

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

BRUNO SIMÕES IBIAS

**AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO DO RUÍDO SÍSMICO AMBIENTE DEVIDO À
FORMAÇÃO DE UM CICLONE BOMBA EM SANTA CATARINA OCORRIDO ENTRE
30/06/2020 E 01/07/2020**

BRASÍLIA

2021

BRUNO SIMÕES IBIAS

**AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO DO RUÍDO SÍSMICO AMBIENTE DEVIDO À
FORMAÇÃO DE UM CICLONE BOMBA EM SANTA CATARINA OCORRIDO ENTRE
30/06/2020 E 01/07/2020**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Banca Examinadora do
Instituto de Geociências da Universidade de
Brasília como requisito na obtenção do grau
de bacharel em Geofísica

Orientador:

Prof. Marcelo Peres Rocha

Coorientadoras:

Prof. Luciana Figueiredo Prado

Prof. Susanne Tainá Ramalho Maciel

BRASÍLIA

2021

BRUNO SIMÕES IBIAS

**AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO DO RUÍDO SÍSMICO AMBIENTE DEVIDO À
FORMAÇÃO DE UM CICLONE BOMBA EM SANTA CATARINA OCORRIDO ENTRE
30/06/2020 E 01/07/2020**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Banca Examinadora do
Instituto de Geociências da Universidade de
Brasília como requisito na obtenção do grau
de bacharel em Geofísica

BANCA EXAMINADORA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço imensamente aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, me dando apoio e me incentivando. Agradeço à minha irmã, que demonstrou imenso carinho, sempre instigando para que me tornasse uma pessoa melhor e para que me dedicasse fortemente no cumprimento dos meus objetivos.

Ao meu orientador, Marcelo Perez Rocha, e às coorientadoras Luciana Figueredo Prado e Susanne Tainá Ramalho Maciel, que me deram suporte e socorro nos momentos de maior dificuldade, não somente durante o TF, mas sempre que necessário. Sem ajuda deles, este trabalho seria impossível.

Aos meus amigos mais antigos, que sempre se ofereceram para ajudar no que fosse necessário e que entenderam a minha ausência em alguma ocasião. Aos amigos que fiz na Geofísica que, com o passar do tempo, se tornaram cada vez mais próximos.

Por fim, agradeço ao corpo docente do IG/UnB por todos os conhecimentos passados e experiências vividas.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 1

Figura 1– A imagem mostra a zona de baixa pressão formada nas coordenadas 35°S 45°W além da sigla e posição das estações usadas. Em vermelho está representada a cidade de Chapecó.

3Erro! Indicador não definido.

Figura 2- Imagem do sismograma gerado com os dados da estação ITAB que mostram a perda de transmissão dos dados no período do evento. O sismograma na parte superior foi feito com os dados da estação ITAB para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020. O da parte inferior é um “zoom” realizado no sismograma da parte superior na área representada pelo retângulo vermelho.....

4Erro! Indicador não definido.

Figura 3- Imagem do sismograma gerado com os dados recuperados da estação ITAB. A linha vermelha indica as 00h do dia 30/06/2020. É possível ver um aumento expressivo no conteúdo de frequência do sismograma a partir do dia 30 se estendendo até o dia 02/07/2020.

5Erro! Indicador não definido.

Figura 4- Imagens infravermelhas do satélite GOES-16 representando a movimentação do ciclone entre os dias 30/06 e 01/07. A imagem 4a mostra o ciclone formado sob o estado do Rio Grande do Sul. Na imagem 4b vemos sua movimentação em sentido ENE. já nas imagens 4c e 4d observa-se o ciclone sob o oceano atlântico.

6Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO 3 11

Figura 5 - Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. Ele traz uma média das frequências medidas nas estações para o dia inicial e final de cada curva. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências de 0.2Hz a 0.3Hz, 2.5Hz a 3.5Hz e 20H a 30Hz.

..... 11

Figura 6 - Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação ITAB. A linha vermelha representa às 09h do dia 01/07.....

12

Figura 7 - Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mB) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

..... 13

Figura 8 - Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. O padrão é muito parecido com o gráfico da estação ITAB, mas para a banda de frequência de 2.5Hz a 3.5Hz os valores de média são um pouco mais elevados.

..... 14

Figura 9 - Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação AQDB. Observa-se um padrão semelhante aos gráficos da estação ITAB, mas com diferenças sutis.	15
Figura 10 - Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mB) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (https://portal.inmet.gov.br/).....	16
Figura 11 - Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. Aqui é possível ver a diferença nas médias do ruído sísmico em relação às estações anteriores. Porém, também apresenta uma média elevada para a banda de frequência de 0.1Hz a 1Hz.....	17
Figura 12 - Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação BSCB. É possível observar mudanças significativas nas respostas de deslocamento do solo. Assim temos um bom exemplo da influência regional do ciclone bomba.	18
Figura 13 - Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mB) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (https://portal.inmet.gov.br/).....	19
Figura 14 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. Observamos um padrão semelhante àquele apresentado por outras estações também inseridas no campo de influência de correntes atmosféricas, mas com destaque para a banda de frequência de 20Hz a 30Hz que apresenta valores elevados.	20
Figura 15 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação CPSB. Observa-se um padrão semelhante aos gráficos da estação AQDB, mas com diferenças significativas para a banda de frequência de 20Hz a 30Hz.	21
Figura 16 - Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mB) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (https://portal.inmet.gov.br/).....	22
Figura 17 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. Para esta estação vemos semelhanças tanto entre as estações inseridas no campo de influência do evento quanto de estações distantes, contudo, apresenta-se diferenças de amplitude.	23

Figura 18 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação FRTB. Aqui é possível observar mudanças significativas nas bandas de 2.5Hz a 3,5Hz e de 20Hz a 30Hz. Porém, para a banda de 0.1Hz a 1Hz, o padrão até então observado se mantém..... 24

Figura 19 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mB) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>)..... 25

Figura 20 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. Para a estação FRTB vemos um padrão semelhante ao de outras estações, com uma diferença nos valores de média para a banda de 20Hz a 30Hz. 26

Figura 21 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação PET01. Aqui é possível observar que o padrão para a banda de 0.1Hz a 1Hz se mantém, mas em outras bandas, apresenta diferenças em relação às outras estações. 27

Figura 22 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mB) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>)..... 28

Figura 23 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. O espectrograma apresenta semelhanças extremamente fortes com aquele apresentado pela estação ITAB. 29

Figura 24 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação PTGB. As semelhanças apresentadas com a estação ITAB só mudam para a banda de 20Hz a 30Hz. 30

Figura 25 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica no nível da estação (mB), rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>)..... 31

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 CICLONE BOMBA	4
CAPÍTULO 2. METODOLOGIA E DADOS	7
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	11
3.1 ITAB	11
3.2 AQDB	14
3.3 BCSB	17
3.4 CPSB	20
3.5 FRTB	23
3.6 PET01	26
3.7 PTGB	29
CAPÍTULO 4. CONCLUSÕES	32
CAPÍTULO 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

RESUMO

O presente trabalho traz em seu escopo a avaliação e análise do registro em estações sismográficas de um fenômeno meteorológico ocorrido na parte sul do Brasil entre 30/06/2020 e 01/07/2020, classificado como “ciclone bomba” e que causou grandes danos à cidade de Chapecó no estado de Santa Catarina. Este fenômeno decorre da diferença de temperatura entre massas de ar e da rápida diminuição da pressão atmosférica, apresentando ventos com dinâmica espiralada. O foco principal do presente trabalho é avaliar a capacidade de estações sismográficas de registrarem fenômenos meteorológicos, e assim, a partir da análise dos registros sísmicos, realizar a caracterização temporal e espacial desse tipo de evento. A análise dos dados sísmológicos está pautada em 4 etapas, sendo elas: 1) A determinação do período dos dados nas estações; 2) A remoção das respostas dos instrumentos; 3) O cálculo das funções de probabilidade de densidade do espectro e 4) A elaboração de gráficos de deslocamento do solo por tempo. Observou-se que é de grande importância se identificar a banda de frequência em que tais eventos são registrados para que seja possível caracterizá-los. Ademais, foram usadas estações em diferentes locais, onde avaliou-se a passagem do ciclone e sua influência. Também foram usados dados de estações meteorológicas como auxílio no estudo.

Palavras-chave: Ruído Sísmico, Chapecó, Ciclone Bomba, Avaliação de Ruído Sísmico.

ABSTRACT

The present work has in its scope the evaluation and analysis of the record in seismographic stations of a meteorological phenomenon occurred in the southern part of Brazil between 06/30/2020 and 07/01/2020 classified as a "cyclone bomb" and which caused great damage to the city of Chapecó in the state of Santa Catarina. This phenomenon is due to the difference in temperature between air masses and a rapid decrease in atmospheric pressure, presenting winds with spiral dynamics. The main focus of the work was to evaluate the ability of seismographic stations to record meteorological phenomena, and thus, from the analysis of seismic records to perform some temporal and spatial characterization of this type of event. The analysis of seismological data is based on 4 stages, which: 1) The determination of the data period in the stations; 2) The removal of the responses from the instruments; 3) The calculation of the functions of probability of probability of spectrum density and 4) elaboration of soil displacement graphs by time. It was observed great importance in identifying the frequency band in which these events are recorded so that it was possible to characterize them. In addition, stations were used in different places where the passage of the cyclone and its influence were evaluated. Data from meteorological stations were also used as an aid in the study.

CAPÍTULO 1

1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A ocorrência de ciclones é relativamente comum para a região sul e sudeste do Brasil nos meses de inverno, mas o fenômeno ocorrido entre junho e julho de 2020 foi exacerbado (Gobato, 2020). Ciclones explosivos ou ciclones bomba possuem a característica de diminuir a pressão em seu centro rapidamente, o que gera ventos muito fortes que giram em torno desse centro. Em geral, iniciam-se sobre o oceano e, em média, os ciclones explosivos são mais profundos, possuem raio maior e pressão central menor, em relação aos ciclones não explosivos. Além disso, os ciclones explosivos geram ventos médios de até 60 % mais intensos que os demais ciclones (Bitencourt et al., 2013).

Os ciclones são influenciados pelo ponto de vista do clima e de outros fatores atmosféricos (Gobato, 2020). Dois fatores são importantes em áreas onde há ocorrência de ciclones. O primeiro é a instabilidade baroclínica, considerado como fundamental para a formação de eventos ciclogênicos. O segundo é relativo a troca de energia entre a superfície e a atmosfera. Altos gradientes horizontais de temperatura e o fluxo de calor latente entre a superfície oceânica e a atmosfera contribuem para a formação de ciclones, além de possuírem influência sobre sua intensidade. O fato de que a maioria dos ciclones explosivos são marítimos, aponta para a importância das trocas de calor entre a superfície e a baixa atmosfera como fonte de energia para a intensificação desses sistemas (Dal Piva et al., 2008). Essas trocas são importantes antes da fase de mais rápido desenvolvimento do ciclone, preparando o ambiente, através da maior disponibilidade de energia e umidade, para uma ciclogênese mais intensa (Bitencourt et al., 2013; Smith, 2000; Dal Piva et al., 2008)

Os ciclones explosivos possuem tempos de duração diferentes para diferentes meses do ano. Para os meses de junho e julho eles possuem duração de 48h. Os períodos de duração são considerados como ciclo de vida dos ciclones. Aproximadamente na metade desse ciclo de vida, ocorre sua máxima intensificação (Bitencourt et al., 2013). O ciclone bomba que atingiu a parte sul do Brasil incitou fortes ventos e chuvas que destelharam inúmeras casas e deixaram milhares de pessoas sem energia nos estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul. Mesmo com alertas sendo enviados aos estados, os danos não puderam ser evitados (Gobato & Heidari, 2020). O estudo de fenômenos meteorológicos intensos, como um ciclone bomba, se dá diante do seu grande potencial destrutivo. A análise eficiente das interações desses fenômenos com a terra, associada à rápida resposta dos órgãos de emergência, podem minimizar as perdas e prejuízos trazidos por eles (de Lima et al., 2020).

O registro do ruído sísmico em estações sismográficas, têm a capacidade de trazer informações importantes sobre a atmosfera, oceano, sociedade e das interações dessas com o solo (Sheen, 2014; Beauduin et al., 1996; Weaver, 2005; Maciel et al., 2021). A maior contribuição do ruído em registros sísmicos se deve à interação de ventos e ondas no oceano, chamado de ruído sísmico ambiental (Behr et al., 2013). Porém, a análise criteriosa do ruído sísmico em estações sismográficas instaladas próximas a cidades, têm se mostrado uma ferramenta de importante ajuda no estudo do monitoramento urbano em inúmeros aspectos, tais como eventos que reúnem várias pessoas e a movimentação dos carros nas rodovias, conectando a sociedade com as ciências da terra (Maciel et al., 2021; Coward et al., 2003; Chen et al., 2004). Ademais, a correlação de registro de ruídos entre estações se mostra útil para aprimorar o imageamento da estrutura interna da Terra e monitorar interações de ondas oceânicas devido a tempestades que lá se formam (Zhang et al., 2010; Shapiro et al., 2005)

O ruído nos registros sísmicos induzido por ventos e ondas oceânicas, também chamado de microssismos, revelam informações sobre interações contínuas entre a atmosfera, o oceano e o solo. Os Microssismos são vibrações que se propagam como ondas elásticas no solo, que incluem ondas de superfície (principalmente do tipo Rayleigh) e ondas compressoriais (P). Foi identificado que em frequências de 0,6-2 Hz, o ruído sísmico consiste em uma quantidade significativa de ondas P que são geradas offshore, e que potência do ruído de ondas P está altamente relacionada com a velocidade do vento offshore, demonstrando que essas ondas P de alta frequência são geradas por ventos distantes no oceano (Zhang et al., 2009; Zhang et al., 2010). Esforços recentes confirmaram que o ruído sísmico de ondas P se correlaciona bem com o estado-mar sazonal e pode até ser usado para rastrear tempestades distantes no oceano, dependendo da eficiência de propagação dessas ondas (Zhang et al., 2009; Zhang et al., 2010; Rindhararisaona et al., 2021). Também estão relacionadas com ondas oceânicas incitadas por ventos fortes como, por exemplo, em tempestades e ciclones ocorridos no oceano. Além disso, o movimento sísmico do solo relaciona-se indiretamente à intensidade com que essas interações se dão. Portanto, análises sísmicas poderiam ser empregados para estudar a relação entre ruído sísmico ambiente e os fenômenos atmosféricos (Gualtieri et al., 2018). O estudo de tais interações mostra-se como uma nova fonte de informação sobre os efeitos geofísicos das mudanças climáticas (Gualtieri et al., 2018; Gimbert & Tsai, 2015). Entendendo como os processos na atmosfera interagem com o oceano em observações sísmicas é possível monitorar o ambiente global (Zhang et al., 2010).

