

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

Ana Paula Trindade Souza

**Determinação de Epicentros e Magnitudes
de Sismos Históricos no Brasil: Testes com
uma Nova Equação de Atenuação de
Intensidades**

São Paulo

2017

Ana Paula Trindade Souza

Determinação de Epicentros e Magnitudes de Sismos Históricos no Brasil: Testes com uma Nova Equação de Atenuação de Intensidades

Dissertação apresentada ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Geofísica

Orientador: Prof.^o Dr.^o Marcelo Assumpção

São Paulo

2017

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio em todos os momentos da minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus por até aqui ter me guiado e me sustentado, me dando forças para mais esta conquista.

Ao meu orientador Prof. Marcelo Assumpção pela dedicação, colaboração, paciência e pelas excelentes sugestões, sem as quais nenhuma linha deste trabalho seria possível.

Agradeço a minha família - meus pais, Paulo e Sonia, tia Rosana, meu irmão Vinícius e meus sobrinhos Lucas e Tiago por todo apoio, torcida, paciência e incentivo.

À todos os professores que conheci durante a graduação; em especial agradeço à professora Edna Facincani (CPAq/UFMS) pelo apoio e por sempre acreditar no meu potencial. Agradeço também aos meus amigos, Rodrigo e Emilly, pela amizade e apoio desde a graduação.

Minha vida em São Paulo não teria sido a mesma sem todos os amigos que conheci. Em especial agradeço à Jôse pela disponibilidade, ajuda e cuidado demonstrados na minha chegada em São Paulo. Eli, Ítalo e Ana Luiza (Lulu) por todo carinho, conversas e risadas. À Ariane pela paciência, aguentando meu mau humor e minha paciência próxima a zero. Pelo companheirismo nos momentos mais difíceis, sempre me fazendo acreditar que chegaria ao final desta etapa.

Aos meus amigos da pós-graduação: André, Carol, Henrique, Nelson, Tacio e Tatiana pelo companheirismo no decorrer desta jornada e também pelos momentos de descontração.

Agradeço à equipe do Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo, por todo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço o apoio financeiro da Capes durante o mestrado.

“Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida, e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto, porque o mundo tentará te dissuadir.”

Friedrich Nietzsche

“Se não puderes ser um pinheiro no topo de uma colina sê um arbusto no vale, mas sê...”

Pablo Neruda

Resumo

Epícentros e magnitudes de sismos históricos (sem registro instrumental) podem ser estimados comparando-se as intensidades observadas com uma equação que prevê como as intensidades variam com a magnitude e a distância. Foram usados os valores de intensidades de 24 eventos registrados instrumentalmente para desenvolver novas relações de atenuação da intensidade com a distância para o território brasileiro, usando diretamente as informações de intensidades ao invés das isossistas. Em seguida, usou-se essas relações e a desenvolvida por Assumpção e Burton (1985) para determinar os epicentros e magnitudes de dois eventos históricos na região sudeste (31/07/1861 e 27/02/1950).

Para isso, dois métodos foram testados com sismos recentes (31/01/1955, 24/10/1972 e 10/03/1998) com epicentro e magnitude conhecidos: 1) *Boxer*, que determina o epicentro apenas com as maiores intensidades e 2) ajuste simultâneo de epicentro e magnitude com curvas de atenuação de intensidade, usando o método de busca de Nelder-Mead para minimizar a diferença média entre as intensidades observadas e as calculadas.

O método *Boxer* só dá bons resultados quando há boa distribuição de intensidades ao redor do epicentro e, portanto, não serve para sismos da plataforma continental. Os resultados obtidos com Método de Nelder-Mead (ajuste da equação de atenuação) foram mais satisfatórios.

Comparando as magnitudes e as localizações dos epicentros a partir das relações de atenuação derivadas nesta dissertação com a desenvolvida por Assumpção e Burton (1985), verificou-se que os resíduos entre as intensidades dos eventos calculados a partir da equação atual foram um pouco superiores ao da relação anterior.

Foi feito um estudo especial dos sismos de 1861 no Vale do Ribeira e de 1950 em Poços de Caldas, onde buscou-se em jornais da época informações macrossísmicas complementares

às já existentes. Novos dados de intensidade recentemente descobertos mostram que o epicentro do sismo de 1861 foi mais ao Sul do que a estimativa anterior. Para o sismo de 1950, não houve grandes diferenças entre os epicentros calculados neste estudo e os anteriores.

Os métodos desenvolvidos nesta dissertação poderão ser usados para re-avaliar epicentros e magnitudes de outros sismos históricos no Brasil.

Palavras-chave: Atenuação de intensidades, Epicentro e magnitude de sismos históricos, inversão de intensidades.

Abstract

Epicenters and magnitudes of historical earthquakes (without instrumental record) can be estimated by comparing observed intensities with an equation that predicts how intensities has changed with magnitude and distance. The intensity values of 24 events recorded instrumentally were used to develop new intensity attenuation relations with the Brazilian territory, using directly the information of intensities rather than isossists. This relations was used and that developed by Assumpção and Burton (1985) to determine the epicenters and magnitudes of two historical earthquakes (31/07/1861 and 27/02/1950).

Two methods were tested with recent earthquakes (31/01/1955, 24/10/1972 and 10/03/1998) with known epicenter and magnitude: 1) Boxer, which determines the epicenter only with the highest intensities and 2) Simultaneous fit of epicenter and magnitude with intensity attenuation curves using the Nelder-Mead search method to minimize the mean difference between observed and calculated intensities.

The Boxer method only gives good results when there is good distribution of intensities around the epicenter and, therefore, does not serve for earthquakes of the continental shelf. The results obtained with the Nelder-Mead method (fit of the attenuation equation) were more satisfactory.

Comparing the magnitudes and locations of the epicenters from the attenuation relations derived in this dissertation with that developed by Assumpção and Burton (1985), it was found that the residuals between the event intensities calculated from the present equation was higher than of the previous relations.

A special study was made of the earthquakes of 1861 in the Vale do Ribeira and 1950 in Poços de Caldas, where macroseismic information complementary to those already in existence was searched in newspapers of the time. New intensity data recently discovered

shows that the epicenter of the 1861 earthquake was more in the South than the previous estimate. For the 1950 earthquake, there were no major differences between the epicenters calculated in this study and the previous ones.

The methods developed in this dissertation can be used to re-evaluate the epicenters and magnitudes of other historical earthquakes in Brazil.

Keywords: Attenuation of intensities, epicenter and magnitude of historical earthquakes, inversion intensities.

Lista de Figuras

2.1	Curvas de atenuação da intensidade com a distância para magnitudes 4, 5 e 6 (Assumpção e Burton, 1985).	28
2.2	Mapa dos eventos sísmicos utilizados para estimar a lei de atenuação.	31
2.3	Comparação entre as equações ajustadas e a de Assumpção e Burton (1985).	34
2.4	Normalização das intensidades observadas para magnitude $m=5$ de acordo com a equação $m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$	35
2.5	Normalização das intensidades observadas para magnitude $m=5$ de acordo com a equação $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$	36
3.1	Mapa com as localizações dos epicentros do sismo de 1955 calculados pelo <i>Boxer</i> e Boletim Sísmico Brasileiro (BSB).	41
3.2	Mapa com as localizações dos epicentros do sismo de 1998 calculados pelo <i>Boxer</i> e R. E. Engdhal (2002).	42
3.3	Mapa de isossistas do sismo de 1861.	44
3.4	Mapa de isossistas do sismo de 1950.	45
3.5	Diagrama do problema inverso.	46
3.6	Exemplo de iteração do Método Nelder-Mead aplicado ao \mathbb{R}^2	51
3.7	Histogramas com as soluções de latitude e longitude do epicentro calculadas para o sismo de 1998 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	52
3.8	Histogramas com as soluções de magnitude calculadas para o sismo de 1998 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	53

3.9	Histogramas com as soluções de latitude e longitude do epicentro calculadas para o sismo de 1955 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	54
3.10	Histogramas com as soluções de magnitude calculadas para o sismo de 1955 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	55
3.11	Histogramas com as soluções de latitude e longitude do epicentro calculadas para o sismo de 1972 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	56
3.12	Histogramas com as soluções de magnitude calculadas para o sismo de 1972 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	57
3.13	Mapa de intensidades para o sismo de 1955.	58
3.14	Mapa de intensidades para o sismo de 1972.	59
3.15	Histograma de latitude e longitude do sismo de 1861.	60
3.16	Histogramas com as soluções de latitude e longitude do epicentro calculadas para o sismo de 1861 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	61
3.17	Histogramas com as soluções de magnitude calculadas para o sismo de 1861 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	62
3.18	Histogramas com as soluções de latitude e longitude do epicentro calculadas para o sismo de 1950 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	63
3.19	Histogramas com as soluções de magnitude calculadas para o sismo de 1950 com Método de Nelder-Mead de acordo com as equações de Assumpção e Burton (1985), e a equação atual.	64
3.20	Mapa de contorno da função objetivo para o sismo de 1955.	67
3.21	Mapa de contorno da função objetivo para o sismo de 1972.	68
3.22	Mapa de contorno da função objetivo para o sismo de 1998.	69
3.23	Mapa de contorno da função objetivo para o sismo de 1861.	70
3.24	Mapa de contorno da função objetivo para o sismo de 1950.	71

4.1	Intensidades macrossísmicas observadas no terremoto de 31/01/1955, Serra do Tombador/MT comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 5.55$	76
4.2	Intensidades macrossísmicas observadas no terremoto de 24/10/1972, Campos/RJ comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 5.27$	77
4.3	Intensidades macrossísmicas observadas no terremoto de 10/03/1998, Porto dos Gaúchos/MT comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 5.27$	77
4.4	Intensidades macrossísmicas observadas no terremoto de 31/07/1861, Lorena/SP comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 5.09$	78
4.5	Intensidades macrossísmicas observadas no terremoto de 27/02/1950, Poços de Caldas/MG comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 4.48$	78
4.6	Mapa de intensidades para o sismo de 1861 com as localizações dos epicentros calculados com os diferentes métodos.	80
4.7	Mapa de intensidades para o sismo de 1950 com as localizações dos epicentros calculados com diferentes métodos.	81
A.1	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Diário do Rio de Janeiro, RJ, 04/08/1861.	94
A.2	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Correio Mercantil, RJ, 06/08/1861.	95
A.3	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída dos jornais Echo da Nação e Actualidade, RJ, publicadas em 07 e 10/08/1861, respectivamente.	96
A.4	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Diário do Rio de Janeiro, RJ, 07/08/1861.	97
A.5	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Echo da Nação, RJ, 07/08/1861.	97
A.6	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Diário do Rio de Janeiro, RJ, 08/08/1861.	98

A.7	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Correio Mercantil, RJ, 08/08/1861.	99
A.8	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída dos jornais Correio Paulistano, SP, 04/08/1861 e Correio da Tarde, RJ, 13/08/1861.	99
A.9	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Correio Paulistano, SP, 09/08/1861.	100
A.10	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal A Actualidade, RJ, 10/08/1861.	100
A.11	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal A Actualidade, RJ, 10/08/1861.	101
A.12	Notícia sobre o sismo de 1861 extraída dos jornais A Actualidade e Diário do Rio de Janeiro, RJ, publicada em 10 e 11/08/1861, respectivamente. . .	102
A.13	Notícia sobre o sismo de 1861 extraída dos jornais Correio Mercantil, RJ, 11/08/1861 e Correio Paulistano, SP, 15/08/1861.	102
A.14	Notícia sobre o sismo de 1861 extraída do jornal Correio da Tarde, RJ, 12/08/1861.	103
A.15	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Correio Mercantil, RJ, 13/08/1861.	104
A.16	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Diário do Rio de Janeiro, RJ, 13/08/1861.	105
A.17	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Diário do Rio de Janeiro, RJ, publicada em 15/08/1861.	106
A.18	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Correio Mercantil, RJ, 16 e 17/08/1861.	106
A.19	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída dos jornais Correio da Tarde, Correio Mercantil e A Actualidade, RJ, 16, 27 e 28/08/1861, respectivamente.	107
A.20	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal A Actualidade, RJ, 17/08/1861.	108
A.21	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Diário do Rio de Janeiro, RJ, 27/08/1861.	109
A.22	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Diário do Rio de Janeiro, RJ, 28/08/1861.	110

A.23	Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída do jornal Diário do Rio de Janeiro, RJ, 18/09/1861.	110
A.24	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do Jornal de Notícias, SP, 28/02/1950.	116
A.25	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal A Noite, RJ, 28/02/1950.	117
A.26	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal Diário da Noite, RJ, 28/02/1950.	118
A.27	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal Folha da Manhã, SP, 28/02/1950.	119
A.28	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal O Globo, RJ, 28/02/1950.	120
A.29	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal A manhã, RJ, 01/03/1950.	121
A.30	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal Correio da Manhã, RJ, 01/03/1950.	121
A.31	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal Diário da Noite, RJ, 01/03/1950.	122
A.32	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal Diário de Notícias, RJ,01/03/1950.	122
A.33	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do jornal Gazeta de Notícias, RJ, 01/03/1950.	123
A.34	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do Jornal de Notícias, SP, 04/03/1950.	123
A.35	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do Jornal de Notícias, SP, 05/03/1950.	124
A.36	Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída do Jornal de Notícias, SP, 08/03/1950.	124

Lista de Tabelas

2.1	Eventos sísmicos utilizados para estimar a lei de atenuação para o Brasil. . .	29
3.1	Comparativo entre os parâmetros dos sismos de 1955 e 1998 calculados com o <i>Boxer</i> e referência.	40
3.2	Parâmetros dos sismos de 1861 e 1950 calculados com o <i>Boxer</i> e referência.	43
4.1	Parâmetros do BSB comparados com os parâmetros calculados pelo Método Nelder-Mead com as equações de 1985 e a atual. O valor de RMS é referente ao resíduo médio entre as intensidades observadas e calculadas.	73
A.1	Localização de cada cidade em que o sismo de 1861 foi sentido e o valor de intensidade correspondente.	115
A.2	Localização de cada cidade em que sismo de 1950 foi sentido e o valor de intensidade correspondente.	128

Sumário

1. <i>Introdução</i>	23
1.1 Importância de dados de intensidade	23
1.2 Lei de Atenuação	24
1.3 Objetivos	25
2. <i>Lei de Atenuação de Intensidades</i>	27
2.0.1 Métodos e Fontes de Informação	29
2.0.2 Resultados	32
3. <i>Determinação de Epicentro e Magnitude de Sismos Históricos</i>	37
3.1 Método <i>Boxer</i>	37
3.1.1 Algoritmo para Determinar o Epicentro	38
3.1.2 Algoritmo para Determinar a Magnitude	39
3.1.3 Testes com os Sismos de 1955 e 1998 e Aplicação do Método <i>Boxer</i> aos Sismos Históricos de 1861 e 1950	39
3.2 Método Manual para Determinação de Epicentro e Magnitude de Sismos Históricos: Isossistas	43
3.2.1 Determinação da Magnitude e Epicentro dos Sismos de 1861 e 1950	44
3.3 Inversão de Intensidades com o Método de Nelder-Mead	46
3.3.1 Problema Inverso	46
3.3.2 Função Objetivo	46
3.3.3 Método de Nelder-Mead	47
3.3.4 Algoritmo de Nelder-Mead	48

3.3.5	Testes com os Sismos de 1955, 1972 e 1998 e Aplicação do Método Nelder-Mead aos Sismos Históricos de 1861 e 1950	50
3.3.6	Análise da Função Objetivo	65
4.	<i>Resultados e Discussão</i>	73
4.1	Teste com sismos recentes	73
4.1.1	Avaliação da Magnitude Calculada com o Método de Nelder-Mead	75
4.2	Localização dos Sismos Históricos de 1861 e 1950: Comparação entre os Métodos	79
5.	<i>Conclusões</i>	83
	<i>Referências</i>	87
	<i>Apêndice</i>	91
A.	<i>Dados Macrossísmicos</i>	93
A.1	Registros históricos sobre o sismo de 1861	94
A.2	Registros históricos sobre o sismo de 1950	116
B.	<i>Escala de Intensidade Mercalli Modificada (MM)</i>	129

Introdução

1.1 Importância de dados de intensidade

Os dados instrumentais (registrados por estações sismográficas) de sismos ocorridos no território brasileiro, só estão disponíveis por um curto período de tempo (desde a instalação de estações sismográficas na década de 1960), o que é insuficiente para a representação da sismicidade com intervalos de recorrência longos. A sismicidade pré-instrumental deve ser refletida para análise de perigo sísmico adequada e para melhor representar o nível de sismicidade existente.

Uma maneira de medir um terremoto é por meio dos efeitos causados por ele. Os dados macrossísmicos referentes a um local são observações feitas pelo homem sobre as consequências causadas pela passagem das ondas sísmicas e correspondem a sensações nas pessoas, efeitos nas construções e na própria natureza. As informações macrossísmicas de terremotos históricos são descritas principalmente em jornais da época.

O valor de intensidade é definido no lugar de observação por meio de dados macrossísmicos. Esses dados são avaliados com referência em escalas de intensidades, neste caso, a Escala Mercalli Modificada (MM) (Apêndice B). Esta escala não envolve medidas diretas com instrumentos, apenas classifica as intensidades das vibrações segundo a percepção da população. Apesar de envolver certo grau de subjetividade, é de suma importância no estudo de sismos históricos. Em alguns casos, quando não existem dados instrumentais de estações sismográficas próximas, os epicentros estimados com dados macrossísmicos podem ser mais precisos do que os epicentros calculados com dados instrumentais de estações distantes (Berrocal *et al.* 1985).

Quando se tem disponível um número considerável de pontos de intensidades sísmicas em

uma determinada região, pode-se construir um mapa de isossistas (curvas que limitam as regiões de mesma intensidade) para determinar o epicentro (Sibol *et al.* 1987). Convencionalmente, os epicentros de terremotos históricos são determinados como sendo o baricentro da isossista de maior intensidade. Como não há registros instrumentais destes sismos, sua magnitude não pode ser calculada diretamente. Neste caso, as magnitudes são estimadas a partir de relações empíricas entre magnitude e área afetada (área onde o sismo foi sentido). A precisão do epicentro e da magnitude estimados com estes métodos convencionais é altamente dependente da cobertura espacial dos danos sísmicos observados.

1.2 Lei de Atenuação

O estudo da atenuação da intensidade com a distância desempenha um papel importante na análise de risco sísmico. A equação de atenuação, utilizada até então no Brasil, foi publicada por Assumpção e Burton (1985). Esta equação foi calculada a partir de um conjunto de dados de 36 terremotos ocorridos no Brasil, incluindo sismos com informações instrumentais e históricas. Esta equação não usa diretamente os pontos de dados de intensidade dos eventos disponíveis, mas sim, os mapas de isossistas. Estas isossistas são ajustadas por decisão do perito, introduzindo uma parte subjetiva nas leituras resultantes.

Neste estudo apresenta-se uma nova lei de atenuação de intensidade-distância, utilizando diretamente as observações de intensidade, ao invés das linhas de isossistas. Três equações que descrevem a atenuação de intensidades com a distância são comparadas para determinar qual delas melhor prediz os valores observados no Brasil. As leis de atenuação foram calculadas usando informações de 314 pontos de intensidades referentes a 24 eventos com medidas instrumentais conhecidas.

A fim de compreender a sismicidade e avaliar o perigo sísmico do país corretamente, é muito importante estimar epicentro e magnitude de terremotos históricos tão precisamente quanto possível. Dessa maneira, novas metodologias vêm sendo amplamente testadas para diminuir a subjetividade nos cálculos destes parâmetros. O programa *Boxer* é um exemplo desses novos procedimentos.

O programa *Boxer* foi desenvolvido por Gasperini *et al.* (1999) para calcular os parâmetros de fonte de um terremoto a partir dos dados macrossísmicos. Ele fornece os parâmetros sismológicos (latitude e longitude do epicentro e magnitude) e um modelo

geométrico da fonte por meio de uma caixa (*Box*) que representa a projeção em superfície da fonte sismogênica. O programa foi calibrado inicialmente para terremotos Apeninos e tem sido amplamente testado na Itália e Europa.

Mediante a utilização generalizada do *Boxer*, decidiu-se testá-lo usando dados de intensidades macrossísmicas para determinar a magnitude e epicentro de sismos históricos do Brasil. No entanto, o *Boxer* foi utilizado sem considerar os limites de aplicabilidade do método (atenuação da intensidade calibrada para o território italiano). Os resultados obtidos com o programa mostram uma tentativa preliminar de determinação dos parâmetros de fonte de sismos históricos.

Neste trabalho propõe-se um novo método para calcular os parâmetros de fonte (epicentro e magnitude) de sismos históricos a partir de intensidades sísmicas, exclusivamente. Com base na lei de atenuação de intensidades (Assumpção e Burton, 1985) e a nova lei determinada, foi elaborado um algoritmo de inversão que utiliza o Método de Nelder-Mead para encontrar o epicentro e a magnitude que resulte o menor resíduo médio entre as intensidades observadas e calculadas.

A inversão de intensidades utilizando o Método de Nelder-Mead é uma nova maneira de resolver o problema de determinação de magnitude e epicentro de sismos históricos, visto que as formas de resolução já usadas não fazem uso de métodos numéricos (Isossistas), ou não usam equações calibradas para o Brasil (*Boxer*).

Os sismos de 31/01/1955, Serra do Tombador/MT; 24/10/1972, Campos/RJ e 10/03/1998 e Porto dos Gaúchos/MT, com medidas instrumentais conhecidas, foram utilizados para testar a viabilidade do método *Boxer* e da inversão com o Método de Nelder-Mead para posteriormente aplicar a metodologia aos sismos históricos de 31/07/1861, Lorena/SP e 27/02/1950, Poços de Caldas/MG.

1.3 Objetivos

- Localizar e identificar em registros históricos, principalmente em jornais, descrições de tremores de terra importantes na região sudeste, tais como: 1861 (Lorena/Itajubá, SP) e 1950 (Poços de Caldas, MG) de modo a complementar os dados existentes.
- Determinar uma equação que relacione intensidades observadas com a magnitude do evento e distância epicentral para o Brasil, utilizando dados macrossísmicos de

sismos com medidas instrumentais conhecidas.

- Rever o problema de determinação dos parâmetros de fonte de terremotos utilizando informações macrossísmicas, permitindo assim, melhorar a localização do epicentro e magnitude de sismos históricos. Para isso, três métodos foram utilizados:
 - Método *Boxer*;
 - Manualmente, traçando as isossistas;
 - Um procedimento alternativo (inversão com o Método de Nelder-Mead) para determinação dos parâmetros de fonte de terremotos históricos utilizando a lei de atenuação determinada por Assumpção e Burton (1985) e a nova lei, para verificar se há melhoras nos resultados.

Lei de Atenuação de Intensidades

A atividade sísmica no território brasileiro apesar de baixa, não pode ser negligenciada. Eventos sísmicos com intensidade até VII MM (provocando sérias rachaduras e desabamentos parciais em construções fracas) não são raros no Brasil (Berrocal et al., 1984), como por exemplo os sismos de Pacajus (CE) em 20/11/1980 com magnitude $mb = 5.2$, Codajás (AM) de 05/08/1983 com $mb = 5.5$.

Embora hoje em dia existam diferentes maneiras para estudar as características de um evento sísmico por meio instrumentais, a intensidade continua a ser um parâmetro importante, especialmente para sismos históricos.

Para a análise de perigo sísmico, é necessário ter uma descrição do modo como a intensidade (MM) diminui com a distância do epicentro. O Brasil, por estar situado no interior da placa Sul-Americana, as ondas sísmicas se atenuam menos do que quando se propagam perto de margens de placas ativas (Assumpção, 1983). Dessa maneira, curvas de atenuação apropriadas devem ser determinadas.

A única investigação sistemática de atenuação de intensidade para o Brasil foi realizada por Assumpção e Burton (1985). Eles ajustaram os raios médios das isossistas e determinaram uma relação entre magnitude, m , intensidade, I e distância epicentral r (km), aplicável a sismos brasileiros com magnitudes de 3.5 a 5.5 e intensidades III a VI (MM)(Figura 2.1).

Um dos objetivos deste trabalho é determinar os coeficientes de atenuação para o Brasil, usando todos os dados macrossísmicos disponíveis e confiáveis para esta área. Diferentemente de Assumpção e Burton (1985), buscou-se ajustar as curvas de atenuação utilizando diretamente as intensidades observadas e acrescentando informações de sismos recentes.

Diferentes autores desenvolveram estudos de atenuação sísmica em diferentes regiões

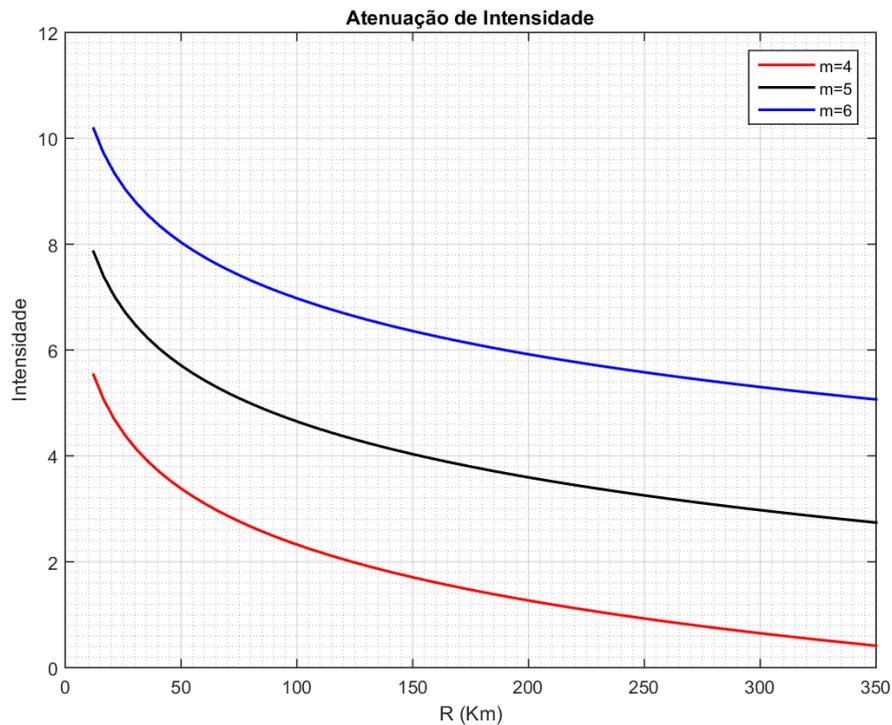


Figura 2.1: Curvas de atenuação da intensidade com a distância r da isossista I , de acordo com a equação: $m = -0.02 + 0.43I + 1.51 \log(R)$, onde $R = \sqrt{r^2 + h^2 + D^2}$; h é a profundidade focal (km) e D uma constante empírica para impedir intensidades exageradamente grandes quando $r = h = 0$. $D = 7\text{km}$.

do mundo: no noroeste da Europa (Ambraseys, 1985), Itália (Gasperini, 2001) e Cascadia (Bakun et al., 2002). Stromeyer e Grunthal (2009) e Le Goff et al. (2014), desenvolveram um estudo de atenuação de intensidade com a distância em Portugal e região central da Europa, respectivamente, usando diretamente os pontos de intensidades observadas.

Com base em um modelo teórico preestabelecido (Howell e Schultz, 1975), três equações que definem um padrão de atenuação da intensidade com a distância são comparadas entre si e com a equação de Assumpção e Burton (1985) para tentar determinar qual melhor prediz os valores observados no Brasil. Para isso, foram obtidas as informações de intensidade (MM), magnitude e epicentro (latitude e longitude) de 24 terremotos.

Em geral, o ajuste do modelo a dados reais é testado estatisticamente, mas muitas vezes há uma enorme dispersão dos dados. De fato, a intensidade é fortemente afetada não só pelo tamanho do terremoto e pelas características da propagação da onda sísmica, mesmo as características do ambiente humano e natural e a arbitrariedade do processo de atribuição de intensidade podem aumentar a incerteza.

2.0.1 Métodos e Fontes de Informação

Os dados necessários para o cálculo da nova lei de atenuação têm que fornecer uma magnitude instrumental e um relatório de intensidades. Foram obtidas do catálogo do Centro Regional de Sismologia para América do Sul (CERESIS) informações de intensidades de 14 eventos, abrangendo o período desde 1955 até 1980. As informações de intensidades dos sismos posteriores a esse período foram consultadas em publicações recentes. As coordenadas do epicentro e a magnitude (mb) destes sismos tiveram como referência o Boletim Sísmico Brasileiro (BSB). Os sismos que ocorrem no Brasil, embora não existam determinações hipocentrais muito precisas, devem ser em sua grande maioria de profundidade focal rasa ($h < 33$ km), geralmente localizados na crosta superior (Berrocal *et al.* 1984). Por isso, para os sismos sem informações de profundidade, as mesmas foram fixadas em 10 km. Os eventos utilizados para determinar a lei de atenuação estão listados na tabela 2.1 e a distribuição geográfica de todas as intensidades, correspondendo a 24 sismos corresponde a figura 2.2.

As intensidades utilizadas na calibração da lei de atenuação, contêm valores de intensidades inteiras e intermediárias (por exemplo, V-VI). Valores intermediários de intensidade não são definidos em qualquer escala macrossísmica, porém eles foram introduzidos como valores incertos entre dois inteiros. O número total de intensidades intermediárias é muito inferior ao das intensidades inteiras. Estes dados são reportados na forma de um valor decimal (por exemplo, 5.5). Estas estimativas de intensidade devem ser interpretadas como significando que: o grau mais baixo (por exemplo, V) certamente foi atingido no local, porém há também evidência (talvez fraca) de que o valor mais alto (por exemplo, VI) foi sentido, mas não é certo.

Em regiões de baixa sismicidade, como o Brasil, o cálculo das leis de atenuação é dificultado pela falta de dados. Os eventos que foram utilizados para calibração do método foram selecionados do catálogo CERESIS, levando em consideração o número de observações de intensidades disponíveis. Eventos com menos de 3 informações não foram levados em consideração.

Tabela 2.1 - Eventos sísmicos utilizados para estimar a lei de atenuação para o Brasil. MDP é o número de pontos de intensidades.

Evento	Ano	Mês	Dia	Epicentro	Magnitude	Profundidade (km)	MDP
Serra do Tombador/MT	1955	01	31	-12.52 -57.35	6.2	10	15
Vitória/ES	1955	03	01	-19.84 -36.75	6.1	10	10
Cunha/SP	1967	03	23	-23.30 -45.00	4.1	10	13
Serra dos Macacos/RN	1968	02	15	-06.09 -38.44	4.1	10	03
Serra dos Macacos/RN	1968	02	23	-06.09 -38.44	4.6	10	34
Campos/RJ	1972	10	24	-21.72 -40.53	4.8	08	19
Parazinho/RN	1973	07	22	-05.28 -35.82	4.3	10	03
Conc. Alagoas/AL	1974	02	24	-20.04 -48.47	4.2	10	03
Itapirapuã/GO	1976	01	05	-15.45 -50.51	3.7	10	13
Balbina/AM	1976	10	08	-02.00 -59.80	4.0	10	03
Santa Cruz/RN	1978	02	10	-06.28 -36.03	3.7	10	04
Prim. de Maio/PR	1979	03	27	-22.84 -51.01	3.7	10	05
Rubiataba/GO	1979	08	22	-15.26 -49.95	3.5	10	07
Pacajus/CE	1980	11	20	-04.30 -38.40	5.2	05	13
Floresta/PE	1981	11	02	-08.61 -38.45	3.1	10	06
Floresta/PE	1981	11	04	-08.59 -38.50	3.1	10	07
Paraguai/PY	1982	04	08	-24.80 -58.10	4.9	12	05
Codajás/AM	1983	08	05	-03.58 -62.14	5.5	23	21
João Câmara/RN	1986	08	05	-05.53 -35.75	3.3	03	17
Ibiaci/PR	1989	01	07	-22.93 -51.01	3.7	10	07
Pto. Gaúchos/MT	1998	03	10	-11.62 -56.77	5.2	04	27
Itacarambi/MG	2007	12	09	-15.07 -44.09	4.7	10	35
Plataf. Cont./SP	2008	04	23	-25.65 -45.29	5.2	17	19
Coxim/MS	2009	06	15	-18.55 -55.84	4.7	06	17

Existem distintas maneiras de representar a atenuação de intensidade de um evento sísmico. Tais modelos relacionam a intensidade e/ou diferença de intensidade em função da magnitude e distância epicentral. As equações (2.1, 2.2, 2.3) testadas, são equações que relacionam magnitude, intensidade e distância epicentral apenas. Todas elas são baseadas na suposição implícita de que a energia sísmica é irradiada de uma fonte pontual através de um espaço de geometria simples (Howell e Schultz, 1975).

