

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

RELATÓRIO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

SISMICIDADE DE CACHOEIRA GRANDE (MA)

Autora:

Josemária Vilar de Alcântara

Orientador:

PhD. Aderson Farias do Nascimento

Co – Orientador:

Ms. Guilherme Weber Sampaio de Melo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

SISMICIDADE DE CACHOEIRA GRANDE (MA)

POR

Josemária Vilar de Alcântara

Comissão examinadora:

Prof. PhD. Aderson Farias do Nascimento (DGEF/UFRN) – Orientador

Ms. José Augusto Silva da Fonsêca (UFRN)

Dr. Flávio Lemos de Santana (UFRN)

Data da aprovação: ____/____/____

“Acredito que todas as pessoas são capazes,
desde que se explore a sua habilidade.”

Aderson Nascimento

Agradecimentos

Primeiramente a Deus que em toda jornada desse curso me fortaleceu para não desistir.

Agradeço em especial aos meus pais, Rosilda Vilar e José Pedro de Alcântara que sempre me fizeram acreditar que era possível, também aos meus irmãos e irmãs que incrivelmente me apoiaram em cada dificuldade, o amor de vocês sempre será meu combustível, a minha tia Maria Luiza e Gila minha gratidão.

Aos professores do Departamento de geofísica e geologia e todos os demais que fizeram parte de minha jornada educativa até hoje. Particularmente agradeço a Josibel, Carlos Cesar e Walter pela forma de passar o conhecimento.

Ao meu orientador, em especial, por cada palavra de apoio e por me ensinar a fazer acontecer o que tanto desejava meu RGG. Seu apoio foi circunstancial em cada dúvida esclarecida e em cada aula dada. Como em tão pouco tempo fui moldada nas estratégias de trabalhos acadêmicos, sou grata também pelo espaço e estrutura disponibilizado no laboratório de sismologia.

Agradeço aos técnicos do laboratório de sismologia da UFRN que prontamente me atenderam sempre que solicitei especialmente André que me apresentou o CANVAS.

Aos mestres José Augusto e Guilherme Sampaio por todo suporte dado no manuseio com o Seisan.

À UFRN por todo seu apoio social que me foi dado com carinho a Graça Costa e Anne que sempre segurou minha mão em dias difíceis, ao departamento de Engenharia de petróleo e Engenharia Química que me acolheram e desenvolveram habilidades administrativas na bolsa de apoio técnico durante anos.

Aos meus amigos tenho poucos, que foram suficiente e luz em dias escuros, especialmente, Victor, Juciany, Carmem, Josiany, Mayara e Matheus. Aos meus tesouros Maria Clara e Ana Júlia obrigada por seu amor.

Por fim, agradeço a todos que passaram nessa minha jornada e deixaram um pouco de si em minha vida.

RESUMO

O Nordeste do Brasil é uma das regiões sísmicas mais ativas do país, mas o Estado do Maranhão não apresentava até então características fortes que o inserisse no mesmo contexto de sismicidade dos estados do Rio grande do Norte e Pernambuco, de atividade sísmica. Em 03 de janeiro de 2017, ocorreu um terremoto de magnitude aproximadamente de 4_{Mb} que foi sentido em vários municípios próximos à capital do estado do Maranhão. Estudos sismológicos desenvolvidos pela UNB, definiu essas tensões, que são geralmente encontradas em margens continentais passivas, caracterizando o evento um típico terremoto de Região Continental Estável (RCE), conforme definido em literatura. As tensões intraplacas são quase críticas e aproximadamente constantes, com terremotos ocorrendo por pequenas variações transitórias localizadas de tensão ou resistência a falhas. Com dados adquiridos da rede Maranhão, essa composta por cinco estações (CAMP, PERO, PICO, PTAL e CAQB), que a principio para inicio de processamentos dos dados, necessitou converter para o formato msid, após conversão em virtude dos dados estarem com tempo quebrados de 15 minutos, foi preciso reconfigurar esses dados para fazer primeiro um arquivo de 60 minutos e em seguida um outro arquivo de 24h finalizando na estruturação de praticamente três meses de dados. Observando minuciosamente cada dia registrado por as estações, localizamos 15 eventos onde 09 eventos locais ocorreram no mês de janeiro em intervalos menores, enquanto os seis ultimos 06 eventos ocorreram em intervalos maiores entre os meses de fevereiro e março. Com esses eventos o software SEISAN pode fazer a localização epicentral do evento que foi coerente com a localização inicial feita com dados da estação UNB e também com a rede Maranhão instalada pelo LABSIs/UFRN

Palavras-Chave: Sismicidade intraplaca, LABSIs/UFRN Nordeste brasileiro, Maranhão

ABSTRACT

The Northeast of Brazil is one of the most active seismic regions of the country, but the state of Maranhão did not have strong characteristics until then, which inserted it in the same seismic context of the states of Rio Grande do Norte and Pernambuco, with seismic activity. On January 3, 2017, an earthquake of magnitude approximately 4Mb occurred that was felt in several municipalities near the capital of the state of Maranhão. Seismological studies developed by the UNB, defined these tensions, which are generally found in passive continental margins, characterizing the event as a typical earthquake of the Continental Stable Region (RCE), as defined in the literature. Intraplate voltages are almost critical and approximately constant, with earthquakes occurring due to small localized transient variations in voltage or resistance to failure. With data acquired from the Maranhão network, it consists of five stations (CAMP, PERO, PICO, PTAL and CAQB), which at the beginning of the data processing process, needed to convert to msid format, after conversion because the data is timely it was necessary to reconfigure this data to first make a file of 60 minutes and then another file of 24h finalizing in the structuring of almost three months of data. Looking closely at each day recorded by the stations, we located 15 events where 09 local events occurred in January at shorter intervals, while the last six events occurred at larger intervals between the months of February and March. With these events the SEISAN software can make the epicentral location of the event that was consistent with the initial location made with data from the UNB station and also with the Maranhão network installed by LABSIs / UFRN.