Trabalhos sugerem que o espectro de frequência do ruído sísmico ambiente carrega uma assinatura persistente de ciclones formados no oceano (Zhang et al., 2010). A presença desses ciclones, resulta no aumento do ruído sísmico ambiente no espectro de frequência, especialmente em bandas de 0.15 a 0.35Hz (Gualtieri et al., 2018;), variando de acordo com a localização da estação em relação ao evento, provavelmente devido à propagação de ondas sísmicas através da estrutura heterogênea da Terra (Gualtieri et al., 2018)

O trabalho busca avaliar a capacidade das estações sismográficas em registrar eventos meteorológicos na região costeira do Brasil, além de mensurar a influência regional da passagem do ciclone bomba. A forma mais eficiente para realizar tal análise se dá por meio de gráficos de deslocamento do solo e de espectros de frequência para diferentes estações e em períodos de tempo selecionados. Com isso, se torna possível caracterizar a frequência característica do evento, além de sua influência na movimentação do solo. Toda a infraestrutura operacional necessária foi disponibilizada pelo Observatório Sismológico. Foram utilizados dados da Rede Sismográfica Brasileira que são de livre acesso, assim como demais programas utilizados para o processamento (*seismic unix*, Qgis,). Foram acessadas as fontes de dados das páginas web do INPE e do INMET, com o intuito de obter informações meteorológicas.

Utilizou-se estações sismográficas localizadas próximas à cidade de Chapecó, cidade mais atingida, estações próximas à zona de baixa pressão, estações inseridas no campo de influência de correntes atmosféricas e estações distantes da cidade e do caminho percorrido pelas correntes e da zona de baixa pressão (Figura 1). Estações meteorológicas próximas as estações sismográficas também foram usadas (Figura 1) como auxílio no estudo. É esperado que seja possível identificar-se a mudança no padrão do ruído sísmico causado pelo evento meteorológico, tanto em tempo nos gráficos de deslocamento, quanto em frequência pelas funções de probabilidade de densidade espectral e correlaciona-los com as informações meteorológicas.

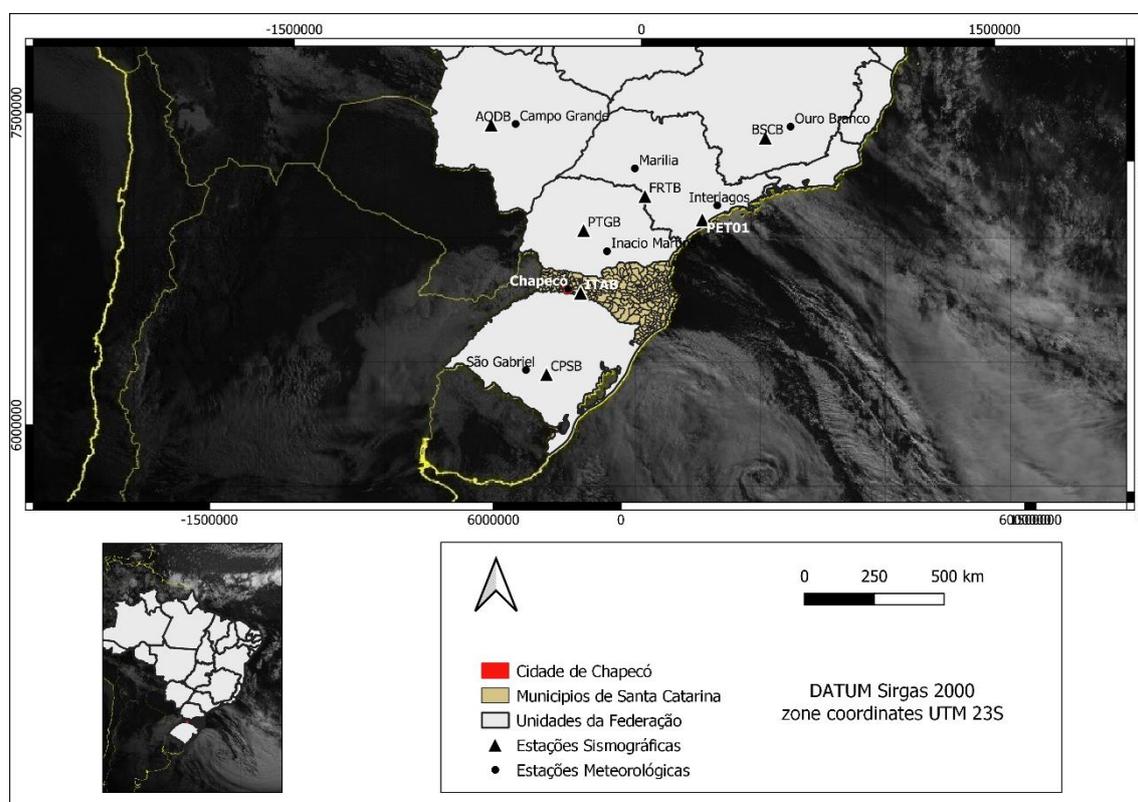


Figura 1 – A imagem mostra a zona de baixa pressão formada nas coordenadas 35°S 45°W além da sigla e posição das estações usadas. Em vermelho esta representada a cidade de Chapecó.

1.1 – CICLONE BOMBA

Ciclones extratropicais são tempestades compactas e circulares, geralmente com cerca de 320 km de diâmetro, cujos ventos giram em torno de uma região central de baixa pressão atmosférica. Os ventos são impulsionados por este núcleo de baixa pressão e apresentam uma dinâmica espiralada que estão intimamente relacionados com alguns fenômenos meteorológicos como a força de coriolis, gradiente horizontal de pressão e forças de atrito (Gray, 1998). Os fluxos de calor sensível e latente, envolvendo o gradiente de temperatura da superfície do mar, bem como a estabilidade da camada limite planetária mostram-se importantes para a ciclogênese, na medida em que os gradientes de temperatura da superfície do mar aumentam o cisalhamento vertical do vento, a instabilidade favorece os movimentos verticais e os fluxos de calor suprem energia para o ciclone.(Avila, 2018; Smith, 2000)

O termo "ciclone bomba" refere-se a ciclones extratropicais que têm rápida intensificação devido à rápida diminuição da pressão em seu centro. Esse tipo de fenômeno é comum em áreas que possuem um gradiente térmico elevado entre massas de ar muito frias e muito quentes e onde o centro deste sistema tem uma diminuição de pressão de cerca de 24 hPa em 24H (Allen et al., 2010). Entretanto, os fluxos de calor latente e sensível no Oceano Atlântico Sul, possuem influência decisiva na intensidade dos ciclones (Bitencourt et al., 2013; Dal Piva et al., 2008; Smith, 2000). O fato de ciclones explosivos ou ciclones bomba ocorrerem sobre o continente predominantemente nos meses mais frios, sugere a importância da baroclinicidade atmosférica. A combinação das liberações de calor latente, trocas de energia entre a superfície e a atmosfera e topografia favorecem o desenvolvimento das chamadas ciclogênese. Por outro lado, a constatação de que a maioria dos ciclones bomba são marítimos, aponta para a importância das trocas de calor entre a superfície e a baixa atmosfera como fonte de energia para a intensificação desses sistemas.(Bitencourt et al., 2013)

O fenômeno ocorrido entre terça-feira, 30 de junho, e quarta-feira, 1º de julho de 2020 com rajadas de vento chegando a 169km/h nas áreas mais atingidas, prejudicou principalmente a cidade de Chapecó. A zona de baixa pressão que se formou no Atlântico Sul, tornou-se uma área de convergência de correntes atmosféricas vindas do Paraguai e Argentina, passando pelo estado do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A passagem dessas correntes derrubou árvores, destruiu casas e, infelizmente, causou a morte de pessoas. A companhia de distribuição de energia do Rio Grande do Sul informou que em torno de 640 mil pessoas acabaram sem o suporte de energia no estado, e a brigada de incêndio do estado de Santa Catarina totalizou mais de 1600 ocorrências pós evento (Gobato & Heidari, 2020).

A Rede Sismográfica Brasileira também sofreu reflexos dessas consequências, tendo perdas de transmissão de dados da estação ITAB instalada no estado de Santa Catarina, próxima a cidade de Chapeco. A ausência dos dados pode ser observada em sismogramas gerados para essa estação no período de ocorrência do evento (Figura 2). Contudo, as estações gravaram os registros, sendo possível a recuperação das informações. O sismograma gerado para estação ITAB, com os dados recuperados,

mostraram sinais da atuação do evento com um aumento considerável na amplitude no sinal registrado (Figura 3).

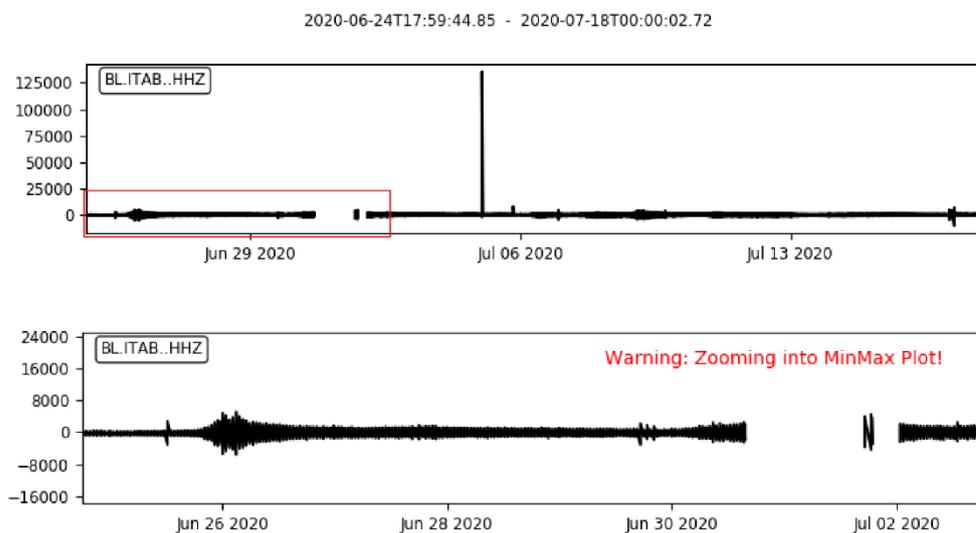


Figura 2 – Imagem do sismograma gerado com os dados da estação ITAB que mostram a perda de transmissão dos dados no período do evento. O sismograma na parte superior foi feito com os dados da estação ITAB para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020. O da parte inferior é um “zoom” realizado no sismograma da parte superior na área representada pelo retângulo vermelho.

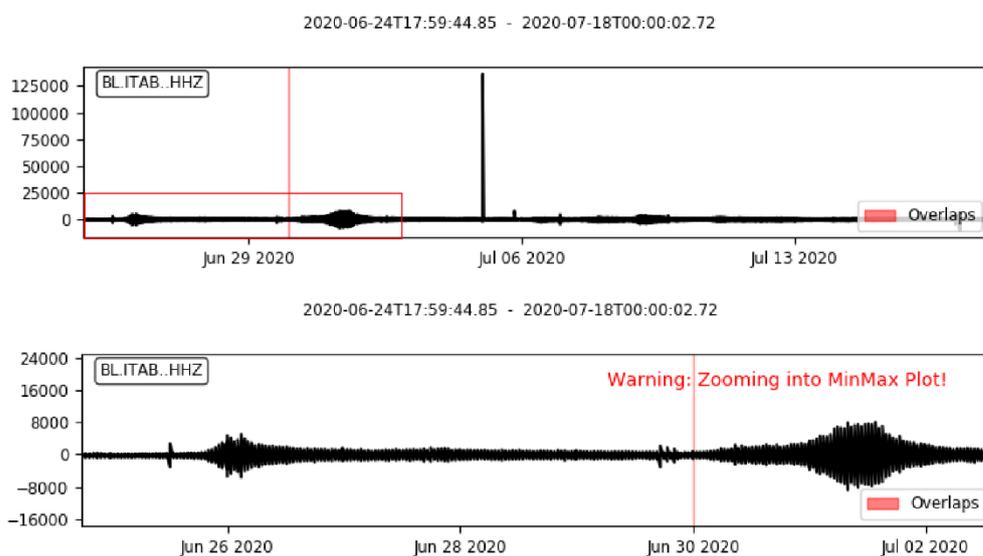


Figura 3 – Imagem do sismograma gerado com os dados recuperados da estação ITAB. A linha vermelha indica as 00h do dia 30/06/2020. É possível ver um aumento expressivo no conteúdo de frequência do sismograma a partir do dia 30 se estendendo até o dia 02/07/2020.

Entre a manhã do dia 30 de junho e a tarde do dia 1º de julho de 2020, foi possível observar a movimentação do ciclone por imagens de satélite. Nas primeiras horas dia 30 de junho observa-se muitas nuvens no estado do Rio Grande do Sul às 8h (Figura 4a). Nesse horário, o ciclone já estava formado sobre o estado, movendo-se para ENE. Os ventos mais intensos ocorreram na tarde e noite de terça-feira 30/06/2020. Na noite do dia 30, às 23h (Figura 4b), o ciclone já havia se deslocado para o Leste, em direção ao Oceano Atlântico. Na manhã do dia 01/07 (Figura 4c) o centro do ciclone encontrava-se sobre o Atlântico, porém sua borda oeste ainda influenciava nas condições do tempo, especialmente no litoral do Rio Grande do Sul. Já na tarde do dia 01/07, o ciclone já se apresentava mais afastado do continente (Figura 4d). As imagens são do satélite GOES-16 do canal do infra vermelho e mostram a temperatura do topo da nuvem (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA.portal.inmet,c2021.noticias.Disponível em:<<https://portal.inmet.gov.br/noticias/ciclone-bomba-fortes-ventos-e-tempestades-associados%20a%20o-forma%20a%20o-ciclone-extratropical-e-o-desenvolvimento-de-uma-ciclog%20a%20a-nese-explosiva-ou-ciclone-bomba>>. Acesso em: 01 de nov. de 2021).

