



Universidade de Brasília - UnB

Instituto de Geociências - IG

NICOLE EVELYN CARVALHO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE EXPLOSÕES QUÍMICAS REGISTRADAS PELAS
ESTAÇÕES INFRASSÔNICA (IS09) E SÍSMICA (PS07) COM A
ESTIMATIVA DO RENDIMENTO EM TRINITROTOLUENO (TNT)**

Brasília
2021

NICOLE EVELYN CARVALHO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE EXPLOSÕES QUÍMICAS REGISTRADAS PELAS
ESTAÇÕES INFRASSÔNICA (IS09) E SÍSMICA (PS07) COM A
ESTIMATIVA DO RENDIMENTO EM TRINITROTOLUENO (TNT)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Comissão Examinadora
do Instituto de Geociências como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Geofísica.

Orientador: Dr. Lucas Vieira Barros

Brasília
2021

ESTUDO DE EXPLOSÕES QUÍMICAS REGISTRADAS PELAS ESTAÇÕES
INFRASSÔNICA (IS09) E SÍSMICA (PS07) COM A ESTIMATIVA DO RENDIMENTO
EM TRINITROTOLUENO (TNT)

NICOLE EVELYN CARVALHO DE OLIVEIRA

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Lucas Vieira Barros

Orientador

Instituto de Geociências – IG / Universidade de Brasília – UnB

Prof^a. Dra. Monica Giannoccaro Von Huelsen

Coordenadora do Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica – PPGGAG

Instituto de Geociências – IG / Universidade de Brasília – UnB

Dr. Juraci Mario de Carvalho

Pesquisador

Instituto de Geociências – IG / Universidade de Brasília – UnB

Brasília
2021

*Porque dEle e por Ele, e para Ele, são todas
as coisas; A Ele seja a glória eternamente.
Amém*

Rm 11.36

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador do universo por sua misericórdia, graça e amor para com a minha vida. Por ter sido meu melhor amigo, meu guia e mestre durante essa jornada tão tribulosa, me auxiliando na prática dos frutos do Espírito na qual fui confrontada principalmente em minha fé, paciência, longaminidade e domínio próprio.

À minha família, em especial minha irmã Alexia Karen por me apoiar, aconselhar e me acalmar em tantos momentos difíceis. À meus pais, Flávia e Daniel, pelo cuidado e incentivo ao estudo. Aos meus avós, Idenis e Raimundo, e minhas tias, Sheila e Patrícia, por acreditarem em mim e me estimularem a seguir em frente.

Ao meu orientador, Lucas Barros, e meu co-orientador do coração, Brandow Lee, pela paciência, ensino, disponibilidade e incentivo à ciência.

À comissão examinadora pelo tempo, disposição e aconselhamento.

Ao Observatório Sismológico da Universidade de Brasília pelo apoio e colaboração, em especial aos estagiários, Letícia e Arthur, e aos bolsistas e demais estagiários do SIS-UnB pelo fornecimento de dados. Ao técnico Darlan, pelas discussões acerca do tema. E aos demais professores, George e Mônica, que se disponibilizavam para me auxiliarem com dúvidas e questionamentos.

Ao CTBTO pelo apoio, disponibilização do *software* e dados.

Aos professores do Instituto de Geociências, que me ensinaram e me apoiaram nessa jornada, em especial o professor Luciano, que acreditou em mim e continua investindo no meu aprofundamento científico-acadêmico.

Aos meus amigos e geoamigos que fiz durante esta graduação. Em especial, aos amigos que conheci através do NVC e Discípulos no Campus, sem eles acredito que muita coisa em minha vida teria sido diferente. Cada conversa, risada e desabafo me deram segurança e apoio no Senhor, sendo essa interação um pilar para minha formação em diversos aspectos.

RESUMO

O Sistema Internacional de Monitoramento (IMS) faz parte do regime de vigilância de testes nucleares de alcance global que dispõe de quatro tecnologias (Infrassônica, Hidroacústica, Radionuclídeos e Sísmica). O IMS é um dos três pilares da Comissão Preparatória da Organização do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBTO), cujo objetivo principal é criar condições para verificar o cumprimento do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBT). Esse Tratado foi estabelecido como uma norma internacional acerca da proibição da realização de qualquer teste nuclear em qualquer ambiente. A tecnologia infrassônica é capaz de detectar sinais de explosões nucleares no ambiente atmosférico, com frequências inferiores a 20 Hz, gerados a milhares de quilômetros da origem, por fontes naturais e/ou artificiais. Existem 60 estações de infrassom da rede IMS e a única estação brasileira com essa tecnologia encontra-se no interior do Parque Nacional de Brasília (PNB). Coordenada e mantida pelo Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS/UnB), entrou em operação rotineira a partir de julho de 2001. Este trabalho consiste na análise de sinais infrassônicos e sísmicos detectados pelas estações infrassônica IS09 e sísmica PS07, respectivamente. Ambos gerados por explosões químicas oriundas de mineradoras/pedreiras. Os parâmetros característicos desses sinais para esse estudo são: amplitude, distância entre a fonte e o receptor, valor da pressão diferencial e a magnitude que, a partir deles, foi estimado o rendimento equivalente em trinitrotolueno (TNT) de um conjunto representativo de explosões, realizadas em diferentes pedreiras, localizadas no DF e regiões vizinhas.

Palavras-Chave: Sinais infrassônicos; Sinais sísmicos; Explosões Nuclear e Química; Rendimento; Mineradoras.

ABSTRACT

The International Monitoring System (IMS) is part of the surveillance regime for nuclear tests of global reach, which has four technologies (Infrasound, Hydroacoustic, Radionuclide and Seismic). The CTBT verification regime consists of three pillars of the Preparatory Commission of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), whose main objective is to create conditions to verify compliance with the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT). This Treaty was established as an international norm concerning the prohibition of carrying out any nuclear test in any environment. Infrasound technology is capable of detecting signals from nuclear explosions in the atmospheric environment, with frequencies below 20 Hz, the signal is generated at the source and propagates over thousands of kilometers from the origin, by natural and/or artificial sources. There are 60 infrasound stations on the IMS network and the only Brazilian station with this technology is located inside the Brasília National Park (PNB). Coordinated and maintained by the Seismological Observatory of the University of Brasília (SIS/UnB), it began routine operation in July 2001. This work consists of the analysis of infrasound and seismic signals detected by the infrasonic stations IS09 and seismic PS07, respectively. Both generated by chemical explosions from mining/quarrying. The characteristic parameters of these signals for this study are: amplitude, distance between the source and the receiver, value of the differential pressure and the magnitude that, from them, the equivalent yield in trinitrotoluene (TNT) of a representative set of explosions was estimated, carried out in different quarries, located in the DF and neighboring regions.

Keywords: Infrasonic Signals; Seismic Signals; Nuclear and Chemical Explosions; Yield; Mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de propagações de ondas (Oliveira & Ianniruberto, 2019).....	20
Figura 2 - Espectro de frequência do som com a divisão em infrassom, frequências audíveis e ultrassom (adaptada de Pujol & Trigueiros-Cunha, 2018).....	22
Figura 3 - Tipos de onda sísmica. a) Onda P. b) Onda S. c) Onda Love. d) Onda Rayleigh. (Barbieri et. al., 2019).....	24
Figura 4 - Propagação de onda de acordo com a Lei de Snell.....	25
Figura 5 - Localização das 60 estações da Rede Infrassônica do IMS.....	26
Figura 6 - Localização da estação infrassônica de Brasília I09BR no interior do Parque Nacional de Brasília. Os círculos denotam cada elemento do arranjo infrassônico. O triângulo indica a localização do Observatório Sismológico no campus da UnB, onde os dados são recebidos, gravados, analisados e retransmitidos para o IDC em Viena - Áustria.	28
Figura 7 - Estação I09BR de Brasília configurada na forma de um arranjo de quatro elementos, sendo que cada elemento do arranjo ocupa um dos vértices de um triângulo equilátero e um elemento no centro (adaptada de Neri, 2019; Barros, 2000). À esquerda, o sistema de redução de ruído – filtro mecânico.....	29
Figura 8 - (a) Prédio do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, onde se observa a torre para recepção dos dados da estação IS09. (b) Entrada principal do SIS-UnB.....	30
Figura 9 - Estações sísmicas pertencentes ao IMS – CTBTO. As estações sísmicas brasileiras estão destacadas no mapa, uma estação sísmica primária (PS07) e duas estações sísmicas auxiliares (AS10 e AS11).....	32
Figura 10 - Estações da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) (http://rsbr.gov.br/).....	34
Figura 11 - Localização da estação sísmica PS07 no interior do Parque Nacional de Brasília (PNB). O círculo representa o local da estação e o triângulo indica a localização do Observatório Sismológico no campus da UnB, onde os dados são recebidos, gravados e analisados.	35
Figura 12 - Mapa com a localização de todos os eventos infrassônicos e sísmicos registrados no período de 2016 a 2020.	38
Figura 13 - Mapa principal com os eventos ocorridos em 2016, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.....	39
Figura 14 - Mapa principal com os eventos ocorridos em 2017, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.....	40
Figura 15 – Mapa principal com os eventos ocorridos em 2018, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.....	41

Figura 16 - Mapa principal com os eventos ocorridos em 2019, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.....	42
Figura 17 - Mapa principal com os eventos ocorridos em 2020, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.....	43
Figura 18 - Mineradora Kinrros, localizada ao lado da cidade de Paracatu/MG.	45
Figura 19 - Mineradoras encontradas via Google Maps© e Google Earth© nos estados de Goiás e Minas Gerais.	46
Figura 20 - Mineradoras coerentes com a localização dos eventos sísmicos e infrassônicos. .	47
Figura 21 - Mineradoras que possuem proximidade com os eventos e que possuem algum tipo de contato para comunicação.....	48
Figura 22 - Mapa do campo de estudo delimitado.	50
Figura 23 - Relação entre magnitude e rendimento.....	61
Figura 24 - Relação entre o período e o rendimento.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidades do som em meios distintos.	20
Tabela 2 - Número de eventos registrados nas estações PS07 (apenas) e PS07 e IS09 no período de 2016 a 2020.....	37
Tabela 3 - Mineradoras alvo e suas respectivas localizações.....	49
Tabela 4 - Parâmetros de análise para cálculo do rendimento e determinação da potência equivalente em t (ton) em TNT.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amplitude máxima registrada
AFTAC - U. S.	<i>Air Force Technical Applications Center of United States</i>
AS10	<i>Auxiliary Station 10</i> - Estação Sísmicas Auxiliar 10
AS11	<i>Auxiliary Station 11</i> - Estação Sísmicas Auxiliar 11
BDFB	Estação de banda larga primária de Brasília
BDI	Banco de Dados de Infrassom
BDI	Banco de Dados de Infrassom
CD	Conferência sobre Desarmamento
CTBT	Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares
CTBTO	Comissão Preparatória da Organização do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares
d	Distância percorrida no intervalo do tempo de chegada
dB	Decibéis
DF	Distrito Federal
EUA	Estados Unidos da América
E-W	Leste-Oeste
GO	Goiás
GSE	Grupo de Especialistas Científicos
GTSN	<i>Global Telemetered Seismographic Network</i>
Hz	Hertz
IDC	Centro Internacional de Dados
IG	Instituto de Geociências
IMS	Sistema de Monitoramento Internacional
IS09 ou I09BR	<i>Infrasonic Station 9</i> - Estação Infrassônica 9
kHz	Quilohertz
km	Quilômetro
kT	Quiloton
LANL	<i>Los Alamos National Laboratory</i>
m	Metro
m/s	Metros por segundo
mb	Magnitude de ondas de corpo

MG	Minas Gerais
mHz	Milihertz
mr	Magnitude regional para o Brasil
MT	Megaton
NE-SW	Nordeste-Sudoeste
N-S	Norte-Sul
NVC	Núcleo de Vida Cristã
NW-SE	Noroeste-Sudeste
ON	Observatório Nacional
OSI	Inspeção no Local
PMCC	<i>Progressive Multi-Channel Correlation</i>
PNB	Parque Nacional de Brasília
PPGGAG	Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica
PS07	<i>Seismic Station 7 - Estação Sísmica Primária 7</i>
PTBT	<i>Partial Nuclear-Test-Ban Treaty</i>
R	Distância entre fonte e receptor
Rm	Romanos
RMS	<i>Root Mean Square Error</i>
RN11	<i>Radionuclide Station 11 - Estação de Radionuclídeo 11</i>
RN12	<i>Radionuclide Station 12 - Estação de Radionuclídeo 12</i>
RSBR	Rede Sismográfica Brasileira
SIRGAS 2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas realizado em 2000
SIS	Observatório Sismológico
SNR	Razão Sinal-Ruído
SP	São Paulo
t	Tonelada (ton)
T	Período
t_0	Instante de ocorrência do sismo
TNP	Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares
TNT	Trinitrotolueno
TO	Tocantins
t_p	Tempo de chegada da onda P
t_s	Tempo de chegada da onda S
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UNB	Universidade de Brasília
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTC	Coordenadas Universais de Tempo
UTM	<i>Urchin Traffic Monitor</i>
Y	Rendimento Explosivo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1 Contexto Histórico.....	16
1.2 Objetivo Geral	18
1.3 Objetivos Específicos	18
CAPÍTULO 2 - ONDAS.....	19
2.1 Ondas Sonoras	21
2.2 Ondas Sísmicas.....	23
CAPÍTULO 3 - TECNOLOGIA INFRASSÔNICA.....	25
3.1 Propriedades do Infrassom	25
3.2 Estação infrassônica de Brasília – IS09/I09BR.....	28
CAPÍTULO 4 - TECNOLOGIA SÍSMICA	31
4.1 Propriedades Sísmicas	31
4.1.1 Magnitude.....	32
4.2 Estações Sísmicas Brasileiras	33
CAPÍTULO 5 - BANCO DE DADOS DE INFRASSOM (BDI) DO SIS-UnB	36
CAPÍTULO 6 - ÁREA DE ESTUDO	44
6.1 Contexto Histórico.....	44
6.2 Mineradoras estudadas	46
6.3 Delimitação do campo de estudo.....	48
CAPÍTULO 7 - CÁLCULO DO RENDIMENTO.....	51
7.1 Cálculo do Rendimento pela magnitude.....	51
7.2 Cálculo do Rendimento por parâmetros infrassônicos	52
7.2.1 Período da amplitude máxima	53
7.2.2 Amplitude da pressão do sinal, distâncias do percurso e parâmetros do vento ...	53
7.3 Resultados.....	54

CAPÍTULO 8 - DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO.....	75
ANEXO I – Resposta da Mineradora CMOC Brasil à carta de solicitação	75
APÊNDICE	76
APÊNDICE A - Modelo de carta enviada às mineradoras.....	76

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Contexto Histórico

O envolvimento com armamento bélico é marcado na história humana pelas recentes guerras. As armas nucleares tiveram um grande marco do fim da Segunda Guerra e início da Guerra Fria, dado pelo lançamento de uma bomba nuclear realizado pelos Estados Unidos da América (EUA) sobre a cidade de Hiroshima, no Japão, em 6 de agosto de 1945. Três dias depois, lançaram outra bomba sobre Nagasaki, também no Japão. Com esses acontecimentos, os países do Eixo (Alemanha, Itália e Japão) assinaram uma rendição aos Aliados (França, Inglaterra, EUA e União das Repúblicas Socialistas Soviéticas - URSS), colocando fim oficialmente à Segunda Guerra Mundial em 2 de setembro de 1945. Apesar desses dois lançamentos nucleares realizados pelos EUA serem os mais famosos, não foram os primeiros. Em 16 de julho de 1945, com o experimento nomeado como “Experimento Trinity”, os EUA realizaram o primeiro teste nuclear da história, com uma bomba nuclear de 15 kT no deserto do Novo México.

Nesse contexto de pós-guerra, tanto os EUA quanto a URSS saíram politicamente vitoriosos, tendo lutado juntos no lado dos Aliados. Contudo, após o fim dessa guerra e de seus inimigos em comuns terem sido derrotados, iniciou-se uma disputa pelo poder entre essas duas superpotências mundiais (Enriconi, 2018). A expressão “Guerra Fria” foi criada em 1947 por Bernard Baruch, na condição de conselheiro de Roosevelt (Xavier Jorge, 2020), para caracterizar o período compreendido entre o fim da Segunda Guerra Mundial e o início de um período de uma crescente rivalidade entre os países que possuíam visões políticas e ideológicas distintas. Diferentemente de uma guerra convencional, a Guerra Fria (1945-1991) envolveu embates econômicos, diplomáticos, sociais e principalmente ideológicos, dividindo o mundo em dois grandes blocos sob a influência de ambas as nações. Neste período, diversos países iniciaram seu envolvimento com testes nucleares, e o enfrentamento bélico começou a se tornar algo quase iminente, gerando uma paz mantida pelo medo do conflito.

O Tratado de Proibição Parcial de Testes Nucleares (PTBT - *Partial Nuclear-Test-Ban Treaty*) foi assinado em 5 de agosto de 1963, em Moscou, com o intuito de proibir todos os testes nucleares atmosféricos e subaquáticos. Em 1968, o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP) foi aberto para assinatura com o objetivo de impedir a proliferação de armamentos nucleares (e tecnologias afins), promover a cooperação no uso pacífico da energia nuclear e promover o desarmamento nuclear geral e completo. Contudo, o TNP entrou em vigor

apenas em 1970. Esse tratado foi assinado por 189 países, dentre eles os cinco principais detentores de armamento nuclear.

[...] cientistas de diferentes países realizaram pesquisas conjuntas sobre tecnologias de monitoramento e métodos de análise de dados para a verificação de uma proibição abrangente de testes desde 1976 no chamado Grupo de Especialistas Científicos (GSE). Apenas três décadas depois, no entanto, o clima político estava maduro: em 1994, o órgão de desarmamento das Nações Unidas, a Conferência sobre Desarmamento (CD) em Genebra, iniciou negociações formais sobre o Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBT), que durou até 1996. [...] (CTBTO, 2021).

Com a abertura do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBT) para assinatura em 24 de setembro de 1996, estabeleceu-se uma norma internacional acerca de testes nucleares. Em suma, o CTBT proíbe a realização de qualquer teste nuclear independentemente do ambiente. Para viabilizar a implementação do Tratado CTBT, foi criada a Comissão Preparatória da Organização do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBTO), cujo objetivo é o estabelecimento do regime de verificação do CTBT e a promoção de assinaturas e ratificações do Tratado para que possa entrar em vigor. Esse regime consiste em três pilares fundamentais da organização CTBTO: O Sistema Internacional de Monitoramento (IMS), o Centro Internacional de Dados (IDC) e a Inspeção no Local (OSI). A partir desses pilares é possível detectar e identificar qualquer teste nuclear relevante (acima de 1kT) para o CTBT em qualquer lugar da Terra.

O IMS é um sistema de vigilância de testes nucleares de alcance global que dispõe de quatro tecnologias: Infrassônica, Hidroacústica, Radionuclídeos e Sísmica. Cada tecnologia detecta explosões nucleares de carga em um dos três ambientes possíveis: no meio aquático (hidroacústica), terrestre (sísmica e radionuclídeo, sendo esta uma tecnologia de verificação e não de detecção) e atmosférico (infrassom), além do que, essas tecnologias são sinérgicas, ou seja, mais de uma tecnologia pode contribuir para validação de um evento, como por exemplo uma explosão. Esse sistema consiste em 337 instalações de monitoramento em todo planeta. O Brasil contribui com 3 dessas 4 tecnologias, em um total de 6 estações: 3 estações sísmicas (PS07 - Primária, AS10 e AS11 – Auxiliares), 1 estação infrassônica (IS09) e 2 de radionuclídeos (RN11 e RN12 - essa ainda não está em operação).

O objetivo principal da rede de infrassom do IMS é o monitoramento de explosões nucleares atmosféricas, embora essa rede também possa contribuir para o monitoramento de explosões submarinas próximas à superfície e explosões subterrâneas rasas. A tecnologia infrassônica realiza a detecção de pequenas variações da pressão do ar cujo alcance pode ser de

centenas de quilômetros. É apropriada, principalmente, para a detecção e registro de explosões nucleares atmosféricas, pois geram perturbações acústicas. Entretanto, outros fenômenos naturais e artificiais também podem produzir sinais infrassônicos, como terremotos, erupções vulcânicas, explosões químicas e bólidos.

1.2 Objetivo Geral

Analisar os eventos detectados pelas estações sísmica PS07 e infrassônica IS09, gerados por explosões químicas, de forma a extrair os seguintes parâmetros: conteúdo de frequência; amplitude de pressão; distância entre a localização do evento e os receptores e magnitude, com vistas à determinação de seus respectivos rendimentos equivalentes em TNT.

1.3 Objetivos Específicos

- Selecionar no Banco de Dados de Infrassom (BDI) do SIS/UnB eventos com as seguintes características:
 - i) Eventos detectados por ambas as estações, sísmica primária (PS07) e infrassônica (IS09);
 - ii) Separar os eventos de acordo com a fase registrada, se infrassônica ou sísmica;
 - iii) Analisar os dados para extração dos parâmetros característicos do rendimento;
- Estimar a potência equivalente (rendimento) em trinitrotolueno (TNT) de um conjunto de detonações representativas, realizadas por mineradoras existentes nas vizinhanças de Brasília e registradas pelas estações sísmica PS07 e infrassônica IS09.

CAPÍTULO 2 - ONDAS

As ondas constituem um dos principais campos de estudo da física e possuem grande importância econômica (Halliday, 2016), abrangendo desde o campo musical a vastas pesquisas de diferentes ciências. As ondas podem se propagar em meios sólidos, líquidos, gasosos e no vácuo, e são divididas em dois grupos principais: ondas eletromagnéticas e ondas mecânicas (Silva, 2021).

As ondas eletromagnéticas são caracterizadas pela combinação do campo elétrico e do campo magnético e possuem a particularidade de não precisarem de um meio para se irradiar. Vibram perpendicularmente à sua direção de propagação, como ocorre com a propagação da luz, raio x, microondas e, ondas de rádio, ou seja, o espectro eletromagnético, conforme descrito por James Maxwell em função do comprimento de onda (λ).

Ondas mecânicas são perturbações que se propagam através de um meio material, e à medida que se propagam, as partículas que constituem o meio sofrem deslocamentos de diversas espécies, dependendo da natureza da onda (Young & Freedman, 2008).

As ondas podem se propagar de duas formas: perpendiculares à direção de propagação da onda e longitudinais, quando as partículas do meio oscilam para frente e para trás na mesma direção de propagação da onda. Essas duas formas de propagação podem ainda ocorrer de forma simultânea.

Os meios de propagação de sons podem ocorrer em distintas camadas, caracterizadas por um valor diferente de impedância acústica, que ao atingir uma interface, a onda acústica sofre alterações, tais como: difração, difusão, reflexão, refração ou absorção. Na Figura 1, observa-se a perturbação que a onda sofre ao atingir uma interface.