Com base em 314 pontos de intensidades de 24 terremotos, buscou-se ajustar as três equações de atenuação por Mínimos Quadrados. Assim, o objetivo é escolher uma curva (determinando os coeficientes a, b, c e d) que melhor se ajuste aos dados observados. O melhor ajuste no sentido de mínimos quadrados minimiza a soma de resíduos ao quadrado, ou seja, a média da diferença entre a intensidade observada e o valor ajustado pelo modelo.

Prezou-se por equações que relacionassem intensidade em função da magnitude, pois

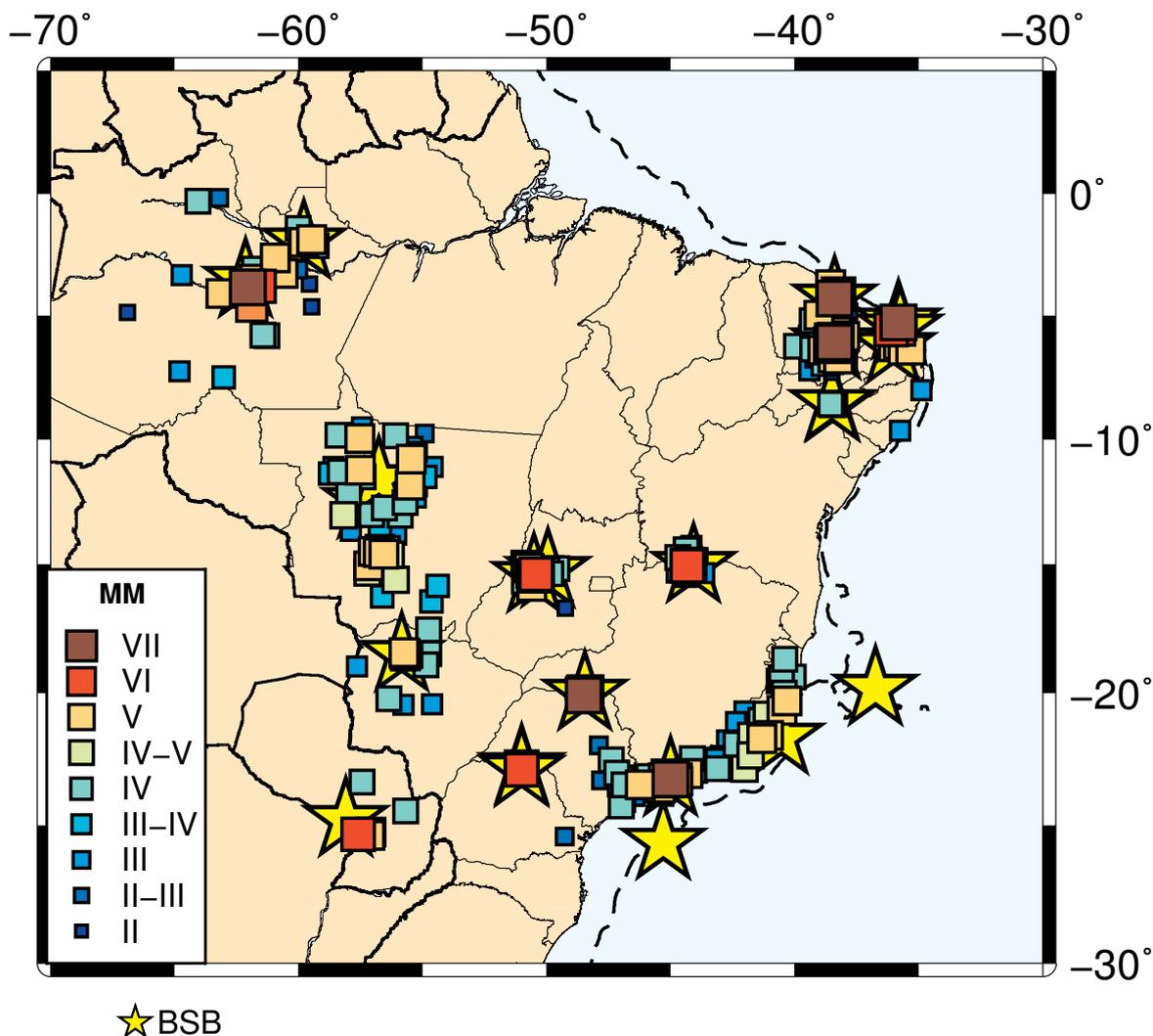


Figura 2.2: Mapa dos eventos sísmicos utilizados para estimar a lei de atenuação. O tamanho e a cor dos quadrados correspondem às intensidades (MM) e as estrelas correspondem aos epicentros dos eventos listados na tabela 2.1.

no Brasil há regiões pouco habitadas e por isso, a intensidade máxima observada pode não corresponder à intensidade no epicentro. A forma das relações de atenuação utilizadas neste estudo são as seguintes:

$$I = am - b \log(R) - cR + d \quad (2.1)$$

$$I = am - b \log R + c \quad (2.2)$$

$$I = a + bm - cR \quad (2.3)$$

onde $R = \sqrt{r^2 + h^2}$ é a distância hipocentral, m é a magnitude e a, b, c e d são os

coeficientes a serem determinados.

Uma matriz (D) contendo todos os dados (magnitude, epicentro, profundidade e intensidade) dos sismos selecionados foi elaborada. Dessa maneira, pode-se resolver, por exemplo, a equação 2.1 por Mínimos Quadrados como segue:

Seja I o vetor $n \times 1$ das observações de intensidades. Seja D o vetor $n \times 4$ das observações das variáveis explicativas. Seja P o vetor 4×1 dos coeficientes.

$$\begin{pmatrix} m_1 & -\log(R_1) & -R_1 & 1 \\ m_2 & -\log(R_2) & -R_2 & 1 \\ m_3 & -\log(R_3) & -R_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_n & -\log(R_n) & -R_n & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix}$$

Para que $P = [a, b, c, d]$ minimize a soma dos resíduos quadrados, ele deve satisfazer:

$$\begin{aligned} D \times P &= I \\ D^T \times D \times P &= D^T \times I \\ (D^T \times D)^{-1} \times D^T \times D \times P &= (D^T \times D)^{-1} \times D^T \times I \\ P &= (D^T \times D)^{-1} \times D^T \times I \end{aligned} \quad (2.4)$$

A equação 2.4 é a fórmula básica matricial do modelo de regressão múltipla por Mínimos Quadrados.

2.0.2 Resultados

A partir dos dados macrossísmicos foi feita uma equação representativa do padrão de atenuação da intensidade com a distância epicentral para o Brasil. Essas leis não incorporam correção local e os efeitos do local não são considerados. O ajuste foi feito com um programa em Matlab utilizando a técnica de Mínimos Quadrados. Foram obtidos os seguintes coeficientes:

$$I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151 \quad (2.5)$$

$$I = 0.9514m - 1.8643 \log R - 3.0684 \quad (2.6)$$

$$I = 1.7467 + 0.6591m - 0.0055R \quad (2.7)$$

O desvio padrão dos resíduos é obtido comparando as intensidades calculadas a partir das relações anteriores com as intensidades observadas. Obteve-se um erro padrão (RMS) de ± 0.9 para equação 2.5, ± 0.95 para 2.6 e ± 1 para 2.7. A lei de atenuação é representada com todos os dados de magnitudes ($3.1 \leq m \leq 6.2$) e intensidades ($2 \leq I \leq 7$ (MM)) disponíveis.

Le Goff *et al.* (2014) utiliza diretamente as intensidades observadas para calibrar uma lei de atenuação para Portugal continental. Para isso, calcula diferentes curvas de regressão (linear, logarítmica e exponencial) para identificar qual delas se ajusta melhor aos seus dados. As regressões logarítmicas foram as que melhor se ajustaram aos dados. Esta lei foi calculada a partir da regressão logarítmica de 25 eventos obtendo-se: $I = -0.9438 \ln(D) + 4.1m - 9.5763$, onde I são as intensidades, m a magnitude e D a distância epicentral. O intervalo de validade corresponde a magnitudes entre 4.4 e 6.2. O desvio padrão dos resíduos foi de 0.63.

A equação que resultou no melhor ajuste para o Brasil (2.5) foi $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$, cujo resíduo médio RMS foi ± 0.9 . Comparando com o trabalho de Le Goff *et al.* (2014), o resíduo neste trabalho ficou 0.27 acima do calculado para Portugal. Essa discrepância pode ser devido ao uso generalizado dos dados.

A figura 2.3 compara as relações de atenuação de intensidades para o Brasil determinadas por Assumpção e Burton (1985) e as derivadas neste trabalho para uma magnitude hipotética $m = 5$. A equação de Assumpção e Burton (1985) foi modificada em relação a original, sendo retirada 0.5 unidades de intensidade. Isto significa que um ponto de intensidade localizado exatamente sobre o raio da isossista IV, por exemplo, a intensidade correspondente é um valor entre III e IV.

Para distâncias epicentrais de até 200 km, a relação de atenuação de Assumpção e Burton prevê observações de maior intensidade comparadas com as equações 2.5 e 2.6. Em relação a equação 2.7 é maior até 120 km. Em contraste, as relações 2.5 e 2.6 desenvolvi-

das neste trabalho, estão de acordo para intensidades maiores que III (MM) e distâncias epicentrais menores que 200 km, porém, abaixo de III (MM) elas divergem, com maiores valores de intensidade sendo previstos com aumento das distâncias para a equação 2.6. Nos primeiros quilômetros as intensidades determinadas pelas novas equações 2.5 e 2.6 são subestimadas em pouco mais de 2 unidades de intensidade em relação a de Assumpção e Burton (1985) (Figura 2.3).

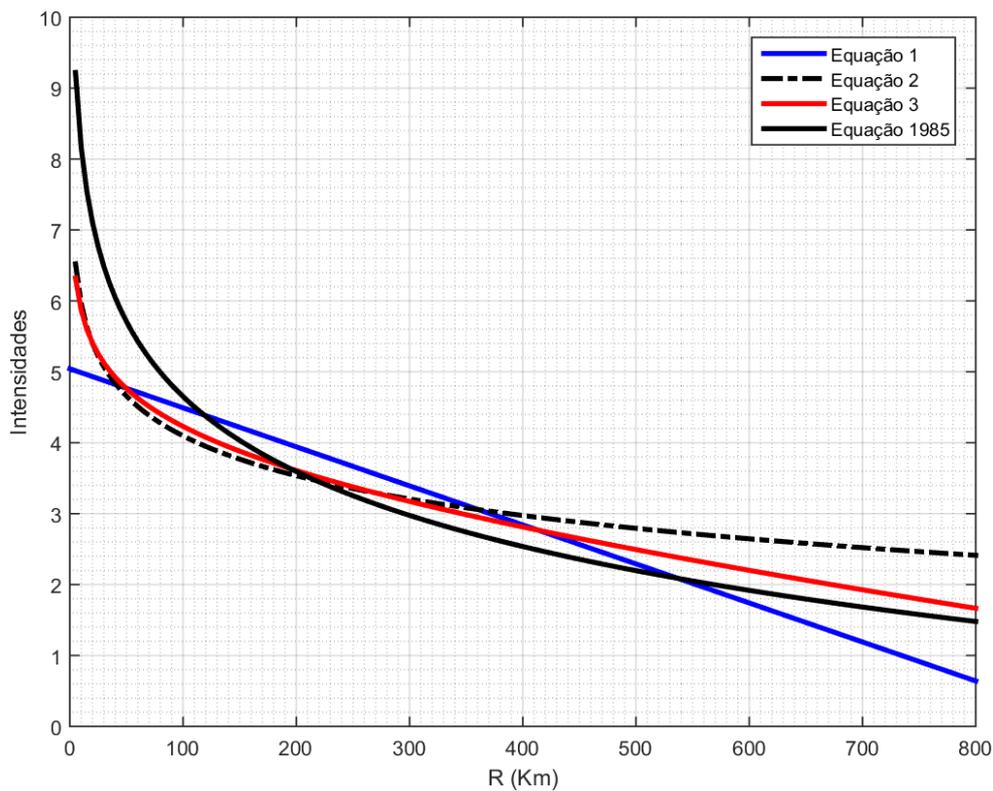


Figura 2.3: Comparação entre as equações ajustadas e a de 1985. Equação 1: $I = 1.7467 + 0.6591m - 0.0055R$; Equação 2: $I = 0.9514m - 1.8643 \log R - 3.0684$; Equação 3: $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$ e Equação 1985: $m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$. A profundidade foi fixada em 0 km.

Para verificar a existência de algum ponto anômalo, as intensidades de cada evento foram normalizadas para uma magnitude comum $m=5$. De maneira geral, o decaimento das intensidades normalizadas se mostram de acordo com os modelos de Assumpção e Burton (1985) e a nova equação 2.5.

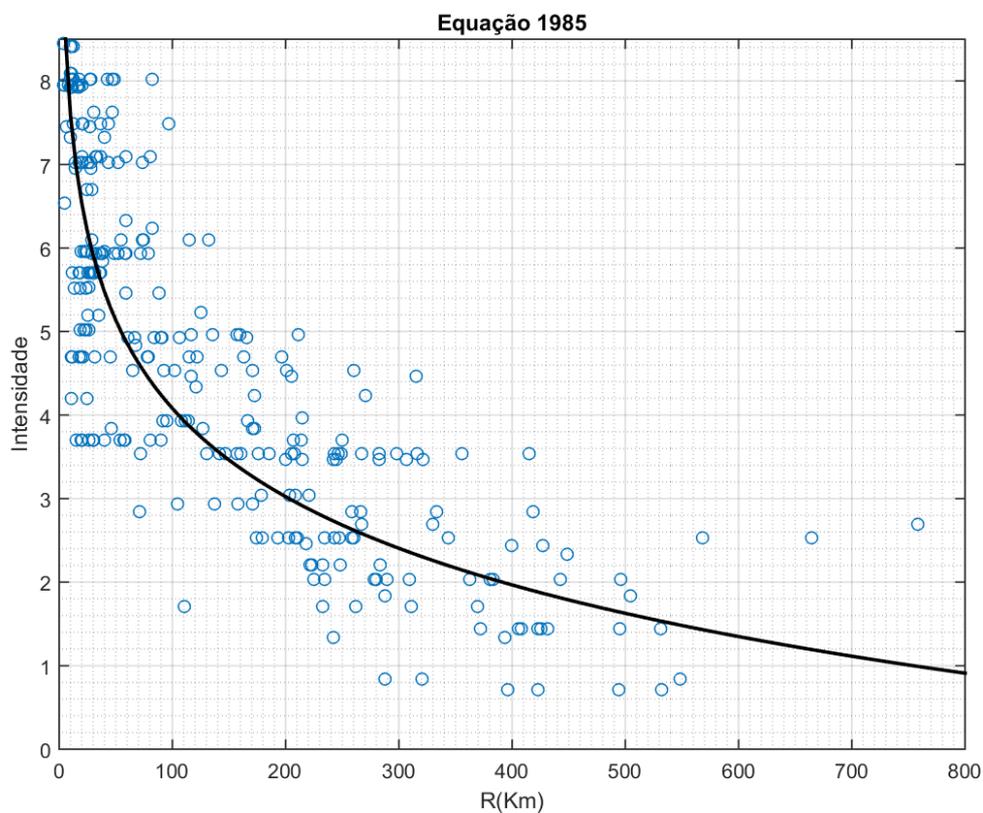


Figura 2.4: Normalização das intensidades observadas para magnitude $m=5$ de acordo com a equação $m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$. O resíduo médio calculado entre as intensidades normalizadas e as observadas foi 1.23.

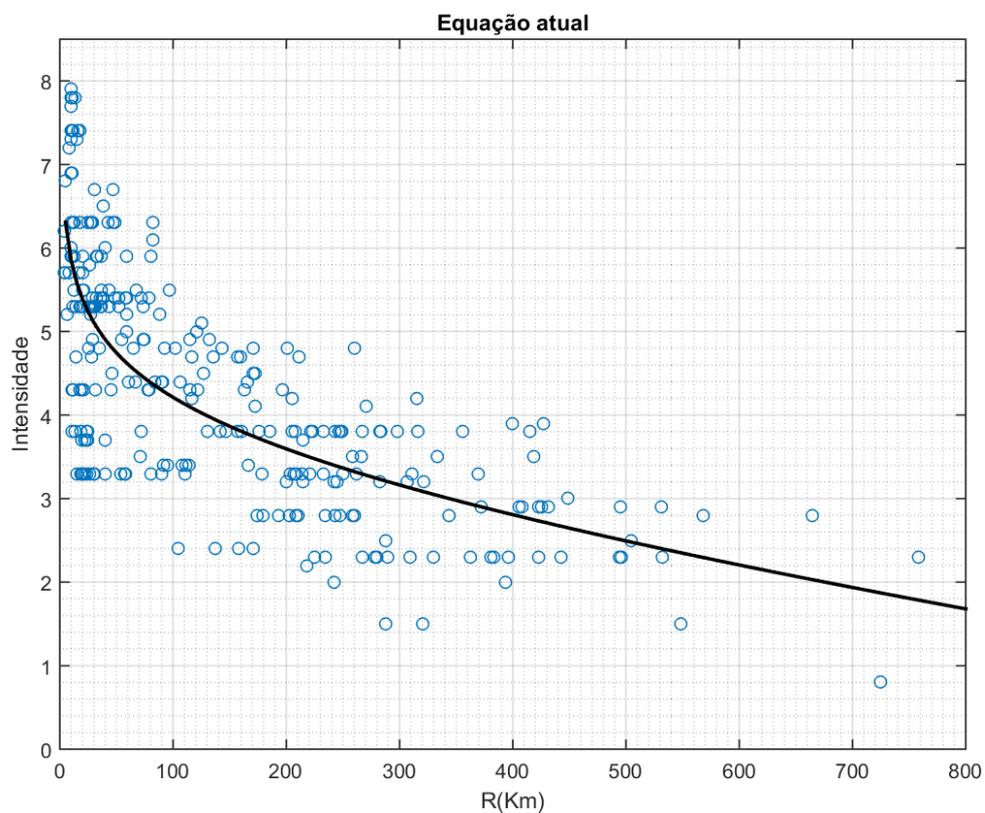


Figura 2.5: Normalização das intensidades observadas para magnitude $m=5$ de acordo com a equação $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$. O resíduo médio calculado entre as intensidades normalizadas e as observadas foi 0.94.

Determinação de Epicentro e Magnitude de Sismos Históricos

Um dos objetivos desta pesquisa foi dimensionar dois eventos históricos ocorridos na região sudeste em 31/07/1861 e 27/02/1950. Com base nos dados macrossísmicos (Apêndice A), foi possível determinar a magnitude e epicentro utilizando três métodos diferentes: *Boxer*, inversão com o Método de Nelder-Mead e manualmente com as isossistas.

Foi testado o desempenho de cada método primeiramente com sismos com informações instrumentais conhecidas (1972, 1955 e 1998) e localizações diversificadas de epicentro. Por exemplo, o sismo de 1972 com epicentro no mar e o de 1955, com poucas informações de intensidade em torno do epicentro. Dessa maneira, pode-se avaliar a aplicabilidade dos métodos aos sismos históricos.

3.1 Método Boxer

Com o objetivo de diminuir o nível de subjetividade com que geralmente são determinados os parâmetros de fonte de sismos históricos, novos procedimentos vêm sendo amplamente testados. O programa *Boxer* é um exemplo desses novos procedimentos.

O *Boxer* foi desenvolvido para calcular os parâmetros de um terremoto a partir dos dados macrossísmicos: epicentro (latitude e longitude), magnitude, as dimensões físicas e a orientação da fonte de grandes sismos históricos (Gasperini *et al.* 1999).

A versão original do programa foi inicialmente calibrada para terremotos Apeninos (na maioria dos casos eventos superficiais). O programa foi amplamente testado na Itália e Europa (Leschiutta e Mirto, 2000).

Utilizamos o método *Boxer* numa tentativa preliminar de determinar o epicentro e mag-

nitudo dos sismos históricos, não levando em consideração que a atenuação de intensidades utilizada no programa é a do território italiano.

3.1.1 Algoritmo para Determinar o Epicentro

O método *Boxer* calcula o epicentro independente da magnitude. O algoritmo supõe que o epicentro macrossísmico é o baricentro da região dos maiores efeitos do terremoto (Gasperini *et al.* 1999) e opera da seguinte maneira:

1. Primeiramente os dados são subdivididos em classes de intensidade. Os dados que ficam entre as classes (por exemplo, intensidade entre IV-V) são atribuídos à classe idade;
2. Seleciona-se a classe que inclui a intensidade máxima (I_{max});
3. Se a intensidade máxima ficar entre valores inteiros (por exemplo, IV-V), as localidades que apresentarem os valores de intensidades inteiras inferior são selecionadas, além de todas aquelas onde a intensidade máxima pertence (por exemplo, toda intensidade IV-V além de todos os dados de intensidade IV);
4. Se o número de localidades selecionadas é menor que 3, o conjunto de dados é estendido para incluir dados das classes de menor intensidade até I_{max} menos um grau.
5. A localização do epicentro corresponde a média aparada de 25%, ou seja, a média das coordenadas de todos os valores incluídos no intervalo entre o primeiro e o terceiro interquartil das coordenadas de todas as localidades selecionadas.

A incerteza associada ao método não pode ser calculada nem *a priori* e nem *a posteriori*, mas apenas avaliada em termos de consistência do procedimento. Para isso, usa-se a média quadrática da diferença entre as coordenadas das localidades selecionadas e as coordenadas do epicentro inferido. Este parâmetro não pode ser usado diretamente como estimativa de incerteza, mas pode ser usado como um parâmetro que controla a confiabilidade da estimativa. Por exemplo, um grande valor pode indicar implicitamente a existência de pontos de intensidades anômalas ou a incompletude da distribuição dos dados (quando o epicentro é no mar ou numa área pouco povoada) (Gasperini *et al.* 1999).

3.1.2 Algoritmo para Determinar a Magnitude

Para calcular a magnitude macrossísmica em função da área da isossista e intensidade epicentral, o programa utiliza uma equação do tipo

$$M_i = a + b \log^2(A_i) + cI_0^2 \quad (3.1)$$

onde A_i é a área da isossista para a i -ésima classe de intensidade e é calculada como:

$$A_i = \pi R_i^2 \quad (3.2)$$

onde R_i (em km) é a distância média epicentral de localidades pertencentes a i -ésima classe de intensidade. Os valores padrões dos coeficientes a , b e c são estimativas empíricas calibradas para região da Itália.

O procedimento para o cálculo da magnitude segue as seguintes etapas:

- O epicentro macrossísmico é calculado, como explicado na seção 3.1.1.
- A intensidade epicentral I_0 é assumida como sendo igual ao I_{max} observado, se tiverem pelo menos dois dados de intensidade presentes, caso contrário, o I_0 é definido como o segundo maior valor de intensidade observada (com limite inferior representado por I_{max} menos um grau);
- A distância macrossísmica é calculada para cada um dos locais onde a intensidade está disponível. Este conjunto de dados é utilizado para obter a distância média R_i para cada valor de intensidade;
- Aplica-se a equação 3.1;
- A magnitude é calculada como a média ponderada dos valores estimados usando os R_i obtidos para diferentes níveis de intensidade.

3.1.3 Testes com os Sismos de 1955 e 1998 e Aplicação do Método Boxer aos Sismos Históricos de 1861 e 1950

Para avaliar a efetividade do programa, foram realizados testes preliminares com os sismos de 31/01/1955, Serra do Tombador/MT e 10/03/1998, Porto dos Gaúchos/MT

com medidas instrumentais conhecidas. Posteriormente, a metodologia foi aplicada aos sismos históricos de 1861 e 1950.

As intensidades dos sismos de 1955 e 1998 foram fornecidas pela Universidade de Brasília (UnB). A localização do epicentro e magnitude foram calculadas automaticamente pelo *Boxer* utilizando os algoritmos descritos em 3.1.1 e 3.1. Os resultados obtidos foram comparados com R. E. Engdhal (2002) e Assumpção e Suarez (1998) (Figura ??).

Tabela 3.1 - Comparativo entre os parâmetros dos sismos de 1955 e 1998 calculados com o *Boxer* e referência.

Ano	Lat/Lon	Mag (Mw)	Autor
1955	-12.52 -57.35	6.2	R. E. Engdhal (2002)/Assumpção e Suarez (1988)
	-14.55 -56.84	4.98(± 0.37)	<i>Boxer</i>
1998	-11.62 -56.35	5.0	Barrer <i>et al.</i> 2009/BSB
	-10.98 -56.50	5.31 (± 0.36)	<i>Boxer</i>

Na figura 2.1, pode-se observar que a localização calculada pelo *Boxer* para o sismo de 1955 ficou bem distante do esperado. Isso aconteceu porque não há informações de intensidades distribuídas em torno do epicentro do sismo, pois o programa faz uma média da localização dos pontos de maior intensidade. Neste caso, como o epicentro calculado ficou distante do esperado, a magnitude ficou subestimada, tendo em vista que a determinação da magnitude depende do epicentro. O resíduo entre a magnitude de referência e a calculada pelo programa foi 1.4.

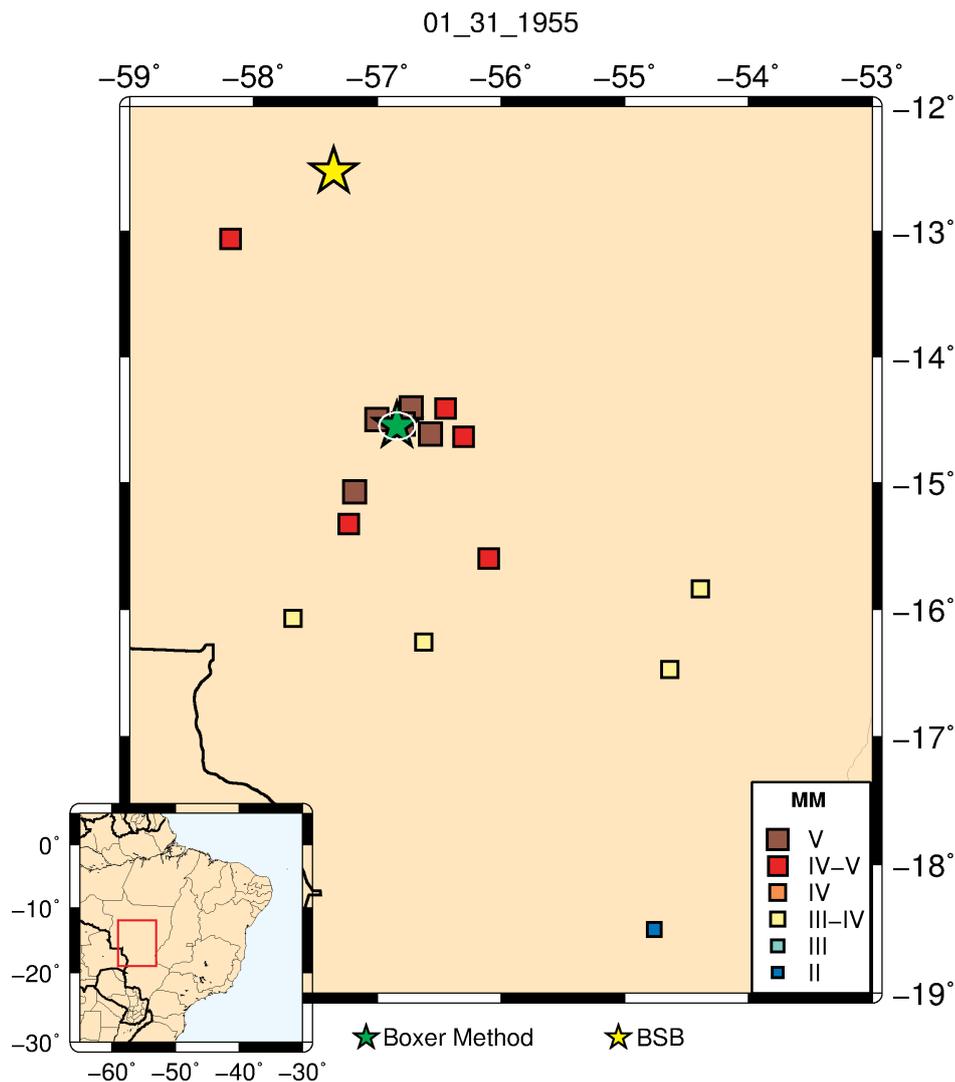


Figura 3.1: Mapa com as localizações do epicentro do sismo de 1955. A estrela amarela indica a localização segundo o Boletim Sísmico Brasileiro (BSB), a estrela verde a localização calculada pelo *Boxer* e a elipse indica o erro no cálculo do epicentro pelo método *Boxer*. Os quadrados coloridos indicam as intensidades na Escala Mercalli.

Na figura 3.2 pode-se observar que o epicentro de referência do sismo de 1998 está localizado na margem de erro do epicentro calculado pelo *Boxer*. Neste caso, o algoritmo conseguiu se aproximar melhor do resultado esperado, tendo em vista o grande número de dados distribuídos em torno do epicentro. Como o epicentro foi melhor localizado, a magnitude calculada se aproximou bastante da esperada, tendo uma diferença de 0.3.

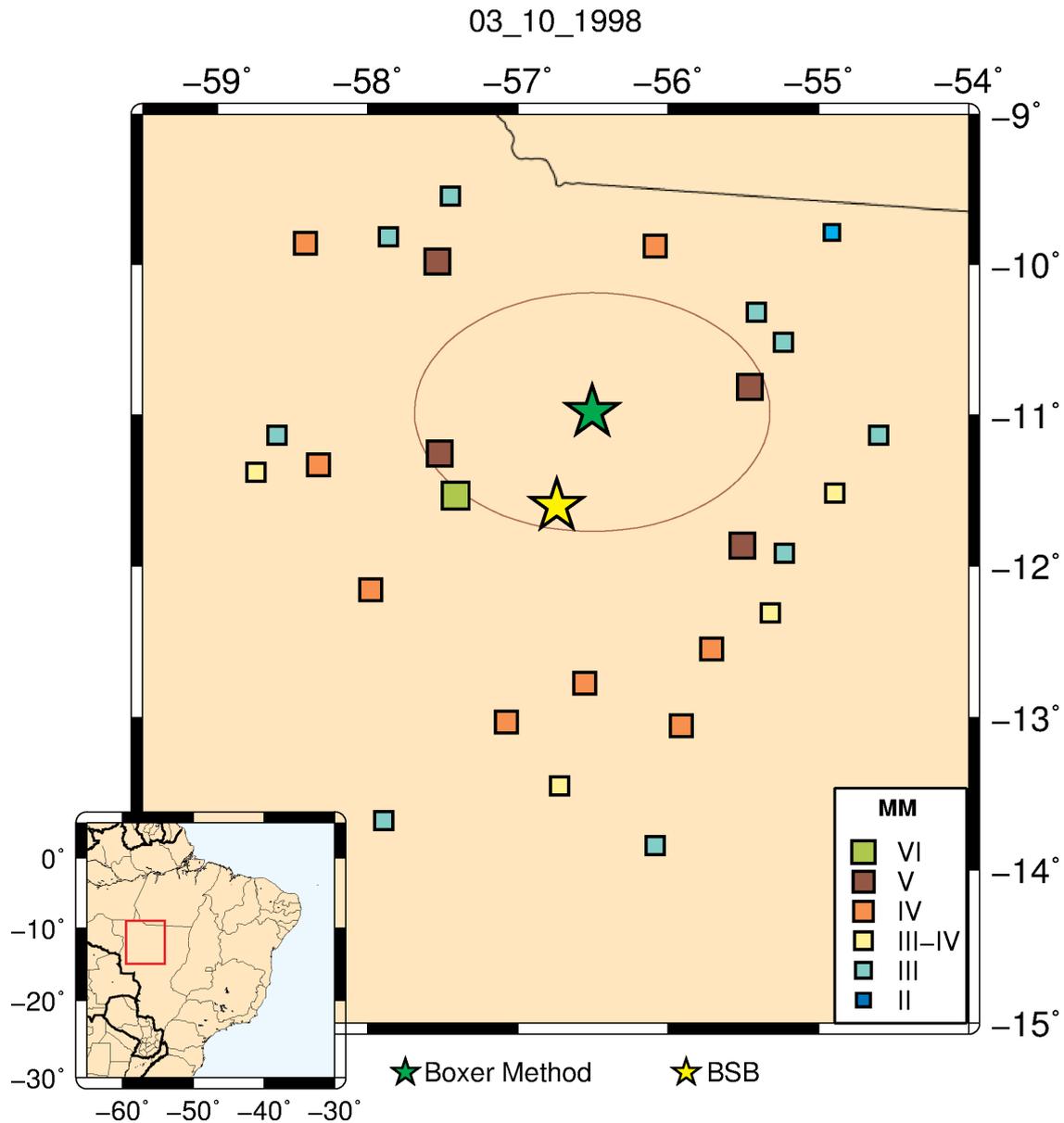


Figura 3.2: Mapa com as localizações do epicentro do sismo de 1998. A estrela amarela indica a localização segundo Barrer et al. (2009), a estrela verde a localização calculada pelo *Boxer* e a elipse marrom indica o erro no cálculo do epicentro pelo método *Boxer*. Os quadrados coloridos indicam os valores de intensidade (MM).

