facilities for seismic, hydroacoustic, infrasound and radionuclide monitoring. The infrasound network is composed of 60 stations (53 certified), distributed uniformly around the globe (Figure 1), and focused on the detection of nuclear explosions in the atmosphere to verify compliance with the CTBT. It has been designed to detect and locate atmospheric nuclear explosions with a yield equivalent to one-kiloton of TNT reliably (Christie, 2007; Marty, 2019).

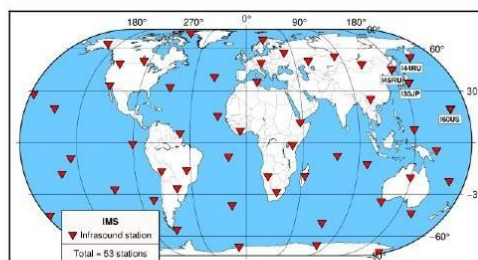


Figure 1 – International Monitoring System (IMS) certified infrasound stations. The stations used in this study are indicated by their codes: I44RU and I45RU (Russia), I30JP (Japan) and I60US (United States territory of Wake Island).

Since the last atmospheric nuclear explosion was conducted in 1980, bolide explosions are now the strongest infrasound sources available to calibrate and test the sensitivity of IMS infrasound instruments. Then it is important to detect meteoroid explosions using infrasound arrays to estimate their potential destruction, the frequency of occurrence and test the sensitivity of instruments. In this sense, the main objective of this work is to analyze the infrasonic waves generated by the meteoroid explosion that occurred over Japan on 29 November 2020 at about 2:00 in order to extract wave attributes that may be used to test the sensitivity of IMS infrasound network.

Data

Member States have access to all data deriving from the global verification regime built to monitor compliance with the CTBT. Raw and processed data are available to the members upon request to the International Data Centre (IDC) located in Vienna, Austria. The data used in this study was requested by the Seismological Observatory of

A.4.3.6



Analysis of infrasonic signals generated by an accidental explosion on July 3, 2020 at a fireworks factory in Turkey

Matheus Fernandes da Cruz^{*1}, Brandow Lee Neri¹, Diogo Farrapo Albuquerque¹, Darlan Portela Fontenele¹ and Lucas Vieira Barros¹, ¹ University of Brasília

Copyright 2021, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 August 2021.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This work carried out the analysis of the infrasonic signals generated by an accidental explosion in a fireworks factory located in Turkey. For the analysis, two infrasound stations were used, the I26DE station in Germany and the I48TN station in Tunisia. From the data processing it was possible to extract important information that made it possible to locate the event using only the two stations.

Introduction

Fireworks are undoubtedly a great attraction in festive events and celebrations, such as World Cups, June parties or the great fireworks display on New Year's Eve, illuminating the skies around the world, bringing hope for a better year. However, behind the beauty and joy, they hide a sad reality: the fear faced by pyrotechnic industry workers because of the danger related mainly to their manufacture and storage.

Unfortunately, accidents in fireworks factories are not rare events to happen and another episode occurred. On the morning of a Friday, July 3, 2020, at 11:15 am (local time), 8:17 am (GMT), an accidental explosion occurred at a fireworks factory in Sakarya province in northwestern Turkey. At the time of the explosion, there were about 150 to 200 people at the scene, according to local sources. Unfortunately, the explosion resulted in at least 6 deaths and more than 100 injuries, and the cause of the accident is still being investigated.

It is in this context that the present work enters with the objective of analyzing the infrasonic signals generated by this explosion. The infrasound, along with 3 other geophysical sensor technologies (seismic, hydroacoustic and radionuclides) are part of the International Monitoring System (IMS) that will be used to verify compliance with the Total Nuclear Test Ban Treaty (CTBT) when it comes into force. The CTBT, although not yet in place, prohibits nuclear explosions at the global level and IMS will be used to verify compliance with the treaty, being able to detect any nuclear test with a power equal to or greater than 1kt of TNT.

IMS has a total of 337 installations with four technologies: 50 primary seismic stations and 120 auxiliary seismic stations; 60 infrasonic stations (Figure 1); 11

hydroacoustic stations; 80 radionuclide stations and 16 radionuclide laboratories.