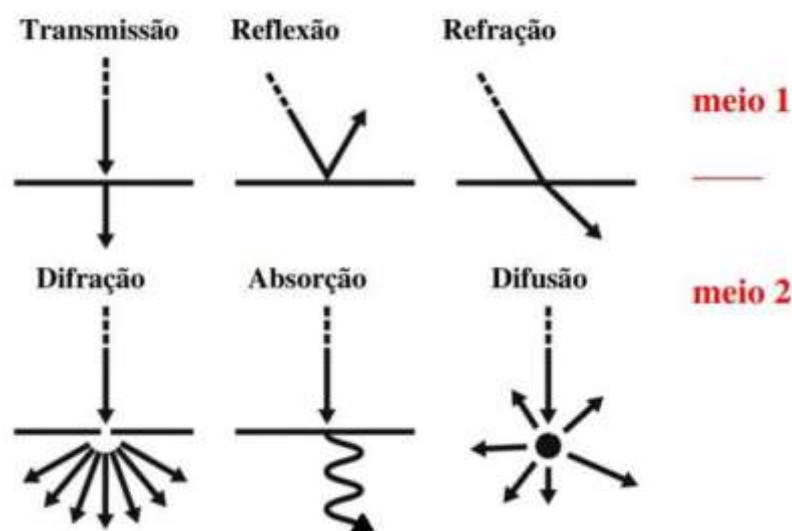


Figura 1 - Tipos de propagações de ondas (Oliveira & Ianniruberto, 2019).

As perturbações mecânicas se propagam com uma velocidade definida através do meio, sendo assim, uma onda mecânica, como são os casos do som e da onda sísmica, necessita de um meio para se propagar, não se deslocando no vácuo (Young & Freedman, 2008). Além disso, sua velocidade depende fundamentalmente do estado físico do meio, sendo a velocidade diretamente proporcional à proximidade entre as moléculas do meio. A temperatura também é um fator determinante na velocidade de propagação de ondas, a relação entre ambas é diretamente proporcional. Na Tabela 1, observa-se as variações da velocidade do som em meios distintos.

Tabela 1 - Velocidades do som em meios distintos.

MEIO	TEMPERATURA (°C)	VELOCIDADE (m/s)	REFERÊNCIAS
Água	20	1482	Halliday, 2016; Mendes, 2020; Young & Freedman, 2008
Água Salgada	20	1522	Halliday, 2016; Mendes, 2020;
Ar	20	344	Halliday, 2016; Silva et. al., 2003; Beyer, 1998; Young & Freedman, 2008
Gelo	0	1402	Halliday, 2016; Young & Freedman, 2008
Rochas graníticas	-	5500-6000	Azevedo & Marques, 2006; Rezende et. al., 2018
Rochas Metamórficas	-	3500-7000	Pirchner, 2001
Rochas Sedimentares	-	6000-7000	Azevedo & Marques, 2006; Rezende et. al., 2018

Nessa pesquisa utilizaremos dois tipos de ondas mecânicas: ondas sonoras e ondas sísmicas.

2.1 Ondas Sonoras

As ondas sonoras são ondas elásticas longitudinais que se propagam em um meio gasoso líquido ou sólido, e suas características podem ser observadas através de seu espectro com, três características: altura, intensidade e timbre. A altura está relacionada com a frequência do som: alta (sons agudos) ou baixa (sons graves). A intensidade acústica é compreendida pela capacidade do transporte da quantidade de energia sonora por unidade de tempo, dada pela potência da fonte emissora, e encontra-se num intervalo de 0 a 120 dB (intervalo captado pelo aparelho auditivo humano). E o timbre é caracterizado pelo formato das oscilações.

As ondas sonoras englobam uma ampla faixa de frequências, genericamente dividida em 3 partes. A primeira parte compreende o intervalo de 20 a 20.000 Hz (frequência audível ao seres humanos), sendo que frequências inferiores ou superiores à esses valores são inaudíveis. A segunda divisão abarca sons com baixas frequências, de 0,001 a 20 Hz, e são conhecidos como infrassom. Por fim, a divisão de sons superiores à 20.000 Hz denominados como ultrassons. Apesar de não serem escutados por humanos, alguns animais conseguem perceber sons infrassônicos e ultrassônicos.

Na Figura 2 observa-se o espectro de frequências do infrassom, o intervalo de frequências auditivas para seres humanos e a banda do ultrassom. No eixo X, a frequência em Hertz (Hz), e no eixo Y, a intensidade em decibéis (dB), unidade utilizada para expressar a intensidade do volume do som. A intensidade é medida em escala logarítmica, mais apropriada para sua quantificação, pois descreve fenômenos cujas medições são muito grandes, ínfimas, ou mesmo situadas em intervalos com uma amplitude acentuada.

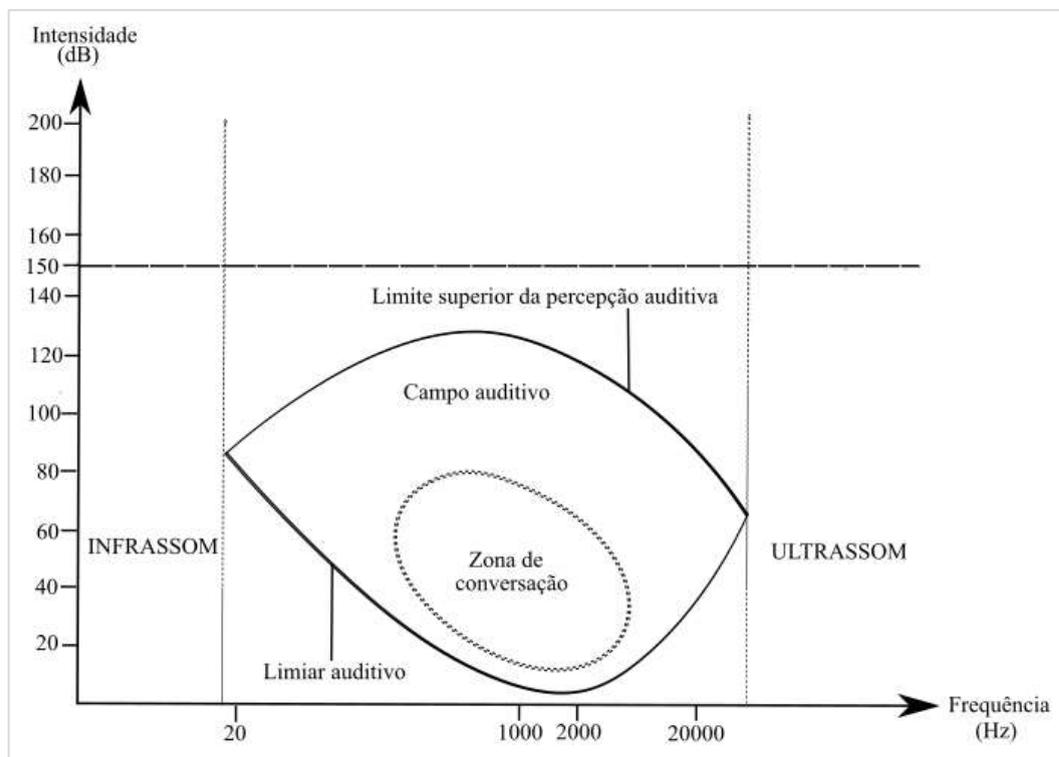


Figura 2 - Espectro de frequência do som com a divisão em infrassom, frequências audíveis e ultrassom (adaptada de Pujol & Trigueiros-Cunha, 2018).

A curva inferior representa os limiares auditivos nas diferentes frequências de um ouvido humano saudável, sendo que, para cada frequência, o limiar auditivo é diferente: as frequências que o ouvido humano melhor discrimina (a curva aproxima-se do eixo X) situam-se, em média, entre 1 a 3 kHz. É também nesta banda de frequências que o campo dinâmico auditivo é maior (0 a 130 dB). A curva superior representa o limiar de desconforto, acima desse nível surge desconforto e/ou dor, e pode haver destruição das células do ouvido interno (Pujol & Trigueiros-Cunha, 2018).

A intensidade de 130 dB é a intensidade acústica mais forte suportada pelo ouvido humano, acima desse nível torna-se nocivo. Se uma pessoa ouve um barulho de 155 dB a 500 m de distância, sentirá dor, tremor no corpo inteiro, visão embaralhada e dificuldade em respirar, além dos tímpanos serem totalmente prejudicados (Geremias, 2014). Um caso bem conhecido foi a erupção do vulcão Krakatoa, em 27 de Agosto de 1883, na província de Lampung, na Indonésia, em que foi percebido em todos os continentes. Teve uma equivalência de rendimento de 200 MT de TNT (BBC News, 2020), gerando uma intensidade de aproximadamente 172 dB, indicado pelos registros barométricos da época (Versignassi, 2019).

Para quem estava mais próximo, a experiência foi bem mais intensa, claro. “As explosões foram de tal violência que estourou os tímpanos de

metade da minha tripulação. Só conseguia pensar na minha esposa: achei que fosse o dia do Juízo Final”, escreveu o capitão do navio britânico Norham Castle, que navegava a 70 quilômetros do Krakatoa na hora da erupção (Versignassi, 2019).

2.2 Ondas Sísmicas

As ondas sísmicas são ondas elásticas que se propagam na superfície e subsuperfície terrestre, tanto em meios sólidos como nos fluidos. Contudo, a propagação nos fluidos se distingue dos sólidos, pois, quando em equilíbrio mecânico, não aceitam a presença de forças agindo de forma paralela à superfície. A velocidade de propagação das ondas sísmicas dependem das propriedades elásticas do meio, visto que as forças que executam a deformação do material dependem das constantes elásticas do meio (Teixeira et. al., 2000; Menegat et al., 2012; Kearey et al., 2009). As velocidades aumentam com a rigidez do material e diminuem com a densidade, e não dependem da frequência (Santos, 2021).

As ondas sísmicas podem ser classificadas em ondas de corpo ou internas e de superfície. As internas são aquelas que se deslocam no interior da Terra, e são subdivididas em ondas P e ondas S. As ondas de superfície são aquelas que se propagam junto à superfície, e são subdivididas em ondas Rayleigh e ondas Love (Teixeira et. al., 2000; Menegat et al., 2012). A Figura 3 mostra os tipos de movimentação de partículas para as ondas sísmicas internas e de superfície.

As ondas P (primeiras ou primárias) são ondas longitudinais e de compressão. Possuem uma velocidade de propagação maior e, conseqüentemente, são registradas primeiro. Se assemelham às ondas sonoras viajando em qualquer meio, balançando o chão na direção da propagação, provocando uma expansão devido a passagem da onda. As ondas S (segundas ou secundárias) são ondas transversais e de cisalhamento. Possuem uma velocidade de propagação com cerca de 60-70% da velocidade da onda P. Conseqüentemente, é registrada posteriormente. A vibração é no sentido perpendicular em direção da propagação, ou seja, de um lado a outro. Contudo, não atravessa o meio líquido, já que não suporta as forças de cisalhamento. A razão entre a velocidade média das ondas P e S é de certa forma constante, sendo possível saber a distância entre a estação de registro (até 200 km) e o epicentro do sismo, através da multiplicação da diferença entre o tempo de chegada das ondas primárias e secundárias e multiplicá-la por 8 (Veloso, 2012).

As ondas superficiais se propagam junto à superfície terrestre e são caracterizadas por grandes amplitudes e longos períodos, sendo que suas amplitudes de vibrações decrescem com a profundidade (Kearey et al., 2009). A onda Rayleigh é a mais lenta das ondas sísmicas, com

velocidade de 1 a 5km/s, e é resultado da combinação das ondas internas, em que cada partícula oscila em movimento elíptico. Essa é a onda mais perceptível durante um terremoto, pois o terreno vibra para cima, para baixo e para os dois lados praticamente ao mesmo tempo. A onda Love é uma onda transversal que faz a superfície vibrar na direção horizontal, mas perpendicular à direção em que trafega, e é constituída pela interação da onda secundária com a superfície do terreno. A velocidade depende do seu período, variando entre 2 a 6 km/s.

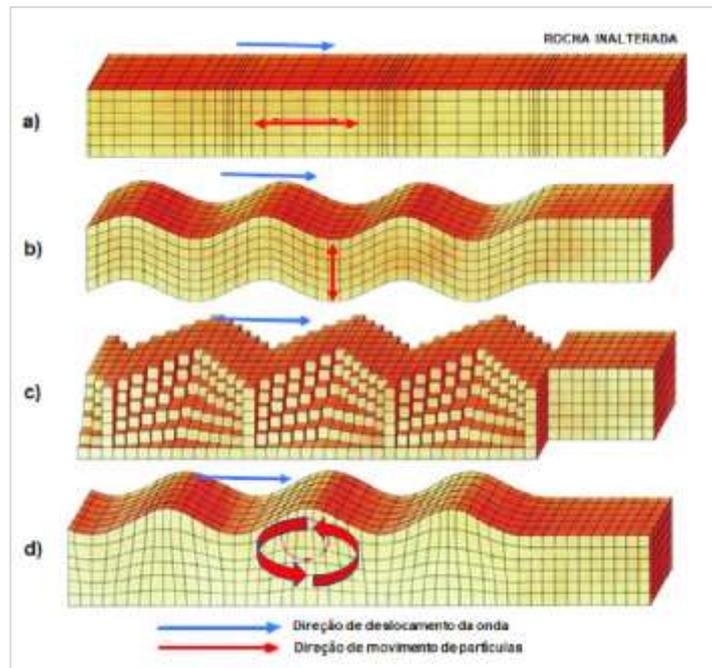


Figura 3 - Tipos de onda sísmica. a) Onda P. b) Onda S. c) Onda Love. d) Onda Rayleigh. (Barbieri et. al., 2019).

A maior parte da energia liberada por um terremoto é dispendida para deformar novas rochas e parte é dissipada na forma de calor. Aproximadamente, 10% se propagam como ondas sísmicas, viajando por grandes distâncias até se atenuarem por completo. Se essa não fosse a proporção na distribuição da energia estocada nas rochas, os terremotos seriam mais poderosos e mais destruidores (Veloso, 2012).

CAPÍTULO 3 - TECNOLOGIA INFRASSÔNICA

3.1 Propriedades do Infrassom

O infrassom caracteriza-se pela variação da pressão atmosférica, com banda de frequência de 1mHz a 20Hz. Possui altos comprimentos de onda que variam entre 17 m a 30 km (Le Pichon et al., 2009). Portanto, se propaga por longas distâncias com baixa atenuação.

Na atmosfera, a propagação das ondas infrassônicas é influenciada principalmente pela direção e velocidade do vento e pela temperatura. Normalmente, a temperatura diminui com a altitude na baixa atmosfera, e as ondas infrassônicas produzidas perto do solo se propagam para cima. Elas podem então ser refratadas de volta ao solo se a velocidade efetiva do som se tornar maior do que seu valor na superfície, e isso pode ser explicado pela Lei de Snell (1) (Pereira, 1998). A variação do ângulo do raio incidente, ao passar para um meio com velocidade diferente, pode gerar, principalmente, reflexão e refração, como mostra a Figura 4, onde (i) é o ângulo de incidência, (r) é o ângulo de refração, V_1 é a velocidade no meio 1 e V_2 é a velocidade no meio 2.

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

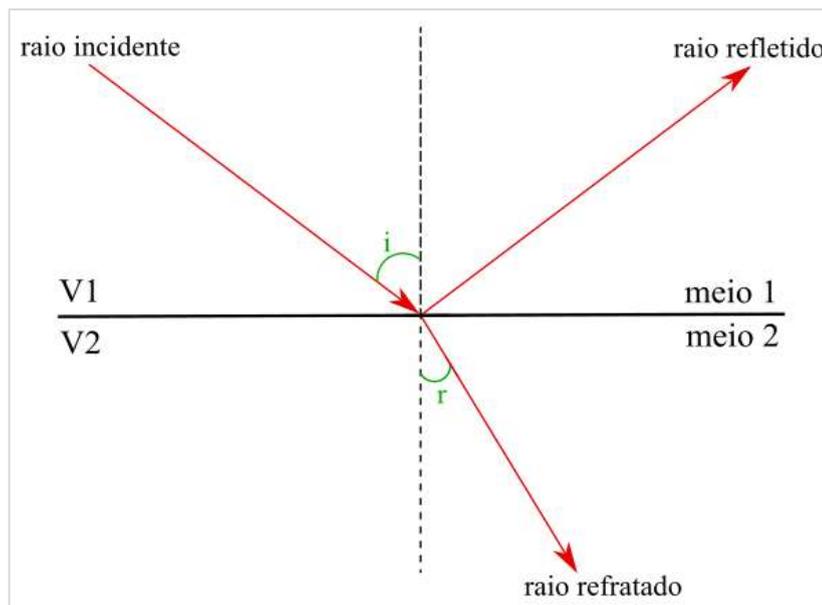


Figura 4 - Propagação de onda de acordo com a Lei de Snell.

As ondas de baixa frequência na atmosfera com uma velocidade menor do que a velocidade do som são conhecidas como ondas de gravidade ou ondas gravitacionais e normalmente viajam com a velocidade do vento, entre 1 a 10 m/s. Já as ondas de choque viajam

mais rápido do que o som. Com a dissipação da energia das ondas de choque, uma onda acústica linear se perpetuará se houver energia suficiente disponível. As flutuações de pressão das ondas sonoras são, em geral, pequenas em relação a pressão ambiente (Le Pichon et al., 2009).

A rede de estações infrassônicas do IMS, pertencente à CTBTO, dedica-se ao monitoramento atmosférico para detecção e localização de explosões nucleares. O sinal analógico (ondas sonoras) pode ser convertido em sinais digitais, com registro de data e hora e assinados (gravados) digitalmente. Sinais infrassônicos também podem ser gerados por fortes fontes subterrâneas ou subaquáticas quando as ondas geradas se conectam à atmosfera (Arrowsmith et al., 2017). As 60 estações de infrassom da rede IMS (Figura 5) são capazes de detectar ondas sonoras de baixa frequência (0,001 a 16 Hz), emitidas por fontes naturais e/ou artificiais, que podem se propagar pela atmosfera e percorrer milhares de quilômetros, visto que, sofrem baixa atenuação (Barros et al., 2020). Devido a essas características a tecnologia infrassônica é propícia para a detecção de testes nucleares atmosféricos realizados a longas distâncias (Le Pichon et al., 2009). Também apresenta sinergia com as outras tecnologias do IMS (Barros et al., 2020). A única estação infrassônica brasileira está localizada em Brasília-DF e é identificada pelo código de I09BR.

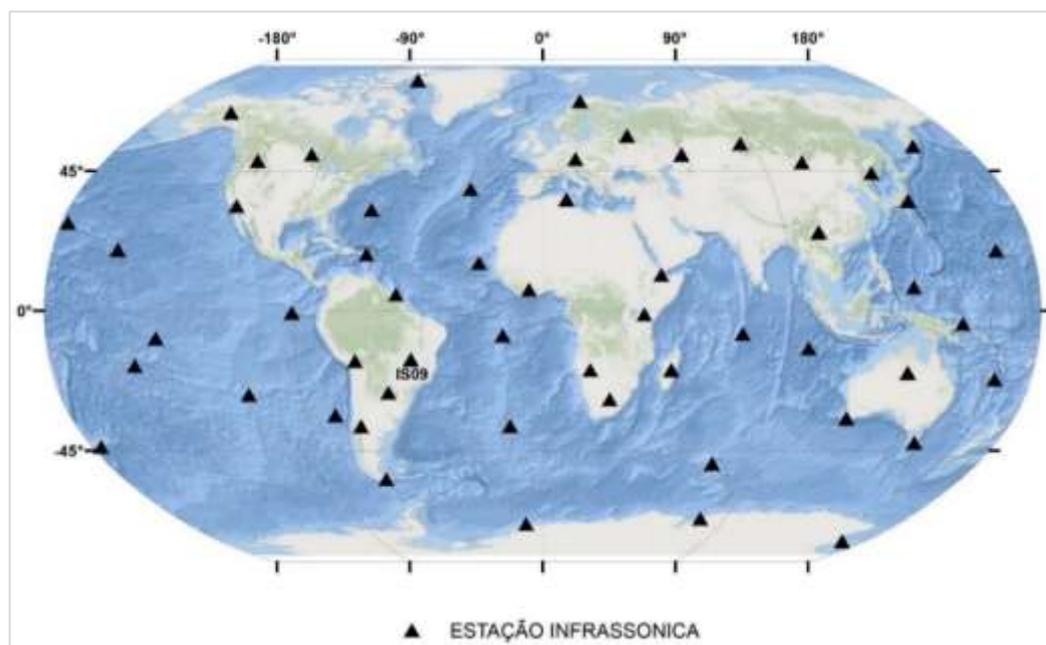


Figura 5 - Localização das 60 estações da Rede Infrassônica do IMS.

Os registros das variações de pressão podem ser contaminados por ruídos causados, principalmente, por fontes típicas, como ventos (sinais de frequências inferiores a 1Hz), zonas de *surf* (ressaca) (Garcés et al., 2004), trovoadas e chuvas (Few 1970; Lin & Langston, 2007;

Georges, 1973; Bedard, 1998), deslizamentos de terra e avalanches (Bedard, 1988, 1993; Arnoult et al. 2005), tornados (Bedard et al. 1988, 1993), cachoeiras (Bedard, 1988), quedas d'água em barragens, aeronaves (pousos e decolagens), aviões supersônicos (Donn, 1978; Liszka & Waldemark, 1995), trens de carga, minas (locais e distantes) (Hagerty et al., 2002), artilharia, meteoritos (ReVelle, 1976), auroras (Wilson, 1971), fogos de artifício, lançamento e/ou reentrada de foguete (Balachandran & Donn, 1971; Greene and Bedard, 1986; Cotten et al., 1971; Garcés et al., 2004), bólidos, rachaduras no gelo, atividades industriais (Liszka, 1974), queimadas em florestas (Bedard, 1988), explosões acidentais (Donn & Shaw, 1967; Reed, 1969; Mutschlecner et al., 1999; Posey & Pierce, 1971; Whitaker, 2007, 2008), erupções vulcânicas (Donn & Balachandran, 1981), terremotos (Le Pichon et al., 2003; Mutschlecner & Whitaker, 2005; Young & Greene, 1982), outras explosões químicas (Reed, 1987; Davidson & Whitaker, 1992; Grover, 1968; Evers et al., 2007), entre outras, produzindo sinais com frequência acima de 1 Hz. Esses ruídos também são causados pela complexidade e pela dinâmica do meio de propagação das ondas, visto que, a depender das condições atmosféricas, a mesma fonte pode gerar múltiplas chegadas, uma chegada ou nenhuma chegada na mesma estação, corroborando assim, a importância de uma rede global de estações espalhadas pelo planeta. As fontes recorrentes de infrassom podem aumentar o nível de ruído na faixa de frequência do IMS (0,02 Hz a 4 Hz) e reduzir a capacidade de detecção da estação. Isso ocorre principalmente devido aos microbaroms, que produzem uma ou várias proeminências no espectro de infrassom na banda de 0,1 a 0,5 Hz, fornecendo algumas evidências adicionais sobre o modo de propagação, se estratosférico ou termosféricos (Le Pichon et al., 2009; Donn & Rind, 1972). Os microbaroms podem ser detectados em toda a Terra e são produzidos pela interação das ondas não lineares na superfície dos oceanos que se propagam em direções distintas (Waxler & Gilbert, 2006). Apesar dos microbaroms atuarem como fontes ruidosas contínuas, podem ser usados como forma de avaliar o desempenho de uma estação.

Os modelos de capacidade de detecção de rede confirmaram que qualquer teste nuclear com rendimento acima de 1kT (quiloton) equivalente em TNT pode ser detectado a qualquer momento por no mínimo duas estações de infrassom do IMS, e em alguns casos, esse limite é inferior a 1kT. Os resultados da modelagem mostraram que a capacidade de detecção da rede infrassônica do IMS pode se aproximar desse limite em certos períodos de tempo, quando a velocidade do vento estratosférico desaparece em certas áreas da Terra (Le Pichon et al., 2009).