Keywords: Intraplate seismicity, LABSIs /UFRN, Northeastern Brazil, Maranhão

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EPICENTROS DO CATÁLOGO BRASILEIRO COM MAGNITUDE MAIOR QUE 3.5 MB. ...	1
FIGURA 2 -LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES FONTE: MODIFICADO LABSIS/UFRN (2017).....	2
FIGURA 3 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE CACHOEIRA GRANDE	4
FIGURA 4 - MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS PROVOCADO PELAS PASSAGENS DAS ONDAS P (À ESQUERDA) E S (À DIREITA).	6
FIGURA 5: SISMOGRAMA DE UM EVENTO REGISTRADO NA ESTAÇÃO CAMP, PERO E PTAL EM 11/01/2017 COM AS CHEGADAS DAS ONDAS P (NA COMPONENTE VERTICAL) E S (NA COMPONENTE HORIZONTAL).....	7
FIGURA 6 - SISMOGRAMA DO DIA 11 DE MARÇO DE 2017 (13:00H) COM APLICAÇÃO DE FILTRO.	10
Figura 7 – PICAGEM DE EVENTO do dia 10 de FEVEREIRO de 2017 às 00:00h da manhã registrado pelas duas estações	11
FIGURA 8 – PICAGEM DO EVENTO SÍSMICO DO DIA 10 DE JANEIRO DE 2017 ÀS 13:00H DA MANHÃ REGISTRADO PELAS DUAS ESTAÇÕES	112
FIGURA 9 – MAPA COM A LOCALIZAÇÃO DOS EVENTOS ONDE OS TRIÂNGULOS SÃO AS ESTAÇÕES E OS CÍRCULOS SÃO OS EPICENTROS.	134

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -MODELO DE VELOCIDADE COM RESPEITO DA PROFUNDIDADE	9
--	----------

SUMÁRIO

Capítulo I – Introdução.....	1
1.1 Apresentação e Motivação.....	1
1.1.2 Geologia.....	4
1.2 Base de dados.....	5
1.3 Ferramentas.....	5
1.4 Fases sísmicas	5
CAPITULO II – Metodologia	8
2.1 Localização Hipocentral e tempo de origem.	8
CAPITULO III – Processamento dos dados	10
3.1 Identificação de terremotos.....	10
3.2 Picagem.....	11
CAPITULO IV – Resultados.....	13
CAPITULO V – Discussões.....	14
CAPITULO VI - Considerações finais.....	15
REFERÊNCIAS	16

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e Motivação

O presente trabalho vem apresentar uma análise feita a partir de dados obtidos através da rede Maranhão que, composta por cinco estações instaladas pelo Laboratório de sismologia da universidade Federal do Rio Grande Do Norte LABSis/UFRN, para monitorar a sismicidade da área, a qual teve um evento sísmico de grande importância no dia 03 de janeiro de 2017, o sismo apresentou magnitude aproximada de 4_{Mb} , esse evento ocorreu próximo da costa equatorial do Estado do Maranhão que é considerado um local assísmico. A Figura 1 mostra o evento, inicialmente estudado por outras instituições que também instalaram suas estações próxima da possível região epicentral. O epicentro que está destacado no mapa por uma estrela foi definido em um dos trabalhos do professor Marcelo Assumpção (Et al,2017).

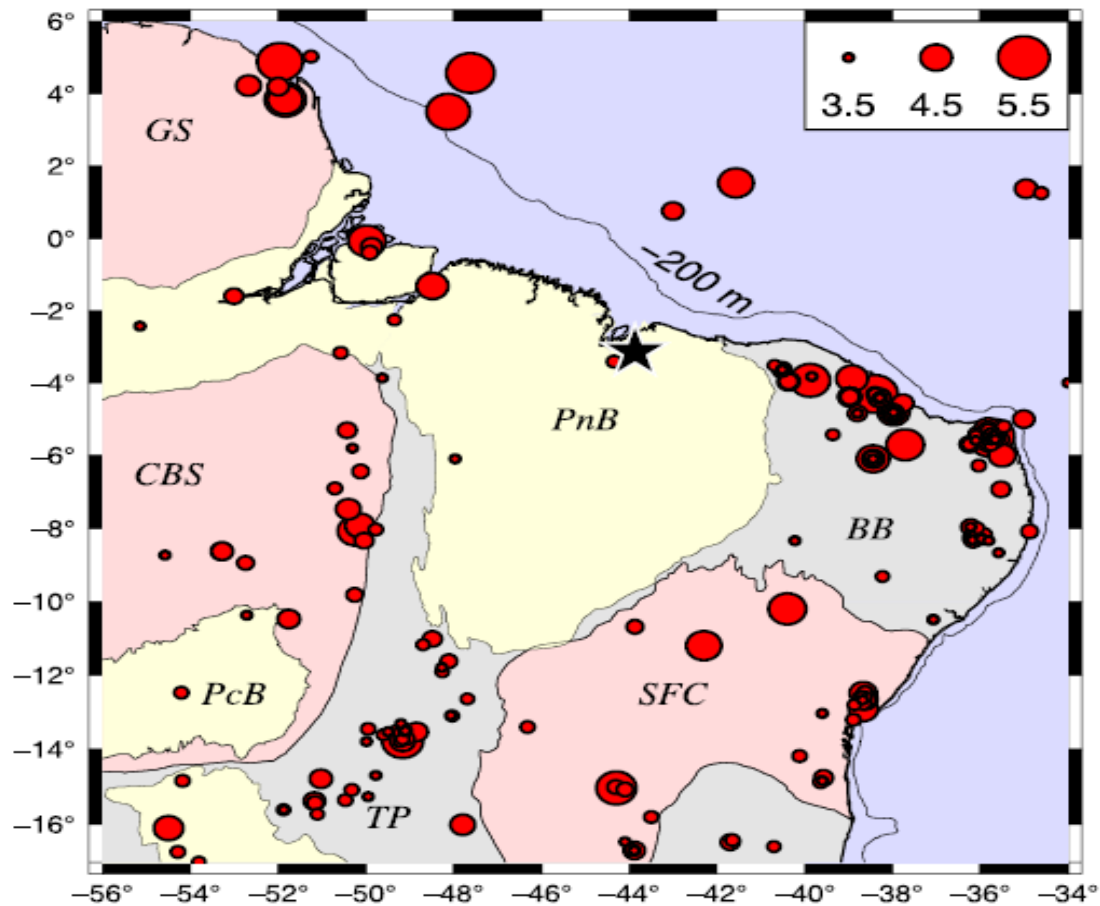


Figura 1 - Epicentros do Catálogo brasileiro com magnitude maior que 3.5 mb.
Fonte: Modificado. Assumpção et al. (2014)

O Tamanho dos círculos vermelhos indica a magnitude (mb). Estrela preta é o epicentro de evento do Maranhão 2017 definido por Assumpção. Províncias geológicas são cratons (rosa), cintos dobrados (cinza) e bacias intracratônicas (amarelo).

Segundo relatório do LABSis/UFRN, o epicentro foi localizado automaticamente pelo sistema integrado da RSBR, próximo a cidade de Belágua, MA. Posteriormente, os analistas revisaram os dados relocando o epicentro próximo às cidades de Vargem Grande e Presidente Vargas, ~90km a sul de São Luís. A Figura 2 mostra o método dos triângulos utilizado que consiste em caso tenhamos o sismograma de pelo menos três estações que registraram o mesmo evento, poderemos localizar facilmente o local do terremoto. Basta fazer o mesmo cálculo para cada uma das estações e traçar um círculo com a dimensão calculada. O epicentro se localizará na intersecção entre os círculos. Localizar terremotos usando esse método exige bastante prática na localização das ondas S e P em um sismograma, além de habilidade na determinação dos tempos com bastante precisão, já que um erro de apenas 1 segundo na estimativa da chegada das ondas representa um erro de cerca de 8 km no cálculo da distancia. Vejamos o método na Figura 1 os triângulo vermelho representa as estações sismográficas, o ponto preto indica o epicentro que foram obtidas através das de s-p de um evento. Pode-se notar que o método dos círculos como explicado anteriormente.