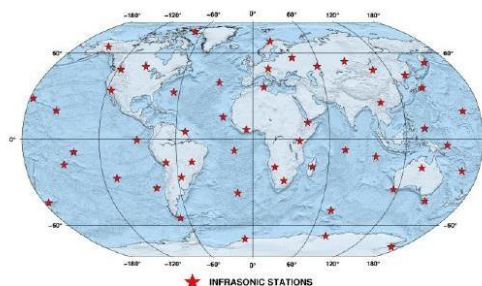


Figure 1 – IMS infrasonic stations network (60 stations).

For the analysis of the infrasonic data performed in the present study, the two stations closest to the accident site will be used: the I26DE station located in Germany, which is approximately 1590 km away and the I48TN station, located in Tunisia 1918 km away from the accident (Figure 2).

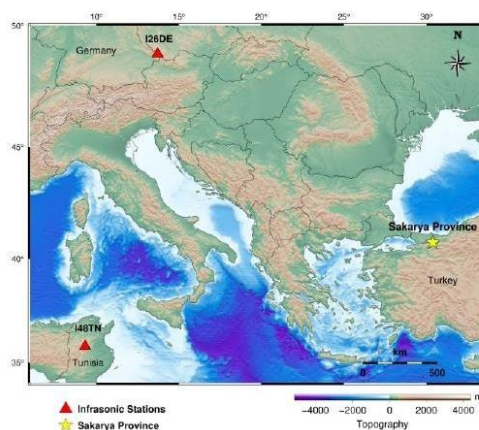


Figure 2 - Location map showing the infrasonic stations used and the location of Sakarya province.

A.4.4.1

CTBT: Science and Technology Conference 2023 - SnT2023

ID: P2.3-525

Type: E-poster

on Infrasound Technology Applied to the Discrimination of Chemical Explosions From Tectonic Events

Wednesday, 21 June 2023 09:42 (1 minute)

This work has the goal to present a useful method to help in the discrimination of natural events (tectonics) from artificial events (chemical explosions in quarries blasting) when both sources are co-located. This is a frequent problem where the seismicity is triggered by stress released due to material removal in mines. With that purpose, we are conducting experiments using local infrasound stations to monitor blasting in quarries, recording infrasonic signals from detonations and infrasonic signals generated by earthquakes, in case they are present. Our work is done considering two scenarios, one of them using one co-located seismic and infrasound stations installed where there are blasting in mines and natural events (up to 30 km distant). We have already managed to get some results with this configuration. The other scenario we are in our way to implement two infrasound arrays (triangular shape four elements each) and a seismic network where there are blasting in mines and natural events. This implementation will be done soon. Our initial findings is that the few induced earthquakes occurred at a mining open pit did not produce any detectable infrasonic signal, hence we managed to discriminate them from the mining blast occurred at the same spot.

E-mail

dpfontenele@gmail.com

Promotional text

Studies on Infrasound technology applied to the discrimination of chemical explosions from tectonic events developed by University of Brasilia researchers.

Oral preference format**Primary author:** Mr PORTELA FONTENELE, Darlan (University of Brasilia, Seismological Observatory)**Co-authors:** Mr BARROS, Lucas (University of Brasilia, Seismological Observatory); Mr DE CARVALHO, Juraci Mario (University of Brasilia, Seismological Observatory)**Presenter:** Mr PORTELA FONTENELE, Darlan (University of Brasilia, Seismological Observatory)**Session Classification:** Lightning talks: P2.1, P2.3, P4.4**Track Classification:** Theme 2. Events and Nuclear Test Sites: T2.3 Seismoacoustic Sources in Theory and Practice

A.4.4.2

CTBT: Science and Technology Conference 2023 - SnT2023

ID: P1.1-489

Type: E-poster

of Geomagnetic Storms with Infrasound Observation Data from International Monitoring System Stations Located in South America

Thursday, 22 June 2023 10:07 (1 minute)