O uso de infrassom para detecção (data e horário) e localização remota (latitude, longitude e profundidade ou altitude) de eventos requer alta qualidade de modelos atmosféricos

temporais e espaciais, bem como eventos infrassônicos gerados pelos chamados eventos *Ground Truth* (GT), para os quais a hora e o local de ocorrência são conhecidos com precisão. Esses eventos GT's são necessários para avaliar modelos atmosféricos e o desempenho de redes infrassônicas (Gibbons et al., 2019). Assim, microssismos e microbaroms não são considerados eventos GT, tanto devido à grande extensão espacial da fonte, devido à sua natureza contínua. Já explosões em pedreiras ou fontes vulcânicas podem ser caracterizados como tais.

3.2 Estação infrassônica de Brasília – IS09/I09BR

A estação infrassônica de Brasília (IS09 ou I09BR) está localizada no interior do Parque Nacional de Brasília (Figura 6) e é operada sob a coordenação do SIS-UnB em parceria com a CTBTO. A escolha do local de instalação da estação se deu devido a vegetação existente, que auxilia na filtragem de ruído, e também por ser uma área de proteção ambiental.

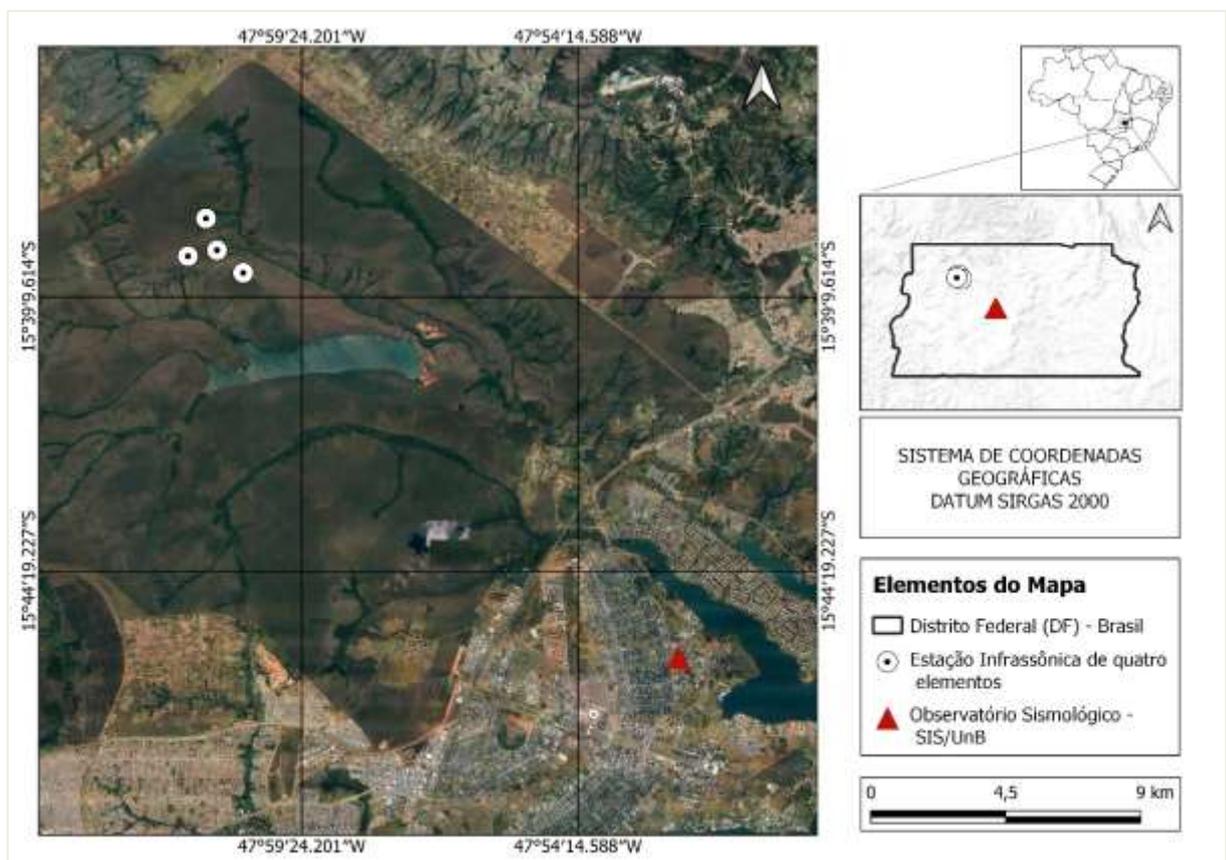


Figura 6 - Localização da estação infrassônica de Brasília I09BR no interior do Parque Nacional de Brasília. Os círculos denotam cada elemento do arranjo infrassônico. O triângulo indica a localização do Observatório Sismológico no campus da UnB, onde os dados são recebidos, gravados, analisados e retransmitidos para o IDC em Viena - Áustria.

De acordo com Barros & Fontenele (2002), a estação entrou em operação rotineira em julho de 2001 e é constituída por um arranjo de quatro elementos, cada um ocupando um dos

vértices de um triângulo equilátero e outro localizado no centro do triângulo (Figura 7). Os equipamentos são alimentados por um sistema fotovoltaico (painéis solares, baterias e reguladores de carga). Cada elemento é composto por um microbarômetro, um digitalizador, um sistema redutor de ruído e um sistema de transmissão, sendo que no elemento central existe também uma estação meteorológica, que auxilia nas verificações das condições atmosféricas (Neri, 2019).

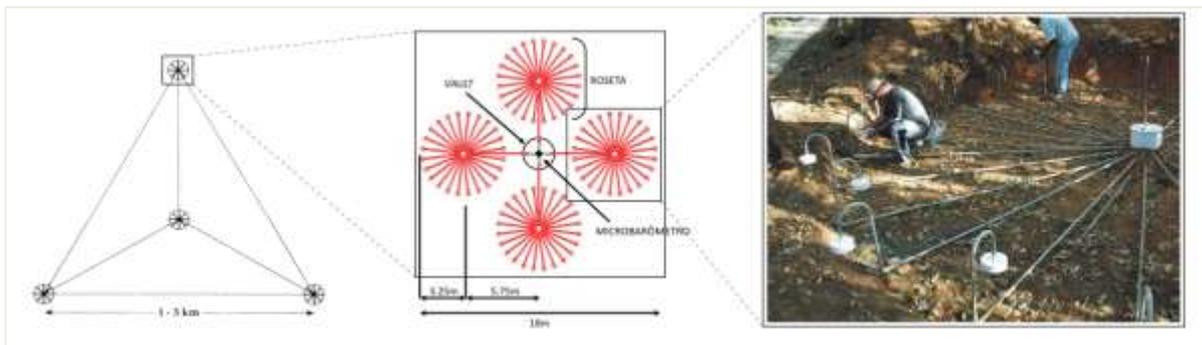


Figura 7 - Estação I09BR de Brasília configurada na forma de um arranjo de quatro elementos, sendo que cada elemento do arranjo ocupa um dos vértices de um triângulo equilátero e um elemento no centro (adaptada de Neri, 2019; Barros, 2000). À esquerda, o sistema de redução de ruído – filtro mecânico.

Os sinais adquiridos em cada elemento da estação são transmitidos para o prédio do SIS-UnB utilizando um sistema de transmissão via rádio digital (Figura 8a). Após a recepção e registro, os dados são analisados, gravados e retransmitidos via satélite para o IDC, localizado em Viena - Áustria (Barros et al., 2020).

O SIS-UnB é responsável pela operação, manutenção e análise dos dados da estação. Além das atividades de ensino e de pesquisa, atua no monitoramento sismológico de reservatórios de usinas hidrelétricas, que foram em passado recente os maiores contribuidores para o monitoramento da sismicidade brasileira. O seu prédio sede (Figura 8b) ocupa uma área de mais 1.200 m², dividida em prédio administrativo, laboratórios de análise de dados, de computação, oficina eletrônica, mostra sismológica (museu), mini-auditório, biblioteca, sala de registradores sismográficos e salas individuais para professores e equipe técnica (Observatório Sismológico, 2019).

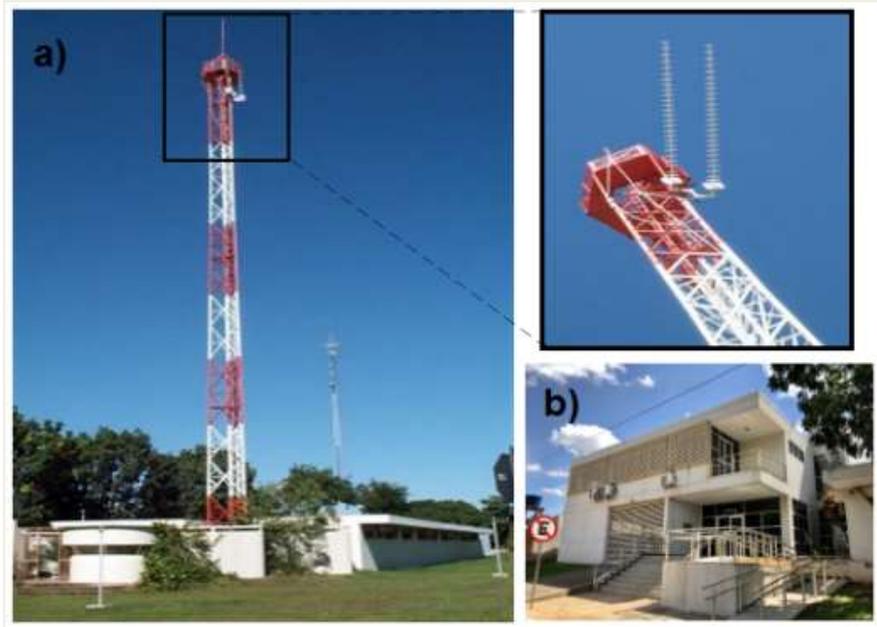


Figura 8 - (a) Prédio do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, onde se observa a torre para recepção dos dados da estação IS09. (b) Entrada principal do SIS-UnB.

CAPÍTULO 4 - TECNOLOGIA SÍSMICA

4.1 Propriedades Sísmicas

Os eventos sísmicos são caracterizados pela variação de movimento das partículas da subsuperfície, devido às propriedades elásticas do meio em questão: densidade, profundidade e pela própria morfologia das descontinuidades (fissuras e fraturas). Sendo que, a partir de certa distância, a amplitude da onda tende a um limite em que a deformação do meio se torne elástica, permitindo a passagem de ondas sísmicas, com isso, entende-se que a amplitude da perturbação gerada por uma onda sísmica decresce com o inverso da distância da fonte (Molina, 2021).

As vibrações sísmicas produzidas na fonte de um terremoto ou explosão se propagam em todas as direções na forma de ondas elásticas. Através de um distúrbio gerado num certo tempo em uma determinada posição, resulta num pulso que se irá se propagar de forma homogênea por todo o volume do material. O encontro de todos os pulsos ocorre na superfície, em um mesmo estado de vibração, denominado como frente de onda, e o raio sísmico é caracterizado pelo segmento que liga, na direção perpendicular, a origem às frentes de ondas.

De acordo com o princípio de Huygens, todo ponto de uma frente de onda primária (origem na fonte) pode ser considerado como uma nova fonte, secundária, também emissora de onda no volume esférico. E depois de certo tempo, as frentes de ondas secundárias são tangenciadas por uma nova frente de onda primária (Pirchner, 2001).

As frentes de onda se propagam com diferentes velocidades a depender das propriedades elásticas do meio. A partir da liberação de energia da ruptura no hipocentro, as ondas são projetadas verticalmente na superfície (epicentro) e são disseminadas radialmente, com uma velocidade que pode ser obtida a partir do instante de ocorrência do sismo (t_0), tempo de chegada da onda P (t_p) à estação (2), tempo de chegada da onda S (t_s) à estação (3) e pela distância percorrida nesse intervalo (d). E pode ser calculada como:

$$t_p = t_0 + \frac{d}{V_p} \quad (2)$$

$$t_s = t_0 + \frac{d}{V_s} \quad (3)$$

Como as distâncias percorridas pelas ondas P e S são iguais, isolando d em (2) e (3) é possível determinar a distância epicentral do evento (d), equação 4. A localização do epicentro é feita conhecendo-se d para no mínimo três estações.

$$d = \frac{(t_s - t_p) \cdot V_p}{\frac{V_p}{V_s} - 1} \quad (4)$$

Dai percebe-se a importância das múltiplas estações sísmicas espalhadas nacional e internacionalmente. No Brasil, de acordo com a Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), existem 93 estações sísmográficas para o monitoramento contínuo. A rede de estações sísmicas do IMS consiste de 170 estações sísmicas (50 primárias e 120 auxiliares), conforme mostra a Figura 9. Essas estações são divididas entre estações sísmicas primárias (50) e estações sísmicas auxiliares (120), em que a diferença entre ambas se dá pela transmissão para o IDC, sendo uma em tempo real e outra apenas quando solicitada, respectivamente.

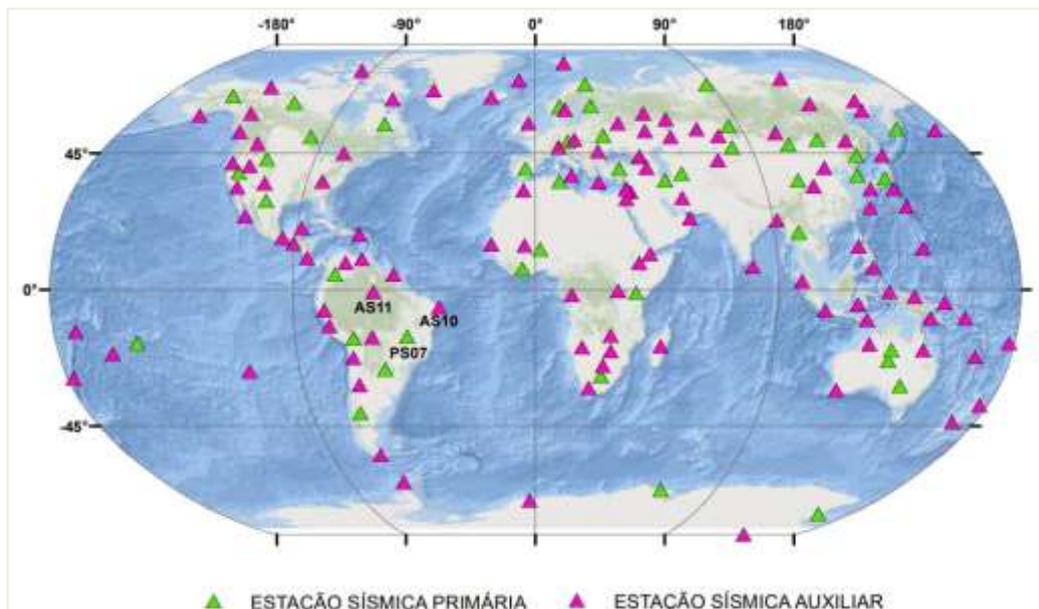


Figura 9 - Estações sísmicas pertencentes ao IMS – CTBTO. As estações sísmicas brasileiras estão destacadas no mapa, uma estação sísmica primária (PS07) e duas estações sísmicas auxiliares (AS10 e AS11).

Os registros sísmicos são realizados através de um sismógrafo, responsável pela captação e registro do movimentos do chão. No sismógrafo são gerados sismogramas que representam uma radiografia do movimento do chão no local do sensor. Adicionalmente ao movimento do chão, são gravadas informações de tempo preciso para leitura dos tempos de chegada das diferentes fases sísmicas à estação. A partir dessas leituras são determinados os tempos de origem dos eventos e suas respectivas localizações hipocentrais.

4.1.1 Magnitude

Visando melhor caracterizar os terremotos quanto aos seus tamanhos, Charles Richter

desenvolveu uma escala de magnitude, particularmente para estudar os terremotos do sul da Califórnia. Depois de Richter, muitas outras escalas foram determinadas, todas com o objetivo de avaliar a quantidade de energia liberada por um terremoto.

Uma outra escala importante em Sismologia, é a escala de intensidade, que avalia os efeitos dos terremotos em cada local por onde as ondas sísmicas vão passando. Uma das mais conhecidas é a Escala de Mercalli Modificada, com 12 graus de intensidade (I - não sentido por pessoas; II - limiar de percepção, algumas pessoas sentem, a depender de suas posições; ...; XII - equivale a destruição generalizada) (Appleton, 2008; Derbli, 2010).

A Escala de intensidade é uma escala subjetiva, pois está associada aos efeitos, percebidos pelas pessoas, causados pelos terremotos, mas com percepções individuais diferentes. Já a Escala Richter é uma escala quantitativa, pois mede quantitativamente os tamanhos dos terremotos, que são avaliados pelas amplitudes geradas pela liberação de energia sísmica, registradas pelos sismográficos. Segundo Assumpção (1983), é possível relacionar as amplitudes máximas registradas (A) com o trem de ondas P nas faixas de período (T) de 0,1 a 1s e a distância entre fonte e receptor (R , sendo $200 \leq R \leq 1500\text{km}$). Através da curva empírica de amplitude-distância para terremotos registrados em distâncias regionais no Brasil, foi determinada uma escala de magnitude regional para o Brasil (m_r), equivalente à escala de magnitude de ondas de corpo (m_b)(5):

$$m_r = \log \frac{A}{T} + 2,3 \log R - 2,228 \quad (5)$$

Onde A/T representa a velocidade de partículas na estação, dada em micrômetro de zero a pico. A escala de magnitude é uma escala aberta, pois não tem limites, nem inferior e nem superior, podendo apresentar números negativos (magnitudes negativas). Entretanto, por questões físicas esta escala tem limites. O maior terremoto já registrado teve magnitude 9,5.

4.2 Estações Sísmicas Brasileiras

O Brasil dispõe de 93 estações sísmicas operadas e mantidas por quatro instituições, pelo Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (UnB), pelo Laboratório de Sismologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), pelo Centro Sismológico da Universidade de São Paulo (USP) e Observatório Nacional (ON), conforme mostra a Figura 10.

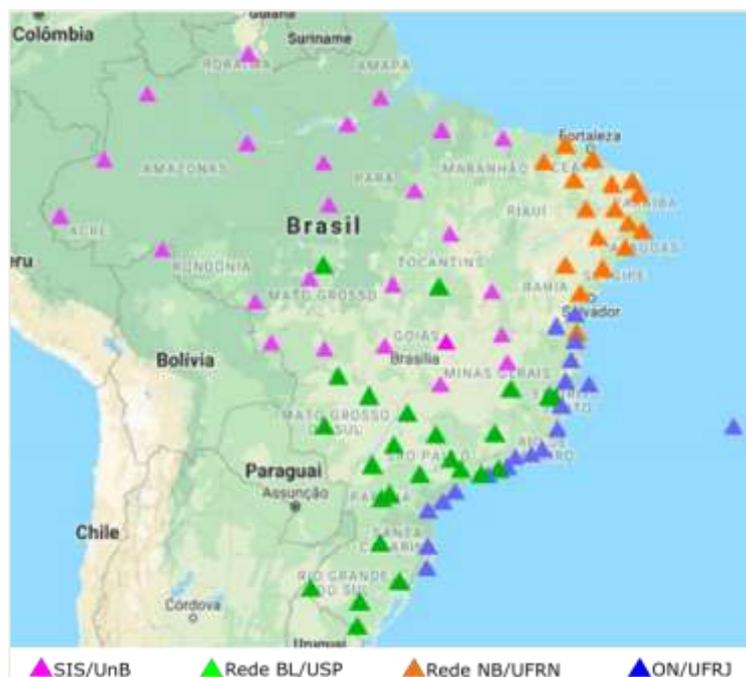


Figura 10 - Estações da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) (<http://rsbr.gov.br/>).

A estação sísmica de Brasília (BDFB) foi instalada em 1993 por meio de uma parceria entre o SIS/UnB e o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS - *United States Geological Survey*), no âmbito projeto da Rede Sismográfica Telemétrica Global (GTSN - *Global Telemetered Seismographic Network*). De acordo com Veloso & Carvalho (1993) e Barros et. al. (2020), o objetivo desse projeto era melhorar o monitoramento dos sismos no hemisfério sul, através da instalação de 8 estações com transmissão de dados em tempo real, sendo capaz de estabelecer uma cobertura mais eficiente no monitoramento sísmico da Terra.

Com o CTBT, a estação BDFB passou por uma modernização e foi adicionada às estações do IMS. Por isso, a estação sísmica de Brasília é conhecida pelo código PS07 (referente ao CTBT) e também BDFB (referente ao projeto da GTSN). A estação PS07 e IS09 estão instaladas no interior do Parque Nacional de Brasília (Figura 11) e são operadas sob a coordenação do SIS – UnB em parceria com a CTBTO. A escolha do local se deve pelo mesmo motivo da IS09.

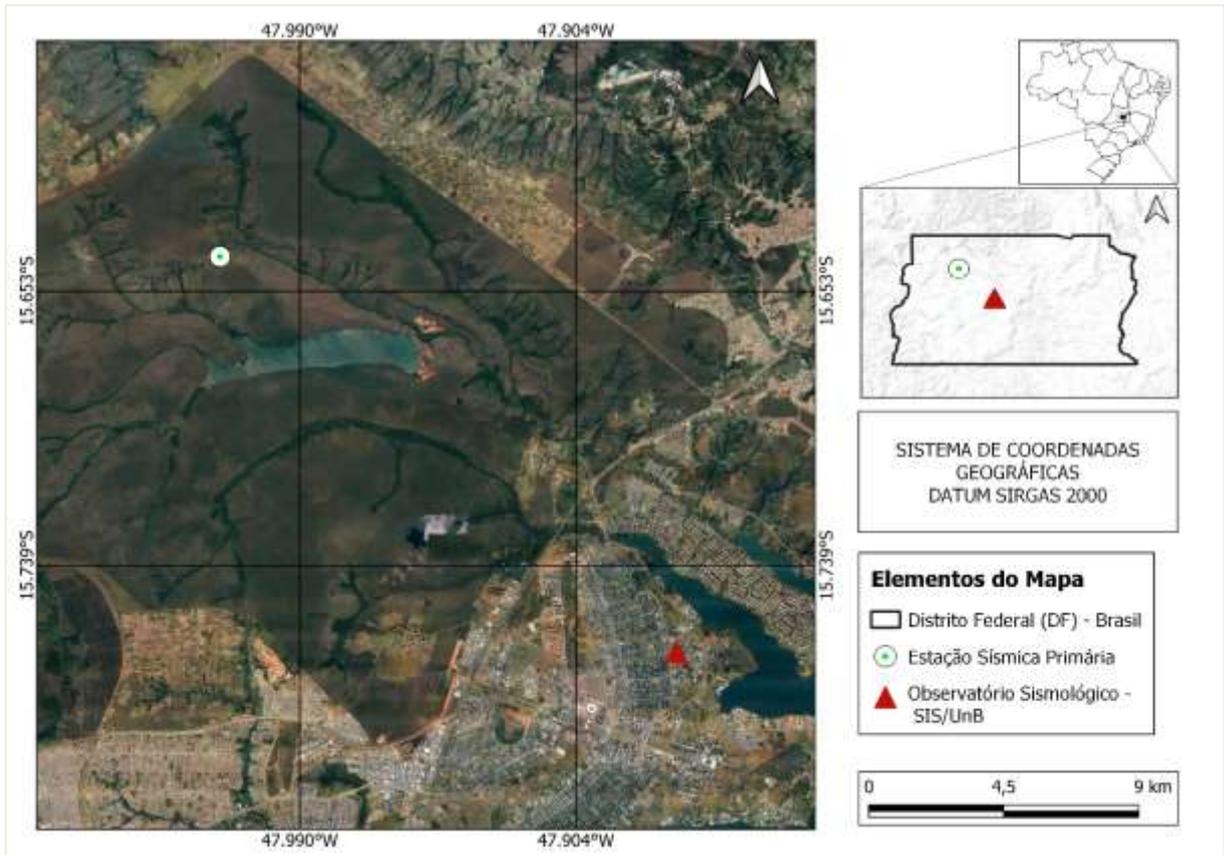


Figura 11 - Localização da estação sísmica PS07 no interior do Parque Nacional de Brasília (PNB). O círculo representa o local da estação e o triângulo indica a localização do Observatório Sísmológico no campus da UnB, onde os dados são recebidos, gravados e analisados.