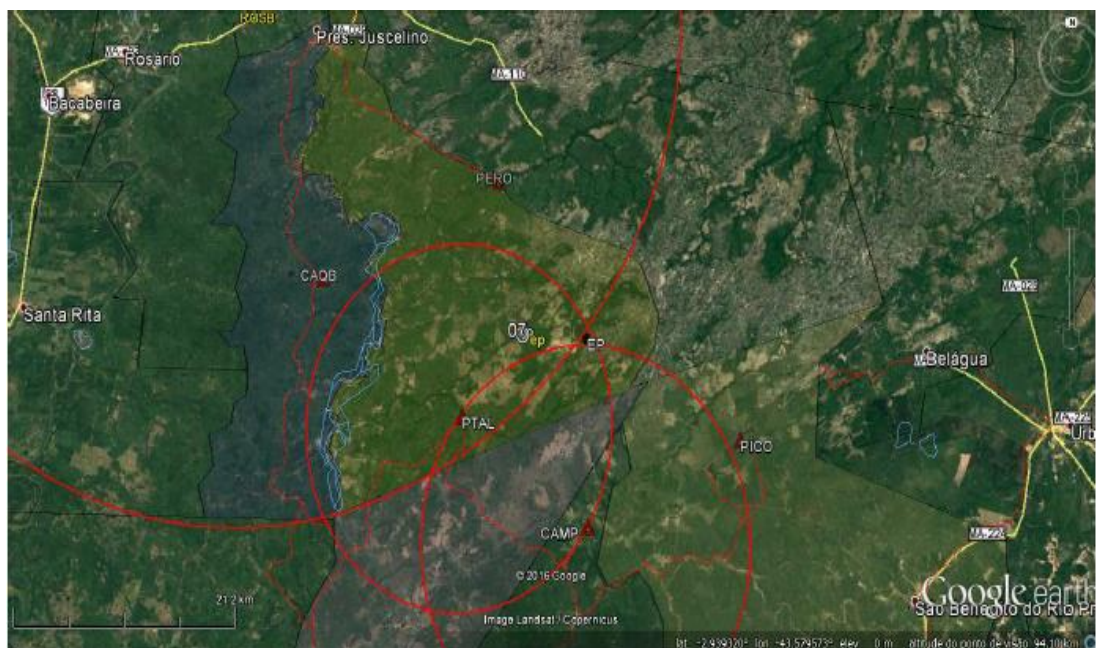


Figura 2 – Localização das estações Fonte: Modificado Labsis/UFRN (2017)

Triângulos vermelho são estações sismográficas geridas por o laboratório de sismologia da UFRN, o ponto preto indica o possível epicentro inicialmente definido com dados de um único evento definido inicialmente através das leituras de s-p de um evento ocorrido entre os vários encontrados com a análise de dados. (Modificado de relatório do Labsis/UFRN)

O terremoto do Maranhão foi relacionado às tensões comumente encontradas em margens continentais passivas, longe dos processos atuais de limite de placa. Por este motivo, é um típico terremoto na Região Continental Estável (RCE), conforme definido por Johnston (1989). Como as forças de limite de placa (as forças de empuxo e colisão na convergência entre as placas de Nazca e da América do Sul) podem causar tensões em toda a placa (por exemplo, Heidbach *et al.* 2010), acredita-se que os terremotos da RCE os mesmos ciclos de carga / deformação como em eventos de limite de placa, a única diferença está nas taxas de deformação muito menores e intervalos de recorrência mais longos. No entanto, uma hipótese alternativa foi proposta (por exemplo, Stein & Liu 2009; Liu *et al.* 2010; Calais *et al.* 2016): as tensões intraplacas são quase críticas e aproximadamente constantes, com terremotos ocorrendo por pequenas variações transitórias localizadas de tensão ou resistência a falhas. Não haveria um acúmulo significativo de deformação lenta com um ciclo sísmico de longo prazo.

Os terremotos ao longo de toda a costa norte do Brasil estão sujeitos a tensões típicas da margem continental, principalmente devido aos contrastes de densidade lateral em toda a crosta continental-oceânica, que são "não renováveis" e não seguem ciclos sísmicos. Se essas tensões predominam sobre as tensões de longo alcance das forças de contorno das placas, o terremoto no Maranhão e a sismicidade ao longo da costa norte do Brasil favoreceriam a nova hipótese de uma litosfera pré-tensionada constante.

O objetivo deste trabalho foi organizar os dados da Rede Maranhão e com o tratamento e análise dos dados fazer a localização epicentral dos eventos ocorridos a partir dos registros das estações (CAMP, PTAL, PERO, CAQB e PICO), instaladas em municípios do estado do Maranhão pelo LABSIs/UFRN que mais sentiram os tremores. Vejamos o mapa de localização do município de Cachoeira grande - MA



Figura 3 - Mapa de localização do município de Cachoeira Grande
 Fonte: Modificado CPRM (2014)

1.1.2 Geologia

O Município de Cachoeira Grande está inserido nos domínios da Bacia Sedimentar do Parnaíba, região intracratônica como visto no mapa 1.

De acordo com essas idéias, Mueche (1994) afirma que: As dunas costeiras se formam em locais em que a velocidade do vento e a disponibilidade de areias finas são adequadas para o transporte eólico. Essas condições são frequentemente encontradas em praias de tipo dissipativo a intermediário, de gradiente suave, a exemplo do que ocorre em parte do litoral do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e em muitos locais do litoral do Maranhão, Piauí e Ceará. Nestes últimos, tais condições são favorecidas pela presença de ventos constantes, bem como pela maior amplitude de maré existente no litoral maranhense. É o que tem maior

expressão geográfica e aflora, praticamente, em todos os quadrantes do município de Cachoeira Grande.

1.2 Base de dados

Os dados foram coletados pelo LabSis/UFRN, através da Rede Sismográfica do Nordeste (RSISNE), a rede Maranhão era composta por um total de 05 estações (CAMP, PICO, PERO, CAQB e PTAL), que monitoram a área com uma taxa de 500 amostras por segundo com registros contínuos.

Sendo assim, cada estação apresenta registros de movimento do solo nas direções horizontais (E-W e N-S) e vertical, as quais são gravadas no formato do fabricante (GeoTech). Entretanto, teve de ser realizada a sua conversão ao formato compatível com o SEISAN, para que o dado fosse adequado ao software de análise sísmico.