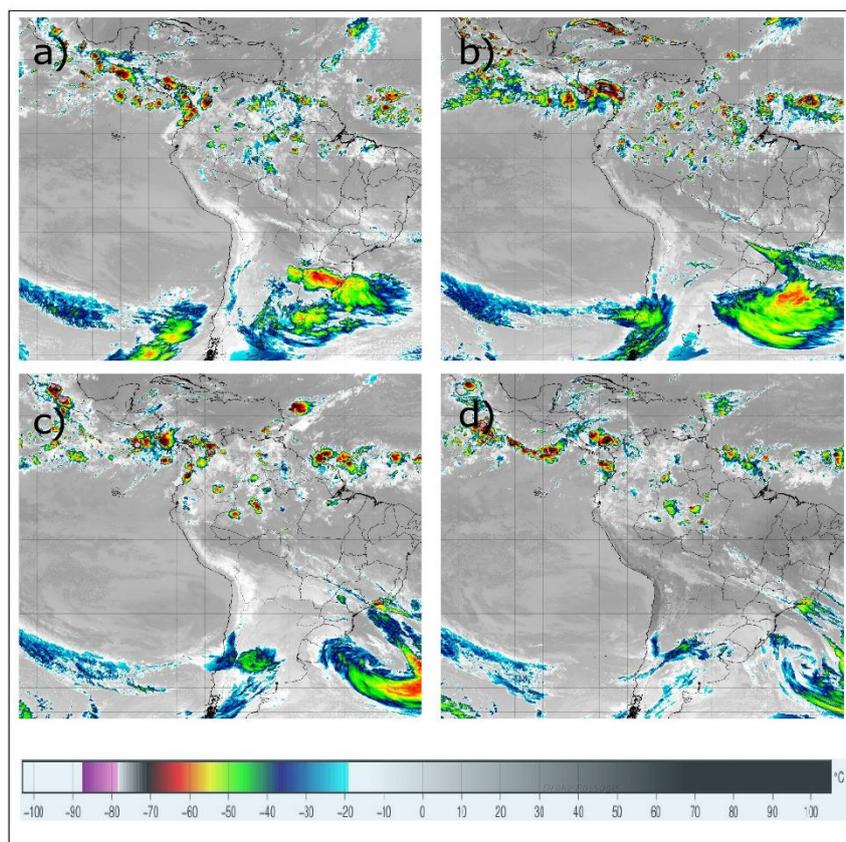


Figura 4 – Imagens infravermelhas do satélite GOES-16 representando a movimentação do ciclone entre os dias 30/06 e 01/07. A imagem 4a mostra o ciclone formado sob o estado do Rio Grande do Sul. Na imagem 4b vemos sua movimentação em sentido ENE. já nas imagens 4c e 4d observa-se o ciclone sob o oceano atlântico. A escala é referente a temperatura no topo da nuvem, onde a extremidade esquerda tem temperatura de -100°C e a direita 100°C . as cores vermelha, amarela, verde e azul indicam temperaturas entre -65°C a -35°C .

CAPÍTULO 2

2 – METODOLOGIA E DADOS

Apresentam-se, agora, características e aplicações do método utilizado. O método sísmico estuda perturbações que se propagam e interagem com o ambiente. Elas são traduzidas em ondas sísmicas, que são geradas naturalmente em terremotos ou artificialmente com fontes de explosivos. Este método é amplamente utilizado para estudar a estrutura interna da Terra e para a exploração mineral. Elas também são derivadas das interações dos ventos com o ambiente, do choque das ondas oceânicas com a costa, do movimento das placas tectônicas e da atividade humana nas cidades. Esta parte da energia sísmica é definida como ruído sísmico ou microssismos. Em todos os casos, as perturbações geradas por essas diferentes fontes e que interagem com o meio, podem ser estudadas por observações sísmicas.

O método consiste basicamente no registro da movimentação do solo por estações sismográficas. Estas registram dados analógicos, em forma de sinais elétricos, que traduzem a movimentação em registros sísmicos. Os dados analógicos registrados pelas estações são convertidos em sinais digitais por um conversor, fazendo-se possível usá-los para processamento e interpretação sísmica (INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA. IPMA, c2021. Quem somos. Disponível em: <<https://www.ipma.pt/pt/oipma/>>. Acesso em: 20 de out. de 2021). Para o estudo de ruído sísmico não é necessário a geração de qualquer tipo de energia, o meio, por si só, tem uma movimentação natural decorrente das fontes de ruído ambiental.

O Brasil dispõe de uma gama de estações sismográficas espalhadas por todo o seu território, formando a Rede Sismográfica Brasileira. A rede tem como objetivo a monitoração da sismicidade do território nacional e geração de informações que auxiliem na investigação da estrutura interna da Terra através da implantação de estações sismográficas permanentes (Bianchi et al., 2018).

As estações sismográficas estão continuamente registrando sinais sísmicos de diferentes fenômenos. Elas são capazes de registrar perturbações que se propagam no meio em forma de onda, com diferentes amplitudes e em frequências de diferentes tipos de fontes. Assim, os diferentes tipos de fontes podem ser relacionados com variedades de sinais sísmicos a depender da frequência e amplitude. Cada fonte emite ondas que aparecem em bandas distintas do espectro de frequência. Eventos de baixa frequência são conhecidos como *seismic hum* e acontecem devido à interação da atmosfera com o oceano e aparecem em bandas de frequência de 0.002-0.03 Hz. Sabe-se que as interações de ondas oceânicas com a costa compõem uma faixa do espectro de frequência de 0.05-0.1Hz, conhecida como microssismos primários, e que a interação entre ondas oceânicas compõem uma banda chamada de microssismo secundários 0.1~1.2Hz (Maciel et al., 2021; de Lima et al., 2020). Esses eventos formam uma parte do que os cientistas chamam de ruído sísmico.

A forma mais eficiente para a realização da análise, se dá por meio de gráficos de deslocamento do solo e de espectros de frequência para diferentes estações em períodos de tempo selecionados. Os gráficos de espectro de frequência nos ajudam a identificar quais as frequências características do evento, e os de deslocamento nos mostram o comportamento do solo com a passagem do fenômeno. Foram utilizadas sete estações sismográficas. As relacionadas à passagem de correntes atmosféricas foram as estações PTGB no estado do Paraná, FRTB no estado de São Paulo, PET01 também em São Paulo, AQDB no estado de Mato Grosso do Sul e a CPSB no Rio Grande do Sul. A estação localizada perto de Chapecó, a cidade mais atingida, foi a ITAB no estado de Santa Catarina. E a que está um pouco mais longe da influência do ciclone é o BSCB no estado de Minas Gerais (Tabela 1). Também foram usadas estações meteorológicas como auxílio no estudo (Tabela 2). Elas trazem informação sobre pressão atmosférica, rajadas de ventos e precipitação de chuva.

código	Localização	Latitude	Longitude	Elevação
BL.ITAB	SC	-27.234.900	-52.131.300	450
BL.AQDB	MT	-20.475.700	-55.699.700	150
BL.FRTB	SP	-23.343.900	-49.564.000	510
BL.PTGB	PR	-24.720.900	-52.011.820	980
BL.BSCB	MG	-20.998.400	-44.763.500	930
BL.CPSB	RS	-30.511.900	-53.490.500	300
ON.PET01	SP	-24.290.100	-47.275.340	150

Tabela 1- Estações utilizadas para o evento entre junho e julho de 2020. A sigla inicial do código da estação refere-se à instituição a que ela pertence. A coluna de localização traz a sigla do estado onde a estação está instalada. As colunas de latitude e longitude informam as coordenadas referentes a cada estação e à coluna de elevação.

Estação	Região	código	latitude	longitude	altitude	amostragem	UF
Chapecó	S	A895	-27,0853111	-52,6357111	679	Horário (UTC)	SC
Ouro Branco	SE	A513	-20,55666666	-43,75611111	1048,2	Horário (UTC)	MG
Marília	SE	A763	-22,235222	-49,965111	660	Horário (UTC)	SP
Inacio Martis	S	A823	-25,567879	-51,077946	1208,85	Horário (UTC)	PR
Campo Grande	CO	A702	-20,447195	-54,722615	528,47	Horário (UTC)	MT
São Gabriel	S	A832	-30,341438	-54,310909	114,89	Horário (UTC)	RS
Interlagos	SE	A771	-23,724501	-46,677501	771	Horário (UTC)	SP

Tabela 2- Estações meteorológicas utilizadas. A coluna com o título Estação informa o nome da Estação. As colunas de Região, Unidade da Federação (UF), latitude e longitude indicam onde as estações estão instaladas. A altitude indica a altura ao nível do mar e a amostragem é referente a taxa com que a estação fez as medidas.

O processamento dos dados seguirá uma sequência lógica e consiste na determinação do período de tempo, remoção da resposta do instrumento, cálculo das densidades de frequência e geração de gráficos de deslocamento do solo. Com isso pode-se observar tendências e picos nos dados cujas interpretações são apresentadas nos tópicos seguintes.

Para o processamento dos dados, utilizou-se o programa *seismc unix*, emulado em uma máquina virtual. Selecionou-se dados para períodos de tempo anteriores, durante e posteriores à ocorrência do evento, com o objetivo de caracterizar-se a variação do ruído sísmico nestes diferentes momentos. Utilizou-se o programa de Thomas leccoq ([GitHub - ThomasLecocq/SeismoRMS](#)) para a obtenção das imagens de espectro de frequência e de deslocamento do solo por dia, para o período selecionado. Assim, se torna possível identificar as bandas de frequências características do evento, além de avaliar o comportamento do deslocamento do solo.

O processamento dos dados seguirá a seguinte sequência: 1) seleção do período de cada estação; 2) remoção da resposta do instrumento; 3) cálculo das funções de densidade de probabilidade espectral; 4) geração dos gráficos de deslocamento.

- 1) O Observatório Sismológico da Universidade de Brasília dispõe de um banco de dados das estações da RSBR desde 2010. Foi disponibilizado *login* e senha de acesso remoto para acesso dos dados. Uma vez feito o *login*, criou-se uma pasta para que se pudesse fazer o *upload* dos dados. Foram selecionados dados do dia 24/06/2020 até o dia 17/07/2020 para as respectivas estações, que foram copiados para dentro da pasta.
- 2) Para remoção da resposta do instrumento, utilizou-se scripts disponibilizados por Thomas leccoq ([GitHub - ThomasLecocq/SeismoRMS](#)). Assim, o registro foi convertido para variação de deslocamento do solo. O resultado do processamento gerou arquivos npz, que foram usados para gerar os gráficos.
- 3) Os arquivos npz são usados para o cálculo das funções de densidade de probabilidade espectral e para avaliar em quais frequências o sinal relacionado ao ruído, causado pelo evento meteorológico, possui maior energia.
- 4) Os arquivos npz também são usados para gerar gráficos de deslocamento em relação ao tempo, que avaliam a variação da amplitude do ruído sísmico.

Para seleção dos dados, indicou-se uma série de estações de interesse, levando em consideração as suas posições, em relação ao fenômeno. Para atestar a capacidade de registro do evento nas estações é necessário escolher aquelas que estão próximas ao centro do sistema ou inseridas no seu campo de influência. Por outro lado, a avaliação do ciclone é feita com estações que estão um pouco mais distantes, para verificar seu comportamento regional. Assim, verificou-se as estações que tinham essas características e quais delas possuíam dados para o período em questão.

Para estudar a resposta sísmica do ciclone bomba, deve-se dar atenção à banda de frequência que ela integra. A melhor forma de se visualizar essa propriedade se dá por meio de espectrogramas. Os gráficos de densidade de probabilidade de frequência nos mostram em qual banda de frequência (Hz) estão concentradas as energias (dB) para um determinado período. O programa gera uma imagem de densidade de probabilidade de frequência com a média das frequências de cada dado. Assim, ele plota a média por frequências relacionando-a com a amplitude. Como se trata de uma média, não é indicado usar períodos muito longos, pois as frequências podem ser atenuadas. Então, selecionou-se os períodos de 24/06 a 26/06, 29/06 a 01/07 e 09/07 a 11/07, com o objetivo de verificar o comportamento da frequência para cada um deles. Assim, analisou-se as bandas de frequência que possuíam maiores energias para se averiguar a amplitude com que o solo foi movido entre o período de 24/06/2020 a 17/07/2020. As bandas de frequência usadas foram: 0.1Hz a 1Hz, 2.5Hz a 3.5Hz e 20Hz a 30Hz. Foi utilizada a componente vertical, representada nas imagens de deslocamento do solo pelo traço azul (HHZ), o traço laranja indica a média do deslocamento do solo para um período de 9h as 21h, isso foi feito com o intuito de evitar o efeito noturno onde há queda do deslocamento do ruído com o objetivo de deixar o gráfico mais estável.

CAPÍTULO 3

3 – RESULTADOS

3.1 – ITAB

Vemos que para uma banda de frequências entre 0.1Hz, e até aproximadamente 1Hz, a média de frequência para os três períodos apresentam valores elevados (dB). Também é possível ver que para a curva do período de ocorrência do fenômeno, linha roxa, a média para essa frequência é maior em relação às outras duas. Para as frequências entre 2.5Hz até 3.5Hz, as três curvas apresentam o mesmo padrão. Quando a frequência passa de 20Hz, é possível ver que somente a curva roxa apresenta uma média ligeiramente mais elevada (Figura 5).

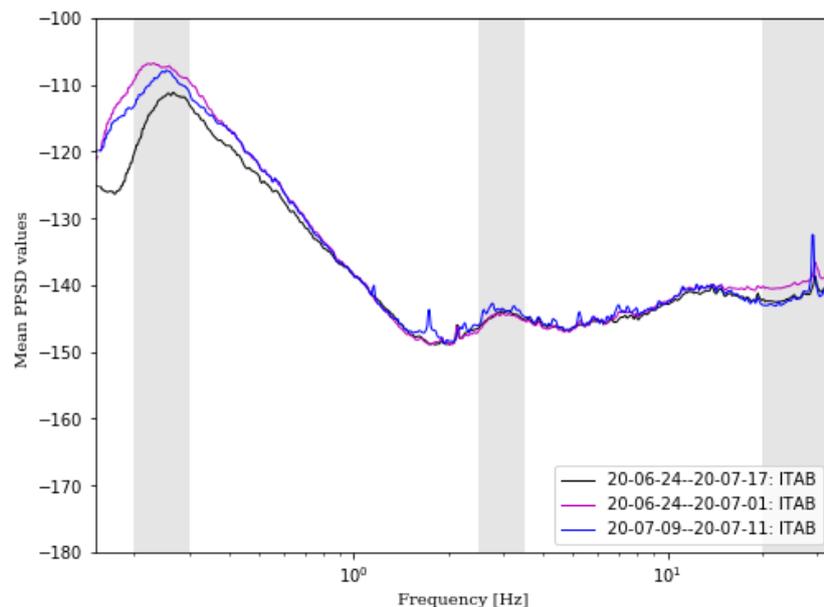


Figura 5 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. Ele traz uma média das frequências medidas nas estações para o dia inicial e final de cada curva. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências de 0.2Hz a 0.3Hz, 2.5Hz a 3.5Hz e 20H a 30Hz.

No gráfico de deslocamento do solo pode-se observar que a banda de frequência de 0.1Hz a 1Hz apresenta uma mudança expressiva na amplitude do deslocamento (mm) para o dia 30/06, às 09h. Essa banda pode estar relacionada à mudança de pressão atmosférica (de Lima et al., 2020; Beauduin et al., 1996). Para a banda de 2.5Hz a 3.5Hz, não vemos nenhuma mudança significativa para a movimentação do solo pelo tempo, o que reflete o que foi observado no espectro de frequência. Já para a banda de 20Hz a 30Hz, há um pico menos expressivo para o dia 30, indicado com a seta preta. Essa resposta pode ser associada com a ocorrência de chuvas. (Figura 6).