A mesma metodologia foi adotada para os sismos históricos de 1861 e 1950. Os dados de intensidades das tabelas A.1 e A.2 foram utilizadas neste processo. Somente as intensidades com valores definidos foram utilizadas. A magnitude do sismo de 1861 teve como referência as informações de Albini (comunicação pessoal). A magnitude do sismo de 1950 e a localização de ambos os sismos tiveram como referência Berrocal *et al.* (1984).

Tabela 3.2 - Parâmetros dos sismos de 1861 e 1950 calculados com o *Boxer* e referência.

Ano	Lat/Lon	Mag (Mw)	Autor
1861	-22.60 -45.20	4.8	Berrocal <i>et al.</i> , 1984
	-22.83 -44.37	4.75(± 0.25)	<i>Boxer</i>
1950	-21.82 -46.61	3.6	Berrocal <i>et al.</i> , 1984
	-21.75 -46.64	4.59 (± 0.38)	<i>Boxer</i>

3.2 Método Manual para Determinação de Epicentro e Magnitude de Sismos Históricos: Isossistas

As intensidades (MM) de dois sismos históricos importantes ocorridos na região sudeste em 1861 e 1950 foram usadas para determinar o epicentro e a magnitude por meio das isossistas. O sismo de 1861, segundo notícias de jornais da época, louças foram quebradas, telhas de algumas residências caíram, camas e outros móveis foram deslocados. O sismo de 1950, alguns jornais noticiaram que em Poços de Caldas/MG louças caíram das prateleiras e houveram algumas paredes rachadas.

Os valores de intensidade têm sido usados há muito tempo para atribuir magnitudes por meio de relações empíricas determinadas com terremotos recentes com magnitudes medidas instrumentalmente (Hanks *et al.* 1975).

Tipicamente, os valores de intensidade são utilizados para definir isossistas, que são linhas curvas ao redor do epicentro que demarcam a região onde o sismo foi sentido com a mesma intensidade. Por exemplo, a isossista de intensidade V (A_V) na Escala Mercalli Modificada (MM), limita a área onde a maioria dos locais sentiram os efeitos de intensidade V (MM). Fora de A_V , as demais localidades sentiram os efeitos de intensidade IV (MM) ou menos. As magnitudes são estimadas a partir do tamanho da área (km^2) da isossista de maior intensidade.

A relação empírica entre área afetada (A_f) e magnitude (m) é similar à das regiões central e leste dos Estados Unidos, que são regiões tectonicamente estáveis (Assumpção *et al.* 2014).

$$m = 2.44 - 0.015 \log(A_f) + 0.0922[\log(A_f)]^2 \quad (3.3)$$

3.2.1 Determinação da Magnitude e Epicentro dos Sismos de 1861 e 1950

A partir das pesquisas realizadas neste trabalho, conseguiu-se encontrar em jornais 31 pontos de observação onde o sismo de 1861 foi sentido, 13 a mais do que os que constam em Berrocal *et al.* (1984).

No caso do sismo de 1861, conseguiu-se uma grande quantidade de informações macro sísmicas, o que possibilitou traçar as linhas de isossistas. Dessa maneira, foi possível calcular a área afetada e então estimar a magnitude segundo a equação 3.3. A localização do epicentro foi determinada centralizando-o na área da isossista de maior valor de intensidade (Figura 3.3).

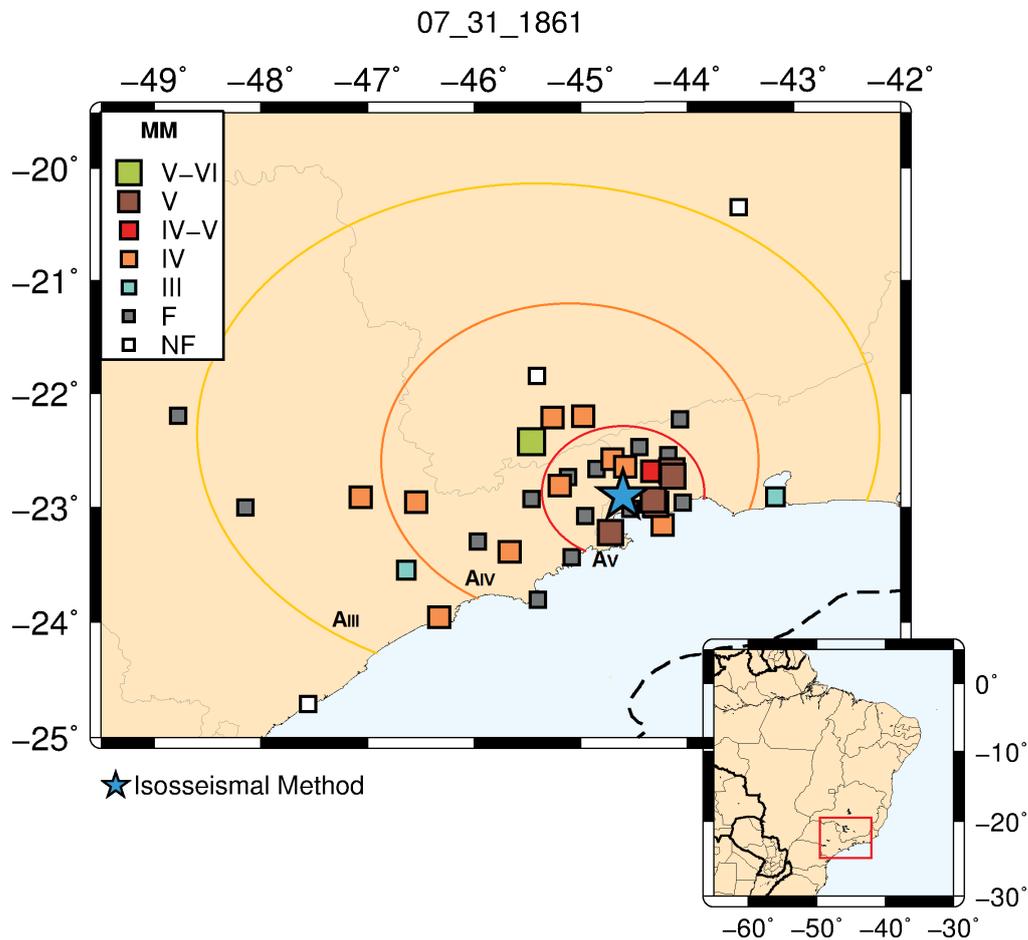


Figura 3.3: Sismo de 31 de julho de 1861. Área afetada de 250.000km^2 , correspondendo a $m_b = 5.0$, calculada com a equação 3.3. A estrela azul indica o epicentro calculado manualmente com as isossistas, os quadrados coloridos indicam a intensidade segundo a Escala Mercalli (MM), os quadrados cinza são localidades em que o sismo foi sentido, mas nos registros dos jornais não haviam dados macro sísmicos suficientes para inferir uma intensidade e os quadrados brancos são localidades em que o sismo não foi sentido.

Da mesma maneira, pode-se estimar a magnitude e localização do epicentro do sismo

de 1950. Foram traçadas as isossistas para delimitar as áreas de mesma intensidade. Foi possível calcular a área total afetada em 44.000km^2 . Aplicando a equação 3.3, isso corresponde a $mb = 4.4$. O epicentro foi localizado centralizando-o na região da isossista de maior intensidade (Figura 3.4).

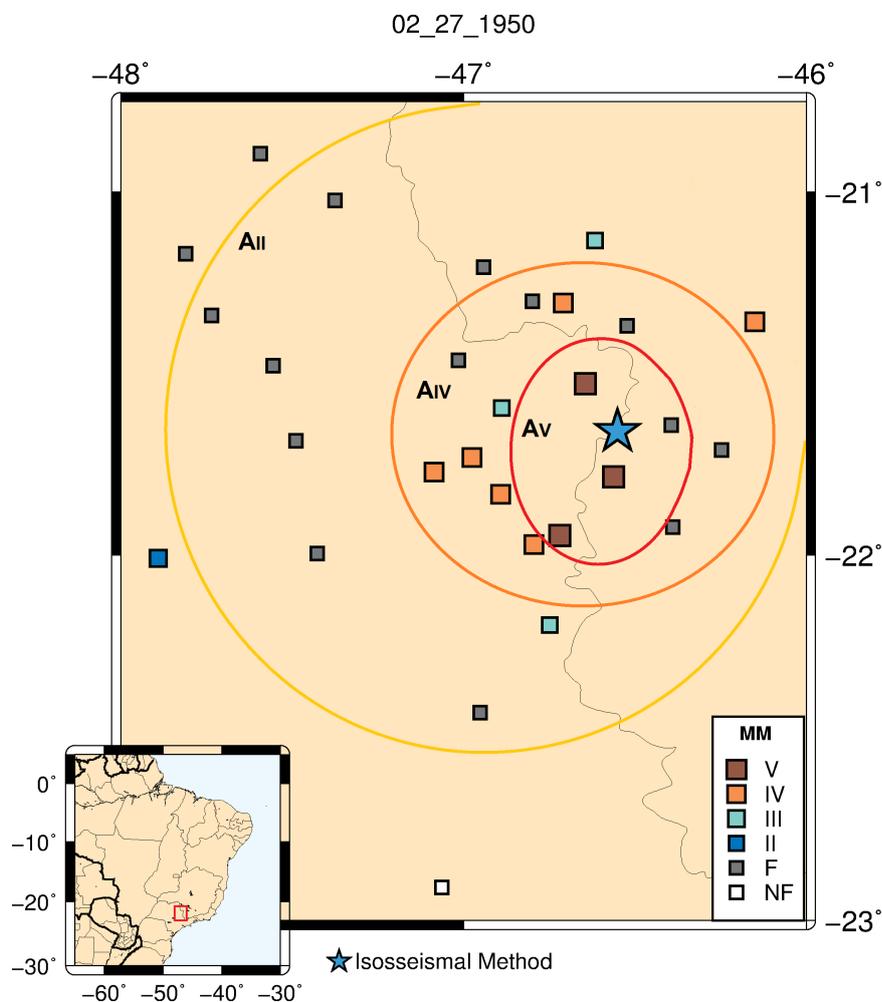


Figura 3.4: Mapa indicando a área afetada pelo sismo de 27 de fevereiro de 1950. Segundo jornais da época, louças caíram das prateleiras e algumas paredes teriam sido rachadas em Poços de Caldas. A estrela azul indica o epicentro calculado com as isossistas, os quadrados coloridos indicam as intensidades (MM), os quadrados cinza são localidades em que o sismo foi sentido, mas nos registros dos jornais não havia dados macrossísmicos suficientes para inferir uma intensidade, e os quadrados brancos são localidades em que o sismo não foi sentido.

Este método, assim como o *Boxer*, sofre forte influência da distribuição espacial das observações de intensidades. Sendo assim, quando um sismo ocorre em locais pouco habitados ou no mar, é difícil obter uma localização mais precisa utilizando este método tradicional. Porém, quando ocorre em uma região bem povoada e com grande quantidade de dados macrossísmicos, o epicentro determinado com esses dados pode ter mais precisão

do que aquele determinado por estações sismográficas distantes (Berrocal *et al.* 1984).

3.3 Inversão de Intensidades com o Método de Nelder-Mead

3.3.1 Problema Inverso

O processo de inversão é uma maneira de estimar o desconhecido a partir de dados observados ou como define o russo Alifanov (1995) ‘a solução de um problema inverso consiste em determinar causas baseando-se na observação de seus efeitos’.

Assim, a essência do processo de inversão está em obter a melhor estimativa possível para os parâmetros de busca, de modo a ajustar a resposta do modelo aos dados observados seguindo critérios definidos por funções matemáticas, chamadas de função objetivo. Em problemas inversos, a função objetivo quantifica a semelhança entre os dados observados e os calculados a partir dos parâmetros do modelo.

Considerando a Lei de Atenuação de Intensidades determinadas neste trabalho e por Assumpção (1985), a solução do problema inverso consistiu na determinação da magnitude e epicentro (latitude e longitude) de sismos históricos, dadas as intensidades inferidas com base nos relatos de jornais da época e a localização das cidades onde o sismo foi sentido, conforme o diagrama da figura 3.5.



Figura 3.5: Diagrama do problema inverso. I são as intensidades inferidas, p são as coordenadas das cidades onde o sismo foi sentido, m é a magnitude e e as coordenadas do epicentro.

3.3.2 Função Objetivo

A função objetivo utilizada no processo de inversão é a função de resíduos quadráticos médios (RMS) para quantificar a semelhança entre as intensidades calculadas e observadas. Portanto, o melhor ajuste dos dados calculados aos observados está associado ao valor mínimo de f , dado pela equação:

$$f = \left[\sum_j (I_j^{obs} - I_j^{cal})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

onde o índice j é o número de informações de intensidades, I_{obs} é a intensidade observada (inferida por meio das notícias de jornais da época) e I_{cal} são as intensidades calculadas em função dos parâmetros (m, e) que correspondem a magnitude e epicentro (latitude e longitude), respectivamente.

Se os danos ou efeitos de terremotos históricos são descritos em detalhes nos relatos de jornais da época, suas intensidades podem ser estimadas referindo-se às descrições de escalas de intensidade, neste caso, a Escala Mercalli (B). No entanto, se nos relatos, apenas os lugares em que o terremoto foi sentido são mencionados, sem descrições detalhadas de danos ou efeitos do terremoto, suas intensidades podem ser estimadas unicamente pelo padrão de atenuação de intensidade com a distância.

Os dados de intensidades das tabelas A.1 e A.2 foram utilizadas no processo de inversão. Para calcular a equação 3.4 nos casos em que a intensidade não tem um valor definido, ou seja, indicada apenas como “sentido” (F) e “não sentido” (NF) o programa é implementado da seguinte maneira:

$$I_{obs} = F \Rightarrow \begin{cases} 2 \leq I_{cal} < 8 & , res = 0 \\ I_{cal} < 2 & , res = 2 \end{cases}$$

$$I_{obs} = NF \Rightarrow \begin{cases} 2 \leq I_{cal} < 8 & , res = 1 - I_{cal} \\ I_{cal} < 2 & , res = 0 \end{cases}$$

Para iniciar a busca, foram gerados pontos (latitude, longitude e magnitude) aleatórios delimitados pela área total onde o sismo foi sentido, assumindo que não existe uma boa informação *a priori* sobre a localização do epicentro. O algoritmo de Nelder-Mead foi utilizado para encontrar o mínimo da equação 3.4, conforme descrito em 3.3.4.

3.3.3 Método de Nelder-Mead

Utilizando a Lei de Atenuação de Intensidades determinada por Assumpção e Burton (1985) ($m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$, onde $R = \sqrt{r^2 + h^2}$, sendo r distância epicentral (km) e h a profundidade) e a equação atual, um algoritmo de inversão foi

implementado com o Método de Nelder-Mead que é o mais popular dos métodos simplex e foi proposto por Nelder-Mead (1965).

Simplex é um conjunto de $n + 1$ pontos (chamados de vértices) em um espaço n -dimensional. A partir de um simplex inicial não degenerado com $n + 1$ vértices em \mathbb{R}^n , a cada iteração, o Método de Nelder-Mead atualiza o ‘pior’ vértice (onde a função objetivo apresenta maior valor) do simplex por meio de quatro operações: reflexão, expansão, contração ou redução.

A escolha do Método de Nelder-Mead para determinar a magnitude e epicentro de sismos históricos é uma nova maneira de resolver este problema, visto que as formas de resolução já utilizadas não fazem uso de métodos numéricos (determinação de epicentros por meio de isossistas) ou utilizam programas com equações que não são calibradas para o Brasil (Método *Boxer*). Este método foi escolhido, porque além de ser um dos métodos de busca mais popular para otimização de funções reais sem vínculos, não utiliza quaisquer derivadas ou aproximações das derivadas da função objetivo, visto que este problema é não diferenciável; o chute inicial não precisa estar próximo do ponto de mínimo e pela simplicidade de sua implementação computacional.

3.3.4 Algoritmo de Nelder-Mead

Seja $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ e um simplex não degenerado com $n + 1$ vértices. Em uma iteração do método, os $n + 1$ vértices do simplex, x_1, x_2, \dots, x_{n+1} representando pontos do \mathbb{R}^n , são ordenados de acordo com o crescimento dos valores de f , isto é:

$$f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{n+1}) \quad (3.5)$$

onde x_1 é definido como o melhor vértice e x_{n+1} o pior vértice.

A partir do simplex inicial, novos vértices são calculados para gerar um novo simplex. O cálculo leva em consideração quatro coeficientes escalares:

- Coeficiente de reflexão: ρ
- Coeficiente de expansão: χ
- Coeficiente de contração: γ
- Coeficiente de redução: σ

os quais devem satisfazer

$$\rho > 0, \chi > 1, 0 < \gamma < 1, 0 < \sigma < 1. \quad (3.6)$$

Os coeficientes são definidos da seguinte maneira:

$$\rho = 1, \chi = 2, \gamma = \frac{1}{2}, \sigma = \frac{1}{2}. \quad (3.7)$$

O método busca substituir o pior vértice do simplex, ou seja, o vértice onde a função objetivo tem o maior valor. Por exemplo, no \mathbb{R}^2 o simplex é um triângulo. O algoritmo então gera uma sequência de triângulos, para os quais os valores da função objetivo em cada um dos vértices ficam cada vez menores. Cada iteração do algoritmo irá reduzir o tamanho dos triângulos que convergem para as coordenadas do ponto mínimo. O processo de substituição consiste nas quatro operações: reflexão, expansão, contração e redução, como mostrado na figura A.2.

Para uma função $f(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ e um simplex no \mathbb{R}^n , a iteração de Nelder-Mead se dá conforme o algoritmo abaixo:

1. *Ordenação*: Ordenar os vértices do simplex de maneira que

$$f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{n+1}) \quad (3.8)$$

Calcular o centróide dos n melhores vértices, $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n$

2. *Reflexão*: Calcular o ponto de reflexão

$$x_r = \bar{x} + \rho(\bar{x} - x_{n+1}) = (1 + \rho)\bar{x} - \rho x_{n+1} \quad (3.9)$$

Se $f(x_1) \leq f(x_r) < f(x_n)$, aceitar o ponto x_r e terminar iteração.

3. *Expansão*: Se $f(x_r) < f(x_1)$, calcular o ponto de expansão

$$x_e = \bar{x} + \chi(x_r - \bar{x}) = \bar{x} + \rho\chi(\bar{x} - x_{n+1}) = (1 + \rho\chi)\bar{x} - \rho\chi x_{n+1} \quad (3.10)$$

Se $f(x_e) < f(x_r)$, aceitar x_e e terminar iteração, caso contrário ($f(x_e) \geq f(x_r)$) aceitar x_r e terminar iteração.

4. Contração: Se $f(x_r) \geq f(x_n)$ fazer contração:

(a) *Contração Externa*: Se $f(x_n) \leq f(x_r) < f(x_{n+1})$, calcular

$$x_{ce} = \bar{x} + \gamma(x_r - \bar{x}) = \bar{x} + \rho\gamma(\bar{x} - x_{n+1}) = (1 + \rho\gamma)\bar{x} - \rho\gamma x_{n+1} \quad (3.11)$$

Se $f(x_{ce}) \leq f(x_r)$ aceitar x_{ce} e terminar iteração. Caso contrário, ir para o passo 5.

(b) *Contração Interna*: Se $f(x_r) \geq f(x_{n+1})$, calcular

$$x_{ci} = \bar{x} - \gamma(\bar{x} - x_{n+1}) = (1 - \gamma)\bar{x} + \gamma x_{n+1} \quad (3.12)$$

Se $f(x_{ci}) < f(x_{n+1})$, aceitar x_{ci} e terminar a iteração. Caso contrário, ir para o passo 5.

5. *Redução (Shrink)*: Calcular os vetores $v_i = x_1 + \sigma(x_i - x_1)$, $i = 2, \dots, n+1$. Os vértices (ainda fora de ordem) para a próxima iteração são x_1, v_2, \dots, v_{n+1} .

6. *Finalização*: Dada uma tolerância Δ_{tol} o critério de convergência sugerido por Nelder e Mead está baseado na comparação do valor da função nos vértices do simplex:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} \frac{(f(x_i) - f(\bar{x}))^2}{n}} < \Delta_{tol} \quad (3.13)$$

onde Δ_{tol} é da ordem de $10^{-3} - 10^{-7}$.

Como o mínimo encontrado pode depender do *Simplex* inicial, é preciso fazer a busca em várias rodadas diferentes. Neste caso, foram 100 rodadas.

3.3.5 Testes com os Sismos de 1955, 1972 e 1998 e Aplicação do Método Nelder-Mead aos Sismos Históricos de 1861 e 1950

A equação de Assumpção e Burton (1985) e a equação atual, derivada neste trabalho, foram utilizadas para calcular a magnitude e epicentro dos eventos-teste de 1955, 1972 e 1998, e posteriormente dos sismos históricos de 1861 e 1950.

Inicialmente a inversão foi testada sobre dados sintéticos. A função objetivo foi avaliada utilizando-se dados sintéticos como se fossem dados observados. Como a resposta é

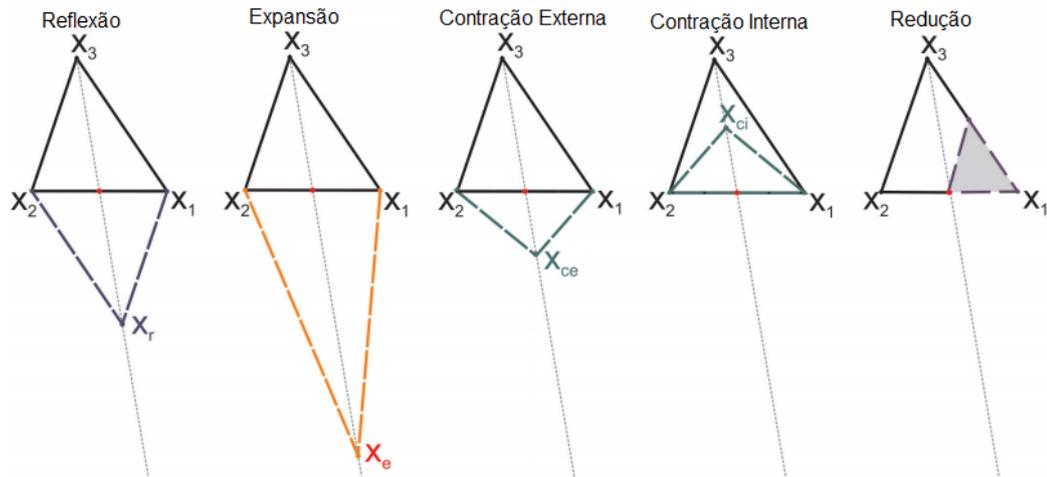


Figura 3.6: Exemplo de iteração do Método Nelder-Mead aplicado ao \mathbb{R}^2 .

conhecida foi utilizado para testar a viabilidade da metodologia, bem como garantir controle na formulação do programa. Após estes testes preliminares, o algoritmo foi testado com as intensidades observadas, ou seja, as intensidades inferidas a partir dos relatos macrossísmicos encontrados em jornais da época. Nestes testes, foram utilizados os dados macrossísmicos dos sismos de 1955, 1972 e 1998, com medidas instrumentais conhecidas.

Os histogramas de magnitude, latitude e longitude dão uma boa noção sobre a unicidade da solução encontrada, pois indicam o número cumulativo de ocorrências ao final de cem rodadas, cada uma partindo de um chute inicial do *Simplex*.

Os resultados obtidos para o sismo de 1998 foram satisfatórios, se aproximando muito do esperado. Pode-se observar nos histogramas de magnitude, latitude e longitude, para ambas equações, que não parece haver presença de mínimos locais. Num total de 100 rodadas, apenas 85 convergiram para o mesmo mínimo de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985) e 97 para equação atual. Isto acontece, pois o valor de mínimo encontrado pode depender do *Simplex* inicial. Porém, somente com as análises dos mapas de contorno da função objetivo será possível compreender o comportamento da função e a estrutura do problema. (Figuras 3.7 e 3.8)

O mesmo não acontece para o sismo de 1955. O resultado se aproximou mais do esperado para ambas equações em comparação com o *Boxer*, porém, como pode-se observar na primeira linha os histogramas de latitude, longitude e magnitude, os resultados de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985) não são únicos, provavelmente existe a presença de mínimos locais no domínio de busca ou há uma região mais plana próxima

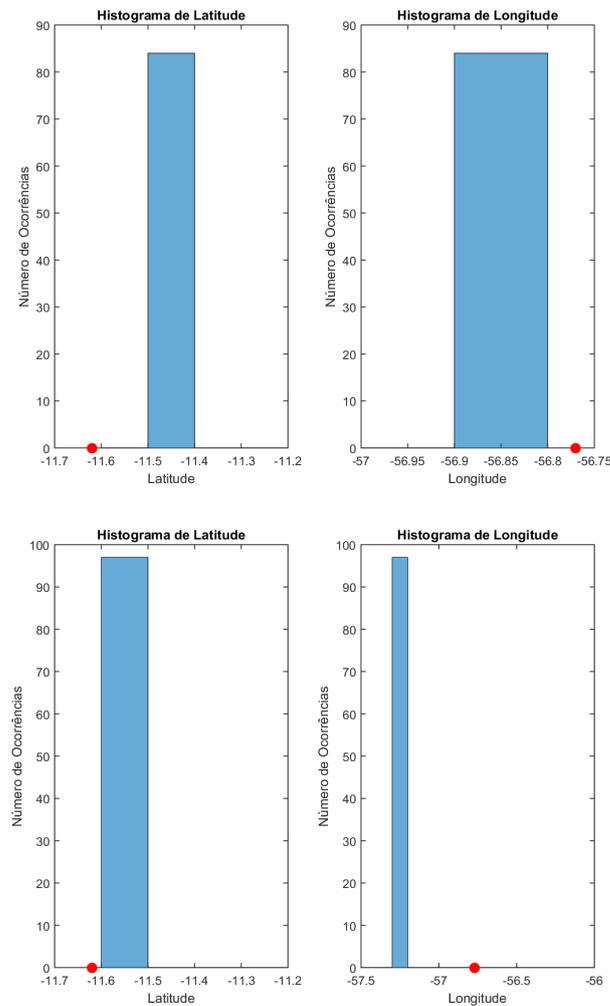


Figura 3.7: Na primeira linha, histogramas de latitude e longitude calculadas para o sismo de 1998 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985): $m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$ e na segunda linha, de acordo com a equação atual: $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$. O ponto vermelho indica latitude e longitude de referência (BSB) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

ao mínimo global, aumentando a incerteza na determinação destes parâmetros. Isto será solucionado, ao analisarmos o comportamento da função objetivo. Na segunda linha, os histogramas de latitude, longitude e magnitude para a equação atual, as soluções convergiram sempre para o mesmo mínimo. Não parece haver a presença de mínimos locais significativos no domínio de busca (Figuras 3.9 e 3.10).

Testes também foram realizados com o sismo ocorrido em 24/10/1972, em Campos/RJ. As intensidades utilizadas tiveram como referência Berrocal *et al.* (1984). O resultado foi satisfatório para ambas equações, porém os resultados obtidos com a equação de Assumpção e Burton (1985) se aproximaram mais do epicentro esperado do que a equação

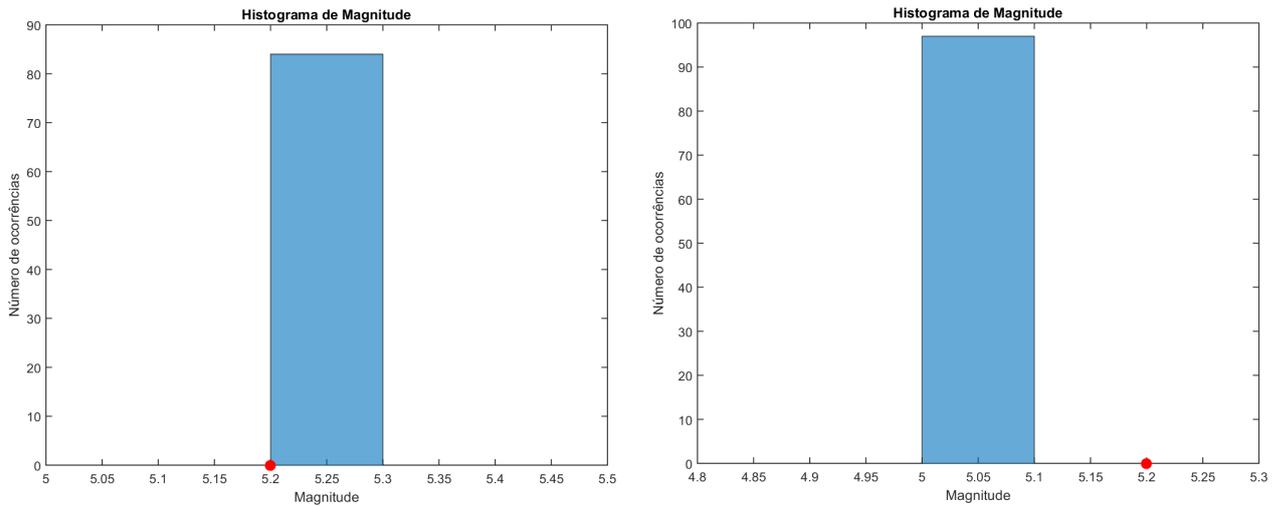


Figura 3.8: À esquerda, histograma de magnitude calculada para o sismo de 1998 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985) e à direita, de acordo com a equação atual. O ponto vermelho indica a magnitude de referência (BSB) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

atual, tendo como base o Boletim Sísmico Brasileiro. O algoritmo de Nelder-Mead encontrou uma melhor localização do epicentro comparando com o *Boxer* para ambas equações. A magnitude foi melhor estimada com equação atual, resultando num resíduo de 0.08 em relação a referência (Figuras 3.11 e 3.12).

Nas figuras 3.13, 3.14 e 3.15, pode-se observar os mapas com os epicentros dos sismos de 1955, 1972 e 1998, respectivamente, calculados com o *Boxer* e com a inversão utilizando o Método de Nelder-Mead. Pode-se notar que, para o caso onde há um número baixo de dados macrossísmicos ao redor do epicentro ou quando o epicentro está localizado no mar, o método *Boxer* não é o mais indicado. Mesmo com as ambiguidades, a inversão se mostrou mais eficiente, se aproximando mais do esperado. Quando há uma distribuição homogênea de intensidades ao redor do epicentro, como evidenciado na figura 3.15, os dois métodos são eficientes.