The Earth is continuously under the influence of solar radiation, which interacts with the Earth's magnetic field, causing various effects. One of them is the warming of the planet, keeping it in a suitable situation for the development and maintenance of life on Earth. Another is the bombardment of the Earth by plasma from solar storms, where the magnetic field acts as a protective shield that deflects this radiation. However, in the polar regions the penetration of the storms products is responsible for the generation of aurora borealis, formed in the northern hemisphere, and aurora australis, formed in the southern hemisphere, which can be recorded by infrasound stations of the International Monitoring System (IMS) of nuclear tests. From this perspective, the South American region stands out due to the presence of the South Atlantic Magnetic Anomaly, where the magnetic field is less intense, making this region more susceptible to the effects of geomagnetic storms. In this research, we study the relationship between geomagnetic storm observation data and infrasound signals detected by the IMS stations located in South America.

E-mail

arthur.2siqueira@gmail.com

Promotional text

Correlation of geomagnetic storms with infrasound observation data from IMS stations located in South America, developed by Universidade de Brasília and Observatório Sismológico de Brasília.

Oral preference format

Primary author: Mr MACÊDO, Arthur (University of Brasília, Seismological Observatory)

Co-authors: Mr BARROS, Lucas (University of Brasília, Seismological Observatory); YOKOYAMA, Elder (University of Brasília, Seismological Observatory); Mr PORTELA FONTENELE, Darlan (University of Brasília, Seismological Observatory); Mr DE CARVALHO, Juraci Mario (University of Brasília, Seismological Observatory)

Presenter: Mr MACÊDO, Arthur (University of Brasília, Seismological Observatory)

Session Classification: Lightning talks: P1.1, P3.3

Track Classification: Theme 1. The Earth as a Complex System: T1.1 The Atmosphere and its Dynamics

A.4.4.3



- Overview
- Key Information
- How to upload material
- Scientific Programme
- Timetable
- Contribution List
- My Conference
- My Contributions
- Book of Abstracts

Capacity Building and Training Section, IDC/CBT

✉ conferences_and_works...

☎ +43 1 26030 6484

Call for Abstracts

An attempt to discriminate chemical explosions from natural events using Infrasound technology #54

Withdraw  

Accepted

Darian Portela Fontenele submitted this abstract and it was finally accepted for track P - Poster session as poster.
[Go to contribution](#)

Author: Darian Portela Fontenele

Co-authors: Lucas Barros, Juraci Mario De Carvalho

Discriminating natural events (tectonic) from artificial events (explosions) is not an easy and straightforward task, especially when both sources are very close to each other. Recently, we have faced this problem where there are quarries for rock blasting and natural seismic sources, triggered by the stress released from rock removal. This raises a great deal of doubt about the origin and nature of these co-located events. In this work, we make an attempt to present an useful straightforward method to help to discriminate these two types of events, trying to answer some basic questions, like: is it possible to use infrasound stations to monitor blasting in quarries? Do detonations in quarries generate an infrasound wave always with a positive first arrival, i.e., first arrival as overpressure? Do low magnitude tectonic events produce infrasonic signals? Do infrasound sensors may register the local air pressure changes that comes from the movement of the ground. In other words, does a seismic wave, upon reaching the surface, generates a local pressure change in the air (simple transmission of waves from one medium to another) and, consequently, the ground movement is upward and the respectively pressure of the generated sound wave also is positive (overpressure)?

D Darian Portela Fontenele submitted this abstract · 17 Oct 2022 · edited

As contribution type:
poster

For track:
P - Poster session

A.4.4.4

 Gmail

Darlan Fontenele <dpfontenele@gmail.com>

LACSC 2022 - Abstract Accepted
2 mensagens

FromEmail <lacsc2022quito@igepn.edu.ec> 28 de julho de 2022 às 20:11
Para: ToEmail <dpfontenele@gmail.com>

Dear DARLAN PORTELA FONTENELE:

On behalf of the Scientific Committee of the IV Assembly of the Latin American and Caribbean Seismological Commission to be held at the Hotel Hilton Colon in Quito Ecuador from 3 - 5 October 2022, we are very pleased to inform you that your proposed abstract "Infrasound technology in the discrimination of chemical explosions from natural events" has been accepted and will be included in the 2022 LACSC Scientific Program.