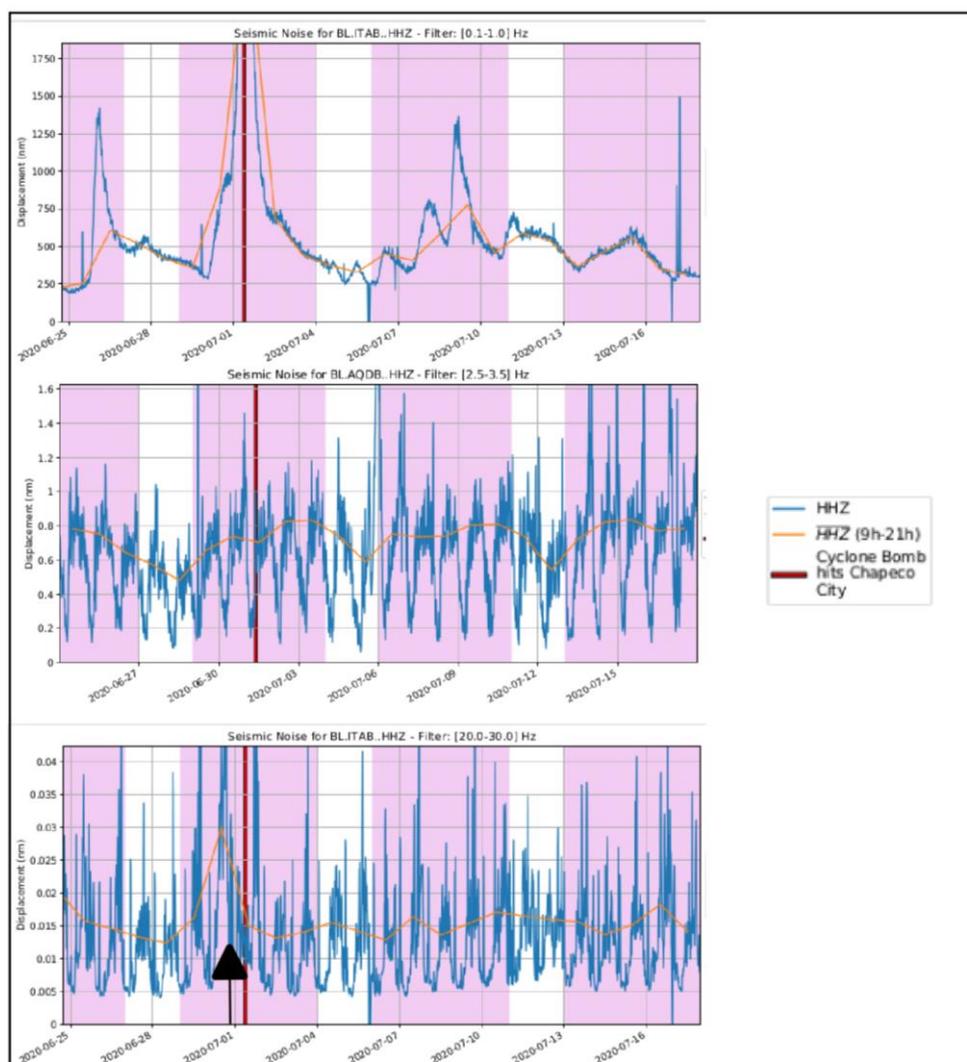


Figura 6 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020, no eixo das ordenadas, da estação ITAB. A linha vermelha representa às 09h do dia 01/07. Eixo das abscissas representa o deslocamento do solo em milímetro (mm).

Ao associar os dados da estação meteorológica situadas em Chapecó com os gráficos de deslocamento do solo, vemos que a pressão (mbar) apresenta um padrão de diminuição no dia 29/06. Tal padrão começa lento até chegar ao dia 30/06, por volta das 16h, com seu menor valor. Após, ele volta a aumentar um pouco, até aproximadamente às 10h do dia 01/07, que apresenta uma subida mais acelerada. Esses padrões são observados no gráfico de deslocamento do solo na banda de 0.1Hz a 1Hz. E vemos que para o dia 30, há a ocorrência de chuvas (mm), o que também é amarrado com o gráfico de deslocamento na banda de 20Hz a 30Hz (Figura 7). Os dados de rajada de vento (m/s), assim como os demais, podem validar o registro do evento nas estações meteorológicas.

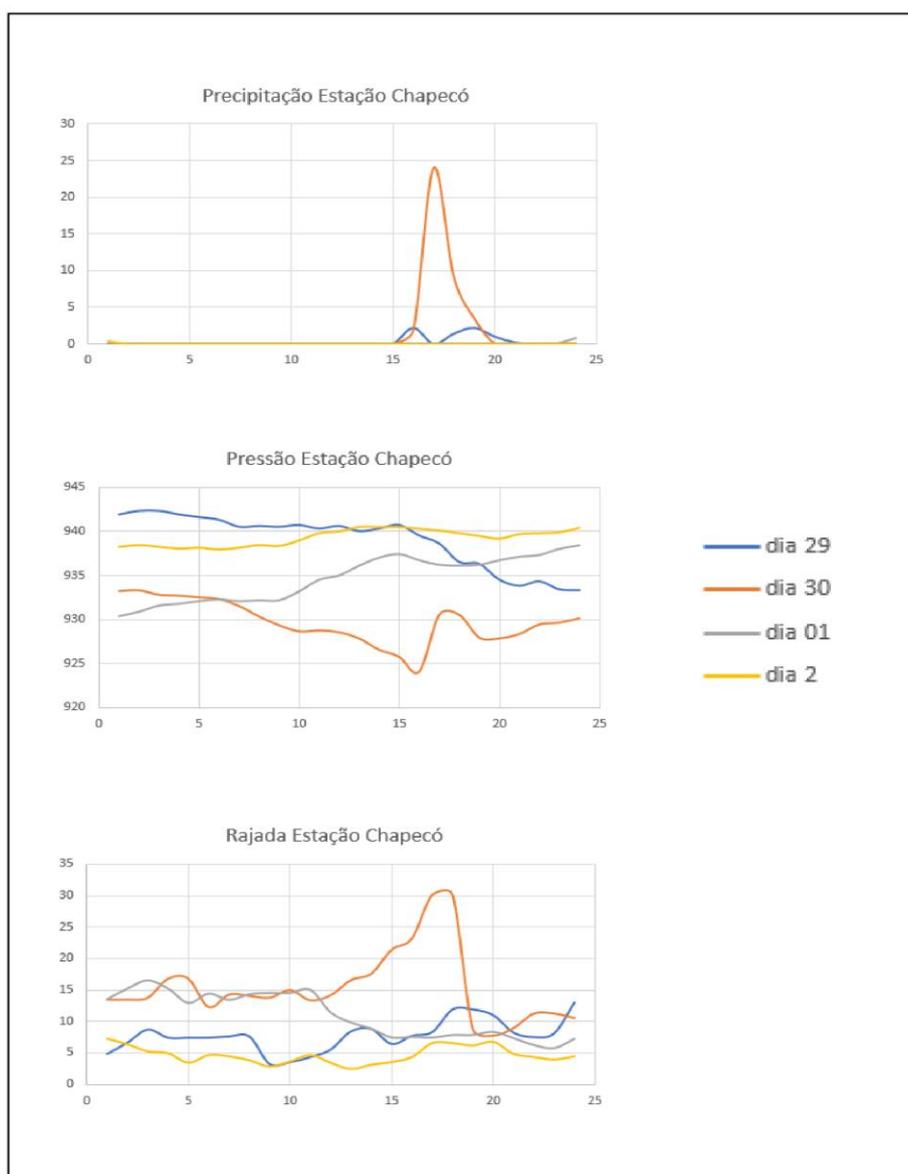


Figura 7 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mbar) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

3.2 – AQDB

A estação AQDB está inserida no campo de influência das correntes atmosféricas vindas do Paraguai. No gráfico de frequência (Figura 8), é possível observar um padrão muito parecido com o da estação ITAB, onde se verificam valores de médias (dB) elevadas para a banda de frequência de 0.1Hz a 1Hz, assim como um leve aumento do valor da média em relação às outras curvas para a banda de frequência de 20Hz a 30Hz. A diferença está na banda de frequência de 2.5Hz a 3.5Hz, que no caso dessa estação, apresenta um valor de média maior em relação a estação ITAB.

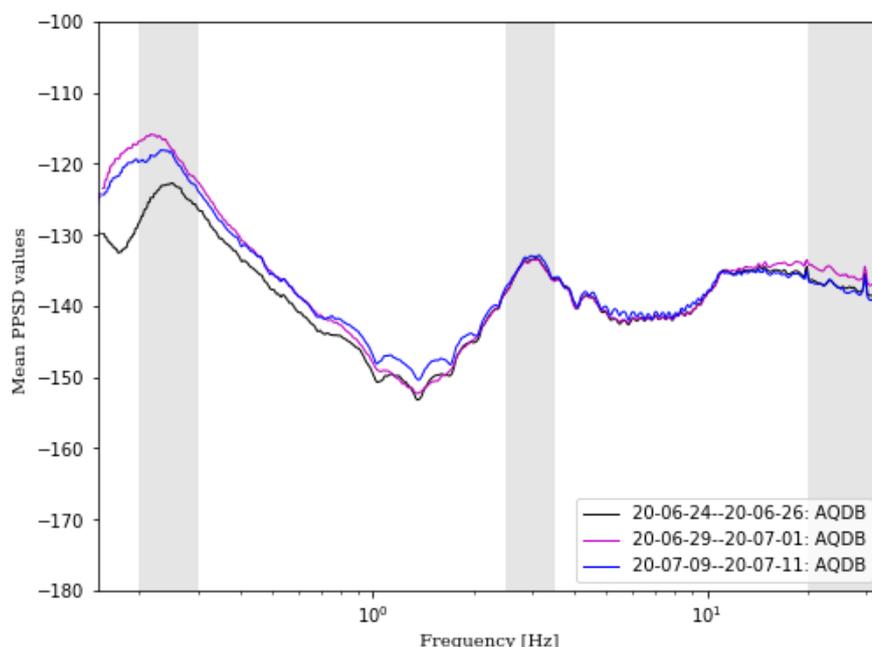


Figura 8 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. O padrão é muito parecido com o gráfico da estação ITAB, mas para a banda de frequência de 2.5Hz a 3.5Hz os valores de média são um pouco mais elevados.

É possível observar uma diferença nas amplitudes na escala do gráfico de frequência entre a estação AQDB e ITAB. Na banda de frequência de 0.1Hz a 1Hz, a estação AQDB tem valores de aproximadamente -115 (dB), e para a estação ITAB esses valores chegam a -105 (dB). Na banda de 2.5Hz a 3.5Hz, a amplitude para a estação AQDB é de aproximadamente -130 (dB), enquanto na estação ITAB é de -140 (dB). E para a banda de 20Hz a 30Hz, a amplitude da estação ITAB é de -140 (dB) e da AQDB -130 (dB).

Nos gráficos de deslocamento do solo, vemos que para frequência de 0.1Hz a 1Hz, o pico que antes foi visto na estação ITAB se manteve, porém com uma amplitude menos elevada, assim como visto no gráfico de frequência. Para as outras frequências, o padrão também é extremamente parecido, mas com diferenças em suas amplitudes. O que muda é para frequências altas de 20Hz a 30Hz, onde pico visto para estação ITAB no dia 30/06 aparece para a estação AQDB mas com uma amplitude bem menor, além de um pico no dia 06/07 (Figura 9).

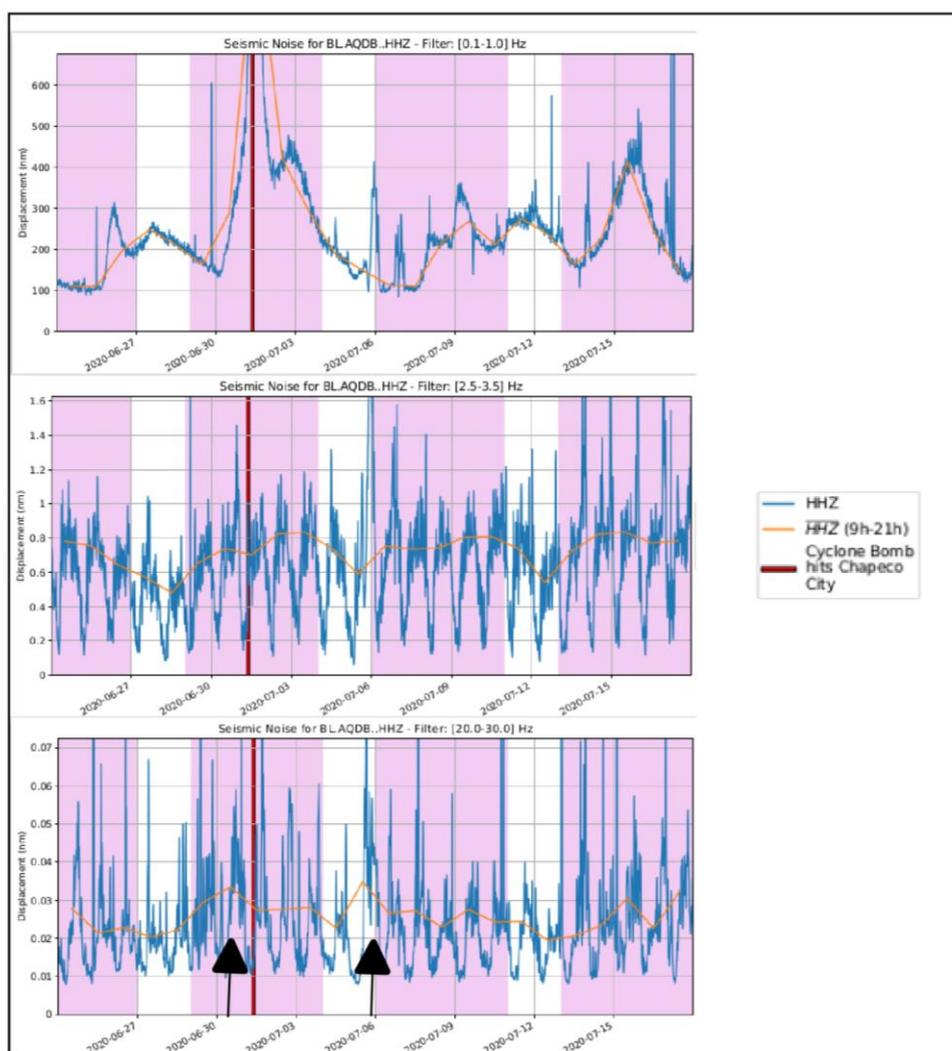


Figura 9 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação AQDB. Observa-se um padrão semelhante aos gráficos da estação ITAB, mas com diferenças sutis.

Para a estação Campo Grande, vemos que no dia 30/06, a pressão (mbar) apresenta valores baixos, mas não apresenta uma diminuição expressiva, como visto na estação próxima a Chapecó. O gráfico de deslocamento também retrata isso, onde vemos uma menor amplitude para banda de 0.1Hz a 1Hz. Porém, as rajadas de vento (m/s) apresentam um padrão de aumento até a metade do dia 29/06 seguido por uma diminuição. No dia 30/06 é possível ver um aumento abrupto por volta das 15h nos valores de rajadas (m/s), e no dia 01/07 o padrão volta a se assemelhar ao dia 29/06. Já no dia 06/07 vemos um padrão semelhante ao do dia 30, porém com menos intensidade (Figura 10). Relacionando com o gráfico de deslocamento do solo, vemos que o vento (m/s) e as chuvas (mm) influenciam na banda de frequência de 20Hz a 30Hz. Relacionando com a estação ITAB, vemos que a intensidade das rajadas (m/s), assim como a intensidade da chuva (mm) e a intensidade da variação de pressão (mbar), influencia na amplitude do deslocamento.