CAPÍTULO 5 - BANCO DE DADOS DE INFRASSOM (BDI) DO SIS-UnB

Devido a grande quantidade de dados para processamento, métodos automatizados são necessários para que o dado seja processado de forma eficiente. Diferentes técnicas foram desenvolvidas para leitura e processamento dos dados. No SIS/UnB, a análise sísmológica é realizada com o *software SeisComP3*, em que se pode extrair informações como: data e horário de chegada do evento; latitude e longitude do local de ocorrência do evento; magnitude na escala Richter (mR); distância do evento até a estação de registro; tempo de chegada calculado; azimute.

O arranjo infrassônico de 4 elementos é, responsável pela transformação da variação de pressão do ar em sinais infrassônicos. Grandes fontes sísmicas também geram infrassom observável na atmosfera (Assink et al., 2018). Assim como nos dados sísmicos, a grande quantidade de dados inviabiliza o processamento individual, sendo necessário a automação desta tarefa. Deste modo, técnicas e metodologias foram criadas e adaptadas para a utilização na tecnologia infrassônica. No SIS/UnB, a análise infrassônica é realizada pelo *software Progressive Multi-Channel Correlation* (PMCC), técnica originalmente desenvolvida para aplicação em dados sísmicos, contudo, atualmente é utilizada para extração de sinais de baixa amplitude. Pelo PMCC pode-se extrair informações como: data e horário de chegada do evento; latitude e longitude do local, conseqüentemente sua cidade e estado de ocorrência; distância do evento até a estação de registro; tempo de chegada e registro (após a chegada sísmica); *back* azimute (calculado); velocidade horizontal (m/s); duração (s); frequência (Hz); correlação; consistência; amplitude; erro RMS; tamanho da família.

Em razão da grande quantidade de informações obtidas por meio de sinais sísmicos, (registradas pelas estações PS07 e IS09) no SIS/UnB, visou-se a realização de uma análise dos eventos de explosões entre o período de 2016 a 2020.

O Banco de dados infrassônicos do Observatório Sísmológico começou a ser formado a partir da entrada em operação da estação IS09 em 2001. Entretanto, neste trabalho, utilizamos dados a partir de 2016. Entretanto, em 2016 foram registrados dados apenas dos meses de janeiro, fevereiro, maio, setembro, outubro, novembro e dezembro, devido à problemas técnicos no arranjo infrassônico. A partir de 2017, foram registradas informações em todos os meses. Na Tabela 2 podemos observar a quantidade dos registros sísmicos e infrassônicos no período de 2016 a 2020. É importante ressaltar que os dados utilizados para este trabalho são apenas os que apresentaram registros em ambas tecnologias, ou seja, apenas o Banco de Dados do

Infrassom (BDI).

Tabela 2 - Número de eventos registrados nas estações PS07 (apenas) e PS07 e IS09 no período de 2016 a 2020.

ESTAÇÃO	QUANTIDADE DE EVENTOS REGISTRADOS POR ANO				
	2016	2017	2018	2019	2020
PS07	438	2164	1305	1222	1127
PS07 e IS09	32	254	160	205	240

Os registros nas duas estações no período de estudo, tiveram um total de 891 eventos, apresentados na Figura 12. No mapa constam registros (categorizados como explosões/detonações) concentrados no Centro-Sul do Brasil, abrangendo apenas 4 estados e o Distrito Federal. No estado de Goiás (GO) foram registrados 523 eventos; no sul do estado de Tocantins (TO) registraram 2 eventos; no estado de Minas Gerais (MG) 308 eventos; no norte de São Paulo (SP) registraram 3 eventos e no Distrito Federal (DF), 55. É possível observar no mapa da Figura 12 ao menos 10 concentrações de dados que se destacam dos demais eventos. Essa concentração ocorre em todos os anos, principalmente no ano de 2017, ano com maior quantidade de registros.

As concentrações mencionadas acima estão destacadas em 10 circunferências (C1 a C10). As quatro primeiras estão localizadas no estado de GO e seus anos de registros encontram-se heterogêneos. Em C1, é possível notar uma aglutinação de eventos bem delimitada, sem uma direção bem definida, com outros eventos próximos, porém mais espalhados e também não apresentando uma distribuição preferencial. Nota-se, ainda, que os dados mais concentrados no centro da aglutinação são do ano de 2017. Em C2, é possível observar uma concentração de dados mais pontual. Em C3, percebe-se eventos com sentido diagonal em direção NW-SE. Em C4, os eventos encontram-se dispostos verticalmente, com alguns eventos em derredor sem direção preferencial. Os eventos de 2017 mostram-se mais destacados nesse ajuntamento, próximo à divisa do estado na direção sudeste goiana com noroeste mineira. A quinta circunferência encontra-se no DF e seus anos de registros são heterogêneos, além de estarem numa direção preferencial que se alinha com a divisa estadual, na parte norte com o Goiás. As cinco últimas circunferências, encontram-se em Minas Gerais. Em C6, os eventos encontram-se mais pontuais com uma verticalidade. Esses eventos encontram-se próximos à divisa do estado na direção sudeste goiana com noroeste mineira, localizado perto de C4. Em C7 e C8 há concentrações de eventos bem pontuais, sem eventos

“soltos” ao redor. Em C9, percebe-se uma concentração de dados bem pontual, com dois eventos acima. Em C10, os dados encontram-se menos aglutinados, mas com uma direção preferencial horizontalizada. Ressalta-se que em C9 e C10 são constituídos em grande parte por eventos de 2017.

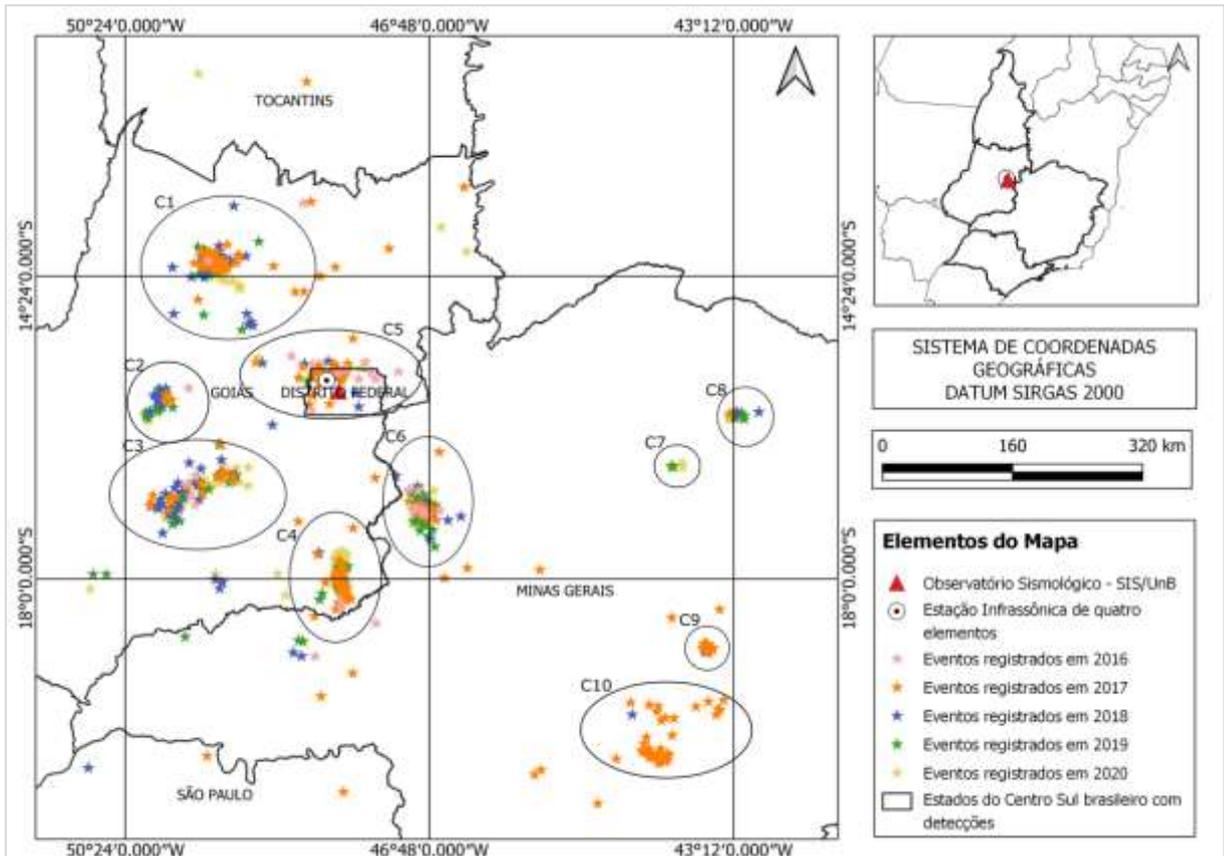


Figura 12 - Mapa com a localização de todos os eventos infrassônicos e sísmicos registrados no período de 2016 a 2020.

Após a visão ampliada, proporcionada pela Figura 13, foram criados 5 mapas, um para cada ano de registro, para melhor visualizar a disposição das informações. Cada mapa terá como base comparativa o mapa geral da Figura 12, para melhor associar as aglutinações de eventos.

No mapa da Figura 12 são mostrados os epicentros dos eventos registrados em ambas tecnologias no ano de 2016. Apesar da pouca quantidade de dados, foi possível separá-los em 6 áreas (C1 a C6). Em GO, observa-se em C1 e C2 apenas um evento, como se sua disposição estivesse interligada com C3. Em C4, existem 2 eventos lineares na direção vertical próximo ao limite entre GO-MG. No DF, é o local com maior número de eventos dispostos com a direção E-W (C5). Em MG, constam poucos dados sísmicos e infrassônicos, tendo apenas um destaque a ser caracterizado (C6)

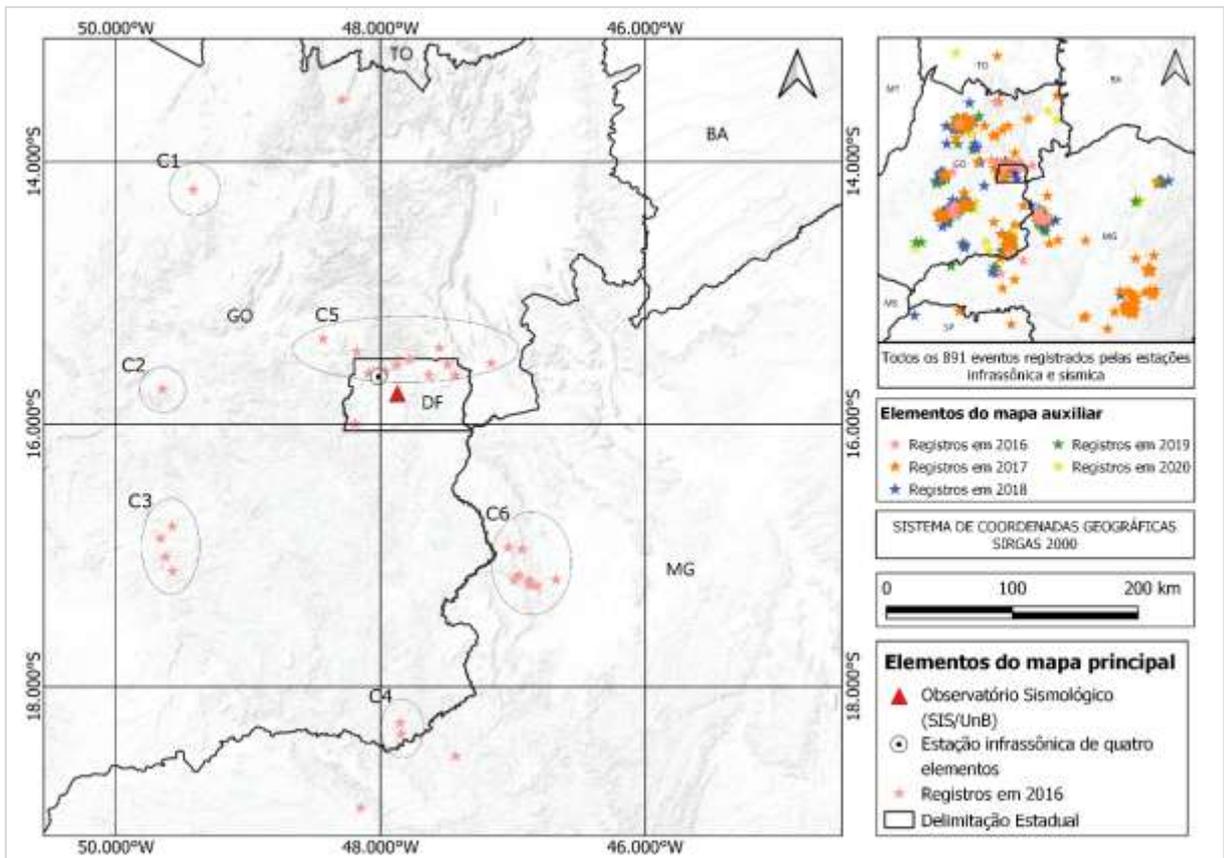


Figura 13 - Mapa principal com os eventos ocorridos em 2016, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.

Na Figura 14 são plotados as localizações dos eventos do ano de 2017, detectados pela estação sísmica PS07 e pela estação infrassônica IS09 onde se observa uma maior quantidade de dados em relação aos outros anos. Os eventos foram destacados em 9 áreas (C1 a C9) para caracterização. Em GO, existem 4 principais aglomerações de dados. Na parte norte, C1, os dados estão bem pontuais, com uma tendência levemente horizontalizada, com alguns eventos mais “soltos” à sua direita. Logo abaixo, em C2, os eventos estão bem concentrados, não apresentando nenhuma direção preferencial. Na parte mais central, em C3, local que no ano anterior apresentou uma curvatura na direção vertical, agora se apresenta aparentemente mais linear num sentido diagonal/horizontal, direção NE-SW. E, mais ao sul, próximo à divisão estadual (C4), as detecções estão na direção N-S. Comparando com as detecções do ano anterior, no DF, os eventos encontram-se mais concentrados na porções noroeste, ainda permanecendo em uma direção horizontal, como mostrado em C5. Em MG, existem 4 principais aglomerações de dados. Próximo à divisa com o estado de GO, existe uma concentração de dados com leve diagonalidade (direção NW-SE), como mostrada pela C6. Mais ao norte, em

C7, encontra-se um evento isolado dos demais, mas destacado aqui, pois apresenta significado comparando com a C8 da Figura 12. Mais ao centro do estado também há uma concentração de eventos bem pontual, contudo, sem uma direcionalidade percebida (C8). E, logo abaixo, em C9, observam-se eventos que, apesar de menos concentrados, estão próximos o suficiente para serem caracterizados como informações relevantes. Apresentam uma direção preferencial E-W.

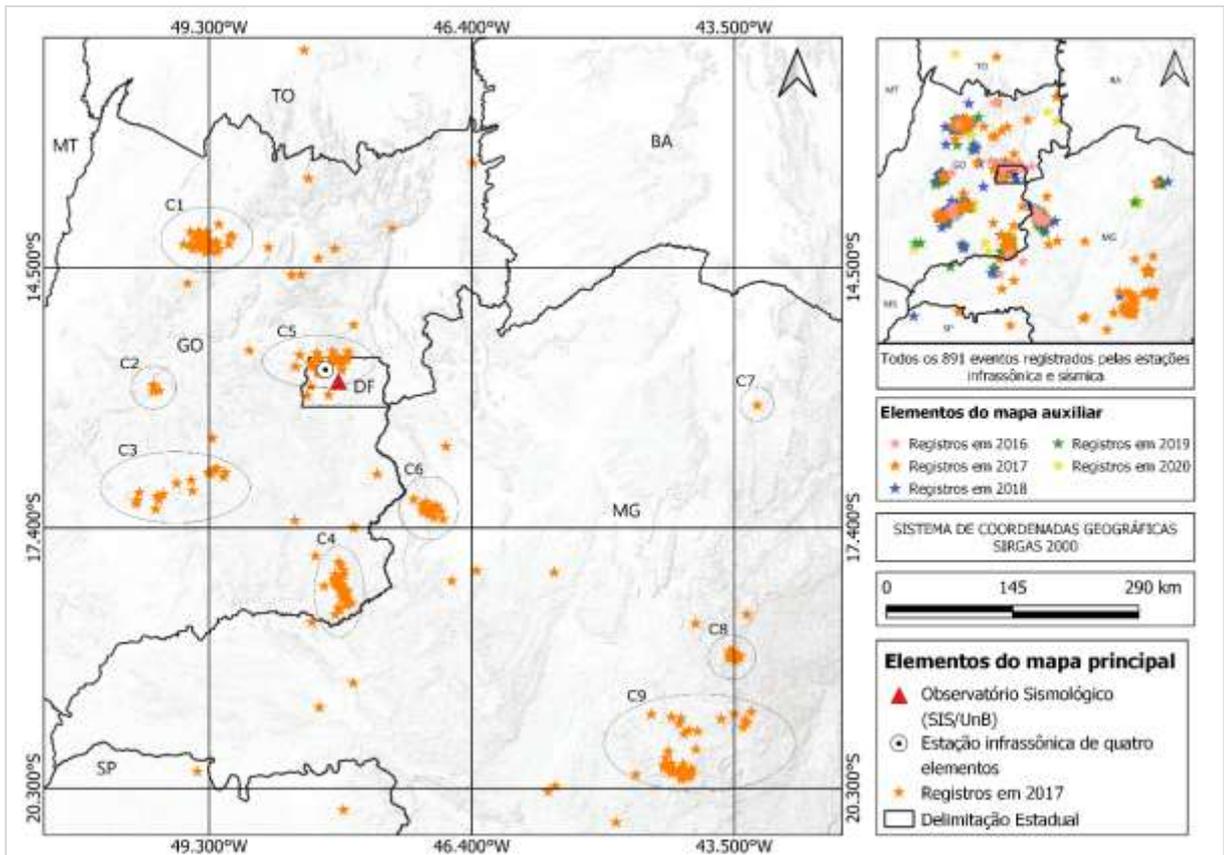


Figura 14 - Mapa principal com os eventos ocorridos em 2017, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.

Na Figura 15, o mapa com os eventos registrados em ambas tecnologias no ano de 2018. Nove áreas (C1 a C9) ressaltam informações relevantes. Os eventos estão mais concentrados no Estado de Goiás. Em C1, os eventos encontram-se mais concentrado, o que pode indicar uma melhor localização epicentral para os eventos de 2018. Em C2, os eventos estão bem concentrados num sentido diagonal (NE-SW), com uma tendência vertical. Logo abaixo, em C3, encontra-se um conjunto de eventos levemente espalhados, dispostos na diagonal (NE-SW), com uma tendência horizontal. E, na parte sul, próximo à divisão estadual (C4), observou-se no ano anterior uma alta concentração na direção vertical e este ano percebe-se uma ausência desses dados, representados por apenas 4 eventos. No DF, os eventos estão mais concentrados

na direção norte, com alguns mais espalhados, como C5. Em MG, em C6, os eventos encontram-se concentrados, aparentando estar perpendiculares. Em C7, é possível ver dois eventos alinhados na direção E-W. Em C8 e C9, os eventos estão pontuais de tal forma como se formassem um único ponto, sem eventos espalhados próximos à ele.