Please help us by inviting your colleagues to come and join us for an exciting meeting that will be accompanied by interesting pre-conference training workshops and exciting pre- and post-conference field trips, such as: the Galapagos Islands; Cotopaxi and Reventador volcanoes in Continental Ecuador and the Imbabura UNESCO Global Geopark.

See you in Quito!

Mario C. Ruiz
President of LACSC

Darlan Fontenele <dpfontenele@gmail.com> 1 de agosto de 2022 às 09:24
Para: Secretaria <secretariasis@unb.br>

Bom dia!

Segue e-mail recebido do Scientific Committee of the IV Assembly of the Latin American and Caribbean Seismological Commission informando o aceite do meu abstract para participação no 2022 LACSC Scientific Program.

Atenciosamente,
Darlan

[Texto das mensagens anteriores oculto]

A.4.4.4 Continuação

Infrasound technology in the discrimination of chemical explosions from natural events

Darlan P. Fontenole, Lucas V. Barros, Juraci M. de Carvalho

Seismological Observatory of the University of Brasilia

INTRODUCTION

Discriminating natural events (tectonics) from artificial events (mine chemical blast) is not an easy and straightforward task, especially when both sources are very close to each other. Recently, we have had this problem in more than one place where there are quarries for rock blasting and natural seismic sources, triggered by the rock removal stress released. This raises a great deal of doubt about the origin and nature of these co-located events.

In this work, we make an attempt to present a useful straightforward method to help to discriminate these two types of events, trying to answer some basic questions, like:

- it is possible to use infrasound stations to monitor blasting in quarries?
- detonations in quarries (dismantling in benches mainly) generate always a infrasound wave with a positive first arrival, i.e., first arrival as overpressure?
- low magnitude tectonic events produce infrasonic signals?
- infrasound sensors may register the local air pressure changes that comes from the movement of the ground? In other words, a seismic wave, upon reaching the surface, generates a local pressure change in the air (simple transmission of waves from one medium to another) and, consequently, the ground movement is upward and the respectively pressure of the generated sound wave also is positive, i.e., overpressure?

Using co-located seismic and infrasound stations, we would give answers to some of these questions, considering the existence of natural and artificial sources within a radius of 40 km.

A.4.4.5

03/04/2022 16:29

Monitoring changes in mine blast detection during COVID-19 shutdown in Brasilia using the I09BR infrasound station

This year's Fall Meeting is in a whole new environment. Learn to navigate the meeting, build your schedule, and see what sessions, events, activities, and resources are available to online and in-person attendees [here](#).

S55C-0155 - Monitoring changes in mine blast detection during COVID-19 shutdown in Brasilia using the I09BR infrasound station



Friday, 17 December 2021



19:00 - 21:00



Convention Center - Poster Hall, D-F

Abstract

During the COVID-19 pandemic, the Seismological Observatory of Brasilia's University continued to carry out the analysis of infrasound and seismic data of the International Monitoring System infrasound station (IS09 – I09BR) and seismic station (PS07 - BDFB), both located in Brasilia, Brazil. These stations are routinely used to characterize local and regional Seismo-Acoustics events such as earthquakes and mine blasts. Few days after the 1st confirmed case of COVID 19 in Brasilia, the government decreed the first restrictive measure. The isolation rate achieved in the first month was around 60%, that is, it reduced cultural noise near stations. Despite the reduction in human activity in urban centers, the number of mine blasts remained like the period before the pandemic. This work compares the differences in mining explosion detections each month of the pandemic period with previous years by station I09BR. The results show that, due to the reduction of cultural noise, in the period with the highest rate of social isolation, the Brazilian infrasound station clearly detected more mine blasts than in a similar previous period.

First Author



Brandow L Neri

UNB University of Brasilia

Authors



Lucas Vieira Barros

OBSIS Seismological Observatory of the University of Brasília



<https://agu.confex.com/agu/fm21/meetingapp.cgi/Paper/938618>

1/3