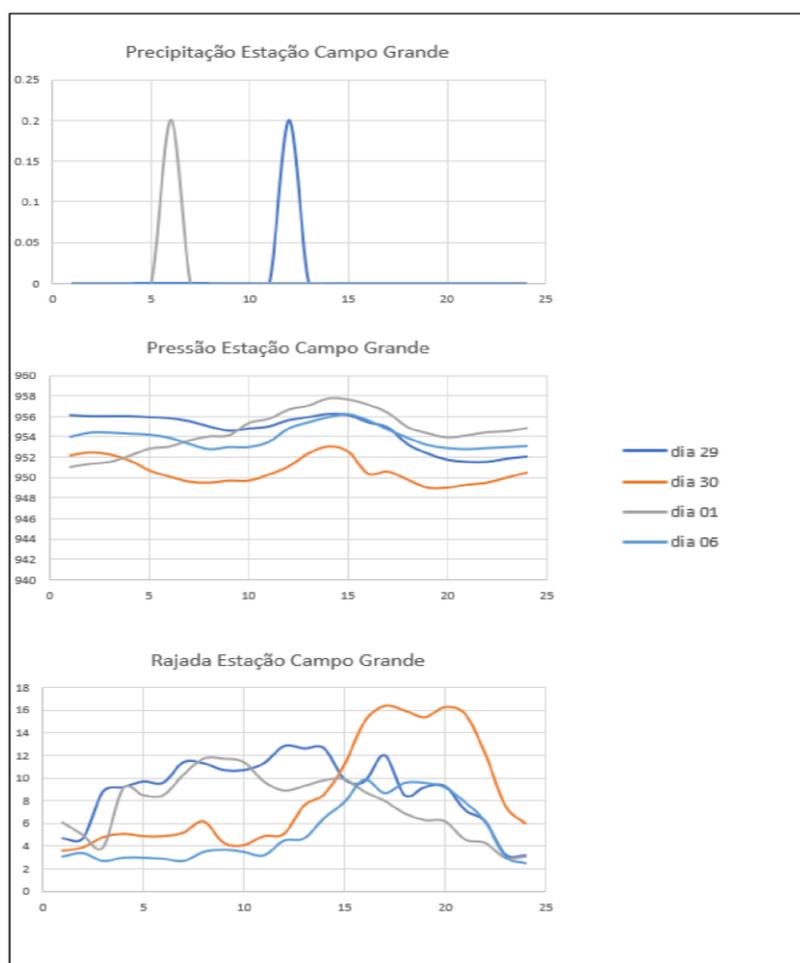


Figura 10 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mbar) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

3.3 – BSCB

A estação BCSB está instalada no estado de Minas Gerais, portanto, onde era esperado não se ter muita influência das correntes atmosféricas. Com essa estação, temos a ótima oportunidade de verificar o raio de influência da formação do ciclone bomba. Ao observar o espectrograma, continuamos vendo um pico maior para frequência de 0.1Hz a 1Hz. Para essa banda, a média também se apresenta mais dispersa em relação às curvas de AQDB e ITAB. Para as frequências de 2.5Hz a 3.5Hz e 20Hz a 30Hz já não vemos o mesmo padrão das estações anteriores (Figura 11).

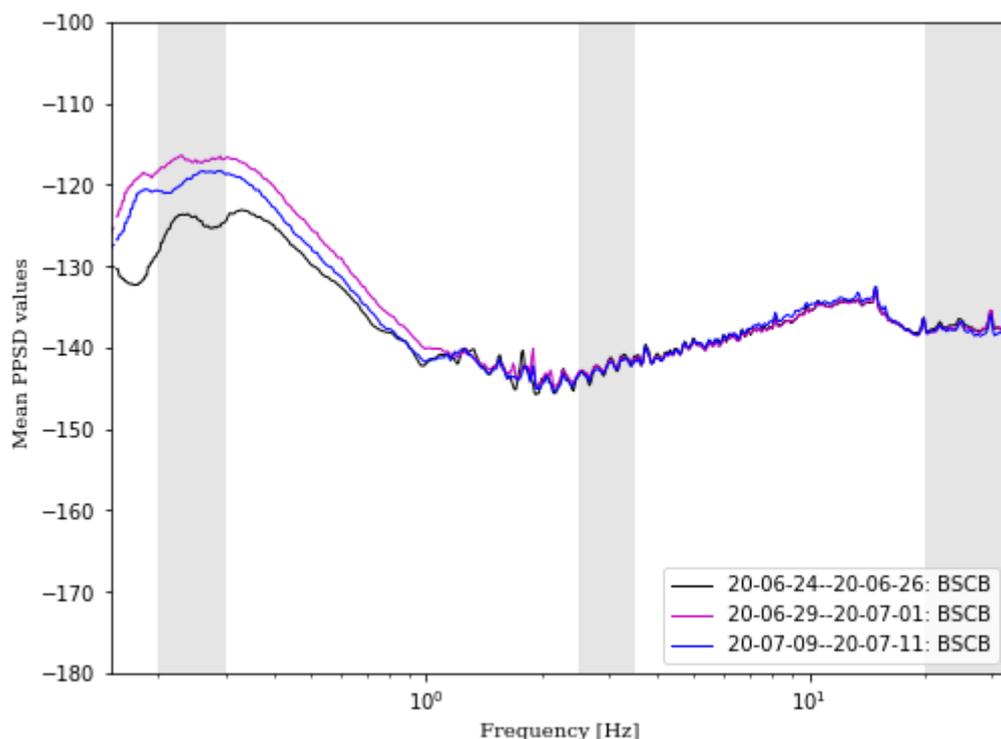


Figura 11 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. Aqui é possível ver a diferença nas médias do ruído sísmico em relação às estações anteriores. Porém, também apresenta uma média elevada para a banda de frequência de 0.1Hz a 1Hz.

A curva relacionada ao período de ocorrência do evento apresenta valores de médias maiores para banda de frequência de 0.1Hz a 1Hz em relação aos outros períodos. Já para as outras bandas, as três curvas apresentam valores praticamente iguais, com o detalhe que na banda de 2.5Hz a 3.5Hz, observa-se uma variação grande entre os valores de média.

No gráfico de deslocamento, vemos que na banda de 0.1Hz a 1Hz, o pico fica no dia 03/07. Portanto, 3 dias após o fenômeno ter atingido a cidade de Chapecó. Enquanto para as outras frequências, o deslocamento manteve o mesmo padrão para todos os períodos, apenas com uma variação maior para a banda de 2.5Hz a 3.5Hz, no período entre os dias 09/07 a 12/07 (Figura 12), assim como visto no gráfico de frequência.

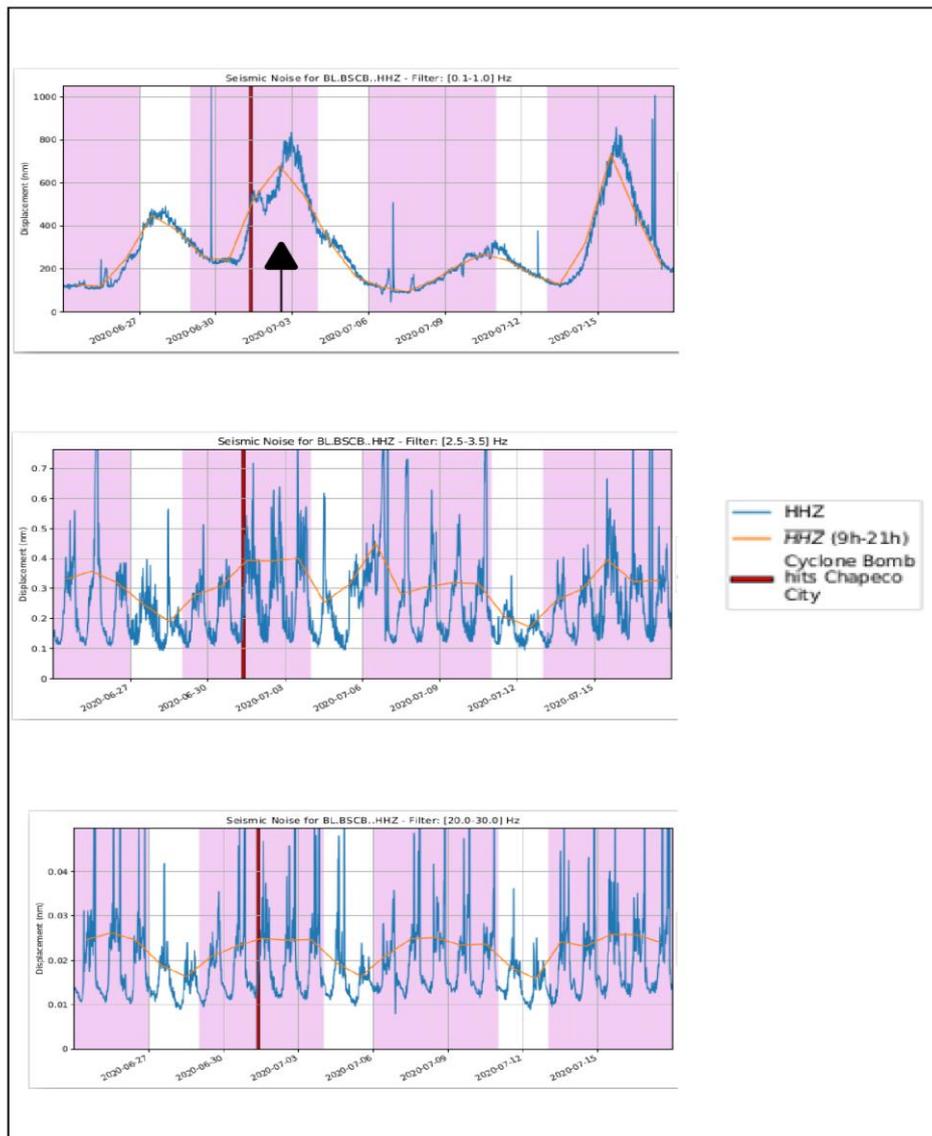


Figura 12 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação BSCB. É possível observar mudanças significativas nas respostas de deslocamento do solo. Assim temos um bom exemplo da influência regional do ciclone bomba.

Com esse produto é possível ver o efeito da atenuação das ondas pela amplitude do registro do deslocamento do solo, assim como a diferença temporal acarretada pela maior distância da estação ao evento. Outro ponto importante a se destacar, se relaciona

à variação observada no período entre os dias 09/07 a 12/07. Essa variação é observada também no espectrograma, porém, lá estamos tratando de média. Isso quer dizer que os valores de frequência apresentam uma maior variação, o que também se reflete no gráfico de deslocamento do solo.

Novamente vemos mudanças no padrão dos gráficos apresentados. Os gráficos da estação meteorológica de Ouro Branco apresentam aumento nas rajadas de vento (m/s) e diminuição da pressão atmosférica (mbar) para o dia 01/07, e praticamente não apresentam chuva para os períodos selecionados (Figura 13).

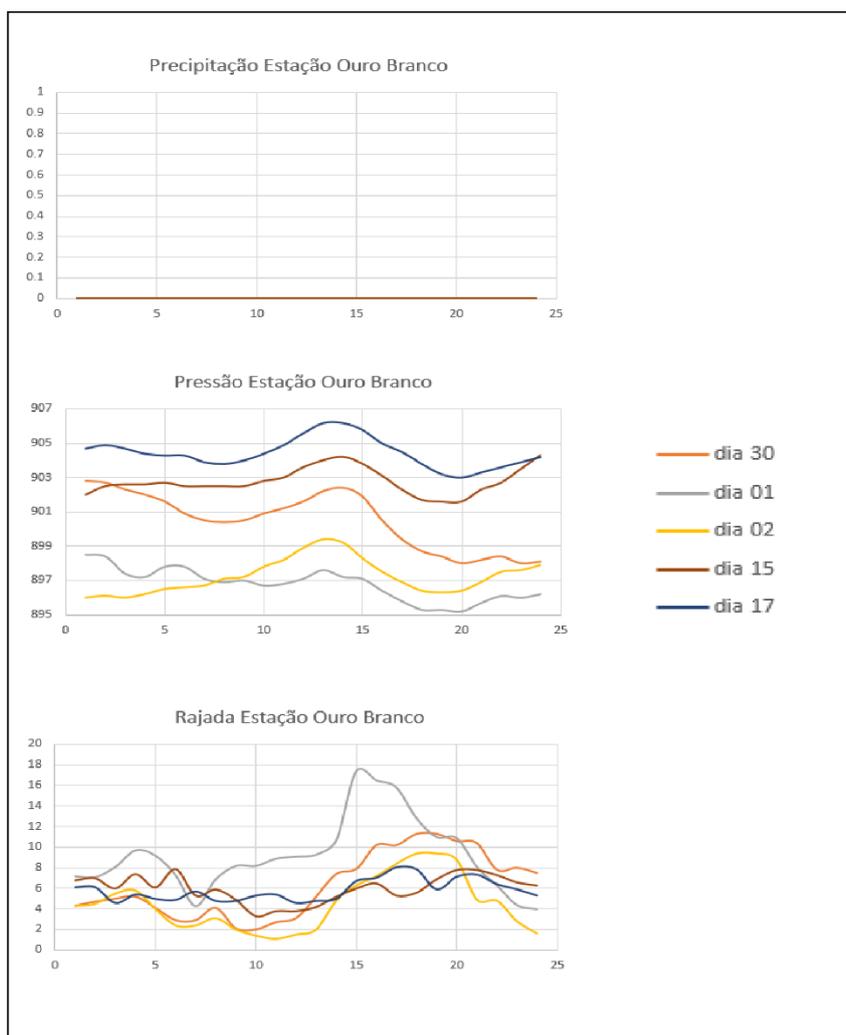


Figura 13 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mbar) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

Vemos, também, que a diminuição da pressão começa nas últimas horas do dia 30/06. No dia 01/07, ela mantém um padrão quase linear, diferente das outras estações vistas, onde a pressão apresentava um padrão de aumento para o dia 01/07. Esse padrão se reflete nos dados de deslocamento do solo. Aqui temos um importante exemplo de como a posição da estação em relação ao evento, assim como os fatores relacionados às rajadas de vento, pressão e à precipitação, influenciam nos dados sísmicos. Do mesmo modo, podemos ver como a influência regional do ciclone se dá tanto nos dados meteorológicos quanto nos dados sísmicos.