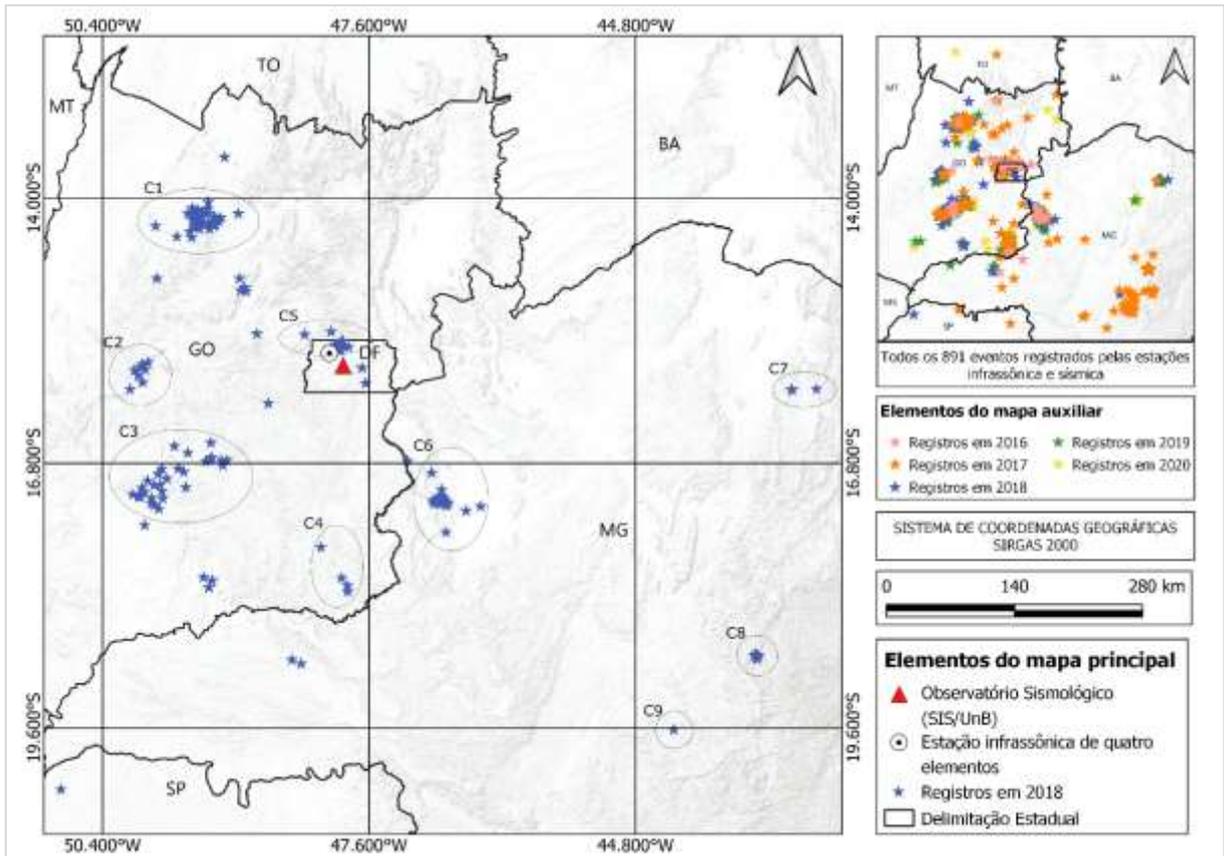
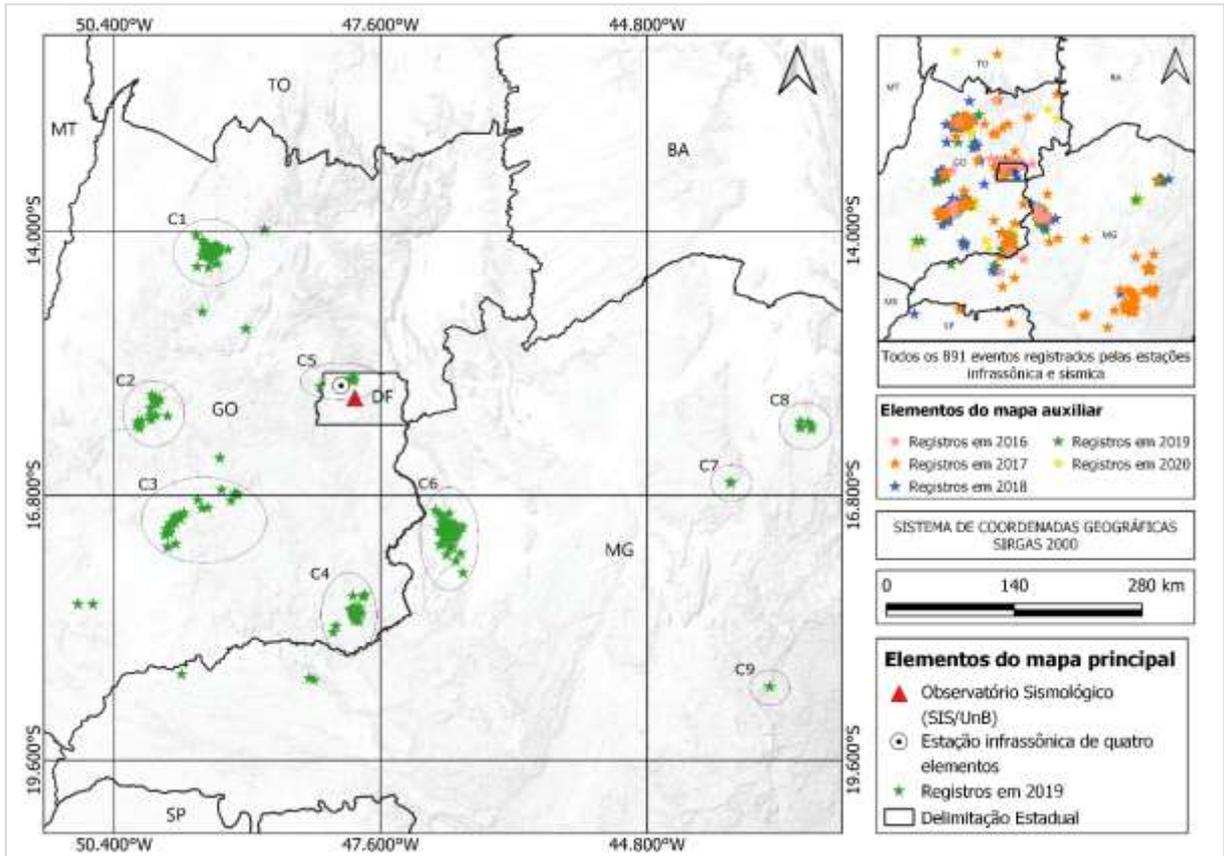


Figura 15 – Mapa principal com os eventos ocorridos em 2018, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.

Na Figura 16, o mapa com os eventos registrados em ambas tecnologias no ano de 2019. Grande parte dos eventos estão concentrados e são melhor caracterizados por 9 áreas (C1 a C9). Em GO, observa-se 4 concentrações de eventos. Na parte norte, em C1, os eventos estão bem pontuais, sem uma tendência de direção. Na parte mais central, em C2, os eventos estão levemente curvados com uma tendência vertical. Mais ao sul, em C3, os eventos também se encontram curvos contudo, num sentido diagonal tendenciando para a direção E-W. Em C4, próximo à divisão estadual, as detecções estão aglutinadas num direção aparentemente vertical. No DF, existe uma baixa concentração de dados, tendo apenas 4 eventos próximos do norte da capital, como mostrado em C5. Em MG, perto da divisa estadual (C6), encontra-se uma alta quantidade de detecções dispostas num direção vertical levemente diagonalizado. E, mais ao

norte do estado, em C8, observa-se um pequeno conjunto de dados mais próximos, aparentemente dispostos de forma mais horizontal. Em C7 e em C9, apesar de apenas um evento isolado, mostra-se significativo ao mapa geral (Figura 12) nas circunferências C7 e C9.



Na Figura 17, o mapa com os eventos registrados em ambas tecnologias no ano de 2020. Neste mapa identificou-se 8 áreas características na distribuição epicentral (C1 a C8). No Goiás, encontra-se 4 conjuntos de eventos bem definidos. Em C1, os eventos encontram-se concentrado ao longo de uma linha, na direção NW-SE. Em C2, os eventos, apesar de poucos, estão mais pontuais e com um direção NE-SW. Em C3, os eventos estão semelhantes aos anos de 2018 e 2019, não estão tão aglutinados como em C1, mas se apresentam de forma coerente, na direção diagonal em direção NE-SW, com uma tendência horizontal. Em C4, os eventos estão bem próximos uns dos outros, formando quase uma linha na direção vertical. No DF, existem apenas 3 eventos que se dispõem horizontalmente e espaçadamente. Em Minas Gerais, não existem eventos fora das circunferências destacadas, ou seja, os eventos registrados mostram-se mais precisos. Em C6, os eventos estão bem concentrados e estão dispostos na

direção vertical (N-S), com leve diagonalizada em direção NE-SW. Em C7 e C8, os eventos encontram-se bem demarcados com tendência para direção E-W.

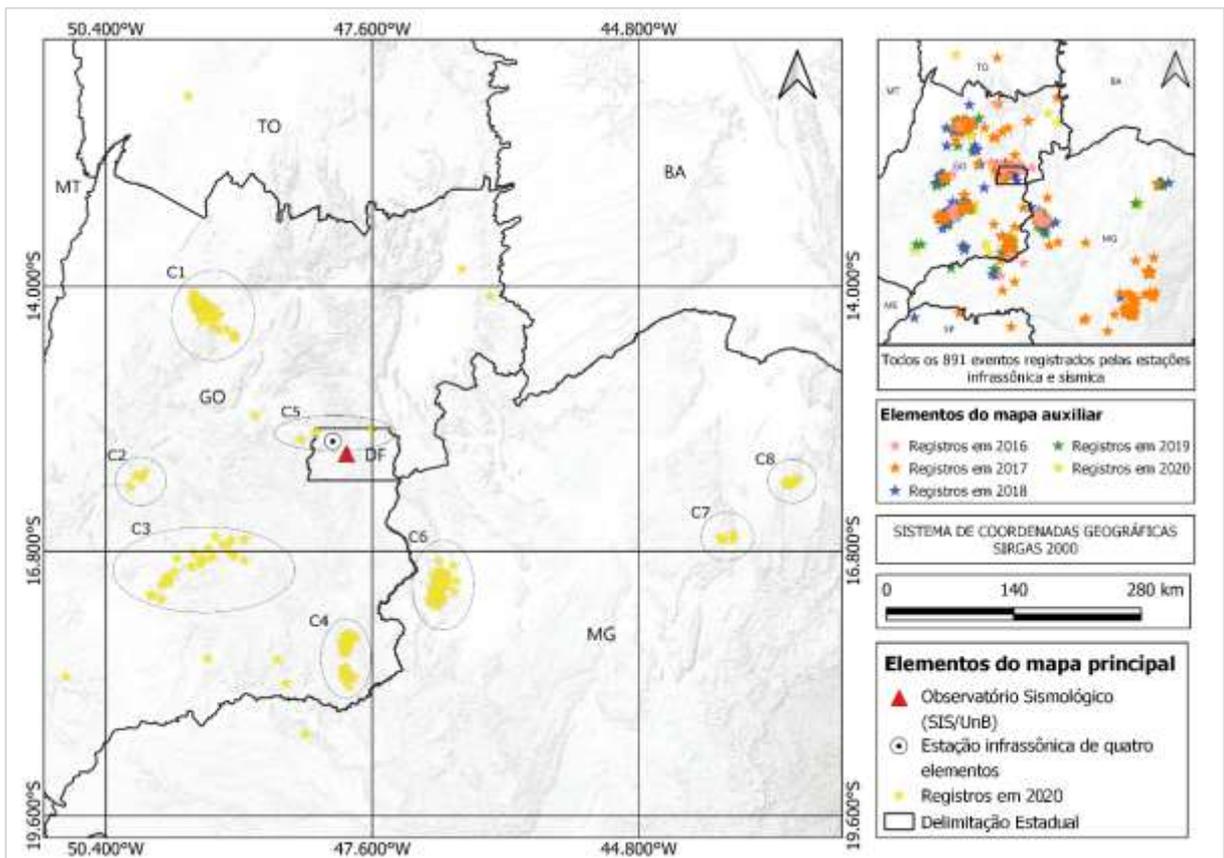


Figura 17 - Mapa principal com os eventos ocorridos em 2020, e no mapa auxiliar encontram-se plotados todos os epicentros.

Através do mapa geral (Figura 12) e dos mapas de cada ano (Figuras 13 a 17) é possível observar a distribuição dos eventos de forma a melhor enfatizar as características das disposições, sentidos e quantidade. Cada evento registrado possui informações sobre as variações infrassônicas e sísmicas significativas para estudo.

CAPÍTULO 6 - ÁREA DE ESTUDO

6.1 Contexto Histórico

Desde o início da história da civilização, já se tem relatos de algum tipo de exploração mineral. No Brasil, a exploração mineral mais antiga ocorreu no início do século XVII, em Minas Gerais (Bloch, 2001; Morris & Powell, 2014). A partir disso, as explorações foram disseminadas para os outros estados brasileiros. Atualmente, existem mais de 9 mil empresas que compõem o setor mineral brasileiro (Bianchetti, 2019), gerando alta movimentação financeira no país. Devido a isso, bens duráveis e reservas de valores, como minérios, gemas e jóias, foram mais procurados e requisitados (Oliveira et. al., 2019).

Assim, por serem atividades tão antigas e financeiramente prospectoras, mineradoras e garimpos começaram a ser estudados por diversas áreas do conhecimento. Por objetivarem a extração de um bem mineral muitas vezes alocado em subsuperfície, máquinas pesadas e explosivos são utilizadas, a fim de abrir minas a céu aberto para tal finalidade. Assim, por utilizarem explosivos e materiais afins, as detonações realizadas são capazes de causar alterações na atmosfera, no subsolo e em massas aquáticas, podendo ser detectadas a quilômetros de distância. A Figura 18 mostra, a título de exemplo, as dimensões da mineradora Kinrros, localizada ao lado da cidade de Paracatu/MG. Como se observa a mina, que é a maior mina a céu aberto do Brasil, ocupa uma área muito grande em relação à cidade de Paracatu. Daí a importância desses estudos, visto que, uma mineradora pode chegar a ser maior do que uma cidade.

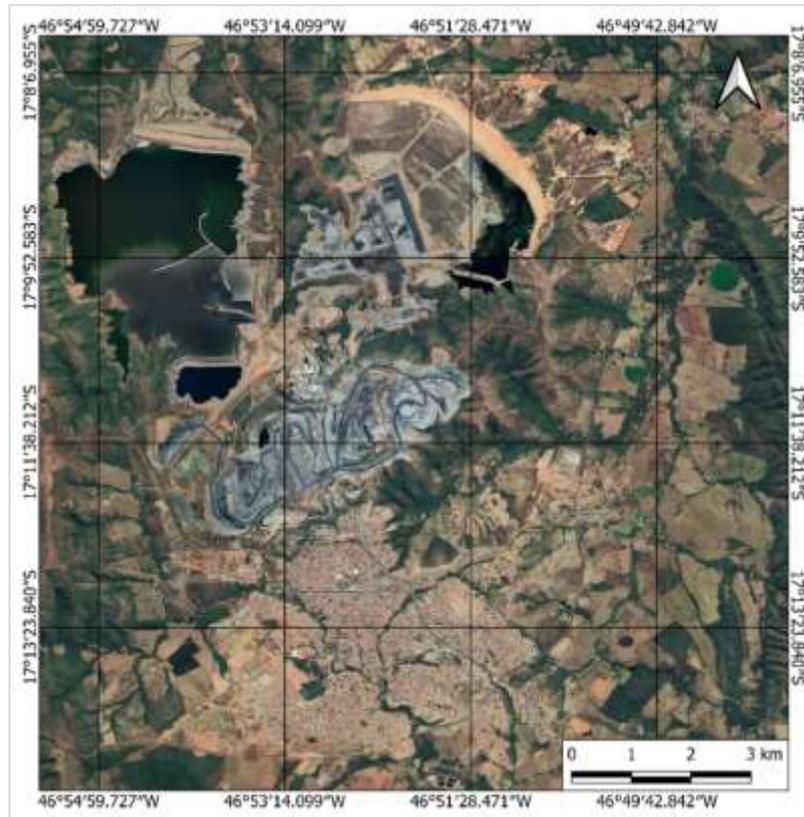


Figura 18 - Mineradora Kinross, localizada ao lado da cidade de Paracatu/MG.

Um sinal de uma explosão local é do tipo impulsiva, com alta razão sinal-ruído (SNR), curta duração (5-15s nas formas de onda), com tamanho da família PMCC de aproximadamente 40-50s e com pacotes de alta frequência. O azimuth, obtido a partir do processamento com a ferramenta PMCC, é muito estável, apontando para a localização da mina (quase nenhum desvio de azimuth). Ainda a partir da processamento com o PMCC, a velocidade determinada possui o traço estável próximo ao valor da velocidade do som (Mialle, 2019).

Já explosões mais distantes são caracterizadas por sinais cuja duração aumenta com a distância (podendo atingir minutos). As chegadas podem possuir múltiplos caminhos e tem uma SNR baixa, altas frequências (3-4 Hz), podendo desaparecer em distâncias maiores. O azimuth é estável para cada chegada detectada, sendo que a diferença entre o esperado teoricamente e o observado deve ser menor do que 4 graus. Além disso, a velocidade do traço aumenta com as chegadas de múltiplos caminhos (Mialle, 2019).

Com um SNR de 2, uma cobertura de duas estações infrassônicas, necessária para detectar e correlacionar um evento, os limites de detecção da rede foram calculados como uma função da posição na Terra com um nível de confiança de 90% (Le Pichon et al., 2019).

Para esta pesquisa, foram utilizadas mineradoras locais (localizadas à menos de 50 km de distância do arranjo infrassônico e da estação sísmica) e mineradoras mais distantes

(localizadas com até 600 km de distância), a fim de obter características das detonações das mesmas.

6.2 Mineradoras estudadas

Para saber as potenciais mineradoras para este estudo, foram inicialmente investigadas as cavas/minas a céu aberto através do *Google Maps*© e *Google Earth*©. Com isso, foram encontradas 101 mineradoras/pedreiras indicadas na Figura 19. Essas mineradoras tiveram suas buscas fundamentadas pela latitude e longitude dos eventos registrados no Banco de Dados de Infrassom (BDI) do Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, sendo que, através desses dados, foram localizados os municípios de localização dos eventos detectados por ambas as estações (PS07 e IS09). Ainda sim, houve uma procura paralela à essas informações (verificação com os estagiários do OBSIS), a fim de localizar o máximo de mineradoras possíveis.

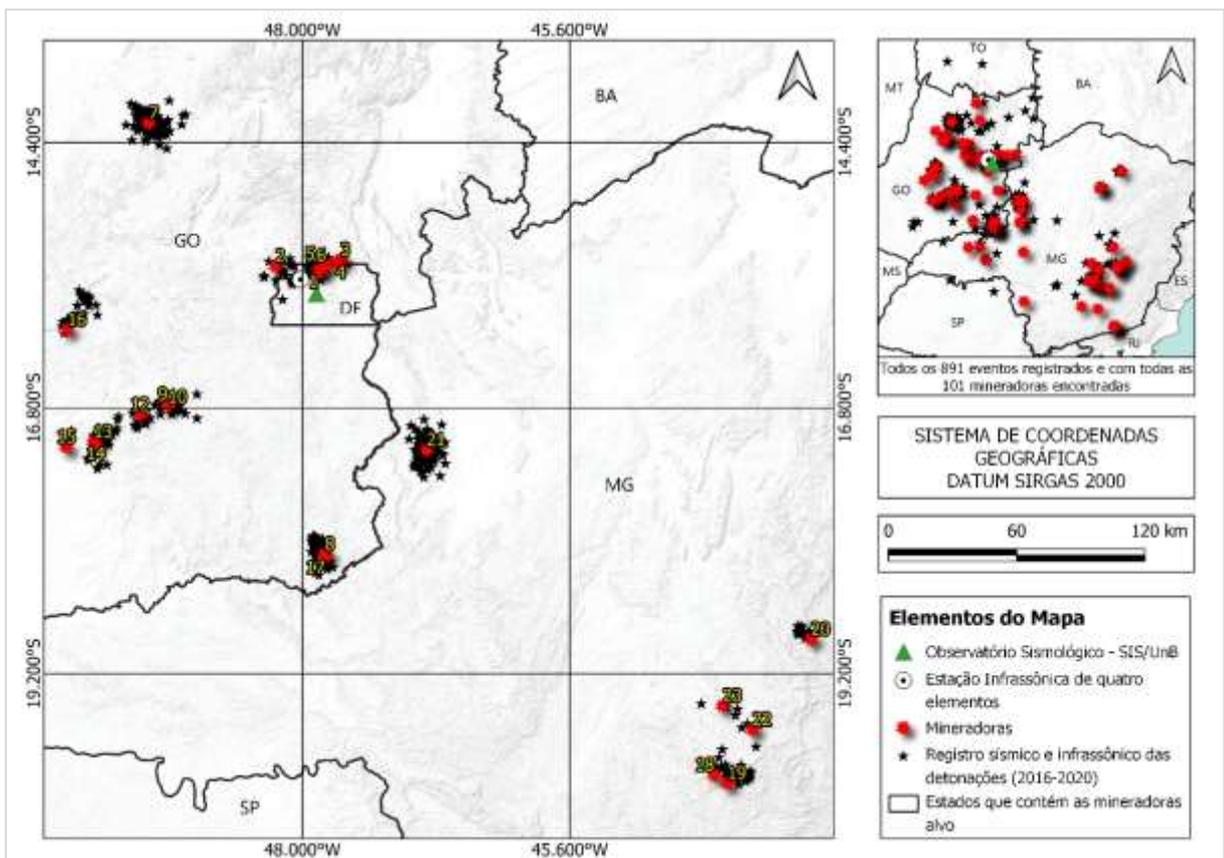


Figura 19 - Mineradoras encontradas via *Google Maps*© e *Google Earth*© nos estados de Goiás e Minas Gerais.

Após gerar o mapa, percebeu-se que algumas mineradoras não estavam tão perto dos eventos registrados e localizados. Assim, foi produzido um mapa com as mineradoras mais

próximas dos eventos, como mostrados na Figura 20. Neste mapa, percebe-se que houve uma diminuição de 43% das mineradoras, resultando em 58 mineradoras.

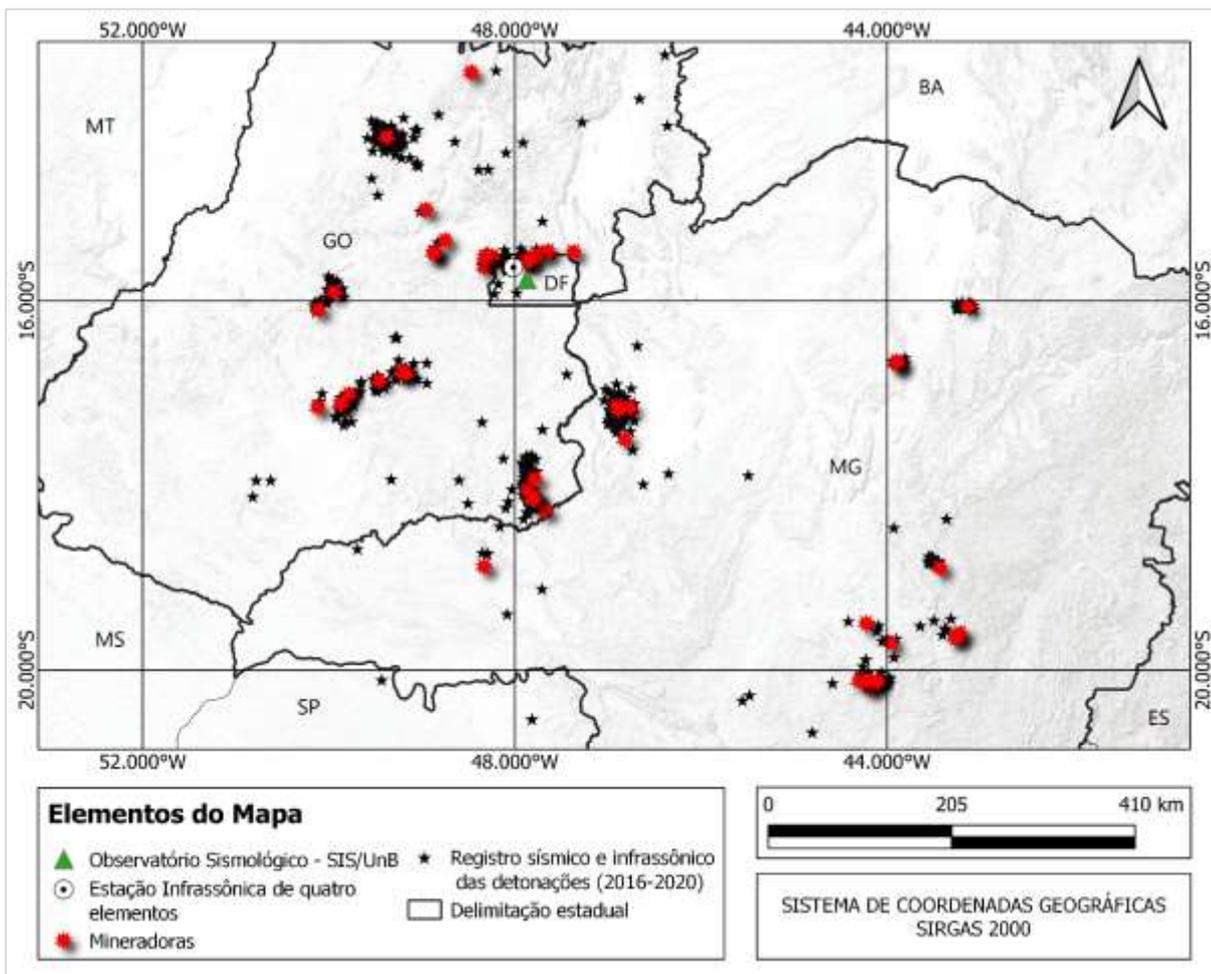


Figura 20 - Mineradoras coerentes com a localização dos eventos sísmicos e infrassônicos.