Os mesmos procedimentos foram aplicados aos sismos de 1861 e 1950. Os histogramas de latitude, longitude e magnitude (Figuras 3.16 a 3.19) pode-se observar nos histogramas de magnitude, latitude e longitude, para ambas equações, que não parece haver presença de mínimos locais. Os resultados para o sismo de 1861 condizem com os relatos da época, onde de acordo com o jornal *A Actualidade*, 10/08/1861 “nas proximidades do mar fôra mais forte“.

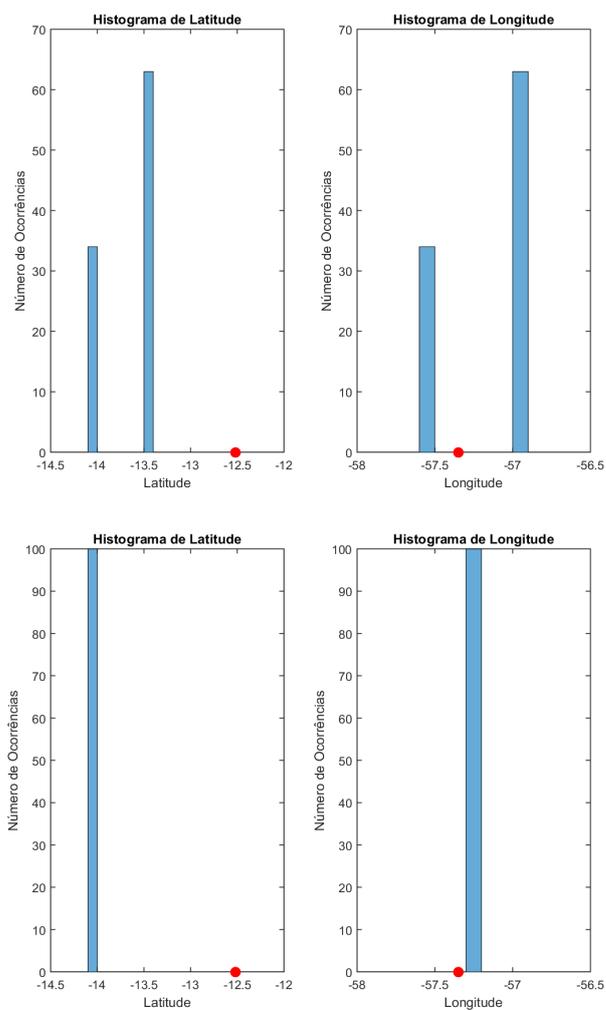


Figura 3.9: Na primeira linha, histogramas de latitude e longitude calculadas para o sismo de 1955 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985): $m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$ e na segunda linha, de acordo com a equação atual: $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$. O ponto vermelho indica latitude e longitude de referência (BSB) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

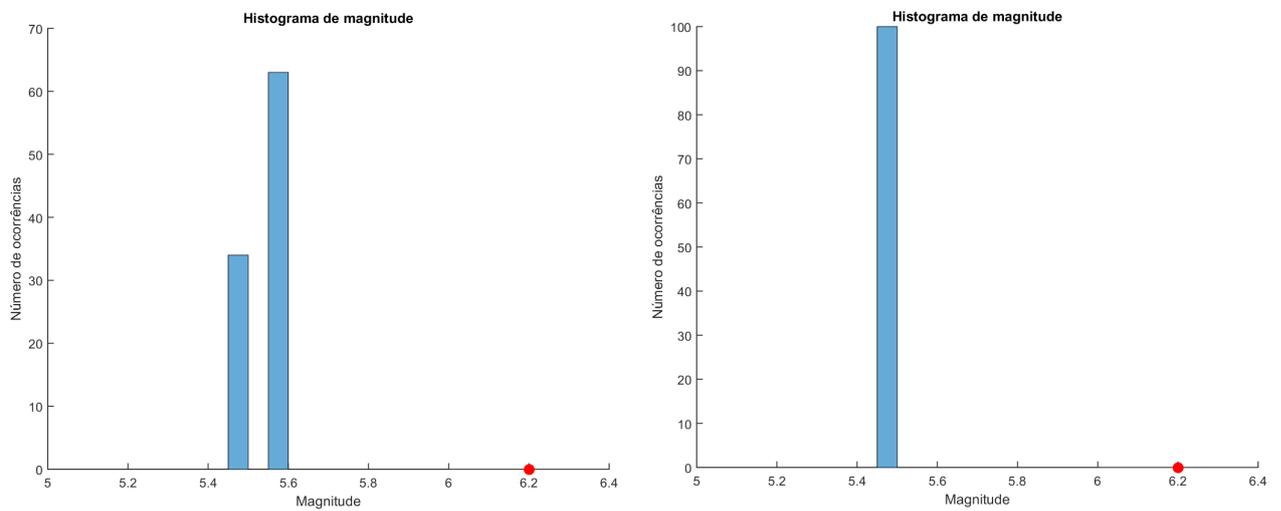


Figura 3.10: À esquerda, histograma de magnitude calculada para o sismo de 1955 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985) e à direita, de acordo com a equação atual. O ponto vermelho indica a magnitude de referência (BSB) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

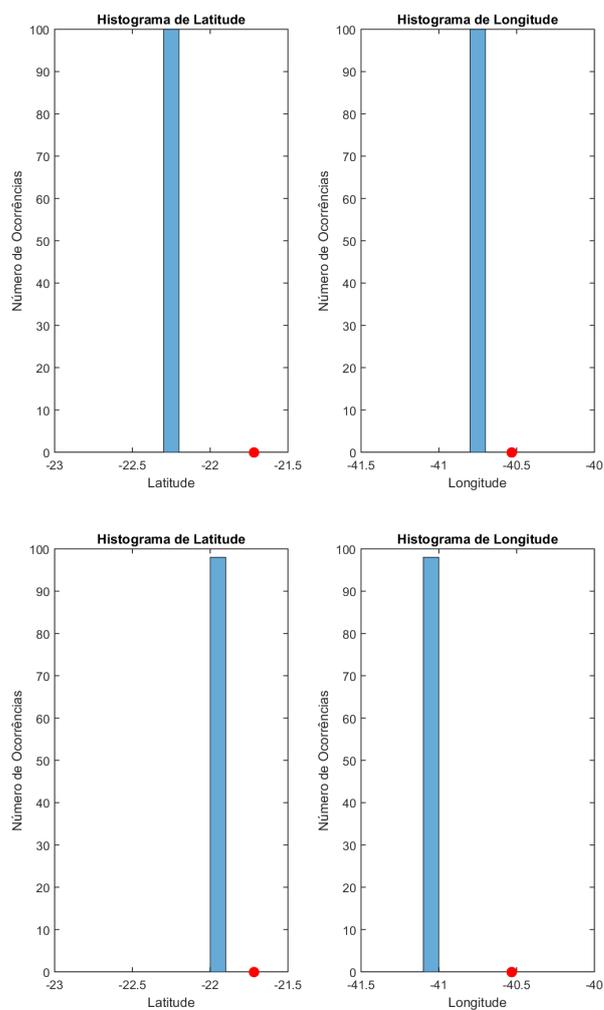


Figura 3.11: Na primeira linha, histogramas de latitude e longitude calculadas para o sismo de 1972 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985): $m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$ e na segunda linha, de acordo com a equação atual: $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$. O ponto vermelho indica latitude e longitude de referência (BSB) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

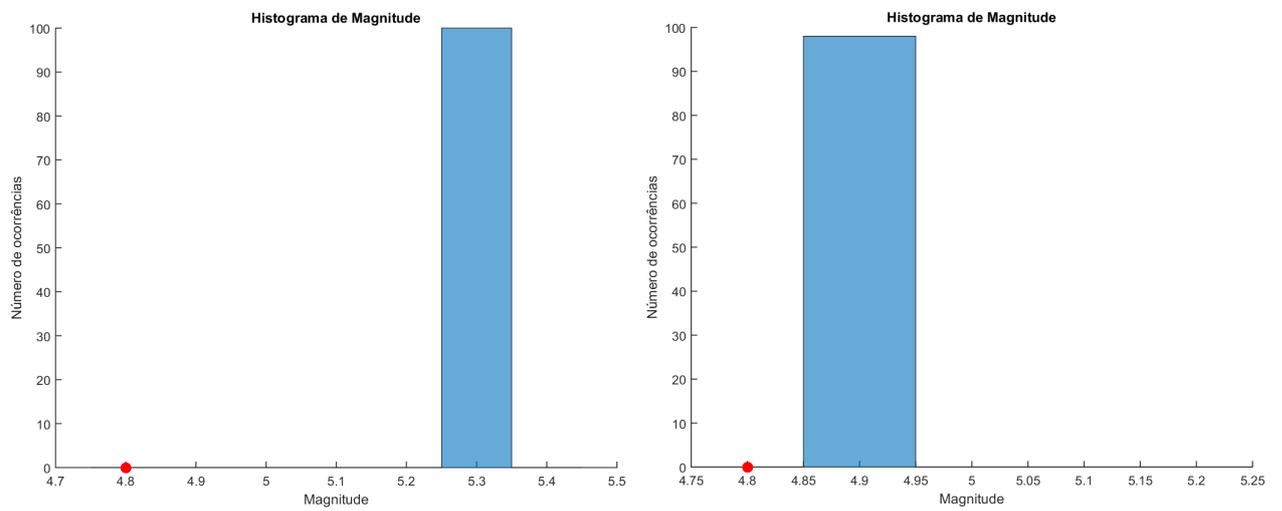


Figura 3.12: À esquerda, histograma de magnitude calculada para o sismo de 1972 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985) e à direita, de acordo com a equação atual. O ponto vermelho indica a magnitude de referência (BSB) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

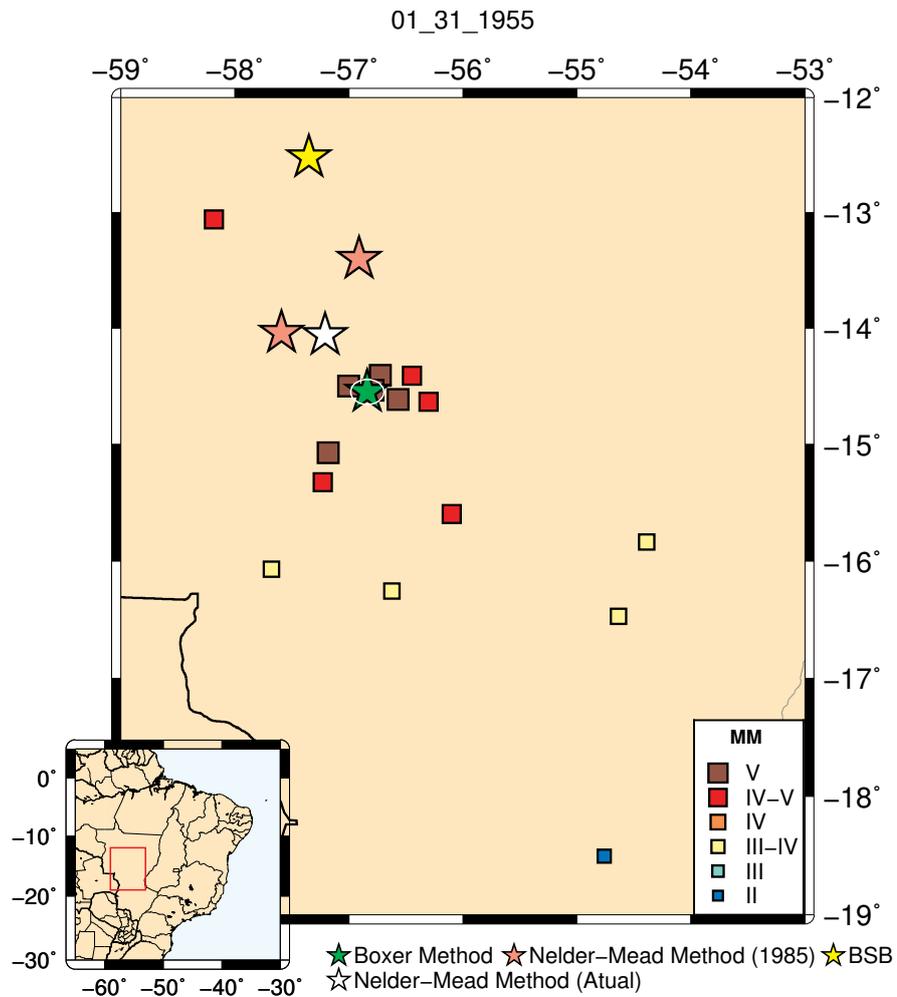


Figura 3.13: Mapa de intensidades para o sismo de 1955. Os quadrados indicam as intensidades (MM), os quadrados cinza são pontos com dados macrossísmicos insuficientes para inferir um valor de intensidade (*Felts*). A estrela amarela indica o epicentro instrumental (incerteza de $\pm 30\text{km}$) e o calculado pelo *Boxer*, respectivamente. As estrelas rosa e branca são os epicentros calculados com o Método de Nelder-Mead utilizando a equação de Assumpção e Burton (1985) e a equação derivada neste trabalho, respectivamente.

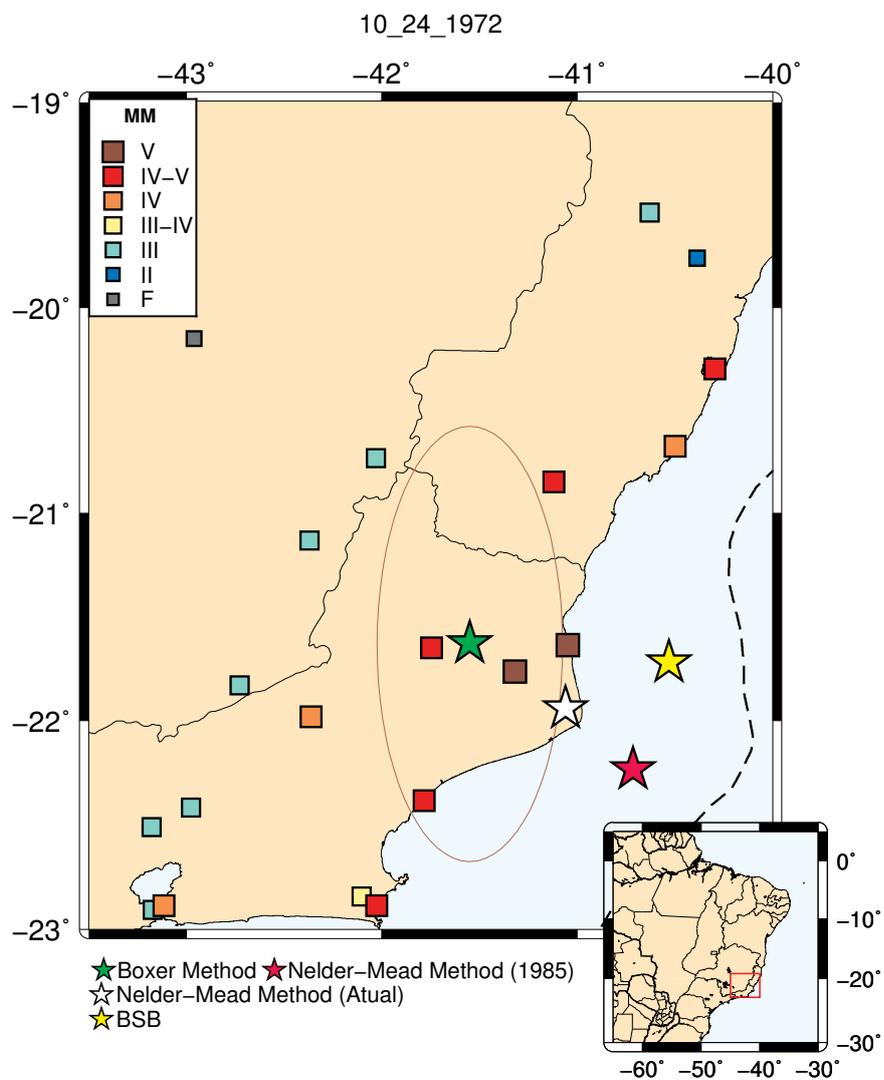


Figura 3.14: Mapa de intensidades para o sismo de 1972. Os quadrados indicam as intensidades (MM) e os quadrados cinza são pontos com dados macrossísmicos insuficientes para inferir um valor de intensidade (*Felts*). As estrelas amarela e verde indicam o epicentro instrumental (incerteza de $\pm 20\text{km}$) e o calculado pelo *Boxer*, respectivamente. As estrelas rosa e branca são os epicentros calculados com o Método de Nelder-Mead utilizando a equação de Assumpção e Burton (1985) e a equação derivada neste trabalho, respectivamente.

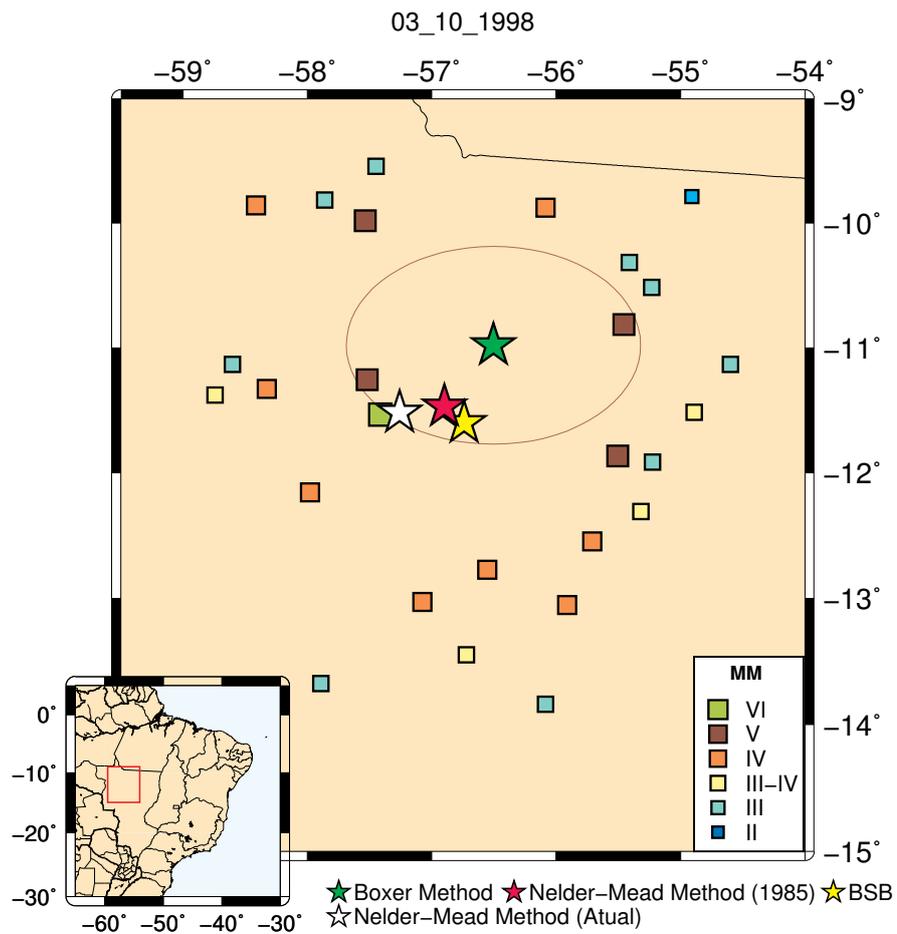


Figura 3.15: Mapa de intensidades para o sismo de 1998. Os quadrados indicam as intensidades (MM). A estrela amarela indica o epicentro instrumental (incerteza de $\pm 5km$) e o calculado pelo *Boxer*, respectivamente. As estrelas rosa e branca são os epicentros calculados com o Método de Nelder-Mead utilizando a equação de Assumpção e Burton (1985) e a equação derivada neste trabalho, respectivamente.

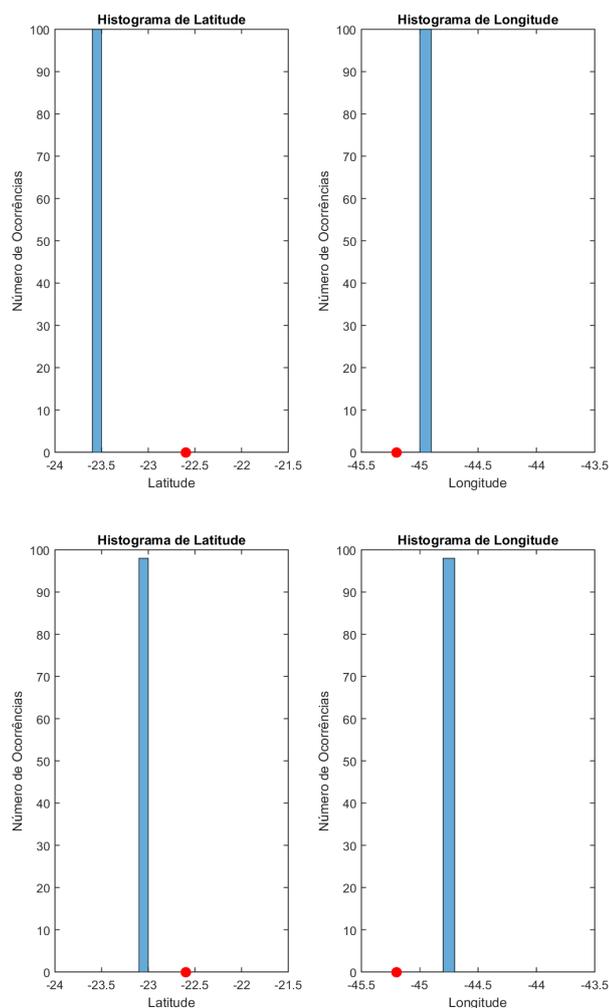


Figura 3.16: Na primeira linha, histogramas de latitude e longitude calculadas para o sismo de 1861 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985): $m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$ e na segunda linha, de acordo com a equação atual: $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$. O ponto vermelho indica latitude e longitude de referência (Berrocal *et al.* 1984) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

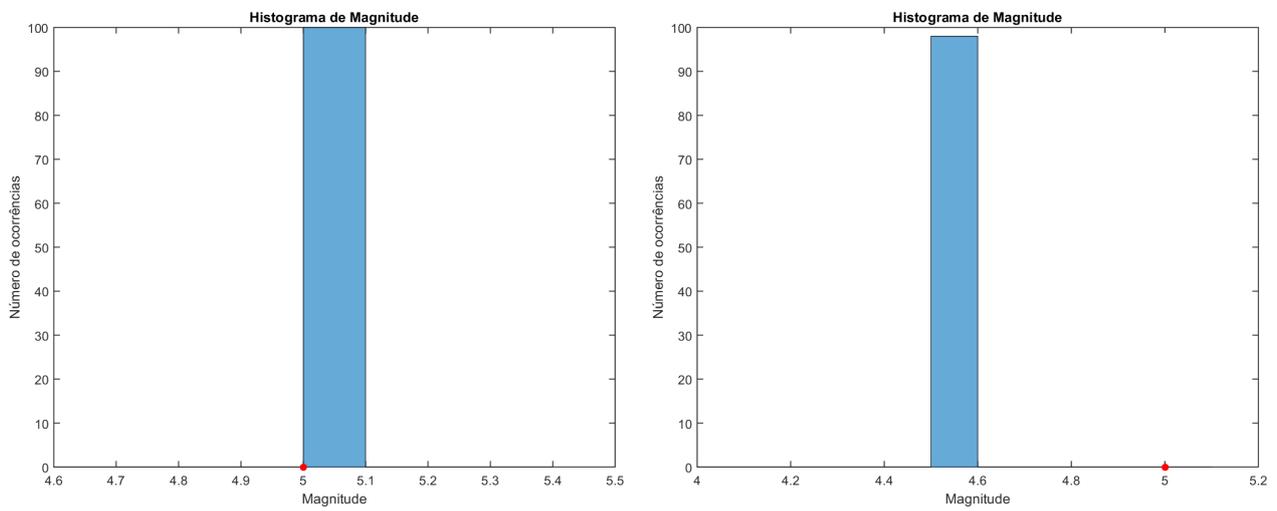


Figura 3.17: À esquerda, histograma de magnitude calculada para o sismo de 1861 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985) e à direita, de acordo com a equação atual. O ponto vermelho indica a magnitude de referência (BSB) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

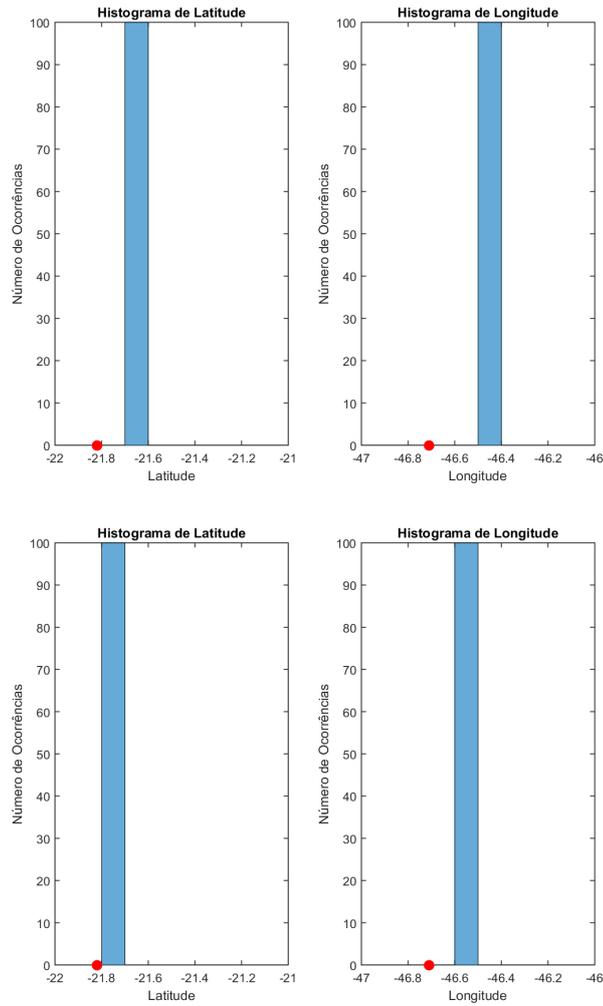


Figura 3.18: Na primeira linha, histogramas de latitude e longitude calculadas para o sismo de 1950 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985): $m = -0.02 + 0.43(I - 0.5) + 1.51 \log(R)$ e na segunda linha, de acordo com a equação atual: $I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151$. O ponto vermelho indica latitude e longitude de referência (Berrocal *et al.* 1984) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

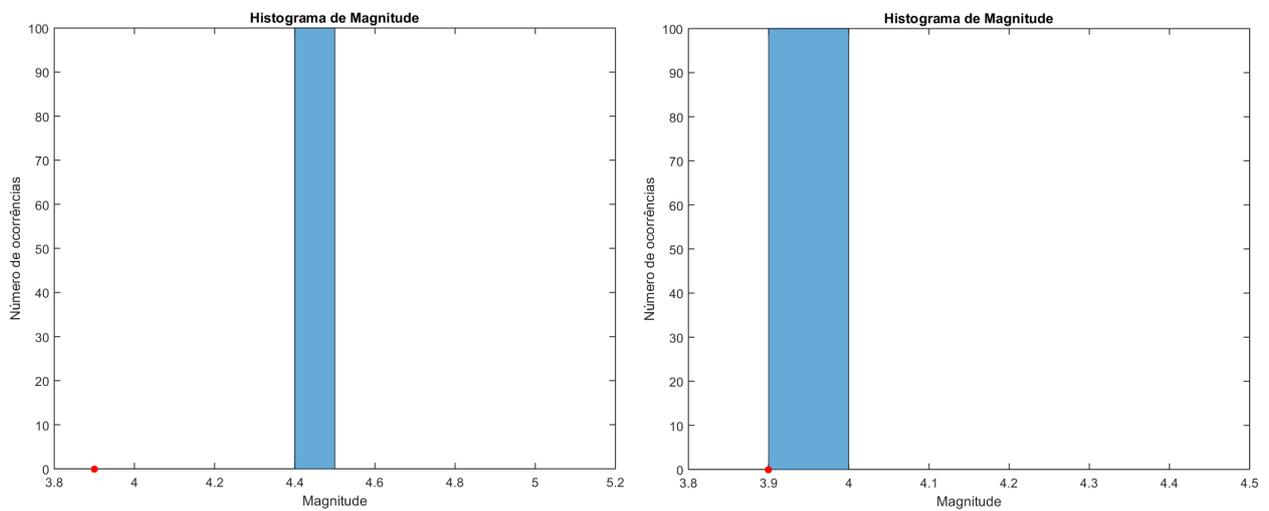


Figura 3.19: À esquerda, histograma de magnitude calculada para o sismo de 1950 de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985) e à direita, de acordo com a equação atual. O ponto vermelho indica a magnitude de referência (BSB) e a barra azul indica o número de pontos que convergiram para esta solução num total de cem rodadas.

3.3.6 Análise da Função Objetivo

A análise das características da função objetivo é fundamental para validar a escolha do método de otimização na solução do problema inverso. A topografia dos mapas de contorno da função objetivo é uma maneira de avaliar as características do problema, tais como: mínimo global bem definido, presença de mínimos locais, ambiguidades e convergência. Estas análises revelam, mesmo que parcialmente, a estrutura do problema.

Nas figuras 3.20 a 3.24 são apresentados os mapas de contorno das duas funções objetivo usadas no processo de inversão: Assumpção e Burton (1985) e a derivada neste trabalho, referentes a cada sismo estudado.

Em todos os casos, a função objetivo foi calculada variando os três parâmetros (latitude, longitude e magnitude). Dividiu-se a área que o sismo foi sentido em uma grade uniforme em que as coordenadas são latitude, longitude e magnitude. A função objetivo foi avaliada em cada coordenada desta região, com passos de 0.1. Dessa maneira, foram geradas duas seções de isovalores para melhor visualização da topografia da função. Em uma seção pode ser visualizado os valores da função objetivo e a presença de mínimos a medida que varia a latitude e longitude. A outra seção corresponde aos valores da melhor magnitude calculada para cada ponto de latitude e longitude da malha.

Nos mapas de contorno, notou-se as seguintes características para ambas equações:

- Todos os hiperplanos apresentaram um mínimo global bem definido (círculo branco no interior das curvas de nível), correspondendo aos valores dos parâmetros do modelo investigado;
- Nos intervalos investigados não ocorreu a presença de mínimos locais significativos, exceto para o sismo de 1955;
- Os pontos de máximo da função coincidiram com a localização das cidades onde o sismo foi sentido. Esta característica é mais suave nos hiperplanos da equação atual;
- Apesar das incertezas inerentes às intensidades, os valores da função objetivo no ponto de mínimo foram menores que 1 unidade, indicando que a inversão conseguiu recuperar os parâmetros;
- Em todos os casos, os pontos de mínimo encontram-se na posição correta;

- Em geral, os mapas da função objetivo demonstraram uma boa estabilidade do problema inverso.

Todos os hiperplanos mantiveram as mesmas características descritas acima, porém, o caso do sismo de 1955 calculado com a equação determinada por Assumpção e Burton (1985) teve uma peculiaridade: a superfície da função objetivo na vizinhança do mínimo ficou mais suave, resultando em uma região mais plana nas proximidades deste e consequentemente um aumento na incerteza nas estimativas dos parâmetros.

Exceto para o caso do sismo de 1955, a função objetivo calculada com a equação de Assumpção e Burton (1985) foi a que melhor se aproximou dos resultados esperados. Apresentou um valor menor de resíduo médio entre as intensidades observadas e calculadas comparado com a equação derivada neste trabalho, ou seja, com o uso da equação anterior os parâmetros puderam ser recuperados de maneira mais satisfatória.