3.4 – CPSB

Outra estação inserida no campo de influência das correntes atmosféricas é a CPSB, que se relaciona às correntes vindas da argentina. O espectrograma apresenta um padrão muito semelhante àquele visto para estação AQDB, também inseridas no campo de influência de correntes atmosféricas. Um destaque a ser feito é para os valores de média na banda de 20Hz a 30Hz, onde vemos valores também elevados (Figura 14).

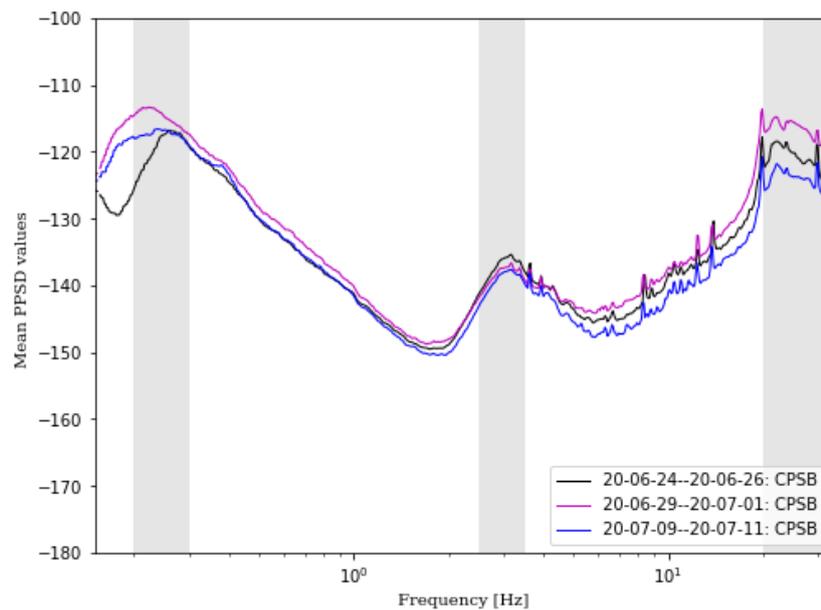


Figura 14 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. Observamos um padrão semelhante àquele apresentado por outras estações também inseridas no campo de influência de correntes atmosféricas, mas com destaque para a banda de frequência de 20Hz a 30Hz que apresenta valores elevados.

Nos gráficos de deslocamento observa-se, também, um padrão parecido com o de outras estações. O pico da banda de 0.1Hz a 1Hz aparece para o dia 01/07 às 09h. A banda de 2.5Hz a 3.5Hz, não apresenta muita variação, visto também no espectrograma. Já na banda de 20Hz a 30Hz, destaca-se três picos, para os dias 25/06, 30/06 e 08/07, onde a amplitude do deslocamento muda (Figura 15).

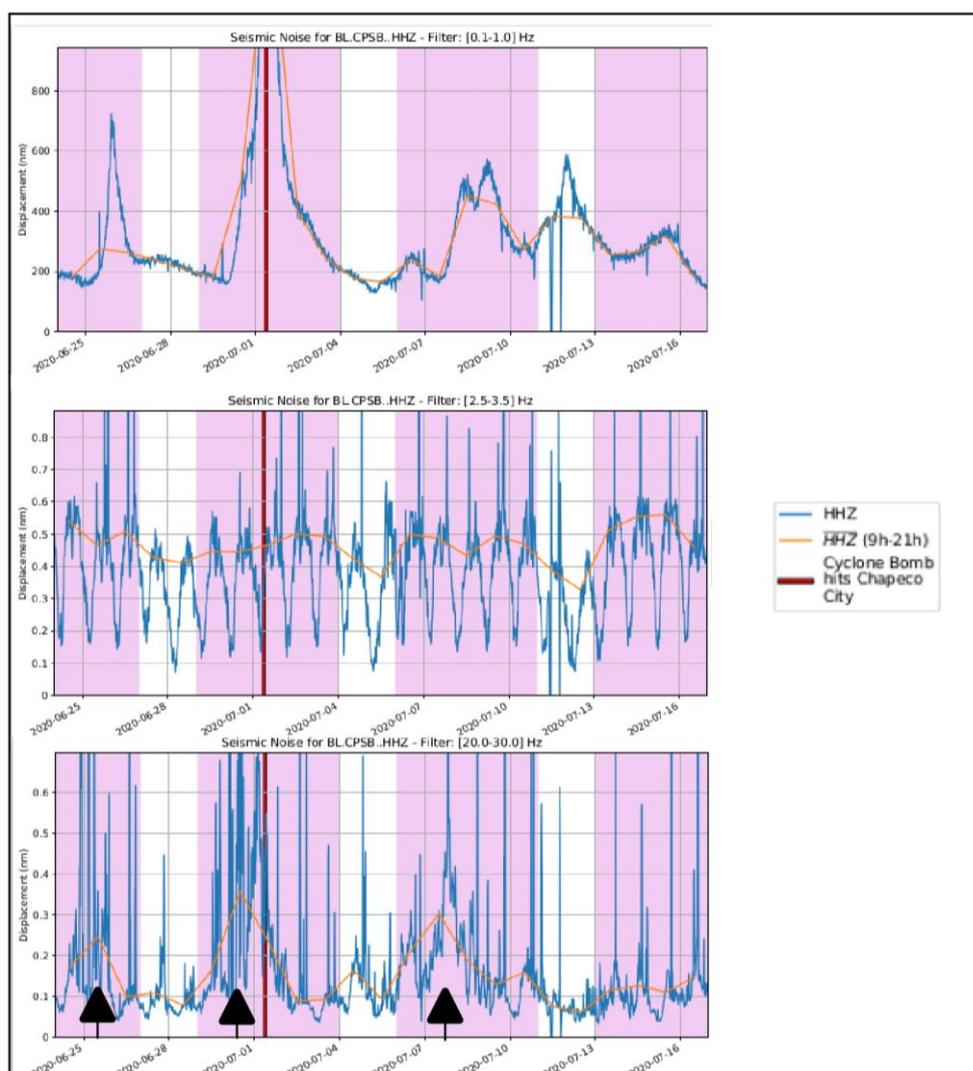


Figura 15 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação CPSB. Observa-se um padrão semelhante aos gráficos da estação AQDB, mas com diferenças significativas para a banda de frequência de 20Hz a 30Hz.

A amplitude das curvas do espectrograma se difere no quesito de valor de média para a banda de 20Hz a 30Hz. No gráfico de deslocamento vemos essa diferença para amplitude, onde no dia 30/06, a amplitude do pico nessa banda é o mais elevado, seguidos pelos dias 08/07 e 25/06 (Figura 15).

A estação meteorológica de São Gabriel também mostra padrões parecidos nos gráficos de pressão atmosféricas (mbar). Nos de rajadas de vento (m/s), a diferença fica para o dia 01/07, que apresenta valores mais elevados para essa estação, enquanto na estação AQDB, são para o dia 30/06. Também há diferenças nos gráficos de precipitação (mm), onde observamos maiores precipitações para os dias 25/06 e 30/06 e uma leve precipitação para o dia 08/07 (Figura 16).

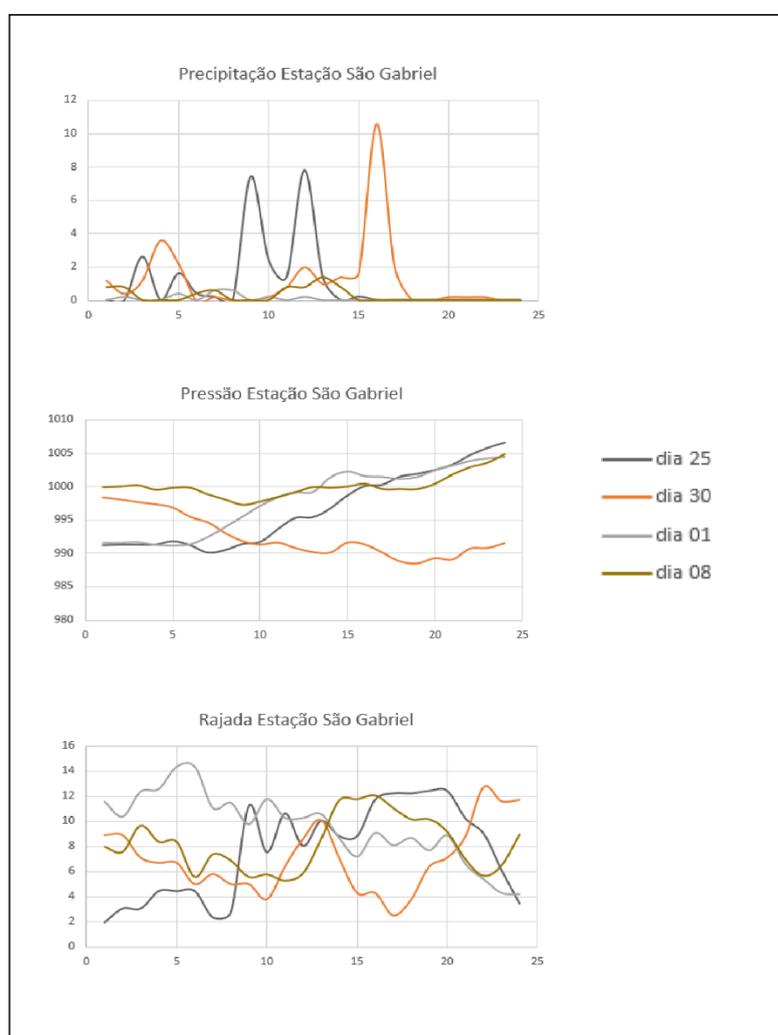


Figura 16 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mbar) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

3.5 – FRTB

Essa é uma estação que está instalada entre a estação ITAB e a BSCB, no estado de São Paulo. Também é possível observar o pico para a banda de 0.1Hz a 1Hz como nas outras estações. Para a banda de 20Hz a 30Hz, a semelhança permanece com as estações ITAB, CPSB e AQDB. Para a banda de 2.5Hz a 3.5Hz, existe uma variação grande entre os valores de média, assim como na estação BSCB, porém, aqui, vemos valores mais elevados do que visto anteriormente (Figura 17)

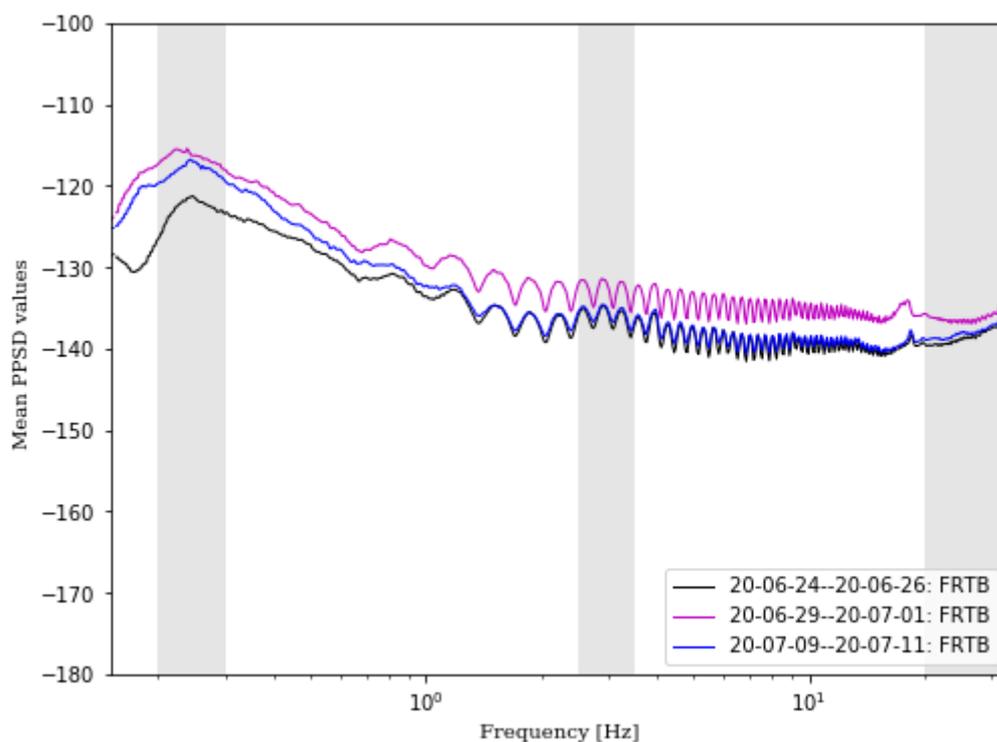


Figura 17 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. Para esta estação vemos semelhanças tanto entre as estações inseridas no campo de influência do evento quanto de estações distantes, contudo, apresenta-se diferenças de amplitude.

As diferenças e semelhanças apresentadas devem ser observadas nos gráficos de deslocamento do solo assim como nos gráficos das estações meteorológicas. É interessante ver como uma estação localizada entre estações inseridas no campo de influência dos eventos e estações distantes desse campo, se comporta.

Ao se analisar os gráficos de deslocamento, vemos a grande variação para a banda de 2.5Hz a 3.5Hz, com valores relativos a outras estações mais elevados. Na banda de 20Hz a 30Hz, também observamos uma grande variação em relação aos gráficos antes vistos. Mesmo assim, o padrão da banda de 0.1Hz a 1Hz se mantém (Figura 18).

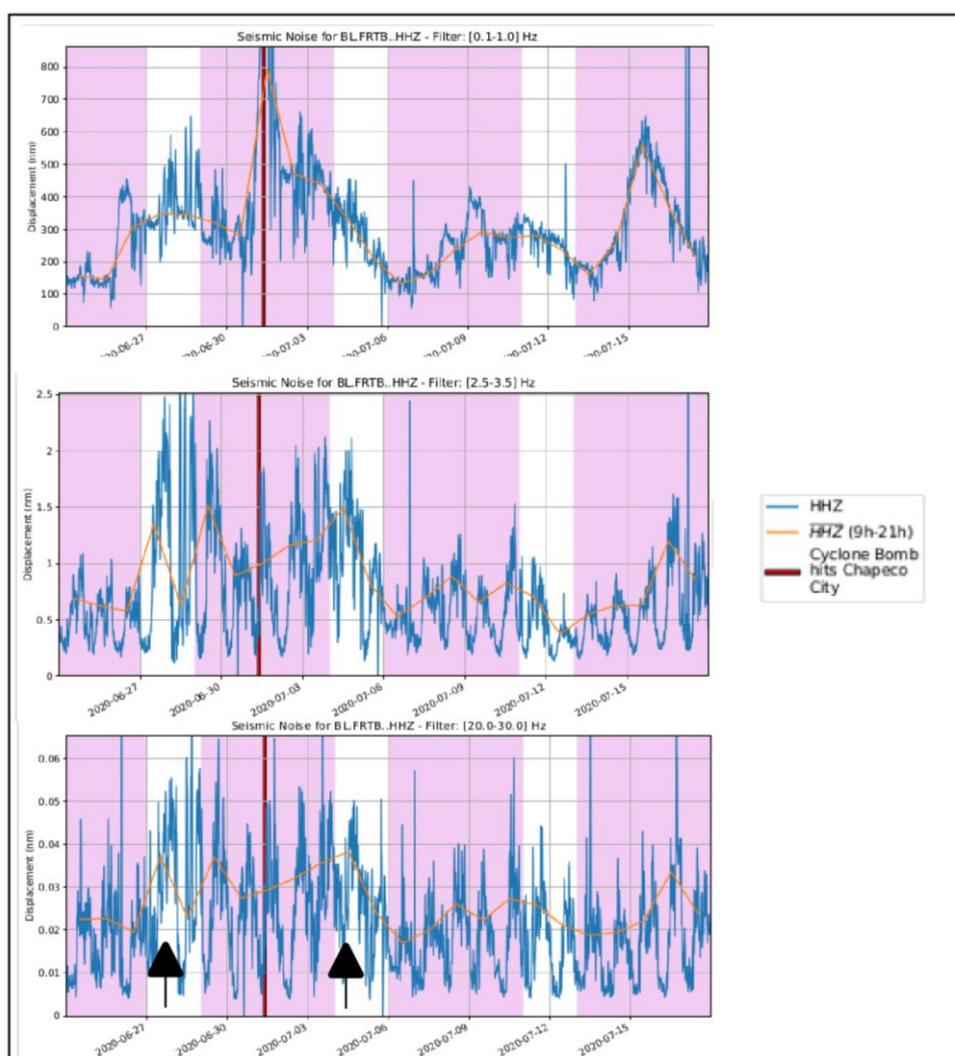


Figura 18 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação FRTB. Aqui é possível observar mudanças significativas nas bandas de 2.5Hz a 3,5Hz e de 20Hz a 30Hz. Porém, para a banda de 0.1Hz a 1Hz, o padrão até então observado se mantém.