1.3 Ferramentas

As estações são compostas cada uma por um registrador digital de 3 canais alimentado por uma bateria de 12 v 90 Ah e realimentado por um painel solar de 12V,65 W, e acopladas a uma antena de GPS, que registra a localização da estação e ajusta o relógio interno.

Os sensores utilizados são de período curto além de sensor de período curto com frequência natural de 10 Hz da PMD Scientific Inc. Os registradores são os Smart24, 24 bits da Geotech 3 canais 24 bits (Fabricante GEOTECH).

Foram utilizados os software fornecidos pelo LabSis/UFRN, compreendendo o software de análise sísmico SEISAN (Havskov e Ottemoller, 1999), em especial seu programa de localização e o HYPOCENTER (Lienert, 1986). Este último é um algoritmo baseado no método de Geiger (Geiger, 1910).

1.4 Fases sísmicas

Quando ocorre liberação abrupta de energia podemos caracterizar como um evento sísmico, tal evento gerará ondas elásticas que percorreram o interior e a

superfície da Terra. Possibilitando assim, o aparecimento de falhas geológicas, explosões, atividade vulcânica e atividades antrópicas.

As ondas que primeiro são detectadas em um evento sísmico são P e S, assim chamadas pois são a primeira e a segunda a serem sentidas pelos sismômetros, respectivamente. A onda P a sua propagação se dá com uma velocidade maior que a de S, pois seu movimento acontece na mesma direção da vibração das partículas. Diferentemente, a onda S se propaga perpendicularmente à direção de vibração das partículas do meio, sendo assim mais lenta. Essas características são mostradas na Figura 4.

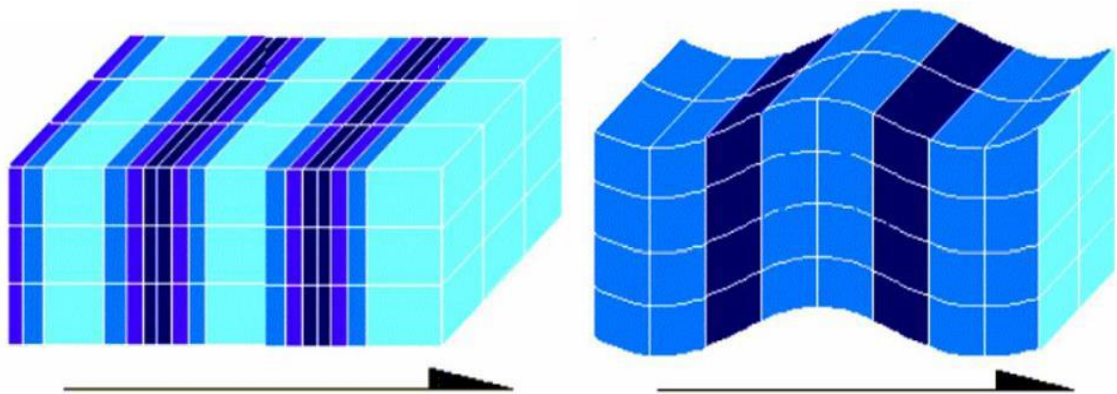


Figura 4 - Movimento das partículas provocado pelas passagens das ondas P (à esquerda) e S (à direita).

Fonte: FôNSECA (2017).

Em geral, a primeira fase possui maior frequência em comparação com a segunda, possibilitando de início um primeiro critério adicional para a identificação da mesma no sismograma, FôNSECA (et al. 2017). Essa assinatura de um terremoto em um sismograma com as chegadas dessas fases sísmicas é apresentada pela Figura 05.

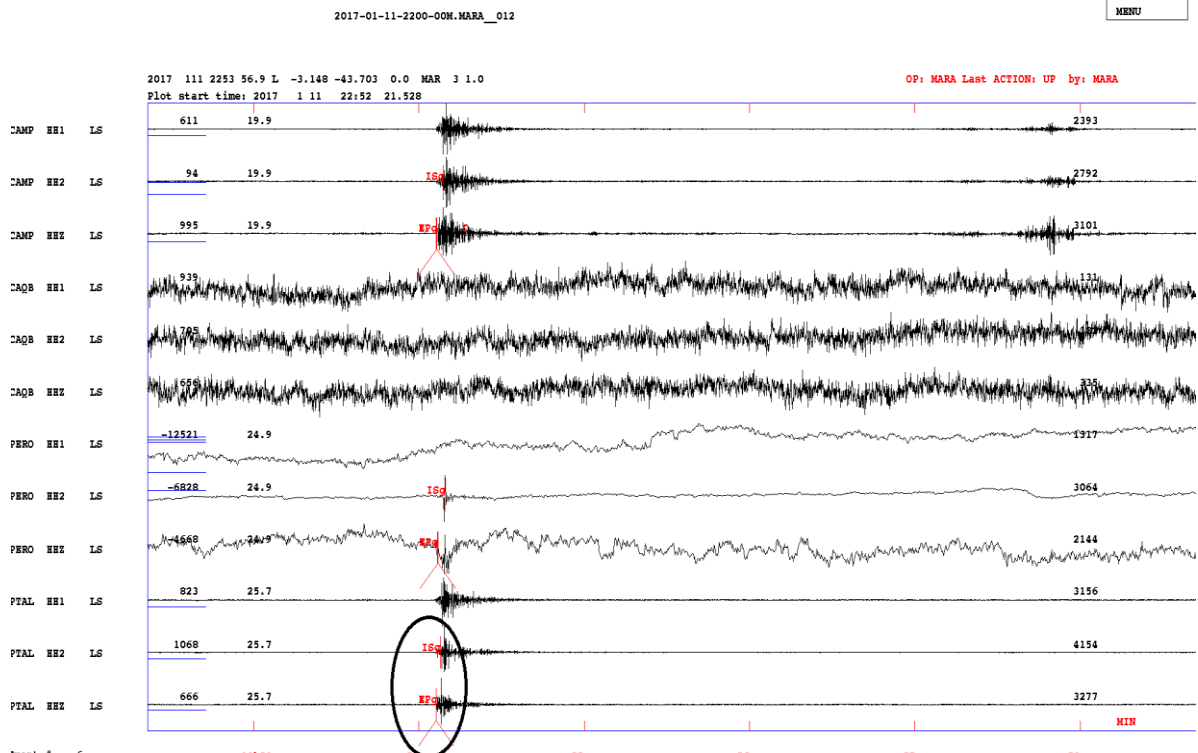


Figura 5: Sismograma de um evento registrado na estação CAMP, PERO e PTAL em 11/01/2017 com as chegadas das ondas P (na componente vertical) e S (na componente horizontal).