Posteriormente, após ver as localizações das mineradoras, fez-se contato com essas mineradoras para solicitação de informações acerca das detonações. E após essa averiguação, notou-se que muitas mineradoras não possuíam nenhum tipo de contato telefônico, eletrônico e/ou website. Com isso restaram 33 das 101 mineradoras iniciais. A Figura 21 mostra o mapa com as mineradoras que possuem algum tipo de contato e uma coerência na localização.

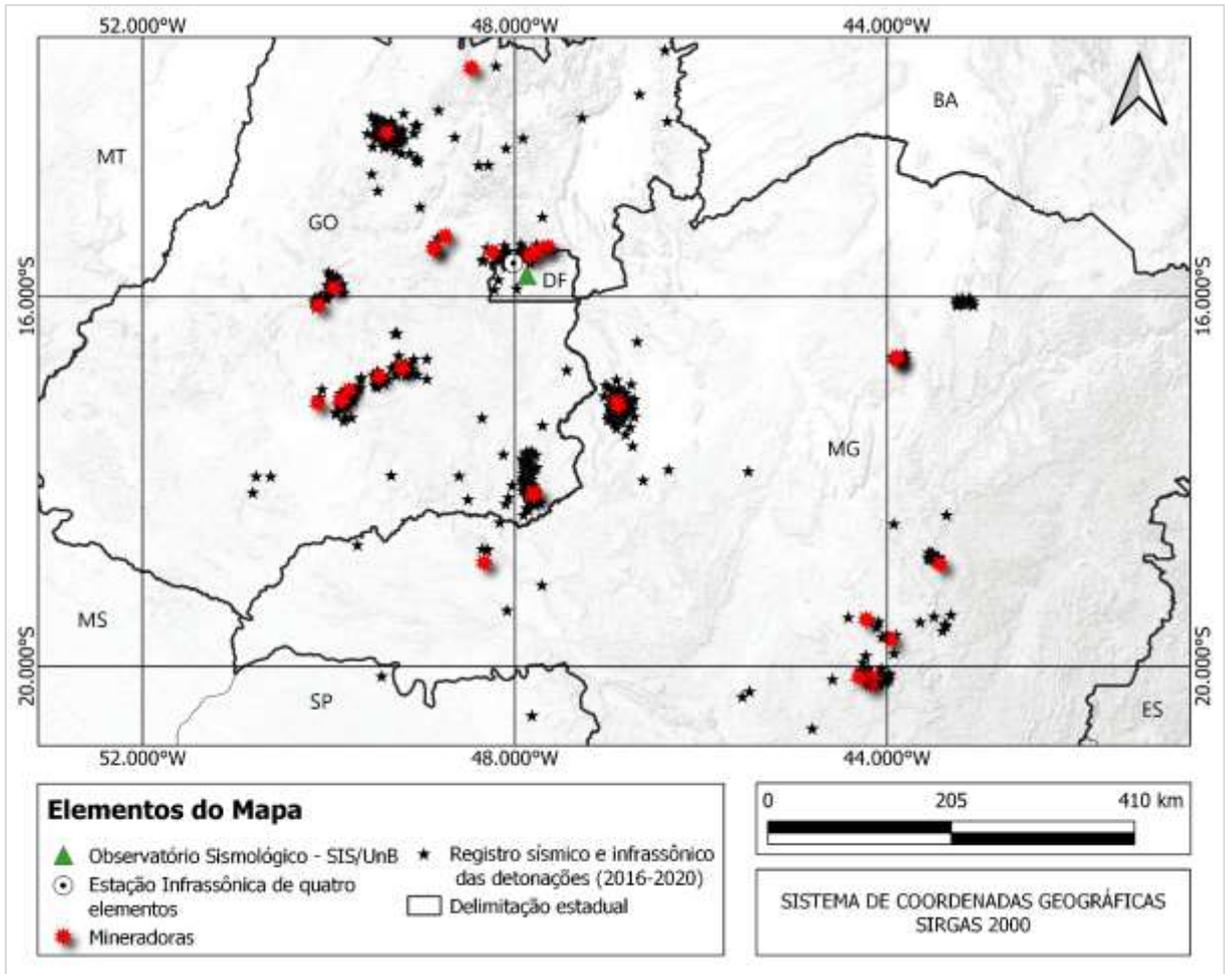


Figura 21 - Mineradoras que possuem proximidade com os eventos e que possuem algum tipo de contato para comunicação.

6.3 Delimitação do campo de estudo

Afim de melhor delimitar as mineradoras alvo, foi observado na Figura 21 que, apesar da proximidade das mineradoras com os eventos, poucos eventos existiam ao seu redor. Por isso, foi criado um critério que ao redor de cada mineradora deveriam constar ao menos 5 eventos, com até 25km de distância. Esse critério baseou-se na suposição de que se uma mineradora teve menos de 5 registros, as detonações realizadas por elas poderiam ser desprezadas, por não atenderem ao objetivo desta pesquisa. Assim optou-se por descartá-las, totalizando em 23 mineradoras como alvo da pesquisa. Em seguida, realizou-se uma filtragem nos eventos sísmicos e infrassônicos, visto que os eventos de interesse estariam mais próximos às mineradoras encontradas. Desse modo, o campo de estudo da pesquisa compõe 23 mineradoras e um total de 587 eventos, como mostra a Tabela 3 e a Figura 22, respectivamente.

Tabela 3 - Mineradoras alvo e suas respectivas localizações.

Nº	MINERADORA	MUNICÍPIO/ESTADO	LATITUDE (UTM)	LONGITUDE (UTM)
1	Mineradora Ciplan	Brasília/DF	-15.5641191515	-47.857177178
2	Grupo SKS	Padre Bernardo/DF	-15.5188604194	-48.240921419
3	Calcário Britacal	Planaltina/DF	-15.4619810217	-47.644570738
4	Mineração Mozondó	Planaltina/DF	-15.4809943690	-47.695977920
5	Fertcal	Queima Lenço/DF	-15.5615795224	-47.842098452
6	Pedreira Contagem	Sobradinho/DF	-15.5130873477	-47.790487401
7	Mineração Maraca	Alto Horizonte/GO	-14.2249730552	-49.377293946
8	Mosaic Fertilizantes	Catalão/GO	-18.1217328043	-47.796908361
9	Pedreira Araguaia	Goiânia/GO	-16.7678522373	-49.212928629
10	Pedreira Izaira	Goiânia/GO	-16.7694065865	-49.206104775
11	Calcário Metago	Goiânia/GO	-15.9049973164	-49.944672525
12	Pedreira Ciplan	Guapó/GO	-16.8605699532	-49.458410918
13	Fillercal Mineração & Comercio	Indiara/GO	-17.1075320076	-49.874821427
14	Goiascal	Indiara/GO	-17.1187283889	-49.854643795
15	Jandaia Calcário Agrícola	Indiara/GO	-17.1522056984	-50.119318181
16	Calcário Itacuã	Mossâmedes/GO	-16.0935057040	-50.109899803
17	CMOC Brasil	Ouvidor/GO	-18.1456527461	-47.798982876
18	Ipê Mineração	Brumadinho/MG	-20.1174127622	-44.304238363
19	Mineração Guaribas	Brumadinho/MG	-20.1915692753	-44.182527769
20	Anglo American	Conceição do Mato Dentro/MG	-18.8910879545	-43.432648289
21	Kinrros	Paracatu/MG	-17.1785297825	-46.884398926
22	ICAL	São José da Lapa/MG	-19.7080275899	-43.957529539
23	Ilcom Mineração	Sete Lagoas/MG	-19.4925798993	-44.224531268

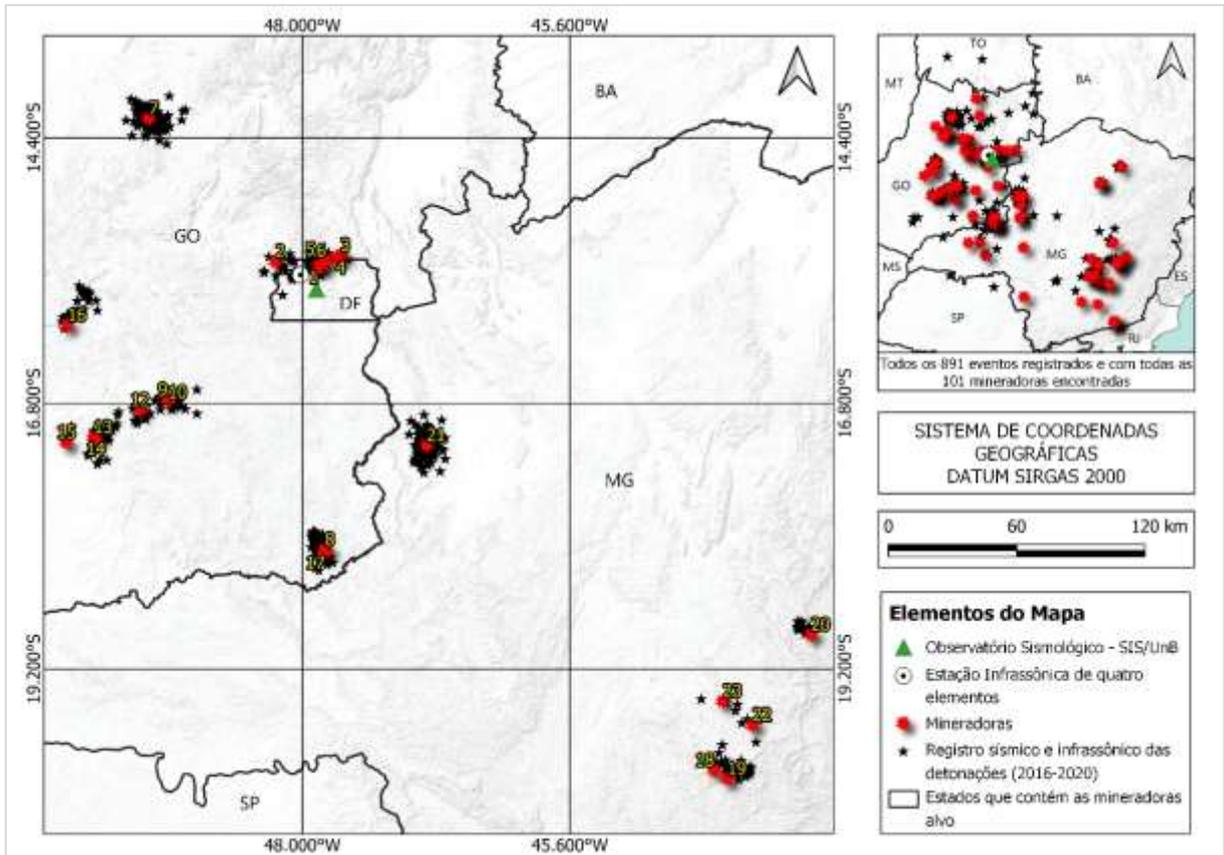


Figura 22 - Mapa do campo de estudo delimitado.

Com o campo de estudo delimitado, foi elaborada uma carta para cada uma das 23 mineradoras, solicitando informações relativas às cargas e ao tempo de retardo das denotações (Apêndice A). Nesta carta foi apresentada de maneira sucinta, o objetivo da pesquisa, um mapa mostrando a mineradora e os eventos registrados próximos à ela, uma tabela com a relação das detonações de mais altas magnitudes detectadas pela estação infrassônica de Brasília, a latitude, a longitude, o dia e a hora de cada registro.

As cartas foram enviadas via *e-mail* em setembro, contudo, nenhuma das mineradoras nos retornou com as informações solicitadas. Uma única mineradora respondeu alegando que as informações solicitadas eram confidenciais (ANEXO I), sendo assim, não poderiam ser compartilhadas com a universidade para contribuição dessa pesquisa.

Devido à isso, a área de enfoque do campo de estudos foi em 587 eventos que serão calculados a partir de equações idealizadas por pesquisadores da área.

CAPÍTULO 7 - CÁLCULO DO RENDIMENTO

O rendimento de uma explosão nuclear está relacionado com a quantidade de energia liberada pela detonação. A rede infrassônica do IMS foi projetada para detectar e localizar explosões nucleares atmosféricas com um rendimento equivalente a 1 quiloton (1 kT) em TNT ou mais, em qualquer lugar da Terra, a qualquer momento (Green & Bowers, 2010; Le Pichon et al., 2019). Esse valor de rendimento foi definido no manual operacional da rede IMS (Christie & Campus, 2010). Uma vez que as fontes antropogênicas produzem rendimentos geralmente muito abaixo de 1 kT, a maioria dos eventos associados a tais fontes está relacionada com eventos detectados por uma única estação (Le Pichon et al., 2019).

A capacidade de detectar uma potência tão baixa é dependente da dinâmica local, regional e global da atmosfera. Mudanças no vento ou na temperatura atmosférica ocorrem em uma base sazonal, diária ou ainda de hora em hora, sendo capaz de modificar completamente parâmetros como o nível de ruído no solo ou caminhos de propagação de onda. Assim, a rede IMS e suas estações foram projetadas para minimizar o impacto dessas mudanças, na capacidade de detecção da rede global e certificar-se de que o limite de detecção de 1 kT seja alcançado em qualquer lugar e a qualquer momento.

Através da bibliografia existente, foram selecionados três métodos para o cálculo do rendimento de explosões, sendo que dois métodos são baseados em parâmetros infrassônicos e um, sísmico. Os métodos baseiam-se na magnitude, fornecida pelos eventos sísmicos, e no período do sinal acústico, na amplitude da pressão (em Pa) e na distância entre fonte e receptor, fornecidas pela rede infrassônica.

7.1 Cálculo do Rendimento pela magnitude

As magnitudes sísmicas são frequentemente utilizadas para estimar os rendimentos de explosões e de eventos significativos (Mueller & Murphy, 1971), sendo comumente utilizadas no monitoramento de campos de testes nucleares subterrâneos. Entretanto, também pode ser usada para fornecer um limite inferior de uma fonte explosiva na superfície (Pilger et al., 2021). No entanto, existe uma incerteza associada ao cálculo do rendimento de explosões químicas, com base na magnitude, devido a fatores, tais como: variações na geologia da localização da fonte e do receptor; condições de localização da explosão, eficiência na propagação da onda da fonte ao receptor, profundidade da explosão, acoplamento da fonte ao subsolo, sua distribuição espacial e sua sequência de disparo (Khalturin et al., 1996; Gaebler et al., 2019; Goldstein, 2020; Pilger et al., 2021).

Devido a esses fatores não é possível determinar uma única relação, mas sim relações empíricas, desenvolvidas para diferentes áreas (Gaebler et al., 2019; Pilger et al., 2021). Essas relações foram desenvolvidas para relacionar medidas das ondas sísmicas de corpo (m_b) ao rendimento explosivo (Y) em kT TNT, mostrado em (6):

$$m_b = A + B \log(Y) \quad (6)$$

onde A e B são constantes que dependem dos fatores mencionados.

Experimentos realizados próximo de locais de testes nucleares mostraram que o rendimento com base na magnitude depende das propriedades da atenuação da geologia local. Assim, a partir da equação empírica mostrada em (6) as constantes A e B foram reajustadas para um ambiente geológico de alta atenuação sísmica (Murphy, 1981) e de baixa atenuação sísmica (Ringdal et al., 1992).

Alta atenuação, desenvolvida para o local de testes nucleares localizado em Nevada nos EUA, mostrada em (7):

$$m_b = 3,92 + 0,81 \log(Y) \quad (7)$$

Baixa atenuação, desenvolvida para o local de testes nucleares localizado no Cazaquistão, mostrada em (8):

$$m_b = 4,45 + 0,75 \log(Y) \quad (8)$$

Gaebler et al.(2019) ressaltam que as relações (7) e (8) só são verdadeiras para explosões subterrâneas bem acopladas e que os fatores de acoplamento sísmico para explosões, acima do solo, devem ser levados em consideração. De acordo com essas premissas geológicas, usa-se estimar o rendimento com base na magnitude m_b no caso de rochas úmidas consolidadas e rochas secas não consolidadas, para estimar uma faixa de rendimento explosivo. Para explosões de superfície, apenas uma pequena parte da energia total liberada acopla-se à subsuperfície como energia sísmica.

7.2 Cálculo do Rendimento por parâmetros infrassônicos

Grandes fontes sísmicas são capazes de gerar sinal infrassônico na atmosfera (Assink et al., 2018) e, devido a isso, alguns dos parâmetros infrassônicos estão atrelados a parâmetros sísmicos. Os eventos atmosféricos afetam as amplitudes e períodos de sinais acústicos.

Contudo, fatores como distância, pressão, temperatura e vento são responsáveis pela variabilidade temporal do meio de propagação (Kim & Rodgers, 2016). Assim, começam a aumentar/destruir sinais acústicos (Golden et al., 2011). A quantificação do rendimento de uma explosão nuclear é hermética e, com isso, a estimativa de rendimento no infrassom é mais complexa do que em registros sísmicos.

Devido as condições atmosféricas apresentarem constantes mudanças em fatores como pressão e temperatura, o valor estimado pode estar “mascarado” por outro fator não informado. Segundo Le Pichon et al (2019), algumas abordagens considerando relações empíricas de escala de rendimento, derivadas de observações remotas foram propostas (Whitaker, 1995; Green & Bowers 2010; Le Pichon et al. 2012, 2019). Porém, as conclusões destes estudos podem estar equivocadas, visto que uma descrição precisa da atmosfera variável no tempo não foi incluída.

7.2.1 Período da amplitude máxima

A frequência é um importante parâmetro medido no infrassom, embora o conteúdo da frequência do sinal seja um parâmetro independente do cálculo do rendimento. Pesquisadores do Laboratório Nacional de Los Alamos (LANL – *Los Alamos National Laboratory*) perceberam que o período dominante do sinal infrassônico é dependente do rendimento da fonte (Whitaker, 1995). Conhecendo-se esse parâmetro, é possível estimar o rendimento de uma fonte explosiva. A relação empírica desenvolvida no LANL forneceu a melhor concordância com os dados (Green & Bowers, 2010).

Assim, através dessa percepção, o Centro de Aplicações Técnicas da Força Aérea dos EUA (AFTAC - *U.S. Air Force Technical Applications Center*) desenvolveu uma relação empírica entre o período dominante do sinal observado (T) e o rendimento nuclear equivalente (Y) em kT, a partir de observações infrassônicas de testes nucleares de baixa altitude.

$$\frac{Y}{2} = \left(\frac{T}{5,92} \right)^{3,34} \quad (9)$$

O rendimento associado ao fator $\frac{1}{2}$ nesta expressão equivale a aproximadamente 50% da energia inicial das explosões nucleares sendo convertidas em energia térmica e de radiação e, portanto, não estando disponível para a explosão (American National Standards Institute, 1983; Edwards et al. 2006; Green & Bowers, 2010).

7.2.2 Amplitude da pressão do sinal, distâncias do percurso e parâmetros

do vento

Fatores infrassônicos como a amplitude da pressão do sinal, distância da fonte ao receptor e a eficiência com que o infrassom se propaga ao longo da trajetória estão atreladas à determinação do rendimento (Golden et al., 2011).

Condições atmosféricas mencionadas por Kim & Rodgers (2016) e Golden et al. (2011), como ventos estratosféricos, influenciam a eficiência de propagação das ondas da superfície para a estratosfera (Reed, 1969; Mutschlecner et al., 1999). As amplitudes do infrassom são consideravelmente menores do que a pressão atmosférica ambiente e, portanto, o clima atmosférico nos fenômenos podem alterar os sinais do infrassom significativamente, mesmo em distâncias locais - menos de 15 km (Kim & Rodgers, 2017; Kim et al., 2018).

Na tentativa de um ajuste empírico nos dados de amplitude da pressão do sinal (P), distância do caminho (D) e parâmetros do vento, Whitaker (1995) formulou (10):

$$\log(P) = 3,37 + 0,68 \log(Y) - \log(D) \quad (10)$$

Posteriormente, avanços significativos foram alcançados por Stevens et al. (2002), considerando várias relações de escala e atenuação derivadas de registros de explosões nucleares e químicas atmosféricas (Whitaker, 1995; Mutschlecner et al., 1999; Stevens et al., 1999; Le Pichon et al., 2009). Stevens et al. (2002) desenvolveu um programa de simulação de rede incluindo parâmetros importantes como a relação de escala, estimando a pressão em função do rendimento da explosão, da distância fonte-receptor, do modelo de ruído de fundo (uniforme ou dependente da estação), e a relação sinal-ruído mínima (SNR) para detecção. A equação (11), de acordo com Stevens et al. (2002), apresentou uma melhor concordância com dados de testes nucleares históricos, apenas adicionando uma constante associada à distância entre a fonte e o receptor, mostrada em (11):

$$\log(P) = 3,37 + 0,68 \log(Y) - 1,36 \log(D) \quad (11)$$

onde P é a pressão de zero à pico, em Pascal, Y é o rendimento em kT e D é a distância em km.

7.3 Resultados

Como mencionado no capítulo 6, o nosso banco de dados contém os registros de 587 explosões detectadas pelas estações sísmica e infrassônica. Considerando esse grande volume de dados, foi feita uma seleção representativa com registros de 3 eventos por mineradora, totalizando em 69 eventos para o desenvolvimento. Cada evento foi selecionado com o critério

de proximidade da localização da mineradora.

Para a determinação do rendimento das explosões, utilizou-se os 3 métodos descritos acima e representados nas equações (8), (9) e (11). Ressaltando que a equação (8) foi escolhida devido ao Brasil possuir baixa atenuação, como na área de aplicação da equação.

Na Tabela 4, são informados os parâmetros mais significativos para essa pesquisa juntamente com o rendimento da potência equivalente. Inicialmente, são mostradas as mineradoras selecionadas com os parâmetros utilizados e posteriormente a determinação do rendimento em t (ton) para melhor visualização dos resultados.

Tabela 4 - Parâmetros de análise para cálculo do rendimento e determinação da potência equivalente em t (ton) em TNT.