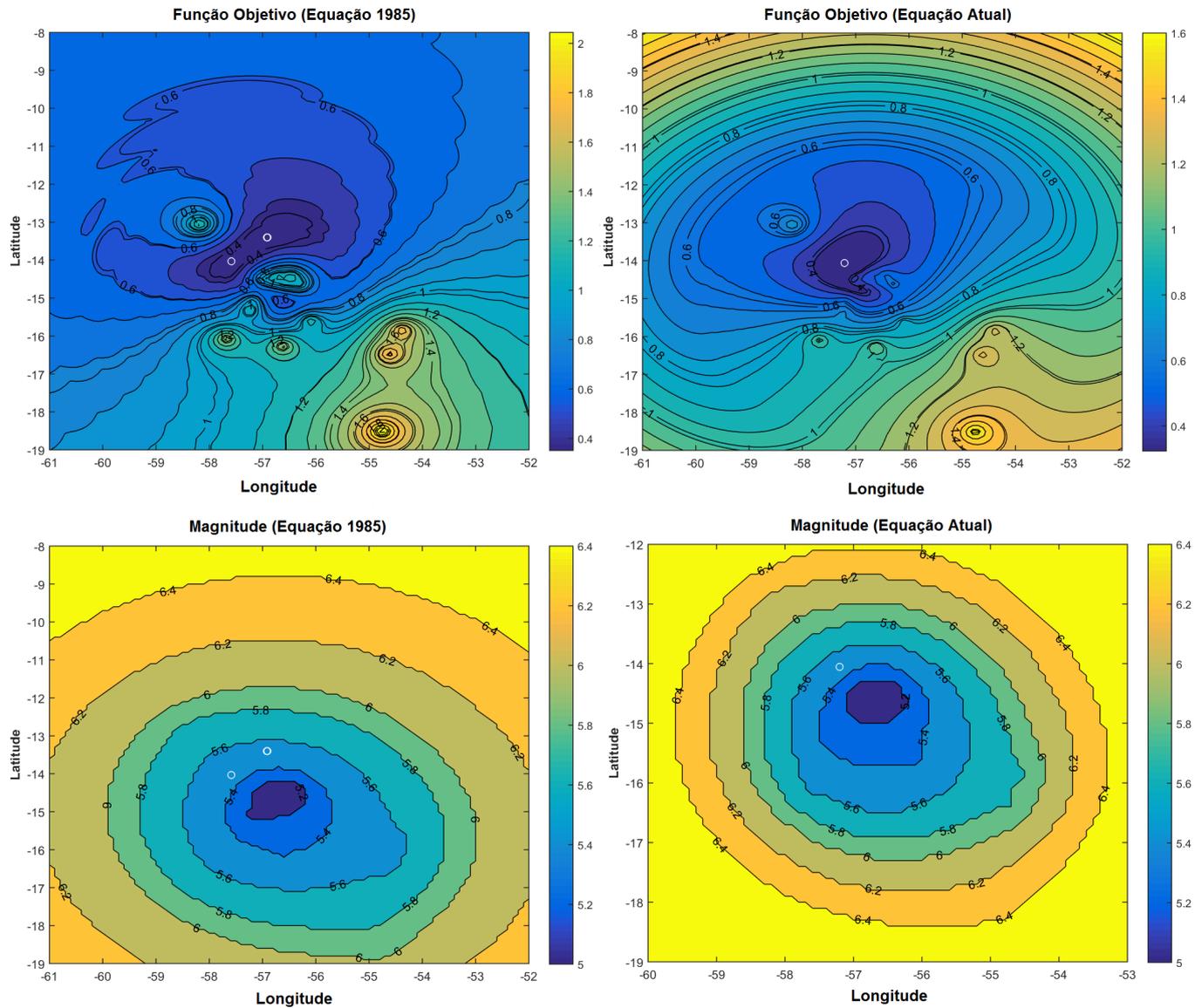


Figura 3.20: Função objetivo em função dos parâmetros: latitude, longitude e magnitude referente ao sismo de 1955. Na primeira seção, cada cor corresponde a uma faixa diferente de valores da função objetivo (resíduos RMS das intensidades), permitindo visualizar sua topografia. Na segunda seção, as cores correspondem a variação da magnitude para diferentes localizações. Para cada ponto do mapa foi escolhida a magnitude com melhor ajuste (menor valor da função objetivo). O círculo branco no interior das curvas de nível indica a solução do problema inverso. A primeira coluna são os resultados de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985), e a segunda coluna são os resultados correspondentes a lei de atenuação derivada neste trabalho.

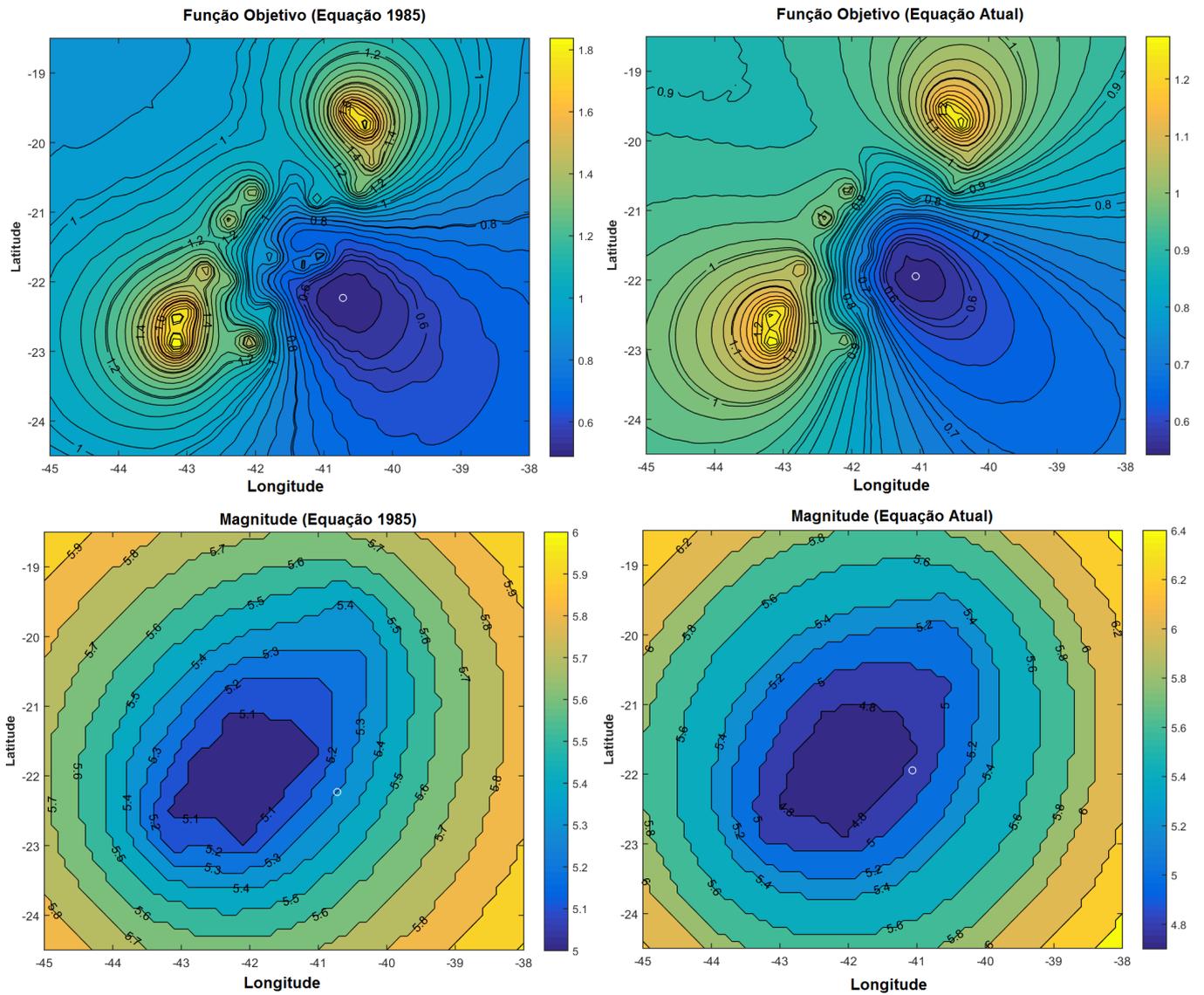


Figura 3.21: Função objetivo em função dos parâmetros: latitude, longitude e magnitude do sismo de 1972. Na primeira seção, cada cor corresponde a uma faixa diferente de valores da função objetivo (resíduos RMS das intensidades), permitindo visualizar sua topografia. Na segunda seção, as cores correspondem a variação da magnitude para diferentes localizações. Para cada ponto do mapa foi escolhida a magnitude com melhor ajuste (menor valor da função objetivo). O círculo branco no interior das curvas de nível indica a solução do problema inverso. A primeira coluna são os resultados de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985), e a segunda coluna são os resultados correspondentes a lei de atenuação derivada neste trabalho.

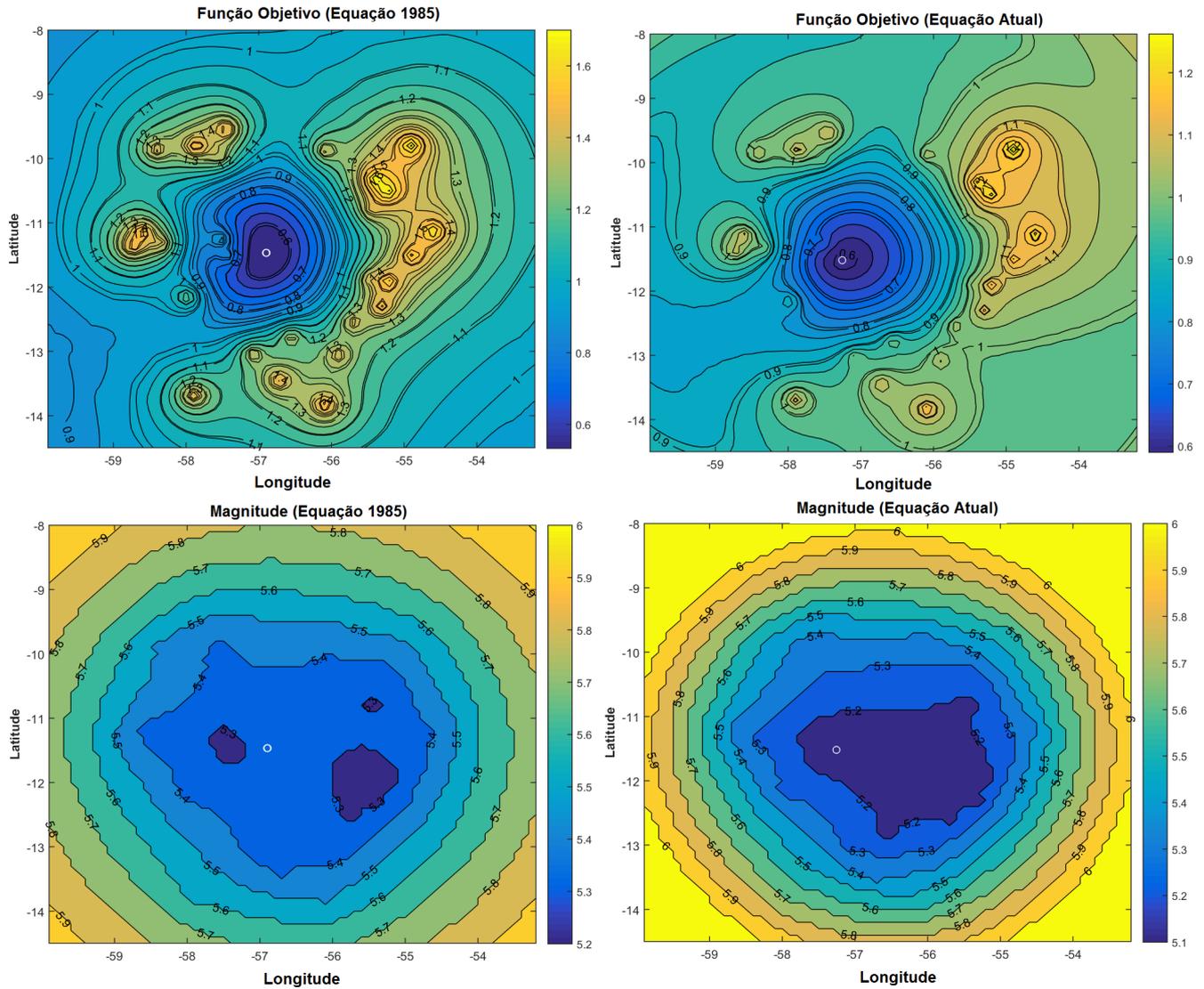


Figura 3.22: Função objetivo em função dos parâmetros: latitude, longitude e magnitude do sismo de 1998. Na primeira seção, cada cor corresponde a uma faixa diferente de valores da função objetivo, permitindo visualizar sua topografia. Na segunda seção, as cores correspondem a variação da melhor magnitude para diferentes localizações. O círculo branco no interior das curvas de nível indica a solução do problema inverso. A primeira coluna são os resultados de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985), e a segunda coluna são os resultados correspondentes a lei de atenuação derivada neste trabalho.

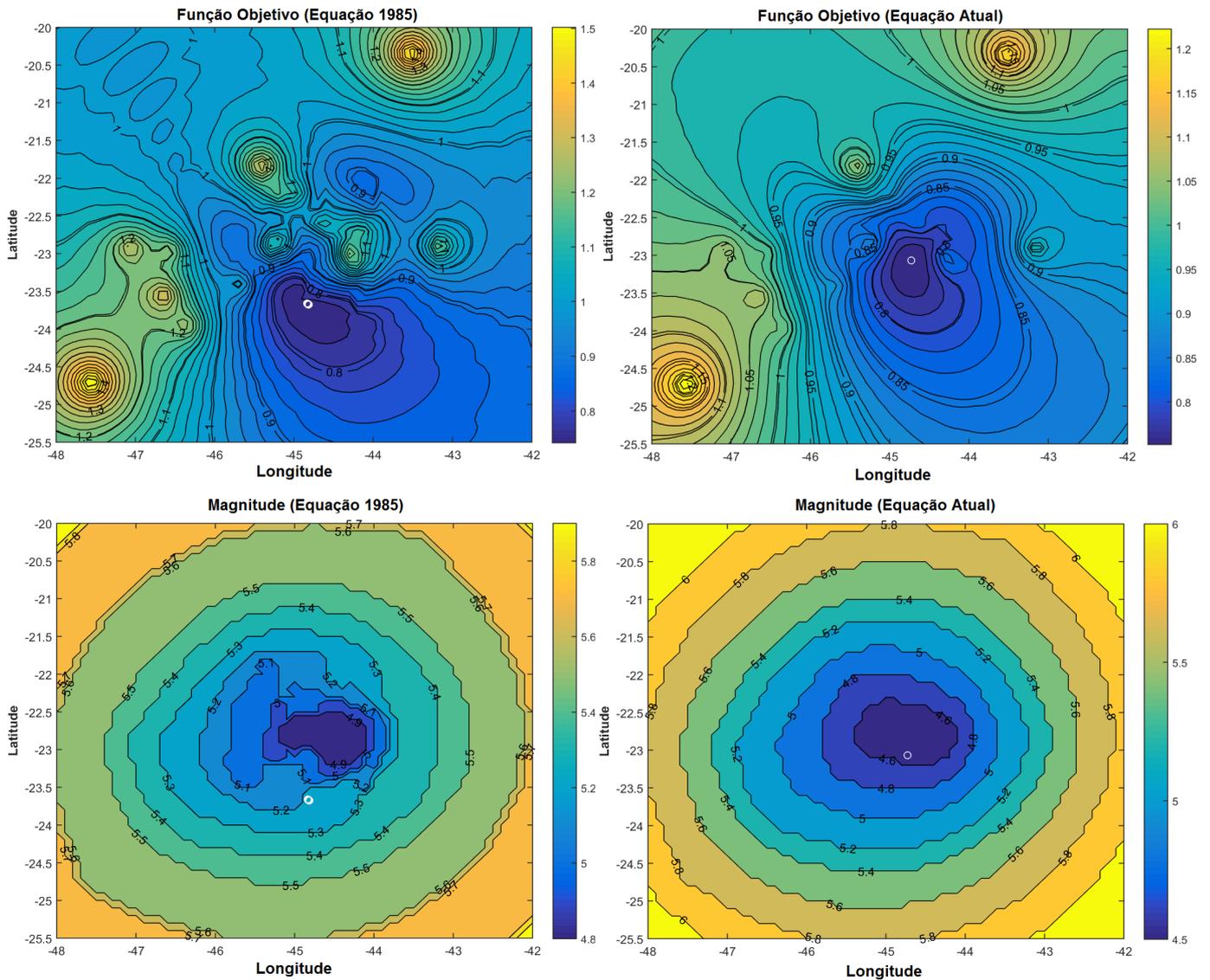


Figura 3.23: Função objetivo em função dos parâmetros: latitude, longitude e magnitude referente ao sismo de 1861. Na primeira seção, cada cor corresponde a uma faixa diferente de valores da função objetivo, permitindo visualizar sua topografia. Na segunda seção, as cores correspondem a variação da melhor magnitude para diferentes localizações. O círculo branco no interior das curvas de nível indica a solução do problema inverso. A primeira coluna são os resultados de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985), e a segunda coluna são os resultados correspondentes a lei de atenuação derivada neste trabalho.

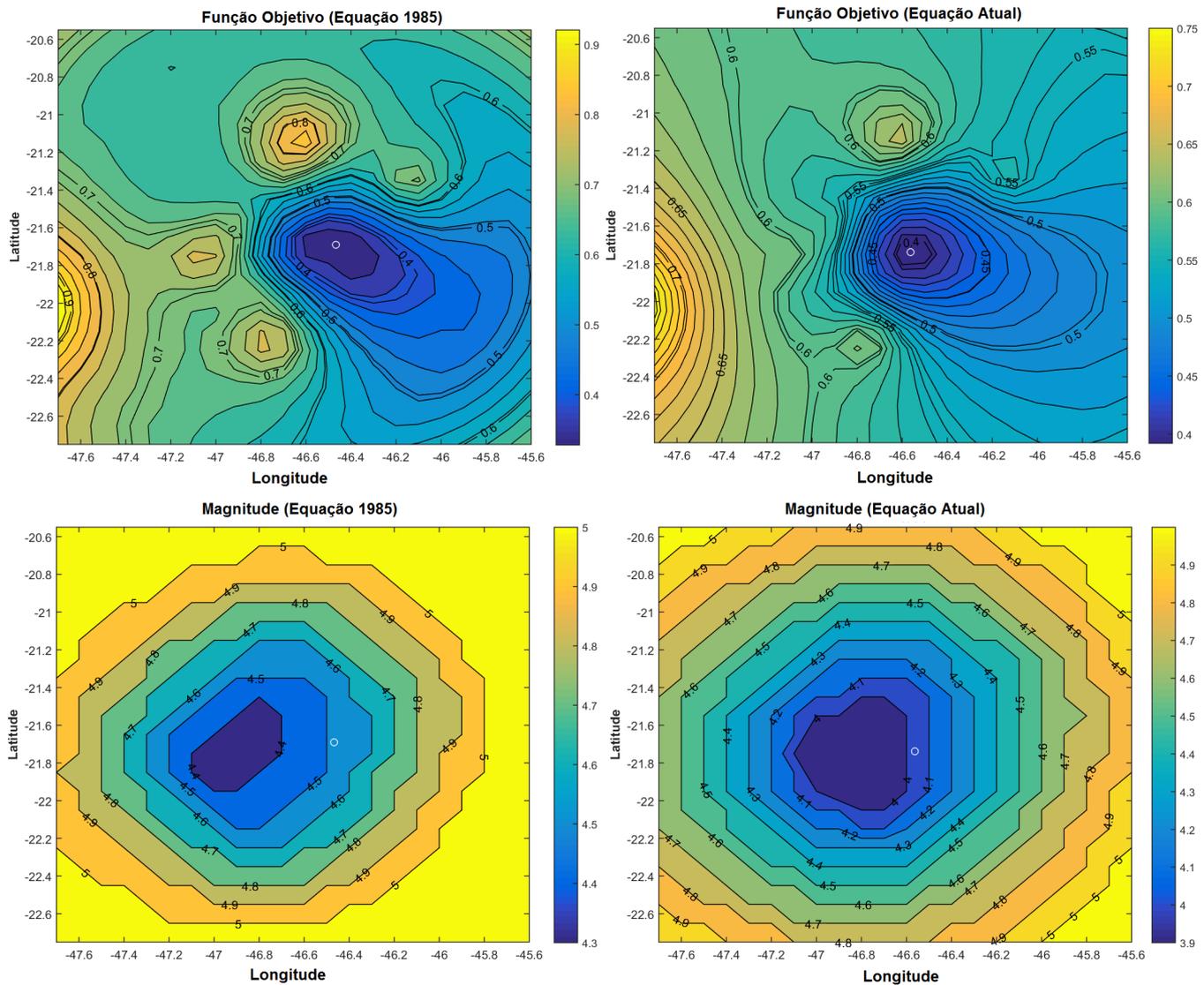


Figura 3.24: Função objetivo em função dos parâmetros: latitude, longitude e magnitude do sismo de 1950. Na primeira seção, cada cor corresponde a uma faixa diferente de valores da função objetivo, permitindo visualizar sua topografia. Na segunda seção, as cores correspondem a variação da melhor magnitude para as diferentes localizações. O círculo branco no interior das curvas de nível indica a solução do problema inverso. A primeira coluna são os resultados de acordo com a equação de Assumpção e Burton (1985), e a segunda coluna são os resultados correspondentes a lei de atenuação derivada neste trabalho.

Resultados e Discussão

4.1 Teste com sismos recentes

Na tabela 4.1 estão listados os eventos-teste com as informações de seus parâmetros de fonte de acordo com o BSB e os resultados obtidos com Método Nelder-Mead para as equações de 1985 e a atual.

Tabela 4.1 - Parâmetros do BSB comparados com os parâmetros calculados pelo Método Nelder-Mead. O valor de RMS é referente ao resíduo médio entre as intensidades observadas e calculadas.

Parâmetros do Catálogo						Equação 1985				Equação Atual			
Data	Lat	Lon	Prof (Km)	mb	Fonte	Lat	Lon	mb	RMS	Lat	Lon	mb	RMS
31/01/1955	-12.52	-57.35	10	6.2	BSB	-13.40	-56.91	5.55	0.35	-14.06	-57.21	5.49	0.32
24/10/1972	-21.72	-40.53	08	4.8	BSB	-22.23	-40.72	5.27	0.49	-21.92	-41.10	4.88	0.55
10/03/1998	-11.62	-56.77	04	5.2	BSB	-11.47	-56.90	5.27	0.53	-11.53	-57.29	5.10	0.60

Sismo de 31 de janeiro de 1955. Este é um dos maiores sismos já ocorridos no território brasileiro, mas por ter ocorrido em uma região pouco habitada na época, não foi possível reconstruir seus efeitos na área epicentral. As coordenadas do epicentro no BSB são 12.52 S e 57.35 W e a magnitude $mb = 6.2$. Observa-se uma distância de 107 km do epicentro instrumental até o epicentro calculado com os dados macrossísmicos segundo o Método de Nelder-Mead com a equação de 1985 e para a equação atual 171.6 km. Já para o método *Boxer* esta distância aumenta para 232 km. A incerteza em torno de epicentro instrumental é ± 30 km. O resíduo entre a magnitude calculada e a de referência foi de 0.65 e 0.71 para o Método de Nelder-Mead com as equações de 1985 e atual, respectivamente

e 1.08 para o *Boxer*. Neste caso, há uma grande discrepância nos cálculos do epicentro e magnitude para ambos os métodos, mas ainda assim, o Método de Nelder-Mead apresentou menor resíduo em comparação ao *Boxer*.

Sismo de 24 de outubro de 1972, ocorrido na Bacia de Campos, frente ao Estado do Rio de Janeiro. É o evento de menor magnitude comparado com os outros estudados, $mb = 4.8$. As coordenadas do epicentro disponíveis no BSB são 21.72 S e 40.53 W, a incerteza em torno do epicentro instrumental é ± 20 km. Os resultados para este evento utilizando o Método de Nelder-Mead com a equação de 1985 foram: distância entre o epicentro calculado até o epicentro instrumental foi 60 km e a o resíduo entre as magnitudes calculada e da referência 0.47. Com a equação atual, os erros no epicentro são um pouco mais elevados do que a relação anterior: 63.7 km, porém, a magnitude se aproxima muito da esperada, 0.08. Para o *Boxer*, a distância entre o epicentro calculado e o de referência foi de 113 km e o resíduo entre as magnitudes foi 0.28.

Os parâmetros do sismo de 10 de março de 1998 calculados com os dados macrossísmicos, foram os que mais se aproximaram dos dados instrumentais disponíveis no BSB. As coordenadas do epicentro deste sismo, de acordo com a referência, foram 11.62 S e 56.77 O e magnitude $mb = 5.2$. De acordo com o Método de Nelder-Mead, o resíduo entre as magnitudes calculada e a de referência foi 0.07. Já a distância entre o epicentro calculado e o de referência foi cerca 22 km, de acordo com a equação de 1985. Para a equação atual, o erro no epicentro aumenta, resultando em 55.51 km, porém, o resíduo entre as magnitudes calculada e esperada é de apenas 0.1. Aplicando o método *Boxer* ao sismo de 1998, a distância entre o epicentro calculado e o de referência foi de 77km e o resíduo entre as magnitudes foi 0.21.

Em alguns dos eventos-teste utilizados neste trabalho, as informações de intensidades não tem uma cobertura geográfica adequada e o número de intensidades relatados é relativamente baixo. Mesmo assim, os resultados obtidos com os dados macrossísmicos são satisfatórios. Para ambos os métodos, a melhor concordância entre os epicentros determinados instrumentalmente e os calculados com os dados macrossísmicos foi para o sismo de 1998. Em relação às magnitudes, os três eventos mostraram concordância com os valores instrumentais. Entretanto, os resultados obtidos com o Método de Nelder-Mead para todos estes eventos são mais consistentes em termos de magnitude e epicentro do que os calculados pelo *Boxer*, podendo destacar os seguintes aspectos:

- O método considera todos os pontos de intensidades macrossísmicas, incluindo os *Felt* e *Not Felt* para o cálculo dos parâmetros dos terremotos históricos;
- A equação de atenuação utilizada no processo de inversão foi calibrada para o Brasil;
- Para determinar o epicentro, não é imprescindível que haja um grande número de informações de intensidades à sua volta;

A modelagem foi validada reproduzindo os parâmetros dos terremotos de forma comparável com os de origem instrumental. Desse ponto de vista, considera-se que o método desenvolvido neste estudo pode ser sistematicamente aplicado a outros eventos históricos registrados nos diferentes catálogos publicados, ajudando a calcular os parâmetros de sismos históricos de maneira objetiva.

4.1.1 Avaliação da Magnitude Calculada com o Método de Nelder-Mead

Para avaliar o desempenho do método no cálculo das magnitudes a partir dos dados macrossísmicos, é possível analisar os valores da intensidade dos sismos em função da distância (Figuras 4.1 a 4.5).

Em todos os casos, o decaimento das intensidades observadas com relação a distância epicentral se mostrou, em geral, de acordo com o modelo de atenuação proposto por Assumpção e Burton (1985). As intensidades se comparam bem com as intensidades previstas pela equação e de maneira geral, as intensidades ficam no limite de $\sigma = m \pm 0.5$. O sismo de 1861 foi o que apresentou maior dispersão dos dados (entre 100 e 150 km). O sismo de 1950 está bem coerente com o decaimento da intensidade com a distância (Figuras 4.1 a 4.3).

Apesar da equação atual ter sido calibrada com estes sismos, as intensidades estão mais dispersas comparados com a relação de 1985. O decaimento das intensidades com a distância para os sismos de 1972 e 1998 foram os que apresentaram maior dispersão. A maior dispersão das intensidades do sismo de 1998 estão entre 150 e 250 km. Já o sismo de 1972, apresenta maior dispersão entre 100 e 200 km. Neste caso, há um bom ajuste nos primeiros quilômetros, porém, a partir de 150 km a equação superestima os valores de intensidades. No caso de 1972, a magnitude se aproximou da esperada, porém há um erro de 63.7 km no epicentro. Para ambos os casos as intensidades ficam fora do limite de $\sigma = m \pm 0.5$. O caso que melhor se ajustou foi o sismo de 1955, onde as intensidades

ficaram dentro do limite de $\sigma = m \pm 0.5$. Para o sismo de 1861, há dispersão dos dados nos primeiros quilômetros, onde a curva subestima os valores de intensidade. Já o sismo de 1950, os dados ficaram bem dispersos e assim como no caso de 1861, a curva subestima as intensidades nos primeiros quilômetros.

Estes resultados são considerados bastante satisfatórios apesar da equação de atenuação de Assumpção e Burton (1985) utilizada no processo de inversão ter sido calibrada com dados antigos e muito subjetivos (Isossistas). De maneira geral, o I previsto pela equação de Assumpção e Burton (1985) se compara melhor com o I observado para terremotos históricos do que a equação atual.

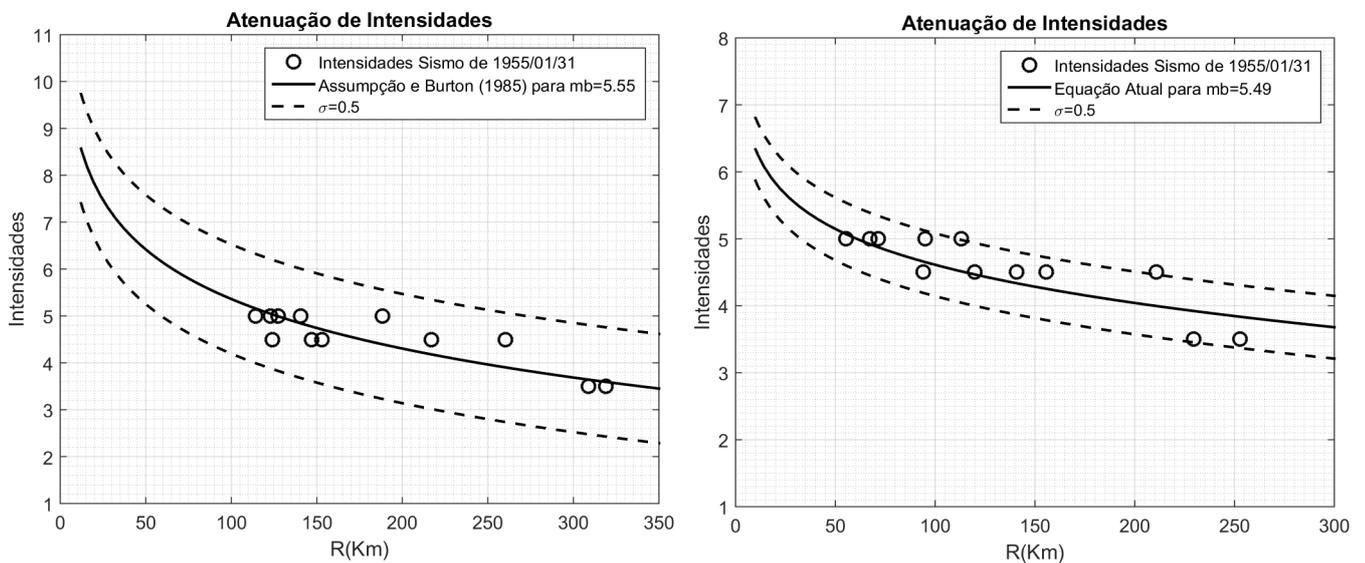


Figura 4.1: Intensidades macro sísmicas observadas no terremoto de 31/01/1955, Serra do Tombador/MT, comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 5.55$ (linha sólida) à esquerda e a curva de atenuação derivada neste trabalho para magnitude $mb = 5.49$ (linha sólida) à direita. As linhas tracejadas correspondem a: $\sigma = m \pm 0.5$.