Fonte: Elaboração Própria

Vemos a onda P, preferencialmente marcada na componente vertical e a onda S na componente Horizontal. Isso se deve ao fato das ondas P e S incidirem respectivamente vertical e horizontalmente na superfície, respectivamente.

A diferença entre esses tempos é importante para a determinação da distância epicentral, podendo ser obtida pela equação 1.1 abaixo.

$$d = (ts - tp) \frac{\alpha}{\sqrt{3}-1} \quad (1.1)$$

Onde podemos definir ts , tp , d e α , respectivamente, como os tempos de chegada das ondas S e P, a distância epicentral e a velocidade da onda P no meio. A partir do resultado dessa equação é possível classificar os eventos quanto à distância epicentral, sendo local (até 1000 km), regional (entre 1000 e 2000 km) ou distante (acima de 2000 km). A figura 06 ilustrou o exemplo de um evento local, devido a diferença $ts-tp$ ser pequena, na ordem de segundos e a marcação da fase.

CAPITULO II – METODOLOGIA

2.1 Localização Hipocentral e tempo de origem.

Conforme a sismologia a um evento sísmico é localizado através da obtenção do hipocentro e também com a definição do tempo de origem, respectivamente $(x_0, y_0$ e $z_0)$ e (t_0) , (Havskov e Ottemöller, 2010). Em seguida para estimarmos a localização utilizamos o programa HYPOCENTER, embutido no software SEISAN e fizemos marcação de amplitudes quando se tratava de uma única estação com registro. Isso é possível pela inversão dos tempos de percurso das ondas P e S.

Considerando o tempo de chegada calculado em uma i -ésima estação (T_i^{cal}), podemos relacionar o hipocentro e o tempo de origem através da equação 2.1

$$t_i^{cal} = T^{tra}(x_i, y_i, z_i; x_0, y_0, z_0) + t_0 = \{[(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2]^{1/2}\} / \alpha + t_0 \quad (2.1)$$

Temos que T^{tra} é o tempo de percurso de P e S em função de (x_i, y_i, z_i) e (x_0, y_0, z_0) que representam a longitude, latitude e profundidade da estação e do evento, respectivamente. Já o tempo de origem, representado por t_0 e α sendo a velocidade da onda P no meio. Devido a equação possuir 4 incógnitas como verificado na equação 2.1 se fez necessário fazermos 4 observações considerando o tempo de chegada da primeira e da segunda onda, assim pôde se determinar a localização hipocentral e o tempo de origem do evento. O resultado deve ser mínimo, onde a diferença entre o valor observado e o calculado sejam mínimos, essa relação caracteriza por residual tanto para onda P quanto para S. A equação 2.2 demonstra essa relação residual,

$$r_i = t_i^{obs} - t_i^{cal} \quad (2.2)$$

Na equação temos t_i^{obs} que é o tempo de chegada observado no sismograma e r_i o resíduo. Assim, a localização se encontra minimizando o resíduo por mínimos quadrados (e), na equação 2.3

$$e = \sum (r_i)^2 \quad (2.3)$$

A função T^{tra} não é linear, assim temos que considerar a expansão da serie de Taylor para obtermos uma boa aproximação, pois o resíduo precisa tender a zero as correções em $(\Delta x, \Delta y, \Delta z$ e $\Delta t)$, para que o resíduo tenda a ser zero, sejam suficientemente pequenas. Assim, a solução pode ser expressa pela equação

$$r_i = (\delta T / \delta x_i) \Delta x + (\delta T / \delta y_i) \Delta y + (\delta T / \delta z_i) \Delta z + \Delta t \quad (2.4)$$

Os termos da equação 2.4 são as derivadas parciais $\delta T / \delta x_i$, $\delta T / \delta y_i$ e $\delta T / \delta z_i$ são análogos a longitude, latitude e profundidade, respectivamente. Em notação matricial pode ser ainda representada como

$$r = G m \quad (2.5)$$

em que r é o vetor residual, G é a matriz de derivadas parciais e m é o vetor de correção do hipocentro. Com isso, o vetor m é obtido pela solução de mínimos quadrados

$$(G^T G)^{-1} (G^T r) = m \quad (2.6)$$

Com essa solução é possível encontrar os valores das correções da posição da fonte (m). Se cada resultado termos com um novo modelo podemos assim fazer n -iterações até que Δx , Δy , Δz e Δt sejam cada vez menores e sejam próximas do real.

É importante um bom modelo de velocidades da onda P no meio, visto que valores imprecisos acarretarão em localizações inconsistentes. Como não há trabalhos que estimem de forma confiável, para toda a região Nordeste do Brasil, os valores de α , foram usados os dados de velocidade do modelo global IASP91, relacionados na Tabela 1.

Tabela 1 -Modelo de velocidade de α com respeito da profundidade

A (Km/s)	Profundidade (KM)
6.2	0.0
6.6	12.0
7.1	23.0
8.05	31.0
8.25	50.0
8.5	80.0

Fonte: Fônseca (2017)

CAPITULO III – PROCESSAMENTO DOS DADOS

3.1 Identificação de terremotos

Inicialmente os dados da Rede Maranhão foi convertidos para o formato msid, para possibilitar o processamento dos dados no soft seisan. Para a identificação dos eventos foi feita a análise visual dos sismogramas. Neste processo é aplicado uma sequência de filtros de frequência que possibilitem identificar ou ressaltar o sismo. As faixas de frequências utilizadas foram geralmente utilizados filtros de (5 a 10Hz) ou (5 a 30Hz) esses foram os melhores filtros que possibilitou identificar bem o sismo. No sismograma seguinte tem-se as identificações das estações sismográficas com os prefixos “MARA” referente a rede Maranhão. Além disso, é também visível a correspondência com as suas respectivas componentes vertical (HHZ) e horizontais (HH1 e HH2), nas direções Leste-Oeste. Ainda vale salientar a decorrência no tempo do registro localizada na parte inferior da figura. A figura 7 deixa claro a utilização de filtro 5Hz a 30Hz utilizado para se marcar na observação feita a onda P e S.