MINERADORA	DATA	HORA (UTC)	LATITUDE (UTM)	LONGITUDE (UTM)	M _b (mR)	D (km)	T (s)	P (Pa)	EQUAÇÃO 8 (t)	EQUAÇÃO 9 (t)	EQUAÇÃO 11 (t)
Anglo American	03/10/2017	17:58:43	-18,83391	-43,46095	2,0	600	1,3086	0,0070	0,54117	12,92897	0,09181
Anglo American	20/10/2017	17:02:36	-18,88133	-43,48372	1,5	601	0,8163	0,0144	0,11659	2,67363	0,26581
Anglo American	21/11/2017	19:30:42	-18,83742	-43,44371	2,2	602	0,4929	0,0073	1,00000	0,49563	0,09773
Calcário Britacal	02/10/2017	14:52:22	-15,48389	-47,76738	2,1	32	0,4789	0,0396	0,73564	0,45038	0,01546
Calcário Britacal	27/09/2017	15:30:05	-15,43934	-47,76689	2,2	35	0,6566	0,1066	1,00000	1,29199	0,07570
Calcário Britacal	17/02/2020	21:46:31	-15,49051	-47,60830	2,1	47	0,6317	0,2172	0,73564	1,13556	0,33395
Calcário Itacuaã	15/03/2019	13:19:09	-16,08696	-50,12877	1,9	231	0,7457	0,1388	0,39811	1,97635	1,81925
Calcário Itacuaã	08/09/2020	18:07:15	-16,12550	-50,14024	1,9	234	0,6357	0,0181	0,39811	1,15985	0,09190
Calcário Itacuaã	10/09/2019	20:07:13	-16,06271	-50,16033	2,4	234	0,6345	0,2687	1,84785	1,15249	4,89015
Calcário Metago	28/06/2017	14:07:55	-15,87952	-49,91802	2,0	205	0,8889	0,0614	0,54117	3,55325	0,45992
Calcário Metago	29/05/2019	14:26:29	-15,95370	-49,96011	2,2	211	0,7092	0,1056	1,00000	1,67141	1,06197
Calcário Metago	21/05/2019	14:20:18	-15,87487	-50,02040	1,9	216	0,6196	0,0505	0,39811	1,06433	0,37146
CMOC Brasil	10/12/2020	15:31:49	-18,13284	-47,81312	1,0	278	0,5382	0,0340	0,02512	0,66506	0,30190
CMOC Brasil	29/01/2020	15:18:40	-18,14192	-47,80087	1,6	279	1,4339	0,1658	0,15849	17,54873	3,11722
CMOC Brasil	24/11/2017	14:20:32	-18,14512	-47,82010	2,0	280	0,9001	0,3002	0,54117	3,70502	7,47083
Fertcal	01/06/2019	14:33:21	-15,58768	-47,87905	2,0	16	0,3349	0,0181	0,54117	0,13636	0,00174
Fertcal	13/06/2017	14:45:04	-15,64701	-47,83619	2,2	19	0,6906	0,1712	1,00000	1,52936	0,06431
Fertcal	21/08/2017	21:30:00	-15,57032	-47,82391	2,0	22	0,5230	0,0156	0,54117	0,60437	0,00229
Fillercal Mineração & Comercio	19/07/2019	19:37:36	-17,09396	-49,80936	1,7	251	0,4355	0,0170	0,21544	0,32797	0,09335
Fillercal Mineração & Comercio	07/07/2017	20:44:59	-17,04606	-49,87426	2,3	253	0,9506	0,0746	1,35936	4,44573	0,83091
Fillercal Mineração & Comercio	06/10/2017	16:08:01	-17,08788	-49,85490	2,3	254	0,6540	0,0931	1,35936	1,27513	1,15913
Goiascal	22/08/2019	15:25:59	-17,12249	-49,80343	1,6	252	0,5373	0,0179	0,15849	0,66149	0,10147
Goiascal	06/06/2020	15:04:06	-17,15953	-49,81476	1,6	256	0,7559	0,0070	0,15849	2,06760	0,02633
Goiascal	08/06/2019	17:05:24	-17,15354	-49,85521	2,6	259	0,5811	0,0247	3,41455	0,85895	0,16920

Grupo SKS	10/01/2017	14:29:54	-15,56430	-48,17067	2,8	18	0,6519	0,0725	6,30957	1,26130	0,01696
Grupo SKS	10/07/2020	20:18:31	-15,54311	-48,19081	2,1	21	0,4866	0,0159	0,73564	0,47499	0,00228
Grupo SKS	23/06/2017	21:59:50	-15,47716	-48,30016	2,0	35	0,8889	0,0614	0,54117	3,55325	0,03449
ICAL	22/11/2017	14:41:00	-19,68987	-44,05281	2,0	616	0,6882	0,0677	0,54117	1,51185	2,67140
ICAL	20/10/2017	14:12:12	-19,65597	-44,00348	2,3	617	0,8726	0,0177	1,35936	3,34040	0,37241
ICAL	15/05/2017	15:01:48	-19,66283	-43,90415	1,6	625	0,5811	0,0468	0,15849	0,85895	1,58287
Ilcom Mineração	17/10/2017	19:19:50	-19,47486	-44,41718	2,5	572	0,8292	0,0045	2,51189	2,81693	0,04438
Ilcom Mineração	17/10/2017	14:30:40	-19,50326	-44,19563	2,3	591	0,4205	0,0477	1,35936	0,29169	1,50045
Ilcom Mineração	22/11/2017	15:22:35	-19,52229	-44,09209	1,7	600	0,4545	0,0031	0,21544	0,37825	0,02736
Ipê Mineração	02/10/2017	15:57:13	-20,05776	-44,27713	2,2	631	2,0354	0,0107	1,00000	56,54280	0,18330
Ipê Mineração	13/06/2017	18:59:41	-20,06059	-44,23562	2,0	634	1,2137	0,0746	0,54117	10,05668	3,21578
Ipê Mineração	30/11/2017	15:31:31	-20,13116	-44,19825	2,0	642	1,9512	0,0190	0,54117	49,10186	0,43927
Jandaia Calcário Agrícola	18/09/2017	20:50:52	-17,00661	-50,07329	1,6	267	0,8613	0,0150	0,15849	3,19842	0,08496
Jandaia Calcário Agrícola	11/07/2017	21:34:21	-17,09665	-50,09411	1,9	275	0,9881	0,4978	0,39811	5,06026	15,31370
Jandaia Calcário Agrícola	14/10/2017	20:06:56	-17,13114	-50,11008	1,7	278	1,3273	0,0269	0,21544	13,55845	0,21311
Kinrros Mineração	17/02/2020	18:19:48	-17,17081	-46,89176	2,8	208	0,7485	0,0647	6,30957	2,00116	0,50789
Kinrros Mineração	04/01/2019	17:29:41	-17,16797	-46,88456	1,8	209	0,6784	0,1361	0,29286	1,44110	1,51766
Kinrros Mineração	02/03/2020	18:24:51	-17,18668	-46,87931	2,1	211	0,3627	0,0167	0,73564	0,17800	0,07050
Mineração Guaribas	22/11/2017	15:09:25	-20,11103	-44,18108	1,7	642	0,4545	0,0031	0,21544	0,37825	0,03025
Mineração Guaribas	03/10/2017	16:11:46	-20,16651	-44,08503	2,3	653	1,7986	0,0032	1,35936	37,40466	0,03331
Mineração Guaribas	04/10/2017	15:06:09	-20,19939	-44,08125	2,0	656	1,4732	0,0109	0,54117	19,20692	0,20061
Mineração Maracá	01/04/2019	18:40:50	-14,23000	-49,37803	2,3	214	1,0576	0,0180	1,35936	6,34989	0,08031
Mineração Maracá	05/02/2020	15:35:33	-14,23529	-49,38450	2,3	214	0,6925	0,0318	1,35936	1,54355	0,18613
Mineração Maracá	27/02/2020	15:28:21	-14,22699	-49,38919	1,9	215	0,4396	0,0232	0,39811	0,33819	0,11774
Mineração Mozondó	02/10/2017	14:52:22	-15,48389	-47,76738	2,1	32	0,4789	0,0396	0,73564	0,45038	0,01546
Mineração Mozondó	27/09/2017	15:30:05	-15,43934	-47,76689	2,2	35	0,6566	0,1066	1,00000	1,29199	0,07570
Mineração Mozondó	17/02/2020	21:46:31	-15,49051	-47,60830	2,1	47	0,6317	0,2172	0,73564	1,13556	0,33395
Mineradora Ciplan	28/11/2017	13:55:32	-15,54506	-47,89169	2,3	17	2,1492	0,1145	1,35936	67,80272	0,02920

Mineradora Ciplan	17/06/2019	20:44:19	-15,55060	-47,88476	2,1	17	0,8319	0,5670	0,73564	2,84836	0,31326
Mineradora Ciplan	29/11/2017	13:58:24	-15,52286	-47,86820	1,6	20	0,5236	0,0244	0,15849	0,60649	0,00397
Mosaic Fertilizantes	28/11/2017	14:33:16	-18,09436	-47,78710	2,2	274	0,9158	0,0306	1,00000	3,92475	0,25311
Mosaic Fertilizantes	29/11/2017	14:18:25	-18,12761	-47,77377	1,8	278	1,1099	0,0563	0,29286	7,45924	0,63193
Mosaic Fertilizantes	01/12/2020	15:11:13	-18,13124	-47,80531	2,0	278	0,5688	0,0843	0,54117	0,80004	1,14544
Pedreira Araguaia	04/10/2017	19:59:56	-16,73825	-49,21684	2,4	177	0,8382	0,0543	1,84785	2,92076	0,30909
Pedreira Araguaia	14/06/2017	20:22:11	-16,75255	-49,24902	2,1	181	0,7605	0,0162	0,73564	2,10991	0,05395
Pedreira Araguaia	13/06/2017	19:43:52	-16,79434	-49,27848	2,0	186	1,2137	0,0746	0,54117	10,05668	0,53091
Pedreira Ciplan	15/06/2020	19:18:18	-16,87438	-49,41626	1,7	203	0,6464	0,2678	0,21544	1,22625	3,94639
Pedreira Ciplan	09/07/2020	20:07:31	-16,81344	-49,47853	1,9	204	0,5865	0,0359	0,39811	0,88617	0,20630
Pedreira Ciplan	14/09/2017	20:13:34	-16,86752	-49,50000	1,2	209	0,5504	0,0071	0,04642	0,71652	0,02001
Pedreira Contagem	19/05/2017	20:55:14	-15,53234	-47,78568	1,9	27	0,8217	0,0548	0,39811	2,73278	0,02007
Pedreira Contagem	19/07/2017	21:14:41	-15,53163	-47,78163	2,0	28	0,8000	0,3781	0,54117	2,49917	0,35182
Pedreira Contagem	02/10/2017	14:52:22	-15,48389	-47,76738	2,1	32	0,4789	0,0396	0,73564	0,45038	0,01546
Pedreira Izaira	20/10/2017	18:26:14	-16,77951	-49,12249	2,1	173	0,7605	0,0289	0,73564	2,10991	0,11852
Pedreira Izaira	15/05/2020	20:26:49	-16,72750	-49,17877	2,7	173	0,7062	0,0771	4,64159	1,64787	0,50166
Pedreira Izaira	21/05/2019	18:52:08	-16,77674	-49,13334	1,8	174	1,6807	0,0388	0,29286	29,82558	0,18355

Ressalta-se que as mineradoras selecionadas como parte do estudo não forneceram os dados solicitados das detonações, assim não temos eventos com carga conhecida. Com isso, os valores adquiridos pelas equações (8), (9) e (11) são empíricos e estimados a partir dos parâmetros conhecidos.

CAPÍTULO 8 - DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Esta pesquisa tem como objetivo principal analisar os eventos detectados pelas estações sísmica PS07 e infrassônica IS09, gerados por explosões químicas em mineradoras, de forma a extrair parâmetros que possibilitem a determinação dos rendimentos equivalentes em TNT dessas explosões. Durante a pesquisa foram levantadas duas discussões:

8.1 Nível de dispersão dos eventos (Capítulo 05 e 06)

Após a seleção dos eventos no BDI, foram gerados mapas separados por períodos anuais (Figuras 13 a 17), em que foram percebidas algumas dispersões e tendências direcionais na distribuição dos eventos. O posicionamento dos eventos se deve à localização das mineradoras, visto que essas são as responsáveis pelas detonações registradas nas estações sísmica e infrassônica. Dessa forma, os eventos com uma tendência direcional e com uma menor dispersão foram melhor localizados. Eventos mais próximos às mineradoras, em geral, têm localização mais precisa. Essa precisão pode estar relacionada com a carga utilizada na detonação, quanto maior a carga explosiva, mais claro é o registro do sinal. Os tempos de retardos das detonações também influenciam na qualidade dos registros. Quanto menor esse tempo maior a chance de produzir chegadas claras nas estações e, portanto, maiores as chances de uma boa localização epicentral dos eventos.

8.2 Estimativa do rendimento (Capítulo 07)

Como abordado no item anterior, a carga explosiva afeta diretamente na localização de um evento. Para tal, foi realizado a estimativa a partir de duas tecnologias de monitoramento de explosões, infrassom e sísmica.

Através da tecnologia sísmica, responsável pelo monitoramento da subsuperfície, utilizamos a magnitude para estimar o rendimento da carga explosiva em TNT, conforme mostra a Figura 23.

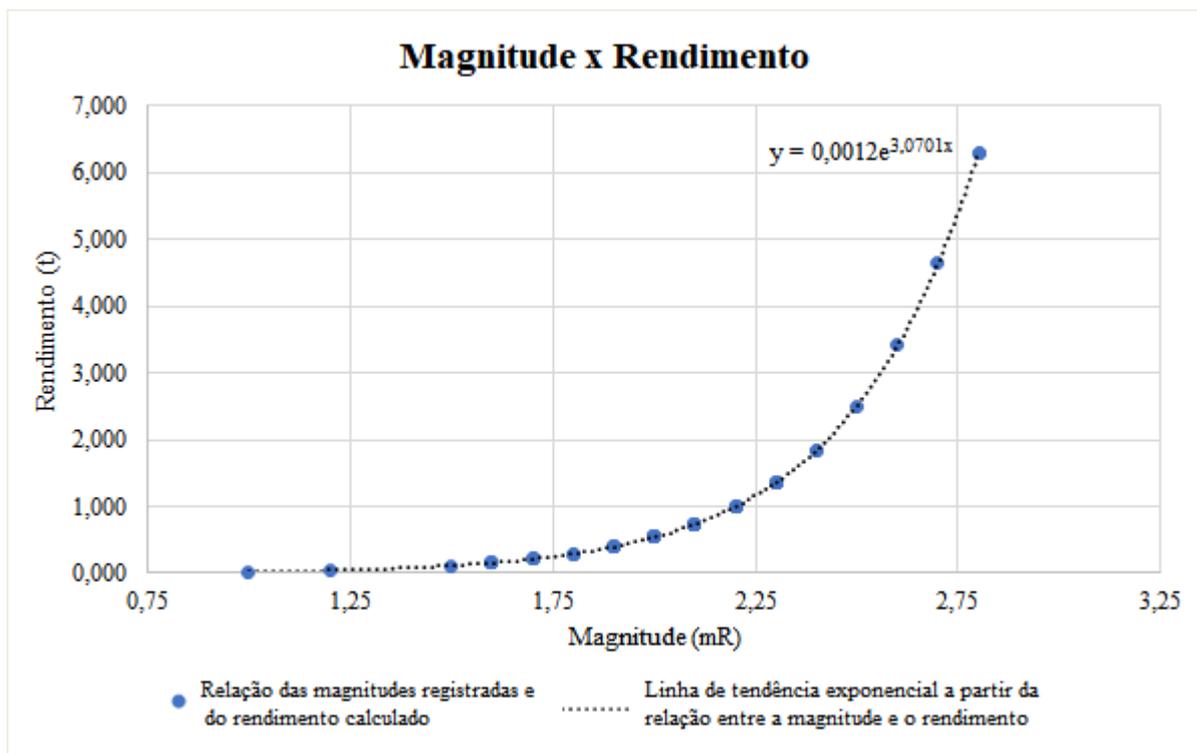


Figura 23 - Relação entre magnitude e rendimento.

A Figura 23 mostra que há uma relação exponencial entre a magnitude de onda de corpo (m_b) e o rendimento equivalente das explosões em t (ton) de TNT, regida pela linha de tendência dada por $y=0,0012e^{3,0701x}$. Os valores de rendimento encontrados variam de 0,25 a 6,3t de TNT.

Através da tecnologia infrassônica, responsável pelo monitoramento na atmosfera, utilizamos o período correspondente à amplitude de pico máxima para estimar o rendimento da carga explosiva em TNT (equação 9), conforme mostra a Figura 24.

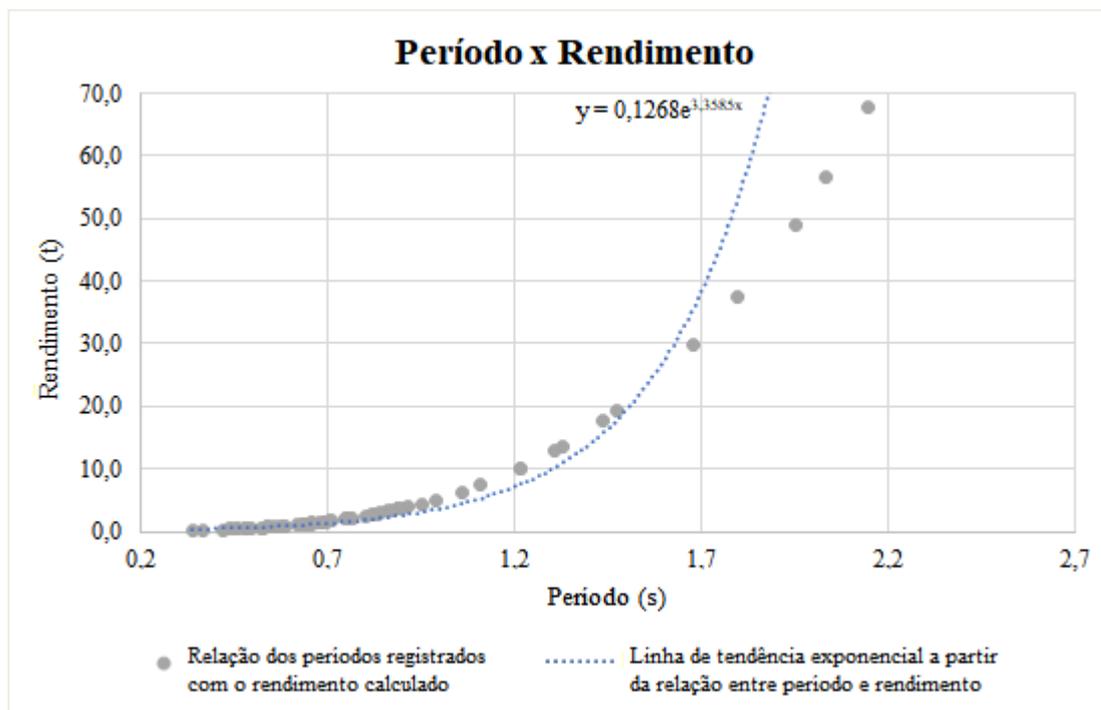


Figura 24 - Relação entre o período e o rendimento.

No gráfico da Figura 24, a relação entre o rendimento (t) e o período correspondente à máxima amplitude do sinal infrassônico, regida pela linha de tendência dada por $y=0,1268e^{3,3585x}$.

Outro parâmetro utilizado para estimar o rendimento da carga explosiva em TNT foi a amplitude da pressão. Neste caso, considerando-se que o rendimento é em função de duas variáveis, amplitude do sinal infrassônico (Pa) e da distância da fonte ao receptor (km), não foi possível ajustar os dados a uma curva. Através dos valores da Tabela 04, percebe-se uma relação inversamente proporcional entre a distância e a amplitude de pressão, ou seja, quanto maior a distância (fonte x receptor) menor a amplitude de pressão. Essa relação perpetuou em boa parte dos valores e acredita-se que seja verdadeira, visto que na equação para o cálculo do rendimento o parâmetro do vento estava inserido, fazendo com que os valores não sejam tão precisos. Ao analisar a relação entre ambos os parâmetros e o rendimento calculado, não foi possível correlacionar entre si os valores conhecidos. Os valores de rendimento encontrados variam entre 2kg a 7500kg. Esse valor inferior é não aceitável, pois é muito baixo.

Comparando os valores dos rendimentos obtidos nas três metodologias, não foi possível obter uma relação direta. Contudo, pelas discussões levantadas na revisão bibliográfica acerca da temática, entende-se que não há uma relação simples entre o rendimento das explosões químicas e a magnitude (Khalturin et al., 1998), entre o período (Green & Bowers, 2010) e entre

a amplitude da pressão relacionado à distância (Golden et al., 2011).

Pela relação entre magnitude e rendimento, o déficit pode ser tão grande quanto 2 unidades na escala de magnitude (Khalturin et al., 1998). Além disso, a propagação das ondas da explosão pode ser alterada devido ao acoplamento (Jacob & Neilson, 1977), sendo esse um fator de incertezas não embutido no cálculo, pois varia para cada evento registrado.

Pela relação entre período e rendimento, deve ser levado em consideração fatores como a influência dos ventos estratosféricos nas amplitudes do sinal, visto que a inclusão desses fatores tende a reduzir o limite de detecção (Green & Bowers, 2010). Mas pela adição de mais variáveis, mais complexo fica o cálculo.

Pela relação entre a amplitude da pressão e distância entre a fonte e o receptor, os fatores mencionados acima também colaboram para que o erro embutido seja maior. Visto que o vento também está ligado à amplitude, em que esse já estando presente na equação, não se sabe seu valor para o caso dessa pesquisa. Assim, um novo parâmetro de erro está incluso neste caso. A distância entre a fonte e o receptor envolve a latitude e longitude, em que se olharmos nas Figuras 12 a 17, nota-se que as explosões possuem coordenadas distintas, ou seja, sua localização não é tão precisa.

Ainda assim, apesar de todos os fatores que influenciam os parâmetros utilizados, o cálculo pela magnitude mostrou-se mais coerente do que os outros métodos. No qual, comparando com discussões de outras pesquisas como (Ottemöller & Evers, 2007) e (Assink et al., 2018), mostrou-se mais condizente com os fatores e resultados apresentados.

A combinação dos resultados das estimativa complexa fornece uma perspectiva da importância sobre o uso das tecnologias infrassônica e sísmica para monitoramento de eventos na atmosfera e na superfície.

A abordagem infrassônica e sísmica pode ser muito útil para melhorar a compreensão de um tópico de pesquisa complexo, como a estimativa do rendimento de explosões químicas.

Esta pesquisa foi comprometida pela falta de informações acerca das cargas das explosões realizadas nas diversas pedreiras e registradas pelas estações sísmica e infrassônica. Esta seria uma informação extremamente útil para uma avaliação comparativa entre as estimativas de rendimentos e as cargas reais detonadas. Isto mostra a necessidade de se pressionar as mineradoras para prestar essas informações. Foram feitas correspondências a 23 mineradoras (Apêndice A) e nenhuma respondeu. Apenas uma mineradora respondeu, informando que esses dados são confidenciais e não poderia disponibilizá-los.

Como trabalho futuro, sugere-se realizar explosões de calibração como forma de se

verificar a consistência da aplicação das técnicas de estimativa de rendimento adotadas neste trabalho e aplicadas no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. (1983). *Estimating Airblast Characteristics for Single Point Explosions in Air, With a Guide to Evaluation of Atmospheric Propagation and Effects*. Acoustical Society of America - ANSI, New York. S2.20-1983 (ASA 20-1983).
- APPLETON, J. (2008). *Reforço Sísmico de Estruturas de Betão*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2008, 109.
- ARNOULT, K. M.; WILSON, C. R. OLSON, J. V.; SZUBERLA, C. A. L. (2005). *Infrasound associated with Mt Steller avalanche*. *Inframatics* 12:4–7
- ARROWSMITH, S.; BOWMAN, D. (2017). *Estimativa do rendimento da explosão a partir da combinação do modelo de onda de pressão*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141 (6), EL519-EL525.
- ASSINK, J.; AVERBUCH, G.; SHANI-KADMIEL, S.; SMETS, P.; EVERS, L. (2018). *Uma análise sísmo-acústica do teste nuclear norte-coreano de 2017*. *Cartas de pesquisa sísmológica*. 2018; 89 (6): 2025–2033. Doi: <https://doi.org/10.1785/0220180137>
- ASSUMPÇÃO, M. (1983). *Uma escala de magnitude regional para o Brasil*. *Boletim da Sociedade Sísmológica da América* 1983 ;73 (1): 237–246. doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0730010237>
- AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E.A.G. (2006). *Introdução à Mecânica das Rochas*. Caderno Didático. Ed. UFV, Viçosa, 361P. Disponível em: <<https://30porcento.com.br/livro/9788572691154-Introdu%C3%A7%C3%A3o-%C3%A0-Mec%C3%A2nica-das-Rochas---Caderno-Did%C3%A1tico-85>>. Acesso em: 09/09/2021.
- BALACHANDRAN, N. K.; DONN, W. L. (1971). *Characteristics of infrasonic signals from rockets*. *Geophys J R astr Soc* 26:135–148
- BARBIERI, E.; ROSELLI, L.; RODRIGUES-FILHO, J. L. (2019). *Influência de Fatores Oceanográficos sob as Comunidades de Aves Marinhas da Região de Vitória-Trindade, Banco de Abrolhos e Ressurgência Cabo Frio*. In: OBSIS. Disponível em: DOI

10.22533/at.ed.82619131121.