As características observadas no espectrograma se mantiveram nos gráficos de deslocamento, tais como a grande variação da frequência nas bandas e 2.5Hz a 3.5Hz e 20Hz a 30Hz, resguardando suas diferenças de valores de média e de amplitude de deslocamento.

Como era de se esperar, as mudanças observadas no espectrômetro foram também observadas nos gráficos de deslocamento, assim como, é esperado serem observadas nos gráficos das estações meteorológicas. Para a estação FRTB, usou-se as estações meteorológicas de Marília (Figura 19).



Figura 19 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mbar) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

Os padrões observados se mantêm tanto semelhantes àquelas estações inseridas no campo de influência do fenômeno como a estação não inserida. As semelhanças estão na diminuição acentuada da pressão atmosférica (mbar) para o dia 30/06, observada na banda de frequência de 0.1Hz a 1Hz, nas rajadas de ventos (m/s) elevadas para os dias 27/06, 30/06 e 01/07 e presença de chuvas (mm) para o dia 27/06 observadas na banda de 20Hz a 30Hz (Figura 19).

3.6 – PET01

A estação PET01 está instalada na costa do Brasil, no estado de São Paulo. Observamos padrões semelhantes àqueles vistos por outras estações devido essa estação estar instalada no campo de influência de correntes atmosféricas. Uma diferença visível está nos valores de média para a banda de 20Hz a 30Hz, onde os valores mais elevados ficam para o período entre os dias 24/06 e 26/06 (Figura 20).

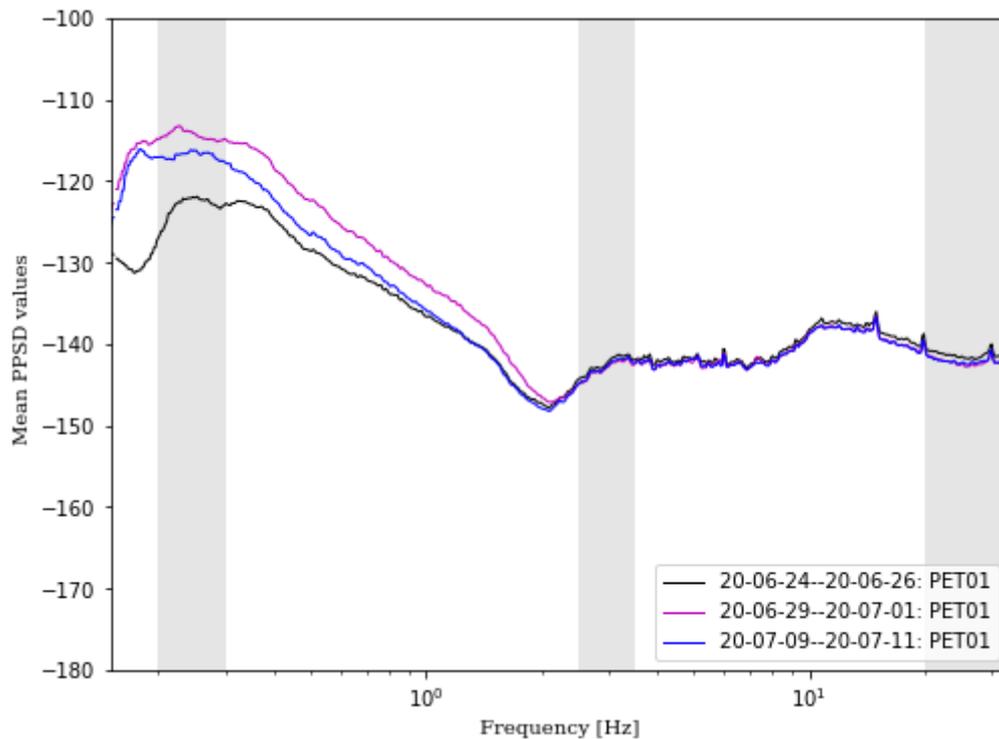


Figura 20 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. Para a estação FRTB vemos um padrão semelhante ao de outras estações, com uma diferença nos valores de média para a banda de 20Hz a 30Hz.

Observamos no gráfico de deslocamento do solo que o padrão da banda de 0.1Hz a 1Hz continua semelhante. Para as outras duas bandas, como observado no espectrograma, as amplitudes no deslocamento (mm) são iguais, porém com um leve aumento para o período de 24/06 a 26/06 na banda de 20Hz a 30Hz (Figura 21).

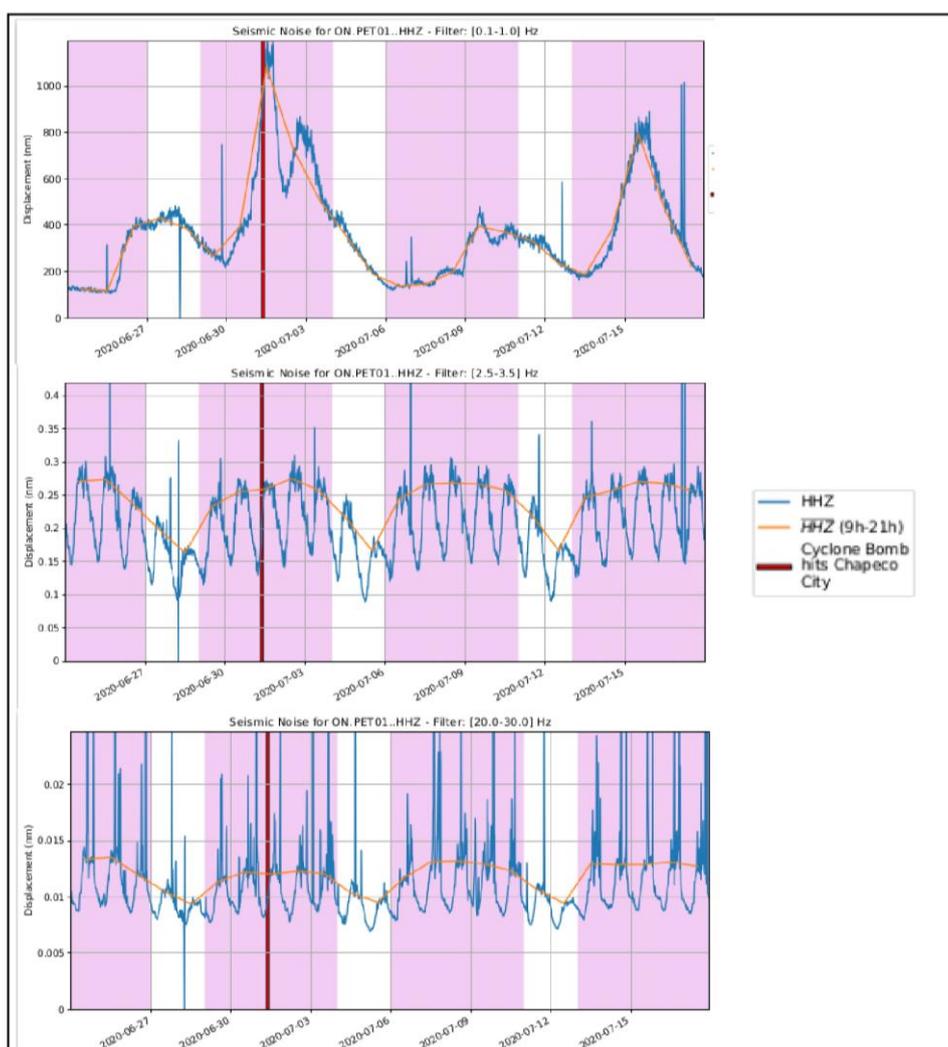


Figura 21 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação PET01. Aqui é possível observar que o padrão para a banda de 0.1Hz a 1Hz se mantém, mas em outras bandas, apresenta diferenças em relação às outras estações.

As estações meteorológicas também apresentam padrões semelhantes àqueles já apresentados. Foi usada a estação Interlagos (Figura 22). Aqui vemos como a intensidade das interações a atmosfera com o ambiente e a Terra, além da posição das estações influenciam nos dados sísmicos. Mesmo com a presença de chuvas e com ventos, nós não vemos muita diferença nas amplitudes dos dados.

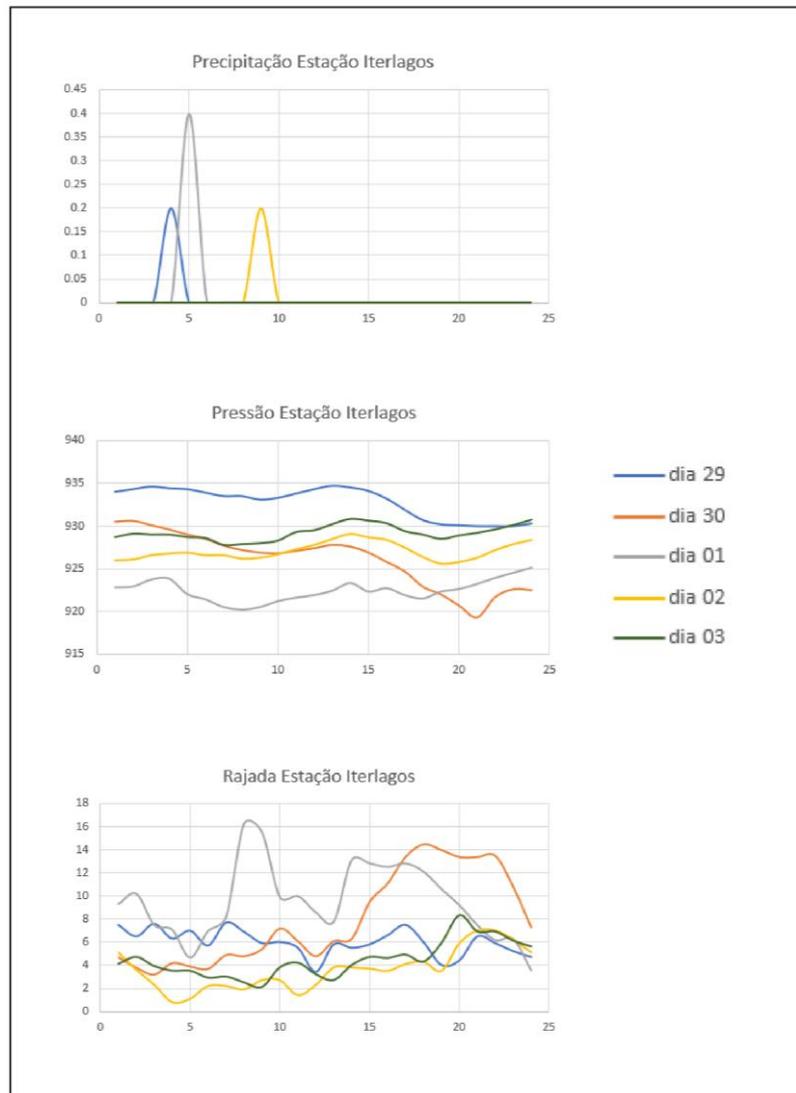


Figura 22 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica (mbar) no nível da estação, rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

3.7 – PTGB

Esta é a estação localizada mais próxima à estação de ITAB. O padrão apresentado pelas duas é extremamente semelhante, tanto em distribuição dos valores de frequências quanto em suas amplitudes (Figura 23).

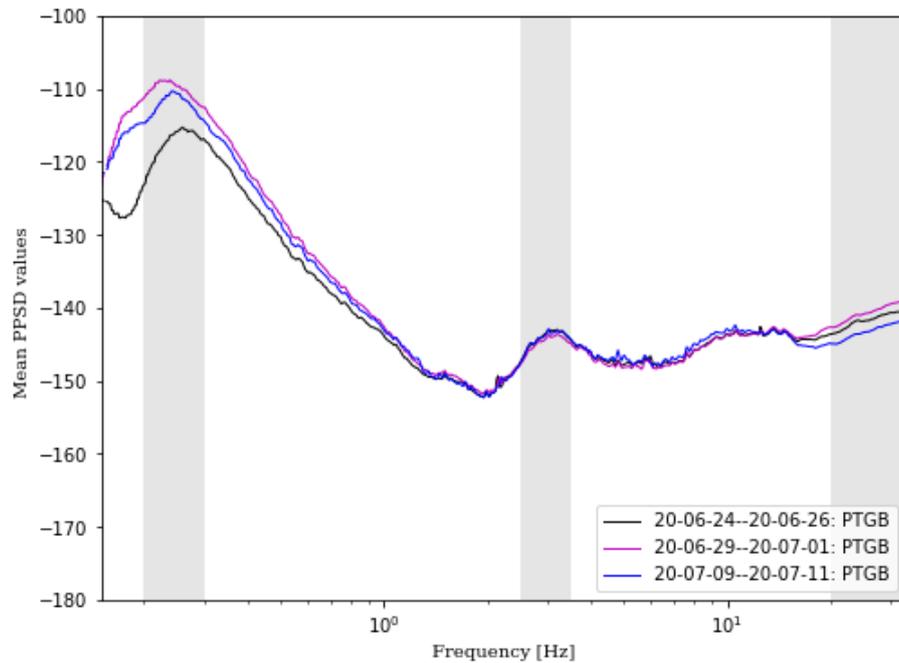


Figura 23 – Gráfico de probabilidade de densidade de frequência. As faixas cinzas indicam as bandas de frequências a serem analisadas nos gráficos de deslocamento do solo. O espectrograma apresenta semelhanças extremamente fortes com aquele apresentado pela estação ITAB.