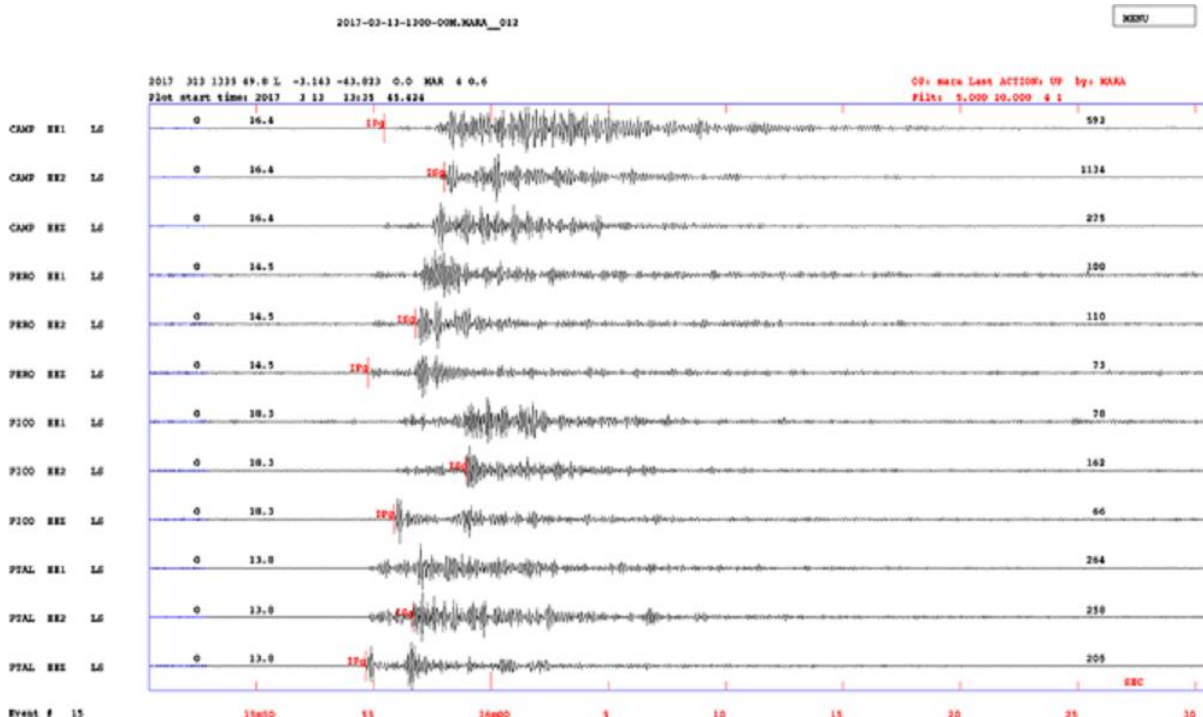


Figura 6 - Sismograma do dia 11 de Março de 2017 (13:00h) com aplicação de filtro.
Fonte: Elaboração própria.

3.2 Picagem

Após a identificação do abalo sísmico foi salvo o arquivo de uma hora que o(s) contém para que em seguida o(s) evento(s) passe(m) pela etapa de picagem para determinação da localização hipocentral, tempo de origem. Sendo assim foram marcados os tempos de chegada das ondas P e S e as máximas amplitudes no sismograma, assim como indica na figura 07 abaixo. Onde o azimuth está marcado indicando a maior amplitude, nos que tinha uma estação ou duas foi colocado o azimuth para fazer a localização mas nos sismogramas com mais de duas estações foi utilizado o hypocenter.

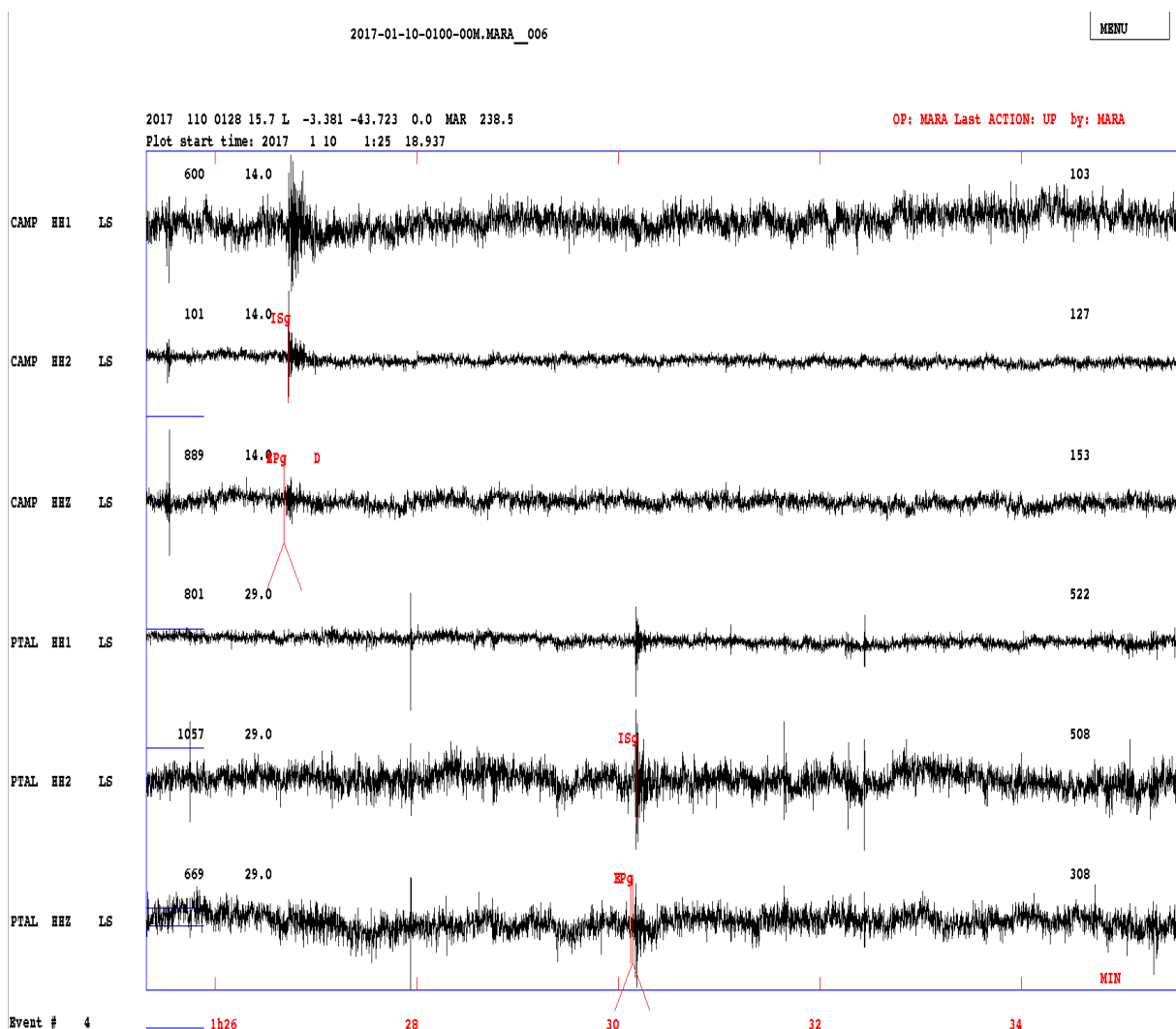


Figura 6– Picagem do evento sísmico do dia 10 de janeiro de 2017 às 00:00h da manhã registrado pelas duas estações (CAMP e PTAL).