- BARROS, L. V.; FONTENELE, D. P., (2002). *IS09 Infrasound Station – International Monitoring System*, Final Report – Site Preparation, Construction and Installation. 254pp.
- BARROS, L. V.; NERI, B. L.; CARVALHO, J. M.; FONTENELE, D. P. (2020). *A Participação brasileira no sistema de verificação do tratado de proibição total de testes nucleares/ Lucas Vieira Barros ... [et al.]. – 1. ed. – Tubarão (SC) : Copiart, 2020. 152 p.*
- BBC NEWS. (2020). *Krakatoa, o inferno de Java: a erupção há 137 anos que foi sentida no planeta inteiro*. BBC News Brasil, 24 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-50308295>>. Acesso em: 7 ago. 2021.
- BEDARD, A. J. Jr (1988). *Infrasound from natural sources in Internoise 88*. Proceedings from the 1988 International Conference on Noise Control Engineering, Avignon, France
- BEDARD, A. J. Jr (1993). *Low-frequency sound waves associated with avalanches, atmospheric turbulence, severe weather, and earthquakes*. J Acoust Soc Am 94(3):1872
- BEYER, R. T. (1998). *Sounds of Our Times: Two Hundred Years of Acoustics*. New York: Springer-Verlag.
- BIANCHETTI, M. (2019). *Mineradoras de pequeno porte predominam no País*, diz Ibram. Diário do comércio, 2 ago. 2019. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/economia/pequenas-e-microempresas-representam-87-do-setor>. Acesso em: 7 ago. 2021.
- BLOCH, M. (2001). *Apologia da história: Ou o ofício do historiador*. trad. André Telles. Editora Zahar. Rio de Janeiro.
- CHRISTIE, D. R.; CAMPUS, P. (2010). *A rede de infrassons IMS: Desenho e implantação de estações de infrassons em monitoramento de infra-som para estudos atmosféricos* (pp. 29-75). Springer, Dordrecht.
- COTTEN, D. E.; DONN, W. L., OPPENHEIM, A. (1971). *On the generation and propagation of shock waves from apollo rockets at orbital altitudes*. Geophys J Int 26:149–159
- CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) – *Preparatory Commission*.

Disponível em: <<https://www.ctbto.org/specials/who-we-are/>>. Acesso em: 20 jul. 2021

DAVIDSON, M.; WHITAKER, R. W. (1992). *Miser's Gold*, Los Alamos National Laboratory Technical Report: LA-12074-MS, February

DERBLI, M. (2010). *Quando a terra treme*. ComCiência, (117), 0-0.

DONN, W. L.; SHAW, D. M. (1967). *Exploring the atmosphere with nuclear explosions*. Rev Geophys 5:53–82

DONN, W. L.; RIND, D. (1972). *Microbaroms and the Temperature and Wind of the Upper Atmosphere*. J. Atmos. Sci., 29(1):156–172.

DONN, W. L.; BALACHANDRAN, N. K.; KASCHAK, G. (1974). *Atmospheric infrasound radiated by bridges*. J Acoust Soc Am 56:1367

DONN, W. L. (1978). *Exploring the atmosphere with sonic booms*. Am Sci 66:724–733

EDWARDS, W. N.; BROWN, P. G.; REVELLE, D. O. (2006). *Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 68, 1136–1160.

ENRICONI, L. (2018). *Guerra Fria: a guerra ideológica entre duas potências*. In: Politize! 9 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.politize.com.br/guerra-fria/>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

ESCALAS RICHTER E MERCALLI. SECRETARIA DA EDUCAÇÃO DO PARANÁ (2021). Disponível em: <<http://www.geografia.seed.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=274>>. Acesso em: 06/09/2021.

EVERS, L.; HAAK, H. (2007). *Infrasonic forerunners: Exceptionally fast acoustic phases*. Geophys Res Lett 34:L10806. doi:10.1029/2007GL029353

GAEBLER, P.; CERANNA, L.; NOOSHIRI, N.; BARTH, A.; CESCO, S.; FREI, M.; GRÜNBERG, I.; HARTMANN, G.; KOCH, K.; PILGER, C.; ROSS, J. O.; DAHM, T. (2019). *A multi-technology analysis of the 2017 North Korean nuclear test*. Solid Earth, 10, 59–78, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/se-10-59-2019>

- GARCÉS, M.; WILLIS, M.; HETZER, C.; LE PICHON, A.; DROB, D. (2004). *On using ocean swells for continuous infrasonic measurements of winds and temperature in the lower, middle, and upper atmosphere*. Geophys Res Lett 31:L19304. doi:10.1029/2004GL020696
- GEORGES, T.M. (1973). *Infrasound from convective storms: Examining the evidence*. Rev Geophys Space Phys 11:571–594
- GEREMIAS, D. (2014). *O barulho mais alto do mundo foi simplesmente catastrófico*. Mega Curioso, 7 out. 2014. Disponível em: <<https://www.megacurioso.com.br/fenomenos-da-natureza/46899-o-barulho-mais-alto-do-mundo-foi-simplesmente-catastrofico.htm>>. Acesso em: 14 jul. 2021.
- GIBBONS, S.; KVRNA, T.; NÄSHOLM, P. (2019). *Caracterização do campo de ondas infrassônico a partir da repetição de eventos sismo-acústicos*. Em monitoramento de infrassom para estudos atmosféricos (pp. 387-407). Springer, Cham.
- GOLDEN, P.; NEGRARU, P.; HOWARD, J. (2012). *Estudos de infra-som para estimativa de rendimento de explosões HE*. Metodista Do Sul Univ Dallas Tx.
- GOLDSTEIN, P. (2020). *Rendimento de explosão de Beirute e efeitos da altura da nuvem de cogumelo do ambiente de origem* (nº LLNL-TR-815803). Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (Estados Unidos).
- GREEN, D. N.; BOWERS, D. (2010). *Estimativa da capacidade de detecção da rede de infrassons do International Monitoring System*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115 (D18).
- GREENE, G.E.; BEDARD, A. J. (1986). *Infrasound from distant rocket launches, national oceanic and atmospheric administration technical report*. No: NOAA-TM-ERL-WPL-131, February NTIS Number: PB86-182771/HDM
- GROVER, F. H. (1968). *Research notes: a note on infrasonics at U.K.A.E.A*. Blacknest. Geophys J R astr Soc 16:311.
- HAGERTY, M.; KIM, W.Y.; MARTYSEVHICH, P. (2002). *Infrasound detection of large mining blasts in Kazakstan*. Pure Appl Geophys 159(5):1063–1079.

- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. (2016). *Fundamentos de Física*. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009 vol 4, 2016.
- JACOB, B.; NEILSON, G. (1977). *Magnitude determination on Lownet*, Global Seismology Internal Report 86, British Geological Survey.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. (2009). *Geofísica de Exploração*. São Paulo - Oficina de textos.
- KHALTURIN, V.I.; RAUTIAN, T.G.; RICHARDS, P.G.; Kim, W.Y. (1996). *Evaluation of Chemical Explosions and Methods of Discrimination for Practical Seismic Monitoring of a CTBT*. 167.
- KHALTURIN, V.I.; RAUTIAN, T.G.; RICHARDS, P.G. (1998). *The seismic signal strength of chemical explosions*. Bull. Seism. Soc. Am., 88, 1511 – 1524.
- KIM, K.; RODGERS, A. (2016). *Waveform inversion of acoustic waves for explosion yield estimation*. Geophys. Res. Lett. 43(13), 6883–6890, <https://doi.org/10.1002/2016GL069624>.
- KIM, K., RODGERS, A.; WRIGHT, M. (2018). *Análise de incerteza para inversão de forma de onda de infra-som: Aplicação para estimativa de rendimento de explosão*. The Journal of the Acoustical Society of America, 144 (6), 3351-3363.
- LE PICHON, A.; CANSI, Y. (2003). *PMCC for infrasound data processing*. Inframatics 2:1–9
- LE PICHON, A.; CERANNA, L.;VERGOZ, J. (2012). *Incorporação de modelagem numérica nas estimativas da capacidade de detecção da rede de infrassom IMS*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117 (D5).
- LE PICHON, A., CERANNA, L., VERGOZ, J.; TAILPIED, D. (2019). *Modelagem da capacidade de detecção da rede global de infrassom IMS*. Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies (pp. 593-604). Springer, Cham.
- LE PICHON, A., VERGOZ, J., BLANC, E., GUILBERT, J., CERANNA, L., EVERS, L.; BRACHET, N. (2009). *Avaliação do desempenho da rede de infra-sons do Sistema*

Internacional de Monitorização: Cobertura geográfica e variabilidades temporais. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Res., 114, D08112, doi: 10.1029 / 2008JD010907.

LE PICHON, A.; BLANC, E.; HAUCHECORNE, A. (2009). *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. In *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5>

LISZKA, L. (1974). *Long-distance propagation of infrasound from artificial sources*. J Acoust Soc Am 56:1383

LISZKA, L.; WALDEMARK, K. (1995). *High resolution observations of infrasound generated by the supersonic flight of the Concorde*. J. Low Frequency Noise and Vibration 14(4):181–192

MENDES, E. (2020). *Velocidade do som*. Educa Mais Brasil, 20 jul. 2020. Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/velocidade-do-som>. Acesso em: 10 ago. 2021.

MENEGAT, R.; FERNANDES, P.; FERNANDES, L.; PORCHER, C. (2012). *Para Entender a Terra* [by Jonh Grotzinger; Tom Jordan] - 6ed Tradução.

MIALLE, P. (2019). *Infrasound Sources*. Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. Provisional Technical Secretariat, Vienna International Centre. P.O. Box 1200 A-1400, Vienna, Austria.

MOLINA, E. (2021). *Ondas Elásticas no Interior da Terra*. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/~eder/EAD/aula3.pdf>. Acesso em: 17 set. 2021.

MOLINA, E. (2021). *Sismologia*. Disponível em: https://www.iag.usp.br/~eder/ensinarcompesquisa/Sismologia_f.pdf. Acesso em: 17 set. 2021.

MORRIS, I.; POWELL, B. (2014). *The Greeks. History, culture and society*. Harlow: Pearson Education, 2014.

MUELLER, R.A.; MURPHY, J. R. (1971). *Características sísmicas de detonações nucleares subterrâneas: Parte I. Escala do espectro sísmico*. Bulletin of the Seismological Society

of America, 61 (6), 1675-1692.

MURPHY, J. R.; MUELLER, R.A. (1971). *Características sísmicas de detonações nucleares subterrâneas: Parte II. Determinações de energia elástica e magnitude*. Bulletin of the Seismological Society of America, 61 (6), 1693-1704.

MUTSCHLECNER, J. P.; WHITAKER, R. W.; AUER, L. H. (1999). *An empirical study of infrasonic propagation*. Tech. Rep. LA-13620-MS, Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, N. M.

MURPHY, J. R. (1981). *P wave coupling of underground explosions in various geologic media, in Identification of Seismic Sources: Earthquakes or Underground Explosion*. NATO Adv. Study Inst., Ser. C, vol. 74, edited by E. S. Husebye and S. Mykkeltveit, pp. 201 – 205, D. Reidel, Dordrecht, Netherlands.

NERI, B. L. (2019). *Detecção e interpretação de sinais de infrassom com a Estação Infrassônica de Brasília – I09BR*. Orientador: Lucas Vieira Barros. 2019. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia apresentada à Comissão Examinadora do Instituto de Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

OBSERVATÓRIO SISMOLÓGICO (SIS-UnB). (2019) *Sobre: O Observatório Sismológico*. [S. l.], 2019. Disponível em: <<http://obsis.unb.br/portalsis/?pg=about>>. Acesso em: 19 out. 2021.

OLIVEIRA, N.E.C.; FAVA, N.; BARBOSA, P.F. (2020). *Por que existem gemas sintéticas e simulantes?*. 50º Congresso Brasileiro de Geologia, 50., 2020, Brasília. Anais. [...]. [S. l.: s. n.], 2020.

OLIVEIRA, N. E. C.; IANNIRUBERTO, M. (2019). *Importância da medição de exsudação de gases naturais e antrópicos*. 25º Congresso de Iniciação Científica da UnB e do 16º Congresso de Iniciação Científica do DF, 25., 2019, Brasília. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2019.

OTTEMÖLLER, L.; EVERS, L. G. (2005). *Análise sismo-acústica da explosão do depósito de petróleo Buncfield no Reino Unido*. 11 de dezembro de 2005, Geophysical Journal International, Volume 172, Edição 3, março de 2008, páginas 1123–1134, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03701.x>

- PEREIRA, M. B. (1998). *Metrologia óptica de superfícies e filmes dielétricos, com extensão a recobrimentos de microestrutura inomogênea*. XVI, 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- PIRCHNER, M. (2021). *Sísmica I – AGG 0232*. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/~marcelo/agg232info/Ondas/apostila1_ondas_e_refracao.doc>. Acesso em: 05/09/2021.
- PILGER, C.; GAEBLER, P., HUPE, P.; KALIA, A. C.; SCHNEIDER, F. M.; STEINBERG, A.; SUDHAUS, H.; CERANNA, L. (2021). *Estimativa de rendimento da explosão de Beirute em 2020 usando forma de onda de acesso aberto e dados de sensoriamento remoto*. Sci Rep 11, nº 4144 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93690-y>
- PREPARATORY COMMISSION FOR THE COMPREHENSIVE NUCLEAR TEST BAN TREATY ORGANIZATION (PrepCom) (1997). *Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty*, vol. 97-28276, 139 pp., Compr. Test Ban Treaty, Vienna.
- POSEY, J. W.; PIERCE, A. D. (1971). *Estimation of nuclear explosion energies from microbarograph records*. Nature 232:253
- PUJOL, R; TRIGUEIROS-CUNHA, N. (2018). *Campo Auditivo Humano: Curvas de Audibilidade Humana*. Cochlea, 6 jun. 2018. Disponível em: <<http://www.cochlea.org/po/som/campo-auditivo-humano>>. Acesso em: 4 ago. 2021.
- REED, J. W. (1969). *Climatology of airblast propagations from nevada test site nuclear airbursts*. Sandia National Laboratory Report SC-I.R.-69-572 m December
- REED, J. W. (1987). *Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions*. J Geophys Res 92(11):979
- REVELLE, D. O. (1976). *On meteor-generated infrasound*. J Geophys Res 81:1217–1229
- REZENDE, K. S.; MARQUES E. A. G.; BAËSSO, A. C. D. (2018). *Correlações entre resistência à compressão uniaxial e velocidade de ondas para alguns anfíbolitos e xistos do estado de Minas Gerais, Brasil*. In: 16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 16., 2018, São Paulo. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2018. 11 p. Disponível em:

- <http://www.schenautomacao.com.br/cbge/envio/files/trabalho_18.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2021
- RINGDAL, F.; MARSHALL, P. et al. (1992). *Seismic yield determination of Soviet underground nuclear explosions at the Shagan River test site*. Geophys. J. Int., 109, 65–77.
- SANTOS, J. A. (2021). *Propagação de Ondas Elásticas*. Disponível em: <<http://www.civil.ist.utl.pt/~jaime/ESG4.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2021.
- SILVA, D. C. M. (2021). *Natureza de uma onda*. Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/natureza-uma-onda.htm>>. Acesso em 09 set. 2021.
- SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; FERREIRA, T. V.; ROCHA, J. S.; SILVA, D. D. P. S.; SILVA, C. D. P. S. (2003). *Velocidade do Som no Ar: Um Experimento Caseiro com Microcomputador e Balde D'água*. Revista Brasileira de Ensino de Física, [s. l.], v. 25, ed. 1, p. 1-7, 18 fev. 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/Zbw9trJ3Q6w5WGWXtWzzwPj/?format=pdf&lang=pt.>> Acesso em: 15 set. 2021.
- STEVENS, J.; DIVNOV, I.; ADAMS, D.; MURPHY, J.; BOURCHIK, V. (2002). *Constraints on infrasound scaling and attenuation relations from Soviet explosion data*. Pure Appl. Geophys., 159(5), 1045–1062.
- TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. (2000). *Decifrando a Terra*. São Paulo Oficina de Textos. 285-304.
- VELOSO, J.A.V. (2012). *O terremoto que mexeu com o Brasil*. Brasília: Thesaurus.
- VELOSO, J. A. V. & CARVALHO J. M. (1993). *Um novo sistema sismográfico para o Observatório Sismológico da Universidade de Brasília*. Anais do 3º Congresso Internacional da SBGf, Vol.1 572-574, Rio de Janeiro, 1993
- VERSIGNASSI, A. (2019). *Qual foi o som mais alto da história?*. Super Interessante, 5 dez. 2019. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/o-som-mais-alto-da-historia/>>. Acesso em: 14 jul. 2021.

- WAXLER, R.; GILBERT, K. E. (2006). *A radiação de microbaromos atmosféricos pelas ondas do oceano*. The Journal of the Acoustical Society of America, [s. l.], v. 119, ed. 5, p. 1-7, 7 mar. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/Zbw9trJ3Q6w5WGWXtWzzwPj/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 17 set. 2021.
- WHITAKER, R. W. (1995). *Infrasonic monitoring*. Proceedings of the 17th Annual Seismic Research Symposium, in Scottsdale, AZ, September 12-15, 997–1000.
- WHITAKER, R. W. (2007). *Infrasound signals as basis for event discriminants*. Proceedings of the 29th Monitoring Research Review, Denver, Colorado, 25–27 September 2007, 905–913
- WHITAKER, R. W. (2008). *Infrasound signals from ground-motion sources*. Proceedings of the 30th monitoring research review, Portsmouth, Virginia, 23–25 September 2008, 912–920
- Wilson, C.R. (1971). *Auroral infrasonic waves and poleward expansions of auroral substorms at Inuvik*. N.W.T., Canada. Geophys. J. R. astr. Soc., 26: 179-181
- XAVIER JORGE, M. R. (2020). *A influência do pós-guerra fria na mudança de paradigma na Política Externa Angolana (1989 – 1992)*. Orientador: Prof. Doutor Samuel de Paiva Pires. 2020. Dissertação de Mestrado (Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Relações Internacionais) - Universidade Beira Anterior, [S. l.], 2020. p. 141. Disponível em: <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/11085/1/7630_16119.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.
- YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. (2008). *Física IV - Ótica e Física Moderna*, 12a ed. São Paulo, Addison Wesley.

ANEXO

ANEXO I – Resposta da Mineradora CMOC Brasil à carta de solicitação

Caro Prof. Dr. Lucas Barros,

Em resposta à sua solicitação, informamos que os dados solicitados à CMOC Brasil são de uso restrito da companhia e não estão disponíveis ao público externo. Ressaltamos que a CMOC atende a todos os requisitos do órgão responsável pela autorização e fiscalização do uso de explosivos, prezando pela segurança e eficiência de suas operações.

Mais uma vez, agradecemos o seu contato.

Saudações,

Equipe Fale Conosco CMOC

APÊNDICE

APÊNDICE A - Modelo de carta enviada às mineradoras

À Mineradora CMOC Brasil em Ouvidor/GO

Prezado Senhor (a),

Sou o Professor Lucas Vieira Barros, do Observatório Sismológico (SIS) da Universidade de Brasília (UnB). No SIS - UnB, registramos sistematicamente em nossas estações da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) e em uma Estação Infrassônica, localizada no interior do Parque Nacional de Brasília (PNB) as detonações realizadas nas pedreiras indicadas no mapa da Figura 1.

Estamos realizando um trabalho de pesquisa com nossos alunos de graduação e pós-graduação em Geofísica, relacionado com a determinação do rendimento dessas explosões equivalente em TNT (Trinitrolueno). Esses estudos, além dos interesses científico e acadêmico, estão relacionados com a participação brasileira na verificação do Tratado de Proibição Total de Testes Nucleares (CTBT), do qual o Brasil é signatário. O SIS - UnB participa de uma organização ligada às Nações Unidas, responsável pela implementação do Tratado.

Neste sentido, gostaríamos de ter a ajuda e a compreensão dos senhores no fornecimento de informações relativas à carga e ao tempo de retardo das detonações relacionadas na Tabela 1 em anexo.

Desde já agradecemos sua contribuição e esforço no fornecimento dessas informações.

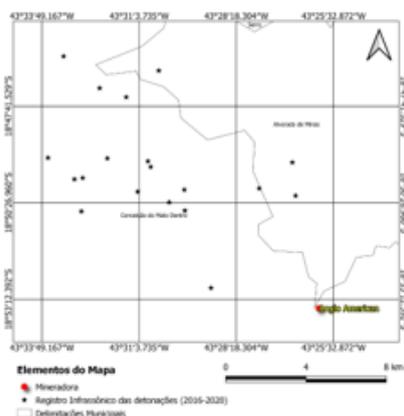


Figura 1 - Mapa com as localizações das mineradoras que realizaram explosões detectadas pela estação infrassônica de Brasília no período de 2016 a 2020.

N	Data	Hora (UTC)	Latitude	Longitude	Magnitude (mR)
1	18/10/2017	16:57:08.000	-18,81962	-43,53275	2,5
2	13/10/2017	20:19:59.000	-18,77105	-43,55345	2,5
3	17/10/2017	19:24:16.000	-18,77788	-43,50843	2,3
4	05/01/2019	15:10:51.000	-18,82371	-43,51224	2,2
5	21/11/2017	19:37:22.000	-18,83555	-43,51840	2,2
6	21/11/2017	19:30:42.000	-18,83742	-43,44371	2,2
7	06/10/2017	17:58:53.000	-18,83460	-43,49632	2,1
8	18/07/2017	20:17:38.000	-18,84487	-43,54501	2,0
9	14/08/2017	18:03:53.000	-18,81940	-43,56083	2,0
10	20/10/2017	17:03:29.000	-18,78621	-43,53640	2,0
11	19/10/2017	19:33:50.000	-18,82157	-43,44525	2,0
12	03/10/2017	17:58:43.000	-18,83391	-43,46095	2,0
13	25/11/2017	14:34:14.000	-18,84057	-43,50350	2,0
14	11/07/2017	20:16:19.000	-18,82895	-43,54441	1,9
15	28/11/2017	19:48:47.000	-18,79047	-43,52380	1,9
16	11/10/2017	18:48:42.000	-18,82103	-43,51355	1,8
17	04/10/2017	18:51:59.000	-18,84453	-43,49608	1,8
18	14/10/2017	13:56:06.000	-18,82956	-43,54831	1,7
19	20/10/2017	17:02:36.000	-18,88133	-43,48372	1,5

Tabela 1 - Relação das detonações com mais altas magnitudes detectadas pela estação infrassônica de Brasília a serem estudadas. São indicadas informações de localizações, dia e hora da realização e magnitude na Escala Richter.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Lucas Vieira Barros
Observatório Sismológico
Universidade de Brasília