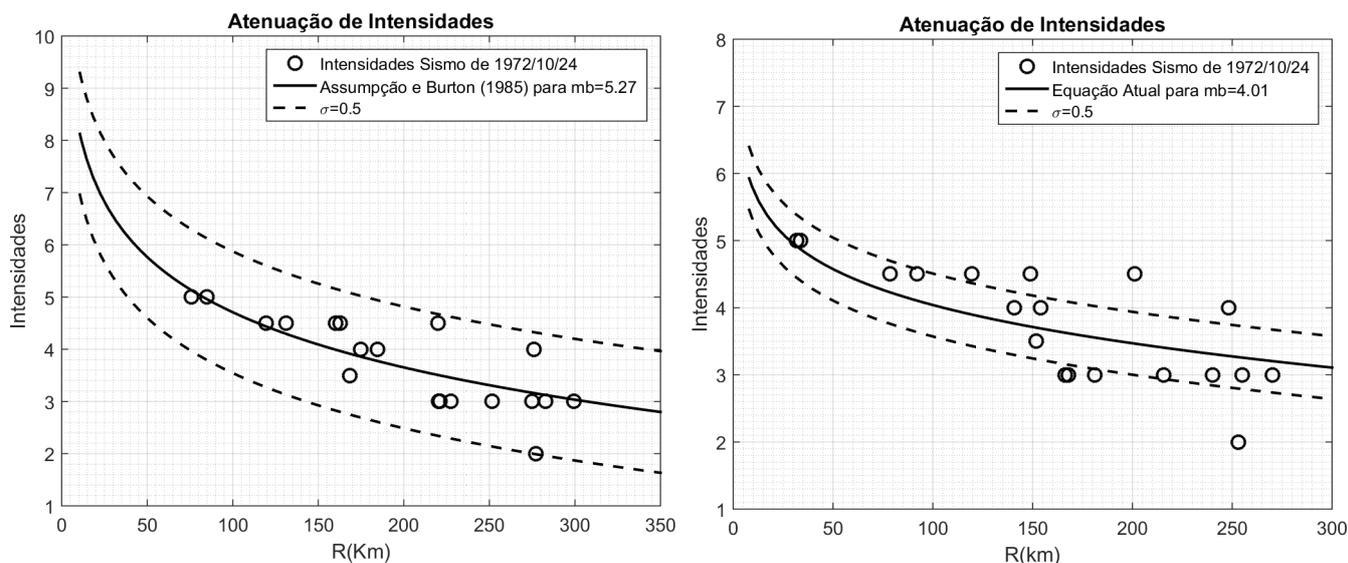


Figura 4.2: Intensidades macro sísmicas observadas no terremoto de 24/10/1972, Campos/RJ, comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 5.27$ (linha sólida) à esquerda e a curva de atenuação derivada neste trabalho para magnitude $mb = 4.89$ (linha sólida) à direita. As linhas tracejadas correspondem a: $\sigma = m \pm 0.5$.

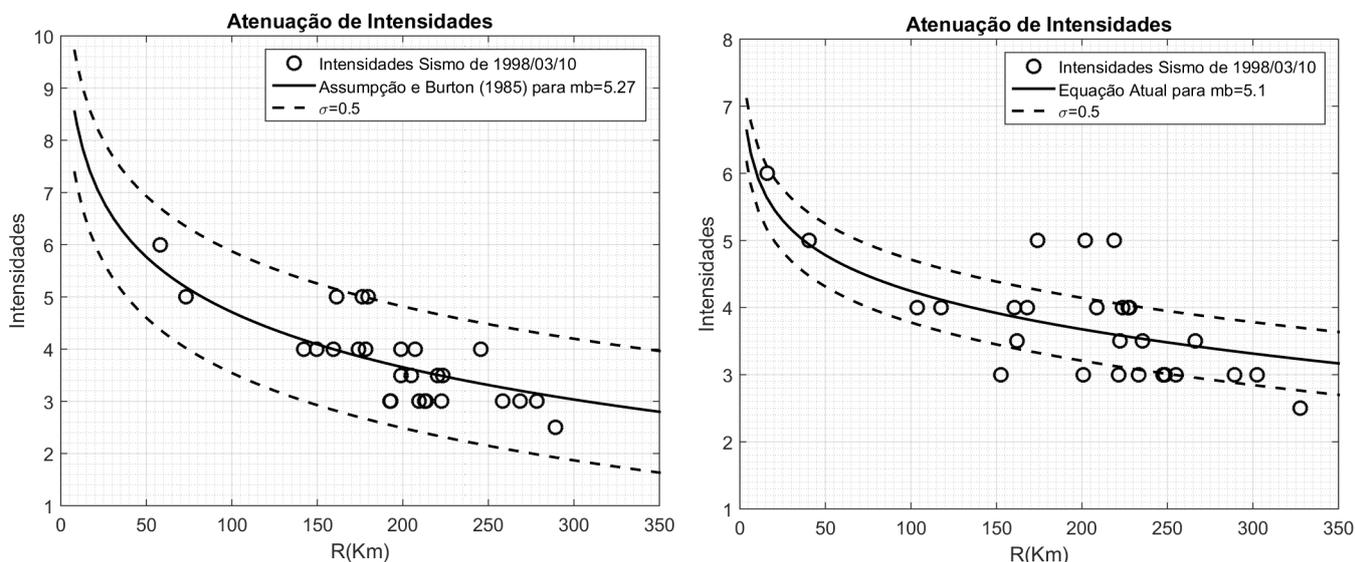


Figura 4.3: Intensidades macro sísmicas observadas no terremoto de 10/03/1998, Porto dos Gaúchos/MT, comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 5.27$ (linha sólida) à esquerda e a curva de atenuação derivada neste trabalho para magnitude $mb = 5.1$ (linha sólida) à direita. As linhas tracejadas correspondem a: $\sigma = m \pm 0.5$.

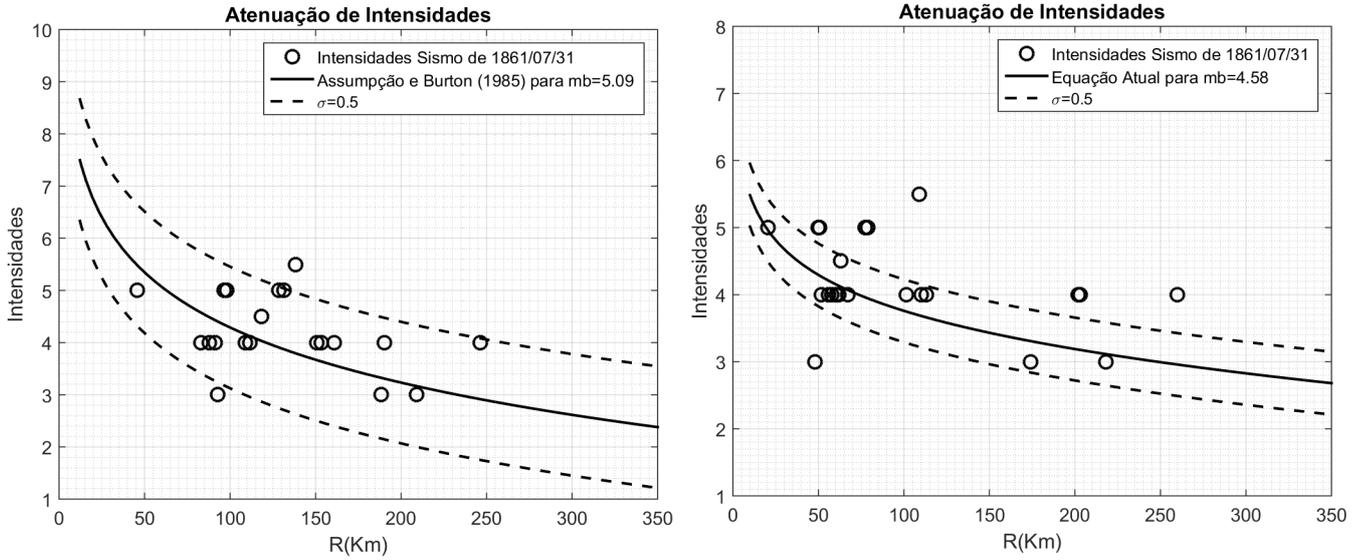


Figura 4.4: Intensidades macro sísmicas observadas no terremoto de 31/07/1861, Lorena/SP, comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 5.09$ (linha sólida) à esquerda e a curva de atenuação derivada neste trabalho para magnitude $mb = 4.58$ (linha sólida) à direita. As linhas tracejadas correspondem a: $\sigma = m \pm 0.5$.

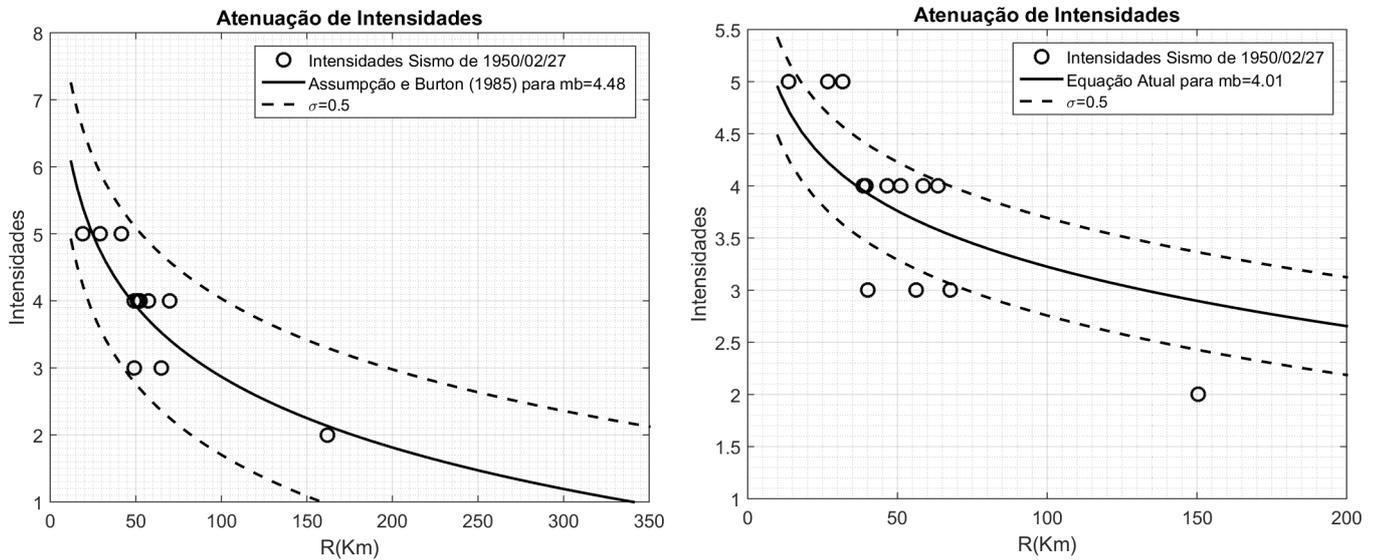


Figura 4.5: Intensidades macro sísmicas observadas no terremoto de 27/02/1950, Poços de Caldas/MG, comparado com a curva de atenuação de Assumpção e Burton (1985) para magnitude calculada $mb = 4.48$ (linha sólida) à esquerda e a curva de atenuação derivada neste trabalho para magnitude $mb = 4.01$ (linha sólida) à direita. As linhas tracejadas correspondem a: $\sigma = m \pm 0.5$.

4.2 Localização dos Sismos Históricos de 1861 e 1950: Comparação entre os Métodos

Na figura 4.6, tem-se o mapa com os epicentros calculados com o *Boxer*, pela inversão com o Método Nelder-Mead e manualmente com as isossistas. Para o sismo de 1861, os resultados obtidos com o *Boxer* e com as isossistas foram muito próximos, tendo em vista a semelhança dos dois métodos que centralizam o epicentro na região de maior intensidade. O resultado da inversão com o Método Nelder-Mead para ambas equações, está coerente com a atenuação de intensidades e com os relatos de jornais da época que noticiaram que os efeitos do sismo “nas proximidades do mar fôra mais forte”. A magnitude calculada para este tremor, segundo os métodos *Boxer*, Nelder-Mead com as equações de 1985 e atual, e manualmente com as isossistas foram $mb = 4.92$, $mb = 5.09$, $mb = 4.62$ e $mb = 5.0$, respectivamente. O resíduo médio entre as intensidades observadas e calculadas com o Método de Nelder-Mead para estes parâmetros foi 0.73 para equação de 1985 e 0.78 para atual.

Pode-se observar na figura 4.7, as localizações do epicentro do sismo de 1950 foram muito próximas ao comparar os três métodos. A magnitude calculada pelo *Boxer* foi $mb = 4.77$, pelo Método Nelder-Mead com as equações de 1985 e a atual foram $mb = 4.48$ e $mb = 4.01$ e manualmente com as isossistas $mb = 4.4$. O resíduo médio entre as intensidades observadas e calculadas com o Método de Nelder-Mead para estes parâmetros foi 0.32 de acordo com a equação de 1985 e 0.39 para atual.

Os resultados das localizações dos epicentros para os dois sismos históricos estudados com os diferentes métodos estão de acordo com premissa de que as intensidades sísmicas atenuam com a distância.

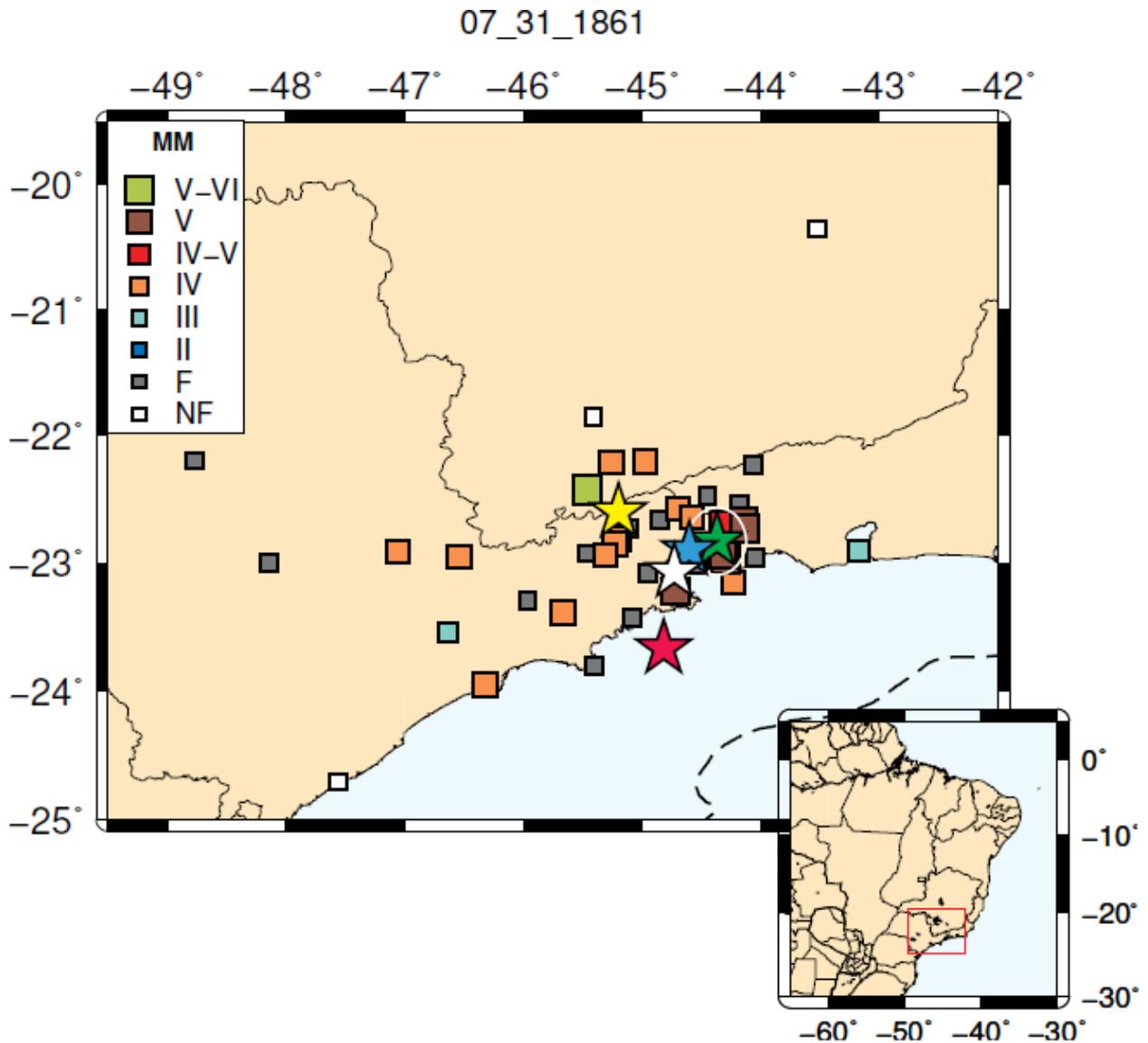


Figura 4.6: Mapa de intensidades para o sismo de 1861 com as localizações dos epicentros calculados com diferentes métodos. Os quadrados coloridos indicam as intensidades (MM), os quadrados cinza são pontos com dados macrossísmicos insuficientes para inferir uma intensidade (*Felts*), os quadrados preto são localizações onde o sismo não foi sentido (*Not Felt*). A estrela amarela indica o epicentro segundo Berrocal *et al.* (1984), as estrelas verde e azul são os epicentros calculados com os métodos Boxer e manualmente com as *Isossistas* (ver Figura 3.3), respectivamente. As estrelas rosa e branca são os epicentros calculados com o Método Nelder-Mead utilizando a equação de Assumpção e Burton (1985) e a equação derivada neste trabalho, respectivamente.

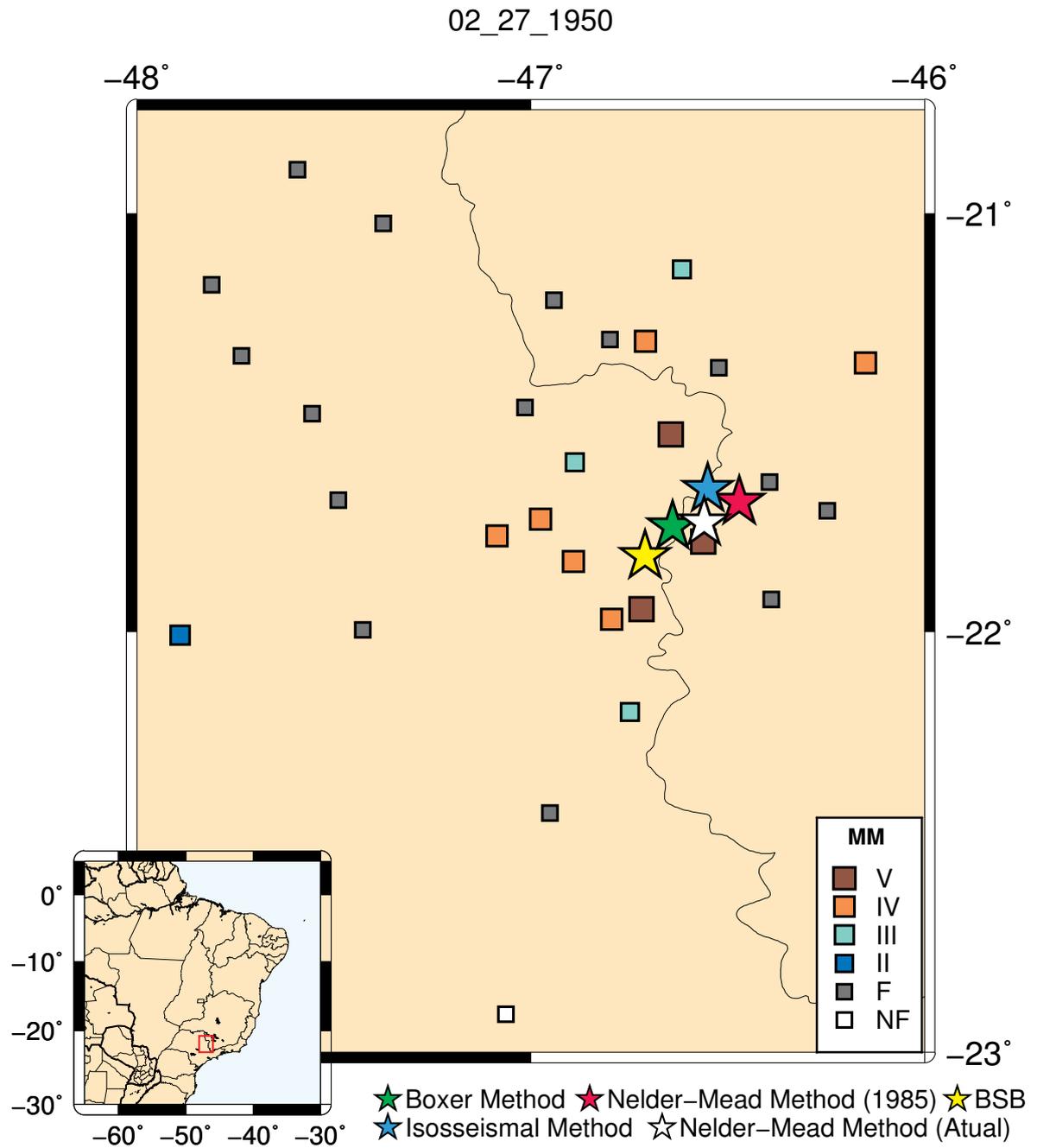


Figura 4.7: Mapa de intensidades para o sismo de 1950 com as localizações dos epicentros calculados com diferentes métodos. Os quadrados coloridos indicam as intensidades (MM), os quadrados cinza são pontos com dados macrossísmicos insuficientes para inferir uma intensidade (*Felts*) e os quadrados brancos são localizações onde o sismo não foi sentido (*Not Felt*). A estrela amarela indica o epicentro segundo Berrocal *et al.* (1984), as estrelas verde e azul são os epicentros calculados com os métodos Boxer e manualmente com as Isossistas (ver Figura 3.4), respectivamente. As estrelas rosa e branca são os epicentros calculados com o Método Nelder-Mead utilizando as equações de Assumpção e Burton (1985) e a derivada neste trabalho, respectivamente.

Conclusões

Epícentros e magnitudes de sismos históricos (sem registro instrumental) podem ser estimados comparando-se as intensidades observadas com uma equação que prevê como as intensidades variam com a magnitude e a distância.

Apesar da escassez de dados, foi possível determinar uma equação de atenuação para o Brasil que é usada para calcular a magnitude e epicentro de sismos históricos. Esta equação foi calibrada usando diretamente as informações de intensidades de 24 eventos com magnitudes e epicentros bem determinados. Supõe-se, em primeira aproximação, que esta curva de intensidade-distância representa a atenuação de intensidades em todo o Brasil, embora os eventos não estejam distribuídos uniformemente.

A metodologia incluiu duas etapas: (1) a escolha das equações a serem ajustadas e (2) a determinação dos coeficientes da lei de atenuação por Mínimos Quadrados. É importante notar que a lei de atenuação obtida não leva em conta as condições do local e a vulnerabilidade das construções.

As equações foram comparadas em termos de resíduos médios quadráticos (RMS) para determinar qual melhor prediz os valores observados no Brasil. A equação

$$I = 0.9704m - 1.4812 \log(R) - 0.0018R + 2.5151 \quad (5.1)$$

onde I é a intensidade, m a magnitude e $R = \sqrt{r^2 + h^2}$ é a distância hipocentral, sendo r a distância epicentral e h a profundidade, foi a que resultou no menor resíduo médio, 0.9. Esta equação foi derivada sobre o intervalo de intensidades II-VII MM e magnitudes entre 3.3 e 6.2.

A fim de diminuir as incertezas nos cálculos dos parâmetros de fonte de terremotos históricos, foram testados dois métodos: *Boxer* e inversão com o Método de Nelder-Mead.

Estes métodos foram avaliados primeiramente por testes com dados de eventos instrumentais e posteriormente aplicados a dados históricos de intensidade sísmica para a determinação dos parâmetros de fonte desses eventos.

As leis de atenuação determinadas por Assumpção e Burton (1985) e a nova lei (Equação 5.1) foram usadas na inversão com o Método de Nelder-Mead para determinação dos parâmetros de fonte dos terremotos. A nova lei foi testada para avaliar se haveria melhora nos resultados.

Era esperado que a relação de atenuação derivada neste trabalho tivesse um melhor resultado na determinação dos epicentros e magnitudes comparada com a determinada por Assumpção e Burton (1985), pois na calibração da nova relação foram incluídos os dados dos eventos-teste. Além disso, a equação atual contém um termo a mais do que a relação anterior. Porém isso não aconteceu. Os resíduos entre as intensidades observadas e calculadas pela relação de Assumpção e Burton (1985) e os erros na localização dos epicentros foram menores para todos os sismos estudados. Isto talvez tenha acontecido pelo fato da equação de Assumpção e Burton (1985) conter um parâmetro, D , que impede que as intensidades sejam exageradamente grandes quando a distância epicentral, r e a profundidade h são pequenas. A equação de 1985 se ajusta melhor aos dados nos primeiros quilômetros. Esta constante não foi levada em consideração no ajuste da nova equação.

Os resultados obtidos com os eventos-teste mostraram que quando os dados macrossísmicos apresentam boa distribuição em torno do epicentro, como por exemplo o sismo de 1998, os métodos *Boxer* e Nelder-Mead são eficazes, se aproximando bastante do resultado esperado. Quando não há uma concentração de dados em volta do epicentro ou quando o epicentro é no mar, como nos sismos de 1955 e 1972, a inversão com o método de Nelder-Mead se mostrou mais eficiente, tendo em vista que o *Boxer*, para localizar o epicentro, calcula o baricentro da região de maior intensidade.

Os resultados obtidos com o Método de Nelder-Mead para todos os eventos-teste são mais consistentes em termos de magnitude e epicentro do que os do *Boxer*, pois além de ser menos dependente da distribuição de dados, utiliza equações de atenuação calibradas para o Brasil. O melhor acordo entre os parâmetros instrumentais e os obtidos a partir das intensidades é para o sismo de 1998, que tem um grande número de informações macrossísmicas. O resultado mais discrepante foi para o sismo de 1955. Apesar de ser o sismo de maior magnitude, as informações de intensidades não têm cobertura geográfica

adequada e o número de intensidades reportadas é relativamente baixo.

Foi feito um estudo especial dos sismos de 1861 no Vale do Ribeira e de 1950 em Poços de Caldas. Pesquisas em jornais da época forneceram informações macrossísmicas complementares às já existentes. Os parâmetros de fonte destes dois sismos foram calculados pelos métodos *Boxer* e Nelder-Mead. Novos dados de intensidade recentemente descobertos mostram que o epicentro do sismo de 1861 foi mais ao Sul do que a estimativa anterior. Para o sismo de 1950, não houve grandes diferenças entre os epicentros calculados neste estudo e os anteriores.

Além dos métodos *Boxer* e Nelder-Mead, a magnitude dos sismos históricos de 1861 e 1950 foram também calculadas por meio da área afetada. Foram construídos mapas a partir dos dados de intensidades destes sismos e foram traçadas isossistas para delimitar as regiões de mesma intensidade. Pode-se estimar as magnitudes destes sismos por meio de uma equação empírica que relaciona magnitude e área afetada (Assumpção *et al.*, 2014). A estimativa de área afetada e magnitude calculadas para o sismo de 1861 feita por Berrocal *et al.*, 1984, foram $52.000Km^2$ e $mb = 4.3$. Os novos dados de intensidade descobertos mostram que a área afetada por este sismo foi muito maior do que a estimativa anterior, sendo $250.000Km^2$ e consequentemente uma maior magnitude, $mb = 5$. A área afetada pelo sismo de 1950 foi $44.000Km^2$ e magnitude $mb = 4.4$. Os epicentros calculados com o *Boxer* e as isossistas foram muito próximos, tendo em vista a similaridade entre os métodos, onde o *Boxer* calcula o baricentro das localizações de maior intensidade e com as isossistas há a centralização do epicentro dentro da isossista de maior intensidade.

Os parâmetros de fonte calculados para os sismos históricos utilizando os três métodos foram muito próximos e coerentes com a atenuação de intensidades. De certa maneira, os parâmetros dos terremotos calculados a partir dos dados macrossísmicos são comparáveis com os de origem instrumental (quando as intensidades têm boa distribuição). Desse ponto de vista, considera-se que o método desenvolvido nesta dissertação poderá ser aplicado a outros eventos históricos registrados nos diferentes catálogos publicados, ajudando a calcular os parâmetros de sismos históricos de maneira mais objetiva.

Referências Bibliográficas

- Alifanov, O. M. Inverse Heat Transfer Problems. Berlin: Springer, 1995. p. 348.
- Ambraseys, N. (1985). Intensity-Attenuation and Magnitude-Intensity Relationships for Northwest European Earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v.13, Nº6, p. 733-778.
- Assumpção, M.; Ortega, R., Berrocal, J. & J.A. Veloso, 1983. O sismo de Codajás-AM, de 05/08/1983. *Rev. Bras. Geofísica*, 2, p. 39-44.
- Assumpção, M. & Burton, P. (1985). Atenuação de Intensidades Macrossísmicas no Brasil e Estimativa de Risco Sísmico no Sudeste. 1º Encontro Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica. São José dos Campos.
- Assumpção, M. & Suarez, G. (1988). Source mechanisms of moderate-size earthquakes and stress orientation in mid-plate South America. *Geophysical Journal*, v. 92, p. 253-267.
- Assumpção, M.; Ferreira J.; Barros, L.; Hilario, B.; França, G. S.; Barbosa, J. R.; Menezes, E.; Ribotta, L. C.; Pirchiner, M.; Nascimento, A. & Dourado, J. C. (2014). Intraplate Seismicity in Brazil. In: *Intraplate Earthquakes*. Cambridge University Press. p. 50-71.
- Bakun, W.; Haugerud, R; Hopper, M. & Ludwin, R. (2002). The December 1872 Washington State Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 92, Nº 8, p. 3239-3258.
- Barros, L.V., M. Assumpção, R. Quinteros & D. Caixeta, 2009. The intraplate Porto dos Gaúchos seismic zone in the Amazon craton - Brazil. *Tectonophysics*, 469 (1-4), 37-47. doi: 10.1016/j.tecto.2009.01.006

Bassini, A. M., 1984. Abalos sísmicos sentidos na região meridional do Brasil em 1982. *Rev. Bras. de Geofísica*, 2, p.85-94.

Berrocal; J.; Assumpção, M.; Antenaza,R.; Dias Neto, C.M.; Ortega, R.; França, H.; Veloso, J. A. (1984). *Sismicidade do Brasil*, IAG. Universidade de São Paulo, CNEM.

BN. Biblioteca Nacional. <https://www.bn.gov.br/>. Último acesso em 01 de março de 2017.

Boshi, E.; Guidoboni, E.; Ferrari, G.; Valensise, G. & Gasperini, P. (1997). *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990*, ING-SGA, Bologna, p. 644 and a CD-ROM.

BSB. Boletim Sísmico Brasileiro. <http://moho.iag.usp.br/>. Último acesso em 01 de março de 2017.

Boletim Sísmico Brasileiro, 8, *Rev. Bras. Geof.*, 1987, 5, p. 67-72.

Boletim Sísmico Brasileiro, 11, *Rev. Bras. Geof.*, 1990, p. 87-91.

CERESIS. Centro Regional de Sismologia para América do Sul. <http://www.ceresis.org/>. Último acesso em 01 de março de 2017.

Chimpliganond, C., M. Assumpção, M. von Huelsen & G.S. França, 2010. The intracratonic Caraíbas-Itacarambi earthquake of December 09, 2007 (4.9 mb), Minas Gerais State, Brazil. *Tectonophysics*, 480, 48-56.

Dias, F.L, M. Assumpção, E.M. Facincani, G.S. França, M.L. Assine, A.C. Paranhos Filho, R.M. Gamarra, 2016. The 2009 earthquake, magnitude 4.8 mb, in the Pantanal Wetlands, Western Brazil. *Annals, Braz. Acad. Sci.*, 88(3), 1253-1264. Doi: 10.1590/0001-3765201620140507.

Gasperini, P. & Ferrari, G. (1997). Stimi dei parametri sintetici: nuove elaborazioni, in: Boshi, E. et al. (eds.). *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990*. ING-SGA. p. 56-64.

Gasperini, P.; Bernardini, F.; Valensise, G. & Boschi, E. (1999). Defining Seismogenic Sources from Historical Earthquake Felt Reports. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 89, p.94-110.