Fonte: Elaboração própria

O processo de picagem foi feito todo com a observação minuciosas de cada tempo de ocorrência do evento, uma vez que após encontrar os 15 eventos partimos para marcação da onda P e S, para em seguida analisar com a escolha de uma estação analisar a máxima amplitude ou apenas fazer a diferença de tempo S-P como observa se na figura 8

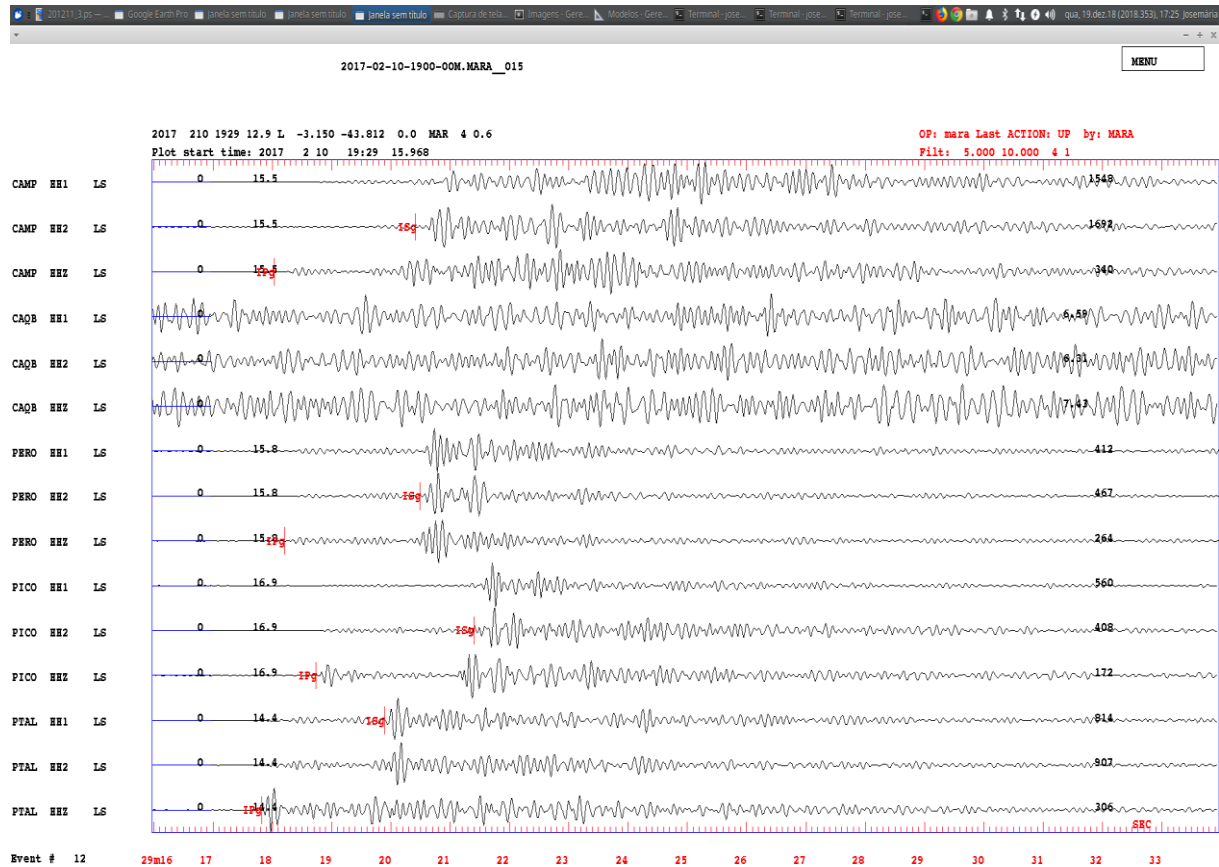


Figura 8– Picagem do evento sísmico do dia 10 de janeiro de 2017 às 19:00h.
Fonte: Elaboração própria

CAPITULO IV – RESULTADOS

No total foram encontrados 15 eventos locais, considerando o período de 09 de janeiro de 2017 a 22 de março de 2017, esses eventos têm intervalos de dias e não se viu réplicas deles. Inicialmente os registros foram obtidos apenas por uma única estação, sendo que mais adiante pode se obter registros até quatro estações, mas com uma ocorrência de eventos menores, uma vez que a maioria dos registros ocorreu no mês de janeiro, quando chegamos em Março e fevereiro calcula se ao todo 06 eventos.

Assim com as localizações epicentrais dos eventos, foi possível gerar o mapa com os epicentros de todos os eventos, que pode ser observado na Figura 9.