Para o gráfico de deslocamento, as semelhanças também aparecem. As diferenças mais aparentes estão na banda de 20Hz a 30Hz, que apresenta dois picos mais visíveis, um para o dia 30/06 e outro pro dia 25/06 (Figura 24).

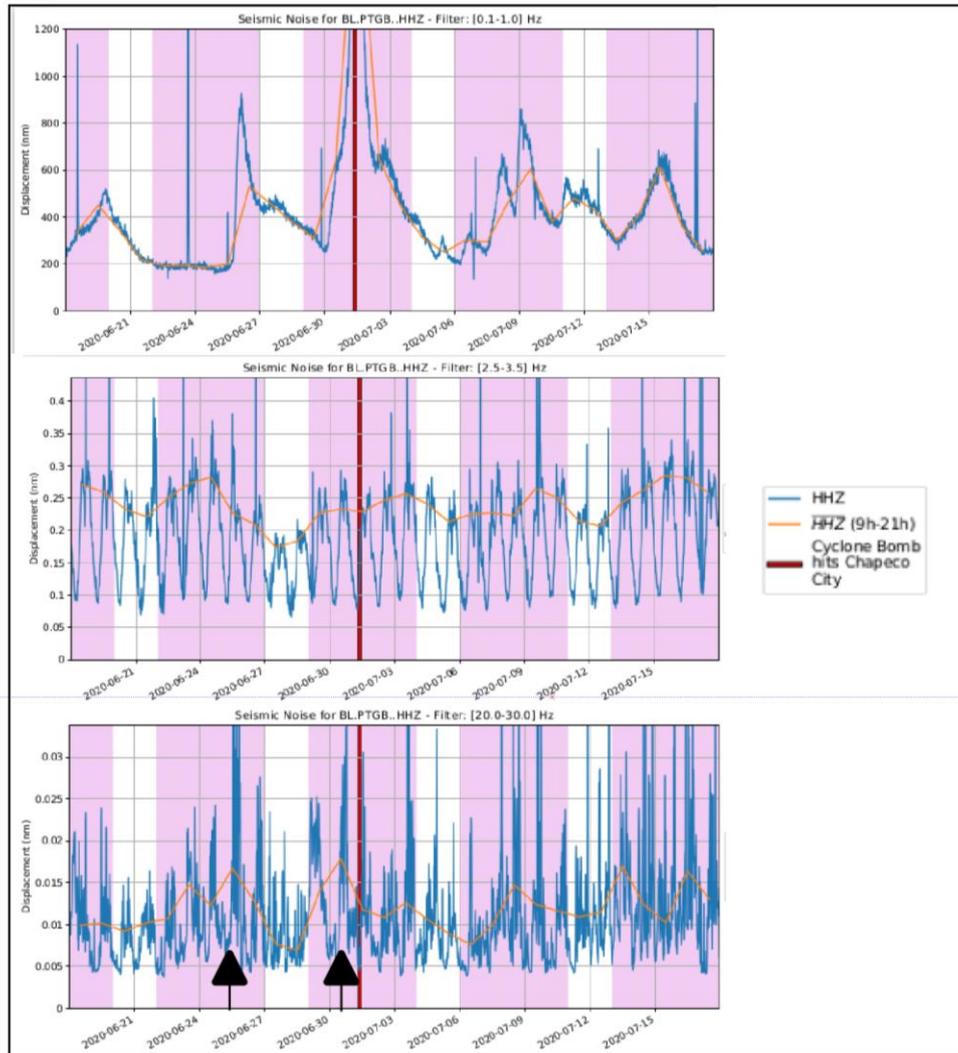


Figura 24 – Gráficos de deslocamento do solo para o período de 24/06/2020 a 17/07/2020 da estação PTGB. As semelhanças apresentadas com a estação ITAB só mudam para a banda de 20Hz a 30Hz.

Não tinha como ser diferente, as estações meteorológicas também guardam semelhanças, com o detalhe que para a estação PTGB, há precipitação para o dia 25/06 (Figura 25).

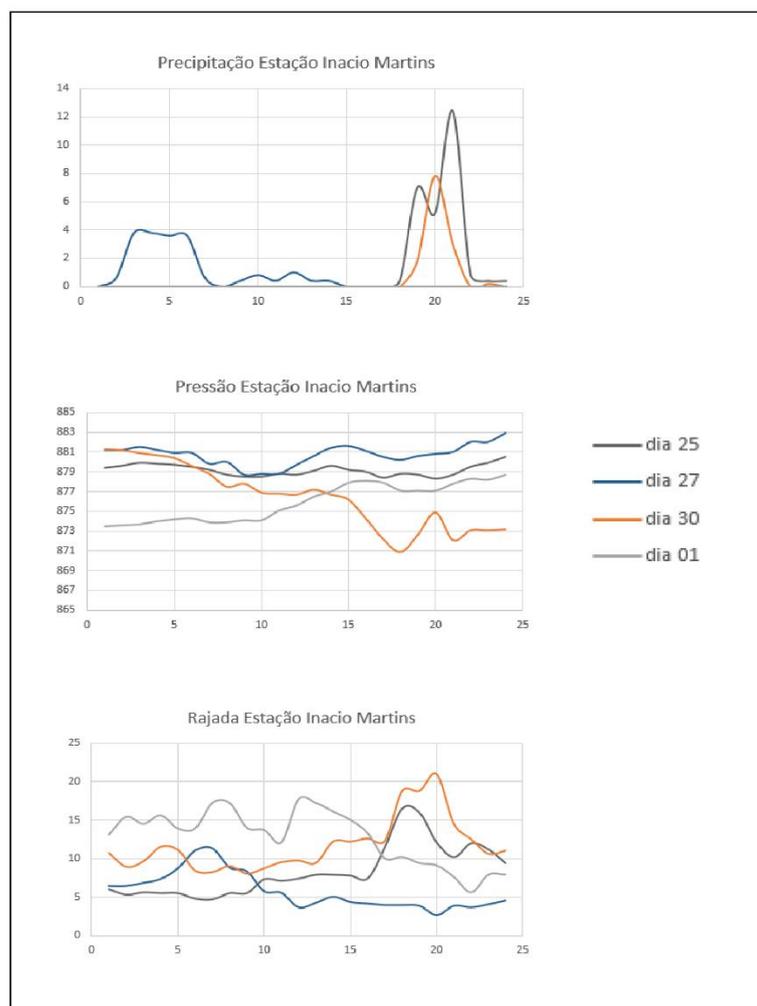


Figura 25 – Gráfico com medidas horárias de pressão atmosférica no nível da estação (mbar), rajadas de ventos (m/s) e precipitação (mm) das estações meteorológicas. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia, IMET (<https://portal.inmet.gov.br/>).

CAPÍTULO 4

4 – CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nas estações meteorológicas, nos gráficos de deslocamento do solo e nos espectrogramas, mostraram as características do evento, assim como, evidenciam as diferenças, nas respostas sísmicas, relacionadas a fatores como as posições das estações e a ocorrência de chuvas, ventos, bem como a diminuição da pressão atmosférica. O método demonstrou eficácia na detecção e na evolução regional do fenômeno meteorológico.

Foi possível identificar o aumento expressivos nos valores de média dos dados de frequência e de amplitude nos dados de deslocamento do solo para o período do evento. Os dados meteorológicos auxiliaram no estudo, trazendo informações de diminuição de pressão atmosférica, aumento nos valores de rajadas de ventos e ocorrência de chuvas para esse período. As estações sismográficas utilizadas puderam registrar a atuação da diminuição de pressão como o principal fator do ciclone na banda de frequência de 0.1Hz a 1Hz, nos demonstrando de que esse tipo de fator meteorológico gera respostas de baixa frequência, inclusive com registros em estações distantes do fenômeno, o que indica que a perturbação percorre longos percursos. Também foi possível ver em estações distantes o atraso temporal da resposta do fenômeno, assim como a atenuação das amplitudes nas respostas dos registros.

Outros fatos observados, foram as consequências da formação do ciclone como chuvas e ventos, registrados na banda de frequência de 20Hz a 30Hz, o que demonstra serem eventos com mais alta frequência e que acabam por influenciar localmente nas medições. Observou-se, ainda, que os picos verificados nas bandas analisadas, fora do período de ocorrência do ciclone, podem ser decorrentes de outros eventos, não necessariamente meteorológicos.

Neste contexto, com análise mais apurada dos resultados obtidos, poderia se confirmar, ainda, que o raio de influência do ciclone é determinado a partir dos dados registrados em diferentes estações, com diferentes distâncias do fenômeno, bem como, que o lag entre as medidas sísmicas e meteorológicas indica uma análise temporal entre o início da formação do evento até efetivamente sua passagem pelos locais e qual o seu pico.

A principal conclusão do trabalho reside no fato de ser possível observar tais mudanças nos dados sísmicos registrados e de ser possível correlacioná-los com informações de estações meteorológicas e assim associá-los com a ocorrência do ciclone bomba. Com isso, o método é confirmadamente eficaz na detecção e na avaliação da evolução de fenômenos atmosféricos como um ciclone bomba.

CAPÍTULO 5

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, J. T., Pezza, A. B., & Black, M. T. (2010). Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalyses. *Journal of Climate*, 23(24), 6468–6484. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3437.1>
- Avila, V. D. de. (2018). *Estudo de Ciclogêneses Explosivas no Atlântico sul* (Vol. 151, Issue 2).
- Beauduin, R., Lognonné, P., Montagner, J. P., Cacho, S., Karczewski, J. F., & Morand, M. (1996). The effects of the atmospheric pressure changes on seismic signals or how to improve the quality of a station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1760–1769. <https://doi.org/10.1785/bssa0860061760>
- Behr, Y., Townend, J., Bowen, M., Carter, L., Gorman, R., Brooks, L., & Bannister, S. (2013). Source directionality of ambient seismic noise inferred from three-component beamforming. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(1), 240–248. <https://doi.org/10.1029/2012JB009382>
- Bianchi, M. B., Assumpção, M., Rocha, M. P., Carvalho, J. M., Azevedo, P. A., Fontes, S. L., Dias, F. L., Ferreira, J. M., Nascimento, A. F., Ferreira, M. V., & Costa, I. S. L. (2018). The Brazilian seismographic network (RSBR): Improving seismic monitoring in Brazil. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 452–457. <https://doi.org/10.1785/0220170227>
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., & Cardoso, C. D. S. (2013). Climatologia de ciclones explosivos para a área ciclogênica da América Do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(1), 43–56. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000100005>
- Chen, Q. F., Li, L., Li, G., Chen, L., Peng, W. T., Tangy, Y., Chen, Y., & Wang, F. Y. (2004). Seismic features of vibration induced by train. *Acta Seismologica Sinica English Edition*, 17(6), 715–724. <https://doi.org/10.1007/s11589-004-0011-7>
- Coward, D., Blair, D., Burman, R., & Zhao, C. (2003). Vehicle-induced seismic effects at a gravitational wave observatory. *Review of Scientific Instruments*, 74(11), 4846–4854. <https://doi.org/10.1063/1.1614411>
- Dal Piva, E., Moscati, M. C. de L., & Gan, M. A. (2008). Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na Costa Leste da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(4), 450–476. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862008000400006>
- de Lima, A. de S., Khalid, A., Miesse, T. W., Cassalho, F., Ferreira, C., Scherer, M. E. G., & Bonetti, J. (2020). Hydrodynamic and waves response during storm surges

- on the southern brazilian coast: A hindcast study. *Water (Switzerland)*, 12(12), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w12123538>
- Gimbert, F., & Tsai, V. C. (2015). Predicting short-period, wind-wave-generated seismic noise in coastal regions. *Earth and Planetary Science Letters*, 426, 280–292. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.017>
- Gobato, R. (2020). Vortex Cotes's Spiral inone in the Southern Coast of Brazil An Extratropical Cycl. *Archives in Biomedical Engineering & Biotechnology*, 4(5). <https://doi.org/10.33552/abeb.2020.04.000600>
- Gobato, R., & Heidari, A. (2020). Cyclone Bomb hits Southern Brazil in 2020. *Journal of Atmospheric Science Research*, 3(3). <https://doi.org/10.30564/jasr.v3i3.2163>
- Gray, W. M. (1998). *Meteorology, and Atmospheric Physics The Formation of Tropical Cyclones*. 69, 37–69.
- Gualtieri, L., Camargo, S. J., Pascale, S., Pons, F. M. E., & Ekström, G. (2018). The persistent signature of tropical cyclones in ambient seismic noise. *Earth and Planetary Science Letters*, 484, 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.026>
- Maciel, S. T. R., Rocha, M. P., & Schimmel, M. (2021). Urban seismic monitoring in Brasilia, Brazil. *PLoS ONE*, 16(8 August), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253610>
- Rindraharisaona, E. J., Barruol, G., Cordier, E., Fontaine, F. R., & Gonzalez, A. (2021). Cyclone signatures in the south-west Indian ocean from two decades of microseismic noise. *Atmosphere*, 12(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/atmos12040488>
- Sheen, D. H. (2014). Microseisms from huge Indian Ocean storms in May 2007. *Geosciences Journal*, 18(3), 347–354. <https://doi.org/10.1007/s12303-013-0068-1>
- Smith, P. J. (2000). The importance of the horizontal distribution of heating during extratropical cyclone development. *Monthly Weather Review*, 128(10), 3692–3694. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<3692:TIOTHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<3692:TIOTHD>2.0.CO;2)
- Weaver, R. L. (2005). Information from Seismic Noise Author (s): Richard L . Weaver Published by : American Association for the Advancement of Science Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/3841757>. *American Association for the Advancement of Science*, 307(5715), 1568–1569.
- Zhang, J., Gerstoft, P., & Bromirski, P. D. (2010). Pelagic and coastal sources of P-wave microseisms: Generation under tropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 37(15), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2010GL044288>
- Zhang, J., Gerstoft, P., & Shearer, P. M. (2009). High-frequency P-wave seismic noise driven by ocean winds. *Geophysical Research Letters*, 36(9), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2009GL037761>

INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA. IPMA, c2021. Quem somos. Disponível em:<<https://www.ipma.pt/pt/oipma/>>. Acesso em: 20 de out. de 2021

REDE SISMOGRÁFICA BRASILEIRA. RSBR, c2021. Projeto. Disponível em:<<http://rsbr.gov.br/projeto.html>>. Acesso em: 20 de out. de 2021

(Shapiro, Nikolai & Campillo, Michel & Stehly, Laurent & Ritzwoller, Michael. (2005). High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise). Science (New York, N.Y.). 307. 1615-8. 10.1126/science.1108339.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. portal.inmet,c2021.noticias. Disponível em:<<https://portal.inmet.gov.br/noticias/ciclone-bomba-fortes-ventos-e-tempestades-associados%3%A0forma%3%A7%3%A3odo-ciclone-extratropical-e-ao-desenvolvimento-de-uma-ciclog%3AAnese-explosiva-ou-ciclone-bomba>>. Acesso em: 01 de nov. de 2021