- Gasperini, P. & Ferrari, G. (2000). Deriving numerical estimates from descriptive information: the computation of earthquake parameters. *Annali di Geofisica*, v. 43, 729-746.
- Gasperini, P. & Ferrari, G. (2001). Stima dei parametri sintetici. In: Boshi, E. et al. (eds.). *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*, ING-SGA. p. 96-111.
- Gasperini, P. (2001) The Attenuation of Seismic Intensity in Italy: A Bilinear Shape Indicates the Dominance of Deep Phases at Epicentral Distances Longer than 45 km. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 91, p. 826-841.
- Gomez-Capera, A.A.; Rovida, A.; Gasperini, P.; Stucchi, M. & Viganò, D. (2014). The determination of earthquake location and magnitude from macroseismic data in Europa. *Bulletin of Earthquake Engineering* DOI 10.1007/s10518-014-9672-3.
- Hanks, T. C.; Hileman, J. A. & Thatcher, W. (1975). Seismic moments of the larger earthquakes of the southern California region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 86, p.1131-1139.
- Howell, B. F. & Schultz, T. R. (1975). Attenuation of Modified Mercalli intensity with distance from the epicenter, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 65, N^o 3, p.651-665.
- Le Goff, B; Borges, J. F; Bezzeghoud, M. (2014). Intensity-distance attenuation laws for the Portugal mainland using intensity data points, *Geophysical Journal International* 199, 2: 1278 - 1285. DOI: 10.1093/gji/ggu317
- Leschiuta, I. & Mirto, C. (2000). Using historical earthquake data for the determination of the source parameters of some European earthquakes, in *Proceedings of the ESC WG Historical Seismology Workshop*, 1-5 September, Macerata (Italy), p.54-59.
- Nelder, J. A. & Mead, R. A. (1965). A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, v. 7, p. 308-313.
- Sibol, M.S.; Bollinger, G.A. & Birch, J.B. (1987). Estimation of magnitudes in central and eastern North America using intensity and felt area, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 77, pp. 1635-1654

Stromeyer, D. & Grunthal, G. (2009). Attenuation relationship of macroseismic intensities in Central Europe, Bulletin Seimological Society of America, v. 99, p.554-565.

USGS, e M. Assumpção (unpublished data).

Wood, N. & Neumann, F. (1931). Modified Mercalli Intensity Scale of 1931, Bulletin of the Seismological Society of America, v. 21, NN^o 4, p. 277-283. Earthquakes, chapter 3, ed. P. Talwani, Cambridge U.P., ISBN 978-1-107-04038-0.

Apêndice

Dados Macrossísmicos

O levantamento dos dados macrossísmicos referentes aos eventos ocorridos em Lorenna/Itajubá, 1861, e Poços de Caldas, 1950, foram realizados principalmente em jornais disponíveis em hemerotecas virtuais (Biblioteca Nacional, Arquivo Público do Estado de São Paulo, Acervo Folha, dentre outros) e em algumas anotações realizadas em acervos de bibliotecas públicas (Biblioteca Mário de Andrade em São Paulo, Biblioteca Espírito Santo de Pinhal e Museu Histórico de Poços de Caldas, em Minas Gerais). Estes relatos foram organizados, analisados e sintetizados, objetivando apenas os dados macrossísmicos relevantes.

Relatos jornalísticos normalmente são sensacionalistas e podem superestimar as características do sismo, portanto, devem ser analisados cuidadosamente. Os relatos sobre os efeitos de cada sismo foram discutidos em conjunto e suas intensidades avaliadas tendo como referência a Escala Mercalli Modificada (MM).

Alguns relatos não trazem informações macrossísmicas suficientes para inferir um valor de intensidade. Neste caso, a intensidade é indicada como “sentido” (*Felt*). Quando os relatos notificam que em uma cidade o sismo não foi sentido ou um jornal local menciona que o sismo foi sentido apenas em outras cidades, mas não menciona a própria localidade, isto também é um indicativo que o sismo não foi sentido e esses casos são indicados como “não sentido” (*Not Felt*).

A determinação de intensidades a partir das descrições dos efeitos de um sismo é bastante subjetiva. Por isso, neste capítulo são apresentadas em ordem cronológica os recortes dos jornais da época com informações sobre os sismos de 1861 e 1950 e a descrição sucinta dos dados macrossísmicos coletados, e uma tabela com o resumo destas informações. Isto permitirá que outros pesquisadores possam efetuar suas próprias interpretações.

A.1 Registros históricos sobre o sismo de 1861

Fonte

- (1) Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 04/08/1861.

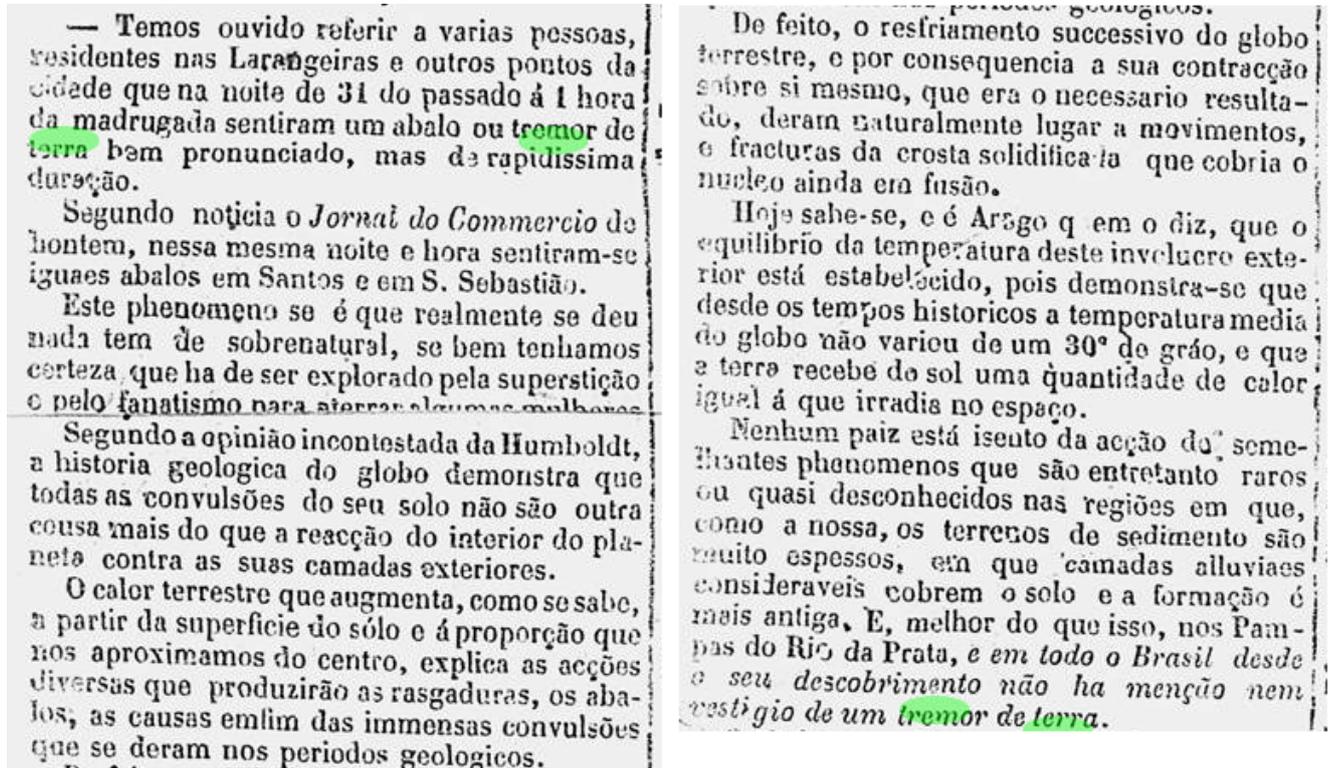


Figura A.1: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (2) Correio Mercantil, Rio de Janeiro, 06/08/1861.

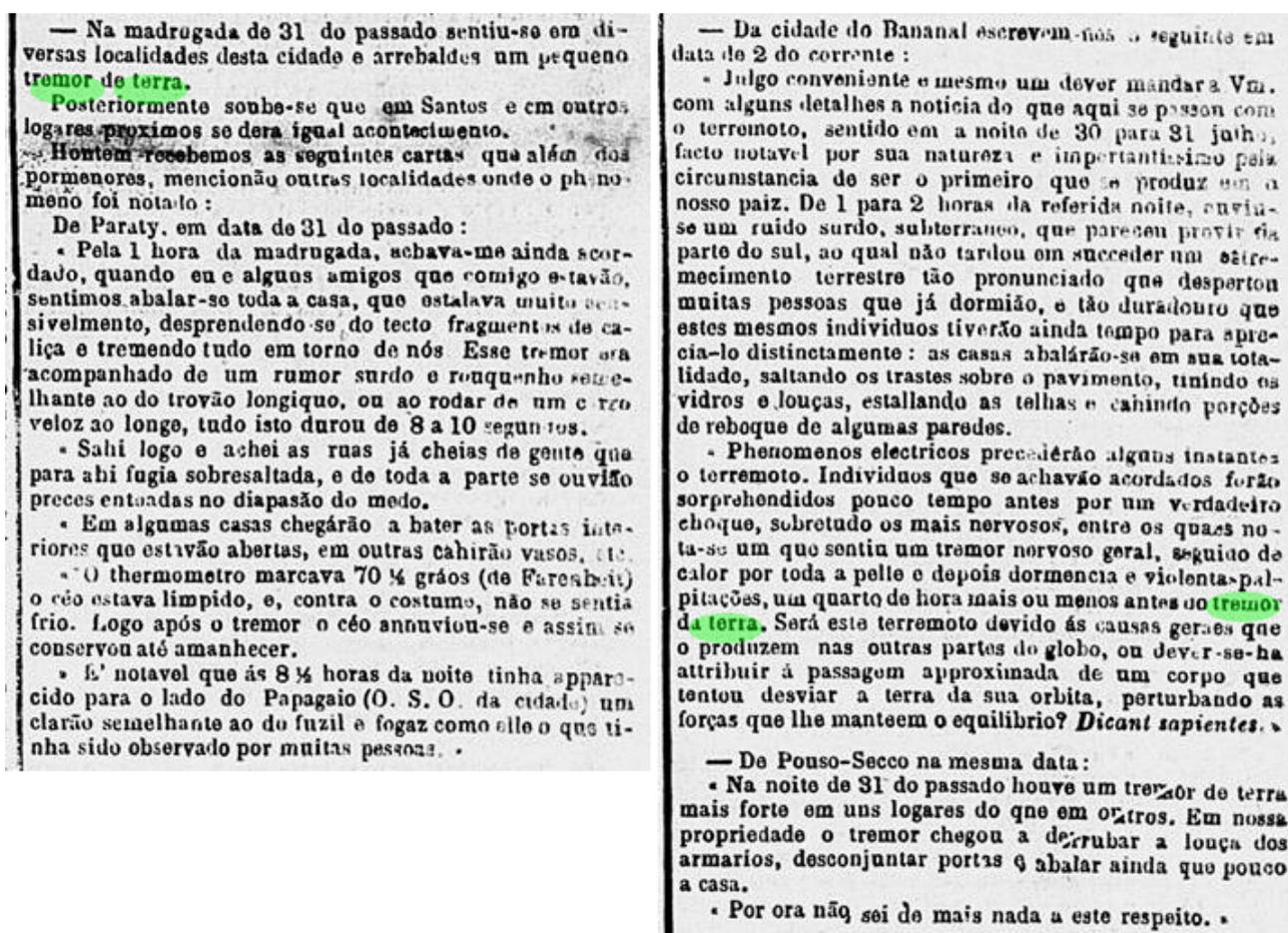


Figura A.2: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (3) Echo da Nação e A Actualidade, Rio de Janeiro reportaram a mesma informação, publicada em 07 e 10/08/1861, respectivamente.

<p>Estremecimento de terra. — Lê-se no <i>Correio Mercantil</i> de hontem : « Recebemos cartas que mencionam o seguinte :</p> <p>« De Paraty, em data de 31 do passado : « Pela 1 hora da madrugada, achava-me ainda acordado, quando eu e alguns amigos que comigo estavam, sentimos abalar-se toda a casa, que estalava muito sensivelmente, desprendendo-se do tecto fragmentos de calça e tremendo tudo em torno de nós. Esse tremor era acompanhado de um rumor surdo e roquenho semelhante ao do trovão longiquo, ou ao rodar de um carro veloz ao longe; tudo isto durou de 8 a 10 segundos.</p> <p>« Sahi logo e achei as ruas já cheias de gente que para ahí fugia sobresaltada, e de toda a parte se ouviam preces entoadas no diapasão de medo.</p>	<p>« Em algumas casas chegaram a abator as portas interiores que estavam abertas, em outras cahiram vasos, » « O thermometro marcava 70 1/2 grãos (de Farenheit) o céu estava limpo, e, contra o costume, não se sentia frio. Logo após o tremor o céu annuiu-se e assim se conservou até amanhecer.</p> <p>« É notavel que ás 8 1/2 horas da noite tinha apparecido para o lado do Papagaio (O. S. O. da cidade) um clarão semelhante ao do fuzil e fogaz como elle, o que tinha sido observado por muitas pessoas. » « — Da cidade do Bananal escrevem-nos o seguinte em dia de 2 do corrente : « Julgo conveniente e mesmo um dever mandar a v.m. com alguns detalhes a noticia do que aqui se passou com o terremoto, sentido em a noite de 30 para 31 de junho, facto notavel por sua natureza e importantissimo pela circumstancia de ser o primeiro que se produz em o nosso paiz. De 1 para 2 horas da referida noite, ouvio-se</p>
--	---

um ruido surdo, subterraneo, que pareceu provir da parte do sul, ao qual não tardou em succeder um estremecimento terrestre tão pronunciado que despertou muitas pessoas que já dormiam, e tão duradouro que estes mesmos individuos tiveram ainda tempo para apreciar-o distinctamente: as casas abalaram-se em sua totalidade, saltando os trastes sobre o pavimento, tinindo os vidros e louças, estalando as telhas e cahindo porções de reboque de algumas paredes.

Figura A.3: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornais da época.

- (4) Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 07/08/1861

— Confirmam-se as notícias do abalo ou tremor de terra da madrugada de 31 do passado.

Além dos lugares que já indicámos, foi o abalo sentido em S. Paulo, na villa de S. José do Barreiro, na serra da Carioca e na cidade do Bananal, em Minas no Pouso Secco, e nesta provincia em Paraty.

E' provavel que se recebam noticias de outros pontos onde, o phenomeno se terá manifestado.

Figura A.4: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (5) Echo da Nação, Rio de Janeiro, 07/08/1861

« Phenomenos electricos precederam alguns instantes o terremoto. Individuos que se achavam acordados foram sorprendidos pouco tempo antes por um verdadeiro choque, sobre tudo os mais nervosos, entre os quaes nota-se um que sentio um tremor nervoso geral, seguido de calor por toda a pelle e depois dormencia e violentas palpitações, um quarto de hora mais ou menos antes do tremor da terra. Será este terremoto devido ás causas geraes que o produzem nas outras partes do globo, ou dever-se-ha attribuir á passagem approximada de um corpo que tentou desviar a terra da sua orbita, perturbando as forças que lhe mantêm o equilibrio? *Dicant sapientes.* »

« -- De Pouso-Secco na mesma data:

« Na noite de 31 do passado houve um tremor de terra mais forte em uns lugares do que em outros. Em nossa propriedade o tremor chegou a derrubar a louça dos armarios, desconjuntar portas e abalar ainda que pouco a casa.

« Por ora não sei de mais nada a esse respeito »

Contam algumas pessoas residentes no Flamengo o Laranjeiras, que sentiram-se por ali, em a mesma data em que foram sentidos os estremecimentos do terra em Paraty e outros lugares, tambem ligeiros estremecimentos.

Figura A.5: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

• (6) Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 08/08/1861

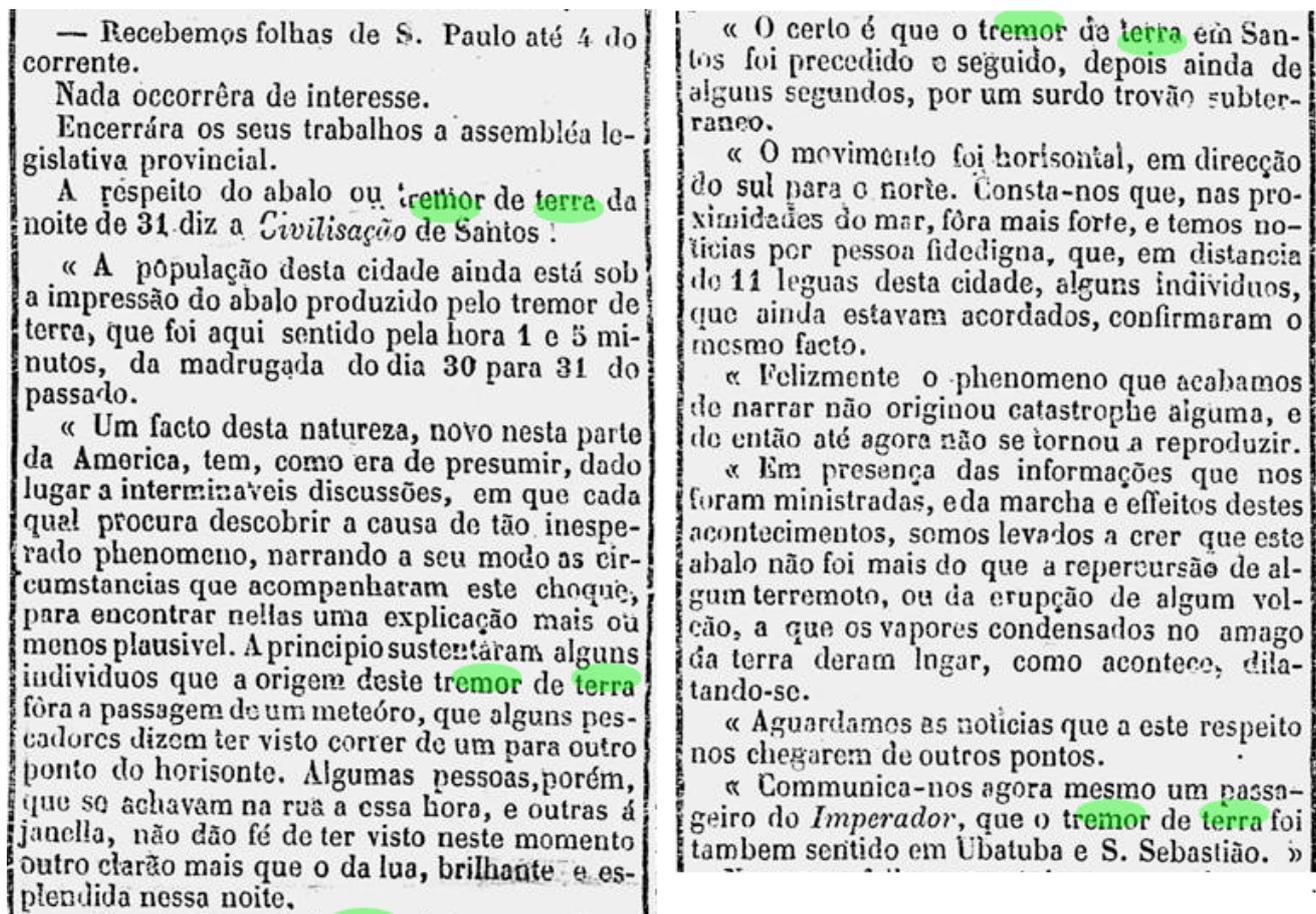


Figura A.6: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (7) Correio Mercantil, Rio de Janeiro, 08/08/1861

Recebemos folhas de S. Paulo até 4 do corrente. As noticias referidas na carta do nosso correspondente desta provincia, e que publicamos hoje no logar competente, temos a accrescentar os seguintes extractos dos jornaes.

Da Civilização de Santos :

- A população desta cidade ainda está sob a impressão do abalo produzido pelo tremor de terra, que foi aqui sentido pela uma hora e 5 minutos da madrugada do dia 30 para 31 do passado.
- Um facto desta natureza, novo nesta parte da America, tem, como era de presumir, dado lugar a innumeráveis discussões, em que cada qual procura descobrir a causa de tão inesperado phenomeno, narrando a seu modo as circumstancias, que acompanháráo este choque, para encontrar nellas uma explicação mais ou menos plausivel. A principio sustentáráo alguns individuos que a origem deste tremor de terra fóra a passagem de um meteoró, que alguns pescadores dizem ter visto correr de um para outro ponto do horizonte. Algumas pessoas, porém, que se achavão na rua á essa hora e outras á

janella, não dão fé de terem visto neste momento outra clarão mais que o da lua, brilhante e esplendida neste noite.

- O certo é que o tremor da terra em Santos foi accedido e seguido depois ainda alguns segundos por um surdo trovão subterraneo.
- O movimento foi horizontal, em direcção do sul para o norte. Consta-nos que, nas proximidades da mar fóra mais forte, e temos noticia por pessoa fiavel que em distancia de 18 leguas desta cidade, alguns individuos que ainda estão acorda los confirmááo o mesmo facto.
- Felizmente o phenomeno, que acabamos de narrar, não originou catastrophe alguma, e de então até agora não se tornou a reproduzir.
- Em presença das informações que nos são ministradas, e da marcha e effeitos deste acontecimento, somos levados a crer que este abalo não foi mais do que a repercussão de algum grande terremoto, ou da erupção de algum volcão, a que os vapores condensados no estrago da terra derão lugar, como acontece, ditatado se.

— A este respeito diz a Revista Commercial de Santos :

- Affirmão algumas pessoas serias que no dia 1.º pelas 7 horas da manhã, sentirão um segundo abalo ou estremecimento em suas casas.
- Por participação do commandante do vapor Imperador, sabemos que em Ubatuba e S. Sebastião, na noite de 30 a 31 do passado, á uma hora houve o mesmo tremor de terra, sem produzir estrago algum que se sentiu nesta cidade, observando-se que o choque partiu do lado do sul.

Figura A.7: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (8) Correio Paulistano, São Paulo e Correio da Tarde, Rio de Janeiro reportaram a mesma a mesma informação, publicada em 04 e 13/08/1861, respectivamente.

Da cidade da Parahybuna escrevem ao Correio Paulistano :

« De hontem para hoje, á meia noite, mais ou menos, houve aqui um tremor de terra que durou alguns segundos, que felizmente não causou damno algum, mas poz em sobresalto toda a população, que nunca presenciou factos desta ordem. Consta-nos igualmente que na freguezia do Rio do Peixe, á 5 leguas de distancia deu-se igual facto.»

Figura A.8: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 encontrada na Biblioteca Mário de Andrade, em SP, no jornal Correio Paulistano. A mesma notícia foi reportada pelo jornal Correio da Tarde e foi encontrada na hemeroteca virtual da Biblioteca Nacional.

- (9) Correio Paulistano, São Paulo, 09/08/1861.

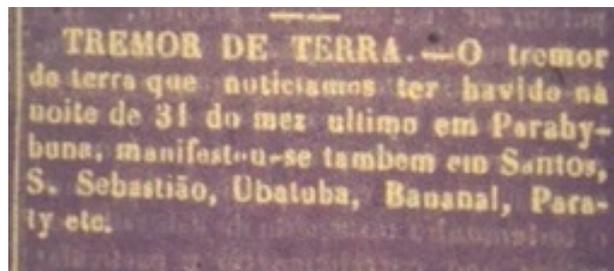


Figura A.9: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 encontrada na Biblioteca Mário de Andrade, em SP, no jornal Correio Paulistano.

- (10) A Actualidade, Rio de Janeiro, 10/08/1861

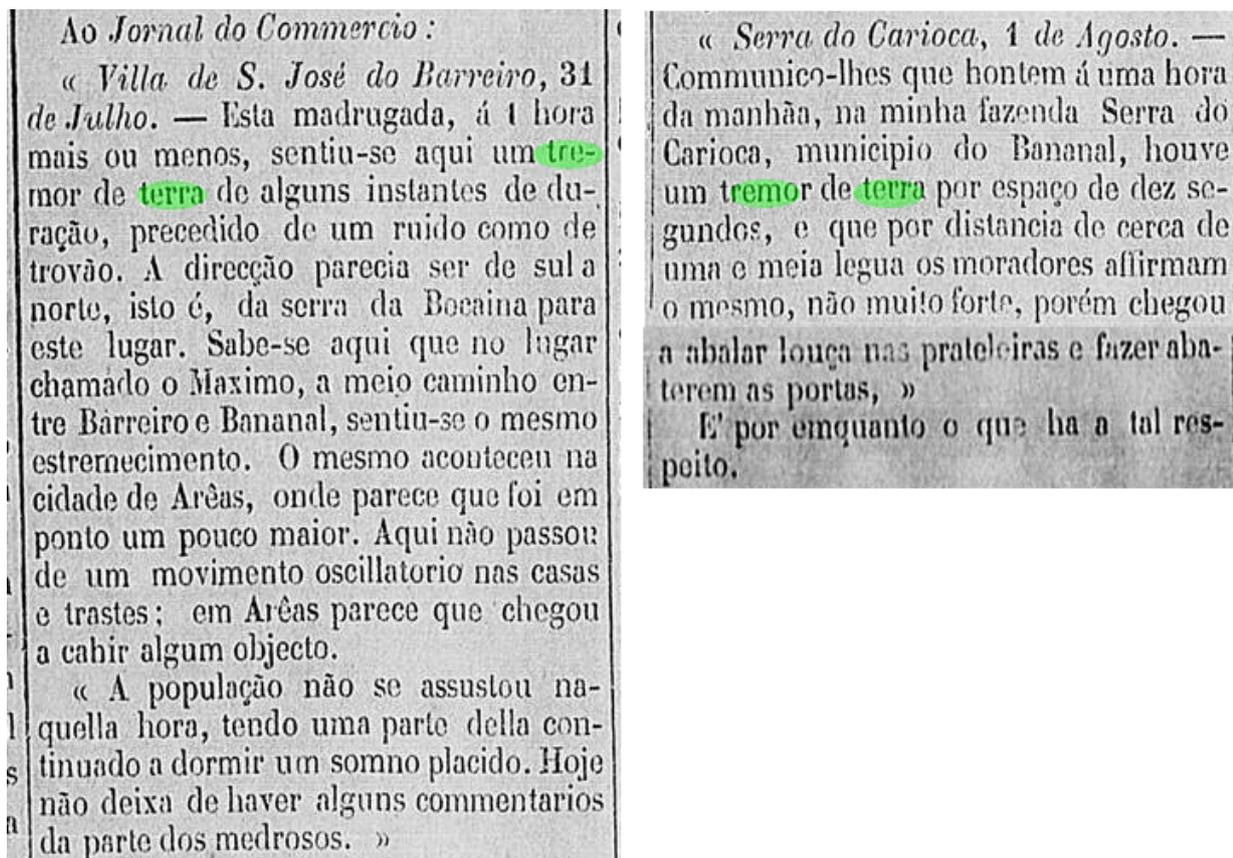


Figura A.10: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

• (11) A Actualidade, Rio de Janeiro, 10/08/1861

« *Cidade do Bananal, 2 de Agosto.*
 — A' 1 hora da madrugada do dia 31 do mez passado, muitos dos habitantes desta cidade foram despertados do somno pacifico, e, possuidos de terror, procuraram fugir de suas habitações. Ouviram um surdo rugido subterraneo, que, pouco a pouco augmentando por espaço de um minuto, constituiu-se tão forte como o rolar do trovão a não mui longa distancia, sendo acompanhado de tremores de terra, a principio ligeiros, e depois mais fortes, até que por ultimo o abalo parecia tornar imminente a ruina das habitações.

« Consta que por todo o municipio sentiu-se o phenomeno com mais ou menos intensidade. Nesta cidade os que o sentiram, lembrados da recente catastrophe da infeliz Mendoza, não puderam mais conciliar o somno durante o resto da noite; de receio de que continuassem os abalos e ficassem sepultados nas ruinas como os habitantes daquella cidade; foi, porém, de curta duração o tremor, que finalisou-se com aquelle ruido, e não teve repetição. »

— A *Civilização*, folha de Santos, dá noticia do tremor de terra do seguinte modo :

« A principio sustentaram alguns individuos que a origem deste tremor de terra fôra a passagem de um meteóro, que alguns pescadores dizem ter visto correr de um para outro ponto do horisonte. Algumas pessoas, porém, que se achavam na rua a essa hora, e outras á janella, não dão fé de ter visto neste momento outro clarão mais que o da lua, brilhante e esplendida nesta noite.

« O certo é que o tremor de terra em Santos foi precedido e seguido depois ainda alguns segundos por um surdo trovão subterraneo.

« O movimento foi horisontal, em direcção do sul para o norte. Consta-nos que, nas proximidades do mar fôra mais forte, e temos noticia por pessoa fidedigna que, em distancia de 11 leguas desta cidade, alguns individuos que ainda estavam acordados, confirmaram o mesmo facto.

Figura A.11: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (12) A Actualidade e Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro reportaram a mesma informação, publicada em 10 e 11/08/1861, respectivamente.

— Lê-se na *Nova Phase* de 1 do corrente :

« Antes de hontem, á uma hora depois da meia noite, um estrondo prolongado de mais de um minuto se fez ouvir nesta cidade ; e por igual espaço de tempo se manifestou um geral tremor de terra. Soubemos hontem que o estrondo partiu do sertão da Japubyba, e que nas casas da fazenda daquelle nome houve louça quebrada e abalo mais sensível. Informam-nos tambem que foi sentido o tremor de terras em Jerumirim e em Jacarehy.

« A existencia de um volcão na Itapesseric da Gambôa da Japubyba nos parece hoje incontestavel : ha alguns annos tem-se observado que dessa Itapesseric,

após horriveis estouros, partem grande^s volumes de pedras, que são lançadas a distancias de quarto de legua, e na noite de ante-hontem ao estrondo geralmente ouvido seguiu-se o tremor de terras que vimos de mencionar. »

Figura A.12: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornais da época.

- (13) Correio Mercantil, Rio de Janeiro e Correio Paulistano, São Paulo reportaram a mesma informação, publicada em 11 e 15/08/1861, respectivamente.

— De Paraty nos escrevem em data de 5 do corrente :

• Tomo a deliberação de escrever estas linhas a Vm. afim de participar-lhe que den-se nesta cidade um phenomeno que atemorizou a maior parte da nossa população.

A's cito horas da noite do dia 30 do mez passado appareceu de E. ao E. um grande clarão, e a uma hora da noite do dia 31 sentiu-se um tremor de terra por espaço de 40 segundos, com tanta força, que acordou a muitas pessoas, e acompanhado de um estfondo surdo, um pouco prolongado, que vinha do Sul. Tudo isto foi notado, quer na cidade quer fóra, em distancia de mais de quatro leguas.

• A mesma oscillação houve no mar, vindo os peixes á tona d'agua, do que resultou haver grande abundancia de peixe nesse dia. Observou-se tambem que o calor foi excessivo da meia noite ás duas horas, e que sobre a madrugada fez bastante frio. Consta-me, Sr. redactor, por pessoa fidedigna, que tambem aconteceu o mesmo nas cidades de Ubatula e Cunha, provincia de S. Paulo.

— Lê-se no *Nova Phase* de Angra dos Reis :

• Antes de hontem (30 do passado) á uma hora depois da meia noite, um estrondo prolongado de mais de um minuto se fez ouvir nesta cidade ; e, por igual espaço de tempo se manifestou um geral tremor de terra. Soubemos hontem que o estrondo partiu do sertão da Japubyba ; e que nas casas da fazenda daquelle nome houve louça quebrada e abalo mais sensível. Informão-nos tambem que foi sentido o tremor em Jerumerim e em Jacarehy.

• A existencia de um volcão na Itapesseric da Gambôa da Japubyba nos parece hoje incontestavel. Ha alguns annos tem-se observado que dessa Itapesseric, após horriveis estouros, partem grandes volumes de pedras, que são lançadas a distancias de quarto de legua ; e na noite de ante-hontem, ao estrondo geralmente ouvido, seguiu-se o tremor de terra.

Figura A.13: Notícia sobre o sismo de 1861 extraída de jornais da época.