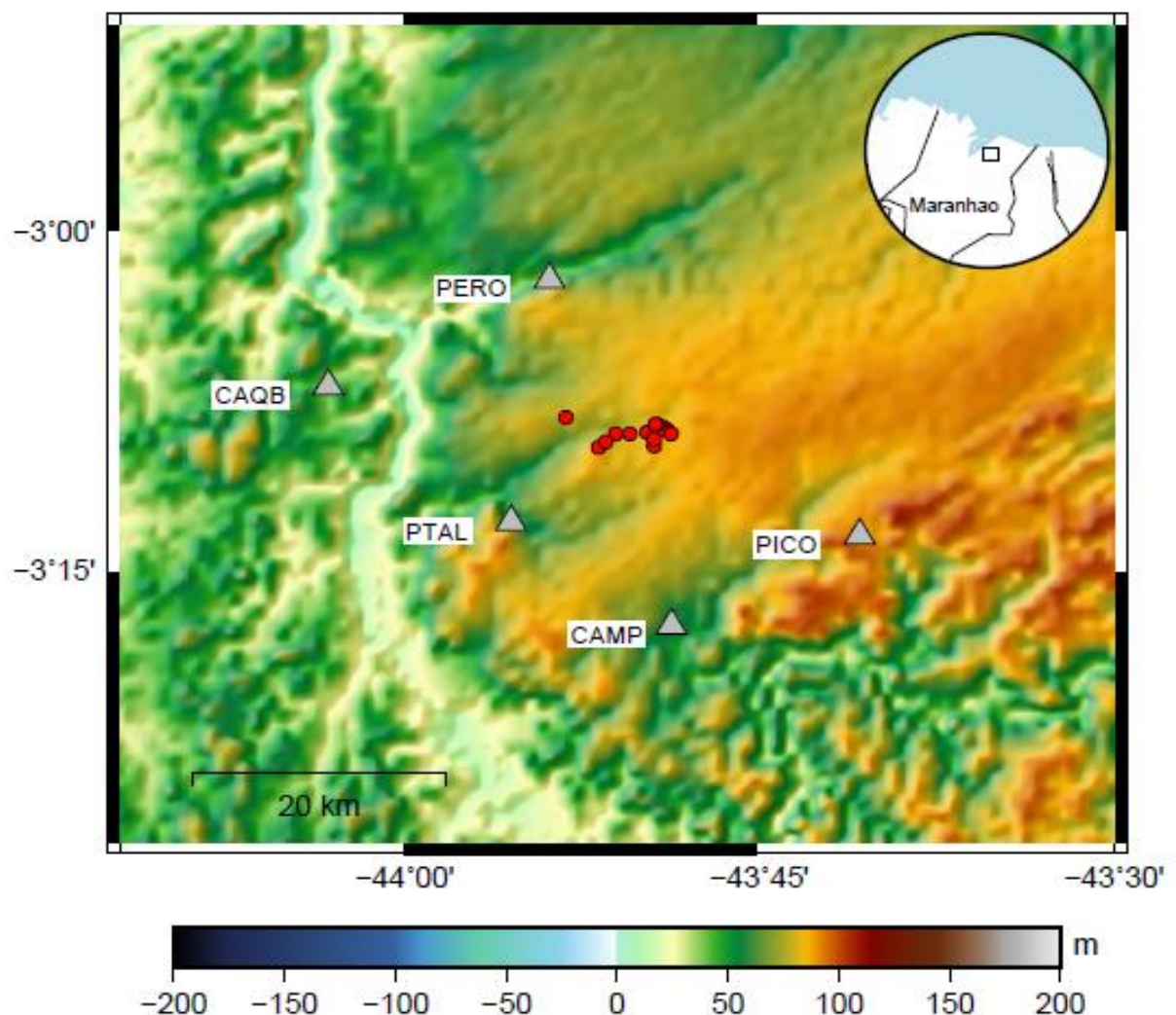


Figura 9 – Mapa com a localização dos eventos onde os triângulos são as estações e os círculos vermelhos são os epicentros.

Fonte: Elaboração própria

CAPITULO V – DISCUSSÕES

A maioria dos eventos são coerentes e próximos da região que os técnicos do LABSIs/UFRN divulgou no relatório, confirmando que as estações foram instaladas em torno da região epicentral.

No decorrer do processo, quando fizemos a picagem das ondas ao colocar o azimute percebeu que o residual ficava muito alto, pode ser que no processo de amplitude máxima das ondas P houve uma não exatidão, já que com a retirada dos azimutes observou se resíduos mínimos entre 0.2 a 0.4.

Segundo o Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (OBSIS). De acordo com o órgão, inicialmente o epicentro do tremor foi entre os municípios de Vargem Grande e Belágua e os efeitos foram sentidos em diversos municípios do Maranhão e do Piauí, incluindo as capitais São Luiz e Teresina, locais onde esse tipo de evento é incomum. Com a localização dos epicentros na Figura 8 a maioria dos eventos se localizaram no Município de Cachoeira Grande que dista 98 km da capital São Luiz.

Esse tremor é decorrência da ruptura de uma falha geológica. Os grandes terremotos acontecem nas bordas das placas tectônicas, quando estas se movem gerando tensão, mas dentro da placa também há tensões distribuídas em pontos fracos. Onde se tem falhas ativas, quando se excede forças, a falha se rompe, provocando tremores como o que foi sentido.

Um dos problemas com os dados foram algumas estações não conseguir registrar bem alguns eventos e no caso da CAQB não funcionou praticamente em todo período dos registros.

Não conseguimos também valores de profundidade, podendo se atribuir ao modelo de velocidade utilizado o qual não considera a geologia da região.

Apesar de não ser possível prever os sismos, Assumpção diz que em cada lugar do Brasil eles acontecem de forma diferente. “No Ceará e no Rio Grande do Norte, por exemplo, os sismos ocorrem na forma de vários tremores que duram semanas” diz ele, afirmando que o Maranhão não é uma região habituada a receber eventos do tipo.

CAPITULO VI - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desta maneira, foram identificados na região de estudo 15 terremotos, todos locais. Os sismos encontrados três sismos iniciais consideramos apenas uma estação (CAMP) para alguns sismos de janeiro, pois havia registros apenas em uma estação e os demais vimos registros em 2 ou 4 estações; e até sismogramas com 5 estações. A localização dos eventos foi coerente com literaturas já existentes.

Assim, podemos tratar o sismo comum. Em que esses tremores acontecem porque todo o continente está sujeito a pressões geológicas devido a movimentação da placa da América do Sul, explica Assumpção. A placa como um todo está sendo apertada, pressionada, é como se cada tremor fosse uma pequena trinca em uma placa que está se movimentando talvez atualmente não houvesse tantos registros devido a ausência de estações anteriormente instaladas na região.

Propõe-se para trabalhos futuros a utilização de um modelo de velocidades mais adequado para o Maranhão devido suas características geológicas. Isso poderia acarretar em estimativas de localização hipocentral e magnitudes mais precisas. Uma vez que com o software utilizado não foi possível obter as profundidades dos eventos, pode se sugerir também a utilização de outro software para retrabalhar os dados.

REFERÊNCIAS

- DIAS, L. The intraplate Maranhão earthquake of 2017 January 3, northern Brazil: evidence for uniform regional stresses along the Brazilian equatorial margin. *Geophysical Journal International*, v. 213, n. 1, p. 387-396, 2017.
- ASSUMPCÃO, Marcelo. Seismicity and stresses in the Brazilian passive margin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 88, n. 1, p. 160-169, 1998.
- LIENERT, Barry R.; BERG, E.; FRAZER, L. Neil. HYPOCENTER: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 76, n. 3, p. 771-783, 1986.
- EARTHALABAMA. Earthquake and Seismic Education. Acesso em: 10 de dezembro Disponível em: <<http://earthalabama.com/education.html>>.
- FERREIRA, J. M.; ASSUMPCÃO, M. Sismicidade do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 1, p. 67-88, 1983.
- HAVSKOV, Jens; OTTEMÖLLER, Lars. SEISAN earthquake analysis software. *Seismol. Res. Lett.*, v. 70, n. 5, p. 532-534, 1999.
- ISKEN, Marius P.; MOONEY, Walter D. Relocated Hypocenters and Structural Analysis from Waveform Modeling of Aftershocks from the 2011 Prague, Oklahoma, Earthquake Sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 107, n. 2, p. 553-562, 2017.
- HAVSKOV, Jens; OTTEMÖLLER, Lars. Location. In: *Routine data processing in earthquake seismology*. Springer, Dordrecht, 2010. p. 101-149.
- FERREIRA, J. A. (1983). Sismicidade do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 67-88.
- Santos, Miro Feliciano Döring dos. Método de Geiger modificado: Localização hipocentral e inversão para velocidade. BS thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.
- Fonsêca, J.A.S. Relatório No. 107 dezembro/2017 Elaboração de um catálogo sísmico para Região Nordeste (2012).