- (14) Correio da Tarde, Rio de Janeiro, 12/08/1861

Da Ilha Grande escrevem á *Liga Constitucional*, folha de Angra dos Reis :

« Em a noite de 30 para 31 de Julho, de 1 para 1 1/2 hora, senti o phenomeno do **tremor de terra**. Os Srs. Pedro de Souza Travassos, ex-tenente d'armada, e João Raymundo da Camara Barreto Sobrinho, que aqui se achavam, igualmente o sentiram. O abalo duraria dous segundos, fazendo tremer camas e todos os mais moveis, sendo o tremor acompanhado de um ronco surdo como uma trovoada longinqua; ou o rodar de pesado carro por uma calçada, ouvido de alguma distancia.

« O ronco parecia com o que costuma fazer o principio de um grande tufão ; mas o céu estava estrellado e quasi limpo de nuvens. Indagando de alguns meus vizinhos a 1 milha para O. e a 2 milhas para o Sul muitos sentiram mais o ronco do que o tremor, talvez porque suas habitações são cobertas sobre esteios.»

Figura A.14: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

• (15) Correio Mercantil, Rio de Janeiro, 13/08/1861

<p>— Escrevem-nos da Ilha-Grande o seguinte :</p> <p>• Em a noite de 30 para 31 de julho, de 1 para 1 ½ hora, sentiu-se aqui um tremor de terra. O abalo duraria dous segundos, fazendo tremer camas e todos os mais moveis, sendo o tremor acompanhado de um ronco surdo como uma trovoadá longinqua, ou o rodar de pesado carro por uma calçada, ouvido de alguma distancia ; o céu estava estrellado e quasi limpo de nuvens. In tagando de alguns meus visinhos a uma milha para O. e a duas milhas para o S., muitos sentirão mais o ruido do que o tremor, talvez porque suas habitações são construidas sobre esteios. •</p>	<p>— Da Novo Phase de Angra dos Reis extrahimos o seguinte :</p> <p>• Escrevem-nos de Mangaratiba que no dia 30 do mez passado, á uma hora da noite pouco mais ou menos, ouvirão os habitantes daquella villa um som como o de um ronco de vapor e logo após tremer a terra, a ponto tal que forão abaladas as telhas do trapiche alli existente, causando aos empregado um não pequeno susto.</p> <p>• O mesmo informante nos diz que em S. João do Principe deu-se igual acontecimento, sendo o tremor de terra tão sensível que partiu alguns vidros das vidraças que guarnecem as casas.</p> <p>• Pelo que vemos, o tremor de terra foi geral, e quanto a nós as causas que o occasionarão são desconhecidas.</p> <p>— • Na freguezia de Nambucaba, o tremor de terra foi muito sensível, tornando-se mais pronunciado para o sul, onde até houve o receio de que ascasas desabassem. O tremor foi precedido por um rumor que durou cinco segundos. •</p> <p>— • Escrevem-nos de Paraty que foi alli muito sensível o tremor de terra na noite de 30 do mez findo. Affirmão-nos tambem que ha muitos receios de que se reproduzão as explosões de ha cinco annos na ilha de João de Araujo, da qual desertarão todos os moradores. •</p>
---	--

— • Informão-nos que no Rio Claro o tremor de terra da noite de terça-feira da corrente semana, quebrou as telhas de algumas casas, e durou talvez mais de dous minutos. A' vista destas informações acreditamos que o tremor foi sentido em uma grande zona ao longo desta costa. •

— Recebemos folhas de S. Paulo até 10 do corrente. A Revista Commercial de Santos em data de 6 dá as seguintes noticias:

• Cartas de Iguape, que alcanço a 2 do corrente, nada referem respeito ao tremor de terra.

— Lê-se no Correio Paulistano :

• De uma carta vinda da cidade de Parahybuna, datada de 31 do mez proximo passado e escripta por pessoa fidedigna, extrahimos o seguinte :

• De hontem para hoje, á meia-noite, mais ou menos, houve aqui um tremor de terra, que durou alguns segundos, que felizmente não causou damno algum, mas pôz em sobresalto toda a população, que nunca presenciou factos desta ordem. Consta-nos igualmente que na freguezia do Rio do Peixe, a 5 legoas de distancia, deu-se igual facto. •

Figura A.15: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

• (16) Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 13/08/1861

— Continuam a chegar noticias do tremor de terra da madrugada de 31 do passado.

Da Ilha Grande escrevem á *Liga Constitucional* de Angra dos Reis :

« — Em a noite de 31 de Julho, de 1 para 1 1/2 hora, senti um tremor de terra. Os Srs. Pedro de Souza Travassos, ex-tenente da armada, e João Raymundo da Camara Barreto Sobrinho, que aqui se achavam, igualmente o sentiram. O abalo duraria dous segundos, fazendo tremer camas e todos os mais moveis, sendo o tremor acompanhado de um ronco surdo como uma trovoadá longinqua, cu o r-

dar de pesado carro por uma calçada, ouvido de alguma distancia.

« O ronco parecia com o que costuma fazer o principio de um grande tufão; mas o céu estava estrellado e quasi limpo de nuvens. Indagando de alguns meus vizinhos á uma milha para O. e á duas milhas para o S., muitos sentiram mais o ronco do que o tremor, talvez porque suas habitações são cobertas sobre esteios. »

A-tal respeito diz ainda a *Nova Phase* da mesma localidade:

« — Escrevem-nos de Paraty que foi alli muito sensível o tremor de terra da noite de 31 do mez findo. Afirmam-nos tambem que ha muitos receios de que se reproduzam as explosões de ha cinco annos na ilha de João de Araujo, da qual desertaram todos os moradores. »

« — Informa-nos pessoa do Rio-Claro que o tremor de terra da noite de terça-feira da corrente semana, quebrou as telhas de algumas casas, e durou talvez mais de dous minutos. A' vista destas informações acreditamos que o tremor foi sentido em uma grande zona ao longo desta costa. »

« — Na freguezia de Mambucaba o tremor de terra foi muito sensível, tornando-se mais pronunciado para o sul, onde até houve o receio que as casas desabassem. O tremor foi precedido por um rumor que durou cinco segundos. »

« — Tremor de terra. — De uma carta vinda da cidade de Parahybuna, datada de 31 do mez proximo passado, e escripta por pessoa fidedigna, extrahimos a seguinte :

« De hontem para hoje, á meia noite, mais ou menos, houve aqui um tremor de terra que durou alguns segundos, que felizmente não causou damno algum, mas poz em sobresalto toda a população, que nunca presenciou factos desta ordem. Consta-nos igualmente que na freguezia do Rio do Peixe, á 3 leguas de distancia deu-se igual facto. »

« — Tremor de terra. — O tremor de terra que noticiámos ter havido na noite de 31 do mez ultimo em Parahybuna, manifestou-se tambem em Santos, S. Sebastião, Matuba, Banaual, Paraty etc. »

Figura A.16: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (17) Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 15/08/1861.

— Escrevem-nos da Barra-Mansa que ahí também foi sentido o tremor de terra na madrugada de 30 para 31 do passado. A ondulação porém foi rápida e menos sensível que a observada no Bananal, Rio-Claro, e outros lugares.

Figura A.17: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (18) Correio Mercantil, Rio de Janeiro, 16 e 17/08/1861

— O *Mosaico* de Guaratinguetá dá as seguintes notícias :

- Na madrugada de 31 houve nesta cidade um ligeiro tremor de terra. Era uma hora, pouco mais ou menos, quando principiou, e durou poucos instantes.
- Sentia-se perfeitamente a terra mover-se e com ella as casas e objectes. Ouviu-se nessa occasião um rumor forte como o éco de um trovão, que foi gradualmente extinguindo-se.
- Foi a primeira vez que nesta cidade deu se um facto desta ordem, e por isso, como era natural, impressionou a todos.

Figura A.18: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (19) Correio da Tarde, Correio Mercantil e A Actualidade reportam a mesma informação, publicada em 16, 27 e 28/08/1861, respectivamente.

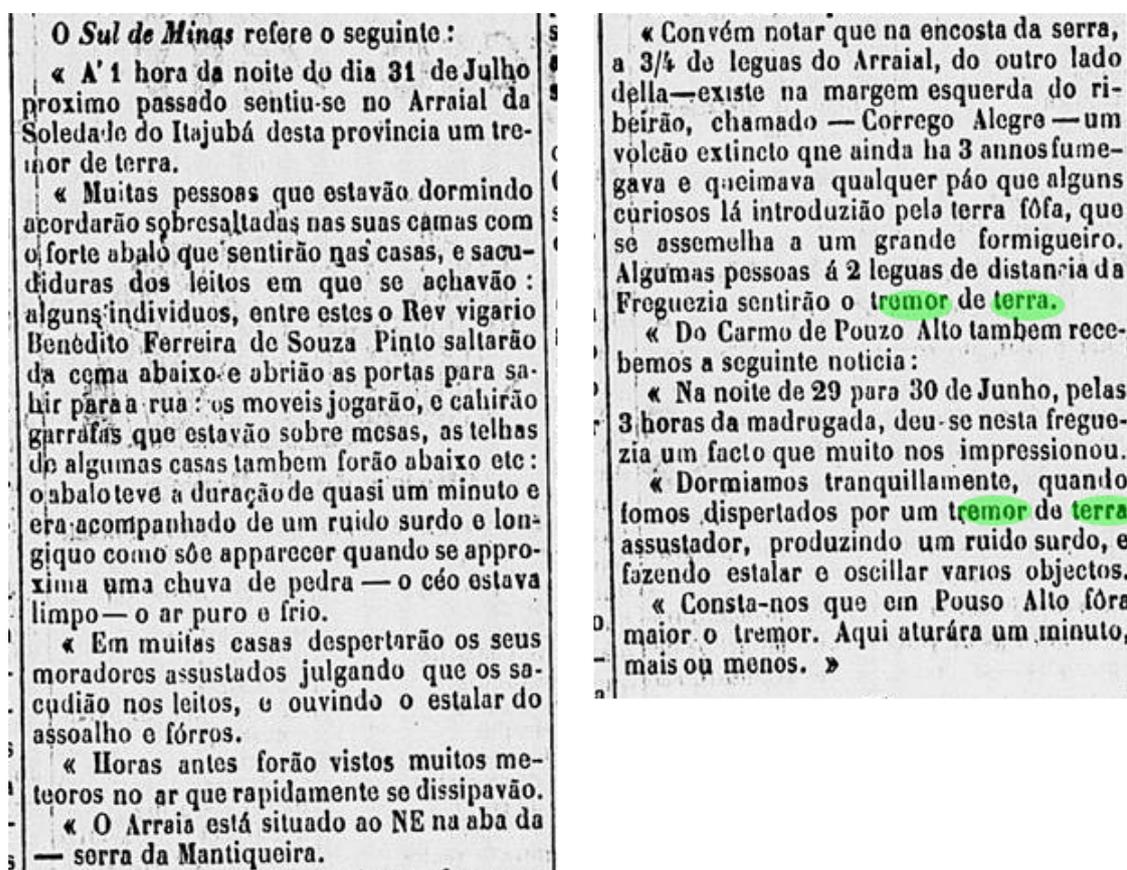
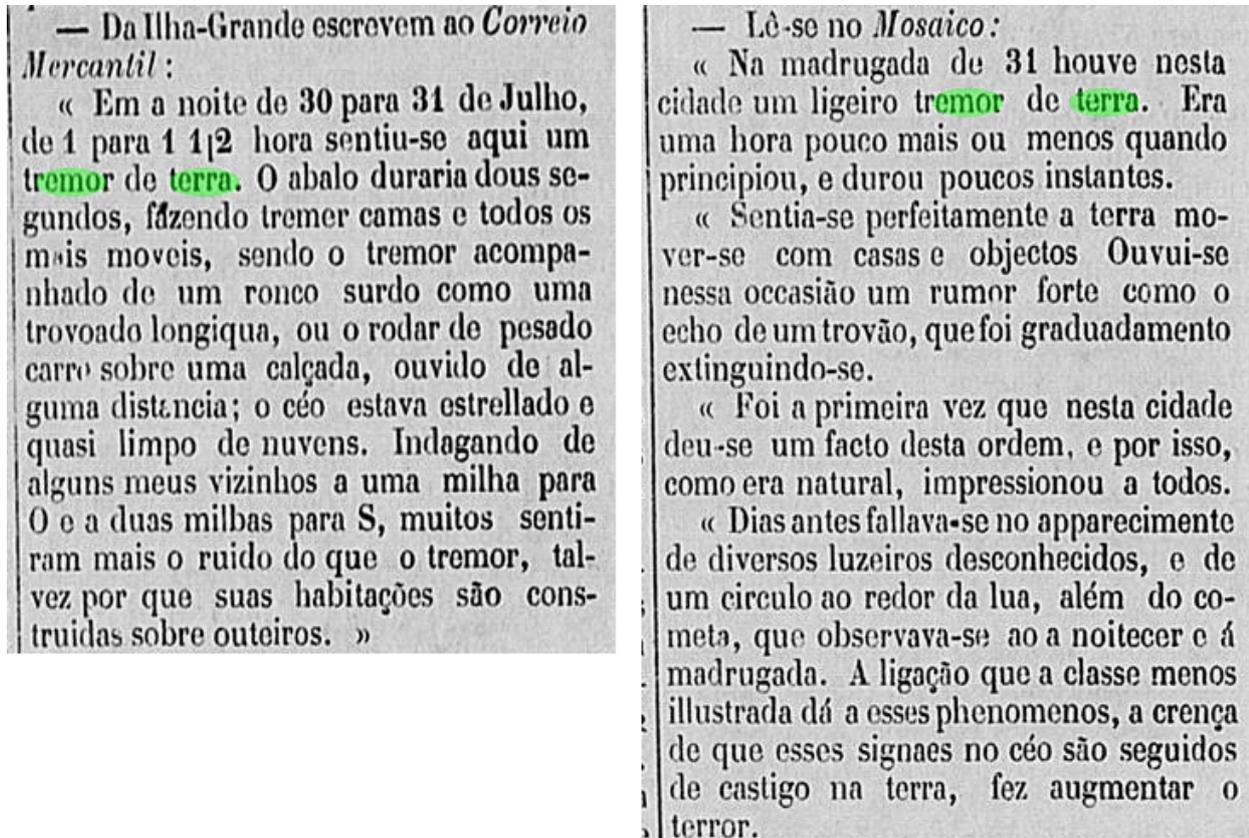


Figura A.19: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornais da época.

• (20) A Actualidade, Rio de Janeiro, 17/08/1861



« Em Lorena observou-se á mesma hora o phenomeno, e dizem-nos que tambem assim succedeu em Pindamonhagaba, Itajubá e Silveiras.

« Felizmente o terremoto não causou prejuizos, mas praza a Deos que não se repita, porque nossos edificios frageis como são não poderão supportar um abalo pouco mais violento que o da madrugada de 31, e nem mesmo iguale a sua duração for por alguns minutos. »

Figura A.20: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (21) Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 27/08/1861

— Do *Sul de Minas*, jornal da Campanha, extraímos o seguinte :

« A' 1 hora da noite do dia 31 de julho proximo passado sentiu-se no arraial da Soledade de Itajubá um tremor de terra.

« Muitas pessoas, que estavam dormindo, acordarão sobresaltadas nas suas camas com o forte abalo que sentirão nas casas e nos leitos em que se achavão: alguns individuos, entre estes o Rv. vigario Benedito Ferreira de Souza Pinto, saltarão da cama e abrirão as portas para sair para a rua; os moveis jogarão, e cairão garrafas que estavam sobre mesas, telhas de algumas casas tambem forão abaixo, etc.; o abalo durou quasi um minuto e foi acompanhado de um ruido surdo e longinquo, como sóe apparecer quando se approxima uma chuva de pedras - o céu estava limpo — o ar puro e frio.

« Em muitas casas despertarão os seus moradores assustados, julgando que os sacudião nos leitos e ouvindo o estalar do assoalho e forros.

« Horas antes forão vistos muitos meteoros no ar que rapidamente se dissipavão.

« O arraial está situado ao NE na aba da serra da Mantiqueira.

« Convém notar que na encosta da serra, a tres quartos de leguas do arraial, do outro lado existe na margem esquerda do ribeirão, chamado—Corrego Alegre —um volcão extincto que ainda ha tres annos fumegava e queimava qualquer pão que alguns curiosos lá introduzião pela terra fôra, que se assemelha a um grande formigueiro. Algumas pessoas a duas leguas de distancia da freguezia sentirão o tremor de terra.

« Do Carmo de Pouso Alto tambem recebemos a seguinte noticia :

« Na noite de 29 para 30 de junho, pelas 3 horas da madrugada, deu-se nesta freguezia um facto que muito nos impressionou :

« Dormiamos tranquillamente, quando fomos despertados por um tremor de terra assustador, produzindo um ruido surdo, e fazendo estalar e oscillar varios objectos.

« Consta nos que em Pouso Alto fôra maior o tremor. Aqui durou um minuto mais ou menos. »

Figura A.21: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (22) Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 28/08/1861

— A respeito do tremor de terra de 31 de Julho escreviam de Guaratinguetá ao collega da *Imprensa Paulista* :

« Tivemos aqui esta madrugada, á 1 1/4 hora, um violento tremor de terra. Ouvio-se primeiramente um estrondo como de um carro correndo sobre uma calçada; depois começou a tremer a terra. Por momentos, pensei que ia desmoronar-se a casa que habito; parecia que um gigante a abalava desde seus fundamentos até o tecto. Eu só velava em casa á essa hora; foram entretanto tão fortes os movimentos que todos os outros, á excepção de um escravo, acordaram sobressaltados. O mesmo aconteceu em todas as outras casas. Em muitas cahiram os objectos que estavam pendurados aos cabides ou encostados ás paredes; moveis tripudiavam; as louças, os ferrolhos das portas e outros objectos davam um ruido serachante ao que se ouve ás vezes na camara de um navio. Felizmente o phenomeno durou apenas cerca de 4 segundos. Abri a janella. A noite estava escura, mas podiam distinguir-se no firmamento nuvens negras e de fórma alongada. Ouvio-se ainda durante algum tempo um som rouco e forte, como de uma chuva de pedras que se approxima. Ventava S. ou SO. »

« Creio que o phenomeno não se fez sentir simultaneamente em todos os pontos, e que elle caminhava na direcção de S. a N. O certo é que elle foi sentido mais ou menos com a mesma intensidade, e talvez momentos antes, na capella da Aparecida e Roseira, que nos ficam ao S., ao passo que nos bairros do Paiol a E., e do Piahy a O., ou não foi sensivel, ou passou quasi desaperecebido. »

Figura A.22: Notícia sobre o sismo de 31/07/1861 extraída de jornal da época.

- (23) Diário do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 18/09/1861

INTERIOR.

Provincia do Rio de Janeiro.

— REZENDE, 11 DE SETEMBRO. — *Carta do correspondente.* — Meu caro redactor. — Apro-

Mais vale tarde do que nunca; também nesta cidade sentio-se o tremor de terra da noite de 31 de Julho findo, ás mesmas horas, que em outros lugares se mencionou.

Figura A.23: Notícia sobre o sismo de 1861 extraída de jornal da época.

Estado de São Paulo

Areias - “Jornal do Commercio: Vila de S. José do Barreiro, 31 de Julho: Parece que chegou a cair algum objeto.” (10)

Bananal - “Serra do Carioca, 1 de Agosto - Comunico-lhes que hontem á uma hora da manhã, na minha fazenda Serra do Carioca, municipio do Bananal, houve um tremor de terra por espaço de dez segundos, e que por distancia de cerca de uma e meia legua os moradores affirmam o mesmo, não muito forte, porém chegou a abalar louça nas prateleiras e fazer abaterem as portas.” (10)

Bananal - “Cidade do Bananal, 2 de Agosto - À 1 hora da madrugada do dia 31 do mez passado, muitos dos habitantes desta cidade foram despertados do somno pacifico e, possuidas de terror, procuraram sair de suas habitações. Ouviram um surdo rugido subterraneo, que, pouco a pouco augmentando por espaço de um minuto, constituiu-se tão forte como o rolar do trovão a não mui longa distancia, sendo acompanhado de tremores de terra, a principio ligeiros, e depois mais fortes, até que por ultimo o abalo parecia tornar imminente a ruina das habitações.” (11)

Bananal - “Da cidade do Bananal escrevem-nos o seguinte em data de 2 do corrente: De 1 para 2 horas da referida noite, ouviu-se um ruido surdo, subterraneo, que pareceu provir da parte do sul, ao qual não tardou em succeder um estremecimento terrestre tão pronunciado que despertou muitas pessoas que já dormião, e tão duradouro que estes mesmos individuos tiverão ainda tempo para aprecia-lo distintamente: as casas abalarão-se em sua totalidade, saltando os trastes sobre o pavimento, tinindo os vidros e louças, estallando as telhas e cahindo porções de reboque de algumas paredes.” (2)

Guaratinguetá - “Lê-se no Mosaico de Guaratinguetá: Na madrugada de 31 houve nesta cidade um ligeiro tremor de terra. Era uma hora pouco mais ou menos quando principiou, e durou poucos instantes. Sentia-se perfeitamente a terra mover-se com casas e objectos.” (18)

Guaratinguetá - “Escreviam de Guaratinguetá ao collega da *Imprensa Paulista*: Tivemos aqui esta madrugada, á 1 1/4 hora, um violento tremor de terra. Ouvio-se primeiramente um estrondo como de um carro correndo sobre uma calçada; depois começou a tremer a terra. Por momentos, pensei que ia desmoronar-se a casa que habito; parecia que um gigante a abalava desde seus fundamentos até o tecto. Eu só velava em casa á essa hora; foram entretanto tão fortes os movimentos que todos os outros, á excepção de

um escravo, acordaram sobressaltados. O mesmo aconteceu em todas as outras casas. Em muitas cahiram os objectos que estavam pendurados aos cabides ou encostados ás paredes; moveis tripudiavam; as louças, os ferrolhos das portas das portas e outros objectos davam um ruído semelhante que ao que se ouve ás vezes na camara de um navio. Felizmente o phenomeno durou apenas cerca de 4 segundos. O certo é que elle foi sentido mais ou menos com a mesma intensidade, e talvez momentos antes, na capella da Apparecida e Roseira.” (22)

Paraibuna - “Da cidade da Parahybuna escrevem ao Correio Paulistano: De ontem para hoje, á meia noite, mais ou menos, houve aqui um tremor de terra que durou alguns segundos, que felizmente não causou damno algum, mas poz em sobressalto toda a população.” (8)

Paraibuna - “De uma carta vinda da cidade de Parahybuna, datada de 31 do mês próximo passado, e escrita por pessoa fidedigna, extraímos o seguinte: De ontem para hoje, à meia noite, mais ou menos, houve aqui um tremor de terra que durou alguns segundos, que felizmente não causou dano algum, mas pôs em sobressalto toda a população.” (15)

Vila de São José do Barreiro - “Ao Jornal do Commercio: Vila de S. José do Barreiro, 31 de Julho. Esta madrugada, á 1 hora mais ou menos, sentiu-se aqui um tremor de terra de alguns instantes de duração. A direcção parecia ser de sul a norte. O mesmo aconteceu na cidade de Arêas, onde parece que foi em ponto um pouco maior. Aqui não passou de um movimento oscillatorio nas casas e trastes.” (10)

Santos - “A Civilização, folha de Santos: O movimento foi horisontal, em direcção do sul para o norte. Consta-nos que, nas proximidades do mar fôra mais forte. Felizmente o phenomeno que acabamos de narrar não originou catastrophe alguma.” (6) (7) (11)

Estado do Rio de Janeiro

Angra dos Reis - “Lê-se na Nova Phase de 1 do corrente: Antes de hontem, á uma hora depois da meia noite, um estrondo prolongado de mais de um minuto se fez ouvir nesta cidade; e por igual espaço de tempo se manifestou um geral tremor de terra.” (12)

Ilha Grande - “Da Ilha-Grande escrevem no Correio Mercantil: Em a noite de 30 para 31 do Julho, de 1 para 1 1/2 hora sentiu-se aqui um tremor do terra. O abalo duraria dous segundos, fazendo tremer camas e todos os mais moveis, sendo o tremor acompanhado do um ronco surdo como uma trovoada longiqua, ou o rodar de pesado carro sobre uma

calçada, ouvido de alguma distancia.” (14) (16) (20)

Japuíba - “Lê-se na Nova Phase de 1 do corrente: Soubemos ontem que o estrondo partiu do sertão da Japuhya, e que nas casas da fazenda daquelle nome houve louça quebrada e abalo mais sensível.” (12)

Paraty - “De Paraty em data de 31 do passado: Pela 1 hora da madrugada, achava-me ainda acordado, quando eu e alguns amigos que comigo estavam, sentimos abalar-se toda a casa, que estalava muito sensivelmente, desprendendo-se do tecto fragmentos de calça e tremendo tudo em torno de nós. Esse tremor era acompanhado de um rumor surdo e rouquenho semelhante ao do trovão longiquo, ou ao rodar de um carro veloz ao longe, tudo isto durou de 8 a 10 segundos. Em algumas casas chegarão a bater as portas interiores que estavam abertas, em outras cahirão vasos.” (2) (3)

Paraty - “De Paraty nos escrevem em data de 5 do corrente: a uma hora da noite do dia 31 sentiu-se um tremor de terra por espaço de 40 segundos com tanta força, que acordou a muitas pessoas, e acompanhado de um estrondo surdo, um pouco prolongado, que vinha do Sul. Tudo isto foi notado, quer na cidade quer fora, em distância de mais de quatro léguas.” (13)

Pouso Seco - “De Pouso Seco, 07/08/1861: Na noite de 31 do passado houve um tremor de terra mais forte em uns logares do que em outros. Em nossa propriedade o tremor chegou a derrubar a louça dos armários, desconjuntar portas e abalar ainda que pouco a casa.” (5)

Rio Claro - “A Nova Fase: Informa-nos uma pessoa do Rio Claro que o tremor de terra da noite de terça-feira da corrente semana, quebrou as telhas de algumas casas, e durou talvez mais de dois minutos. A vista destas informações acreditamos que o tremor foi sentido em uma grande zona ao longo desta costa.” (16)

S. João do Príncipe - “Novo Phase de Angra dos Reis: sendo o tremor de terra tão sensível que partiu alguns vidros das vidraças que guarnecem as casas.” (15)

Estado de Minas Gerais

Itajubá - “Do Sul de Minas, jornal da Campanha: Á 1 hora da noite do dia 31 do Julho proximo passado sentiu-se no arraial da Soledade do Itajubá desta provincia um tremor de terra. Muitas pessoas que estavam dormindo acordarão sobresaltadas nas suas camas com o forte abalo que sentirão nas casas, e sacudiduras dos leitos em que se achavão. Alguns

indivíduos saltarão da cama abaixo e abrirão as portas para sair para a rua: os móveis jogarão, e cairão garrafas que estavam sobre mesas, telhas de algumas casas também cairão abaixo, etc: o abalo teve a duração de quase um minuto e era acompanhado de um ruído surdo e longo como se aparecesse quando se aproxima uma chuva de pedras. Em muitas casas despertaram os seus moradores assustados julgando que os sacudidos nos leitos, e ouvindo o estalar do assoalho e forros.” (19) (21)

Pouso Alto - “Do Carmo de Pouso Alto: Na noite de 29 para 30 de junho, pelas 3 horas da madrugada, deu-se nesta freguesia um fato que muito nos impressionou: Dormíamos tranquilamente, quando fomos despertados por um tremor de terra assustador, produzindo um ruído surdo, e fazendo estalar e oscilar vários objetos. Durou um minuto mais ou menos.” (19) (21)

Tabela A.1 - Localização de cada cidade em que o sismo de 1861 foi sentido e o valor de intensidade correspondente.

Cidade	Latitude	Longitude	Intensidade (MM)
Angra dos Reis (RJ)	-23.01	-44.32	III
Aparecida (SP)	-22.85	-45.23	IV
Areias (RJ)	-22.58	-44.70	IV
Bananal (SP)	-22.68	-44.33	IV-V
Barra Mansa (RJ)	-22.54	-44.18	F
Boraceia (SP) - (Mello, 1881)	-22.19	-48.78	F
Bragança (SP) - (Mondello, 1933)	-22.95	-46.54	IV
Campanha (MG)	-21.84	-45.41	NF
Campinas (SP) - (Mondello, 1933)	-22.91	-47.06	IV
Cristina (MG) - (Mondello,1933)	-22.21	-45.26	IV
Cunha (SP)	-23.07	-44.96	F
Guaratinguetá (SP)	-22.81	-45.19	IV
Iguapé (SP)	-24.71	-47.56	NF
Ilha Grande (RJ)	-23.15	-44.23	IV
Itajubá (MG)	-22.42	-45.46	V-VI
Jacareí (SP)	-23.30	-45.97	F
Japuíba (RJ)	-22.97	-44.30	V
Jerumirim (RJ)	-22.93	-44.32	V
Lorena (SP)	-22.73	-45.12	F
Mambucaba (RJ)	-23.01	-44.54	F
Mangaratiba (RJ)	-22.96	-44.01	F
Paraibuna (SP)	-23.39	-45.66	IV
Paraty (RJ)	-23.22	-44.72	V
Pindamonhangaba (SP)	-22.93	-45.46	F
Pouso Alto (MG)	-22.20	-44.97	IV
Pouso Seco (RJ)	-22.69	-44.15	V
Resende (RJ)	-22.47	-44.45	F
Rio Claro (RJ)	-22.73	-44.13	V
Rio de Janeiro (RJ) - (Mondello, 1933)	-22.91	-43.17	III
Rio do Peixe (SP)	-23.00	-48.14	F
Roseira (SP)	-22.94	-45.31	IV
Santa Isabel do Rio Preto (RJ) - (Mello, 1881)	-22.23	-44.07	F
Santos (SP)	-23.96	-46.33	IV
São João do Príncipe (RJ)	-22.80	-44.03	V
São José do Barreiro (SP)	-22.64	-44.58	IV
São Paulo (SP) - (Albini, ppt)	-23.55	-46.63	III
São Sebastião (SP)	-23.81	-45.40	F
Silveiras (SP)	-22.67	-44.85	F
Ubatuba (SP)	-23.43	-45.08	F

A.2 Registros históricos sobre o sismo de 1950

Fonte

- (1) Diário da Noite, São Paulo, 27/02/1950

Forte abalo sentido em toda região que abrange os municípios de Casa Branca e São João da Boa Vista - SP e Poços de Caldas - MG, durando alguns segundos. Em Casa Branca e São João da Boa Vista a população saiu às ruas assustada. Em Águas da Prata e Poços de Caldas teria sido mais forte. Em Poços de Caldas "ruíram prateleiras de casas comerciais e bares, despejando-se as mercadorias. Não houve vítimas nem desabamentos. Berrocal et al. (1984).

- (2) Jornal de Notícias, São Paulo, 28/02/1950

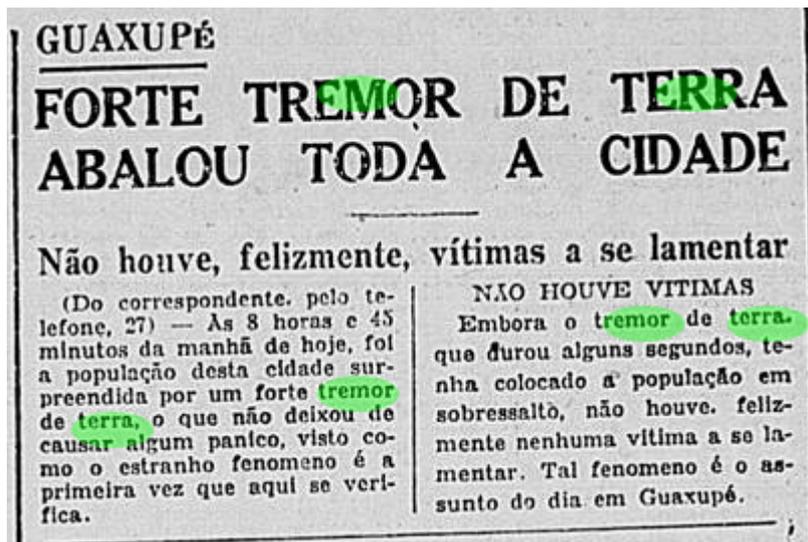


Figura A.24: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (3) A Noite, Rio de Janeiro, 28/02/1950

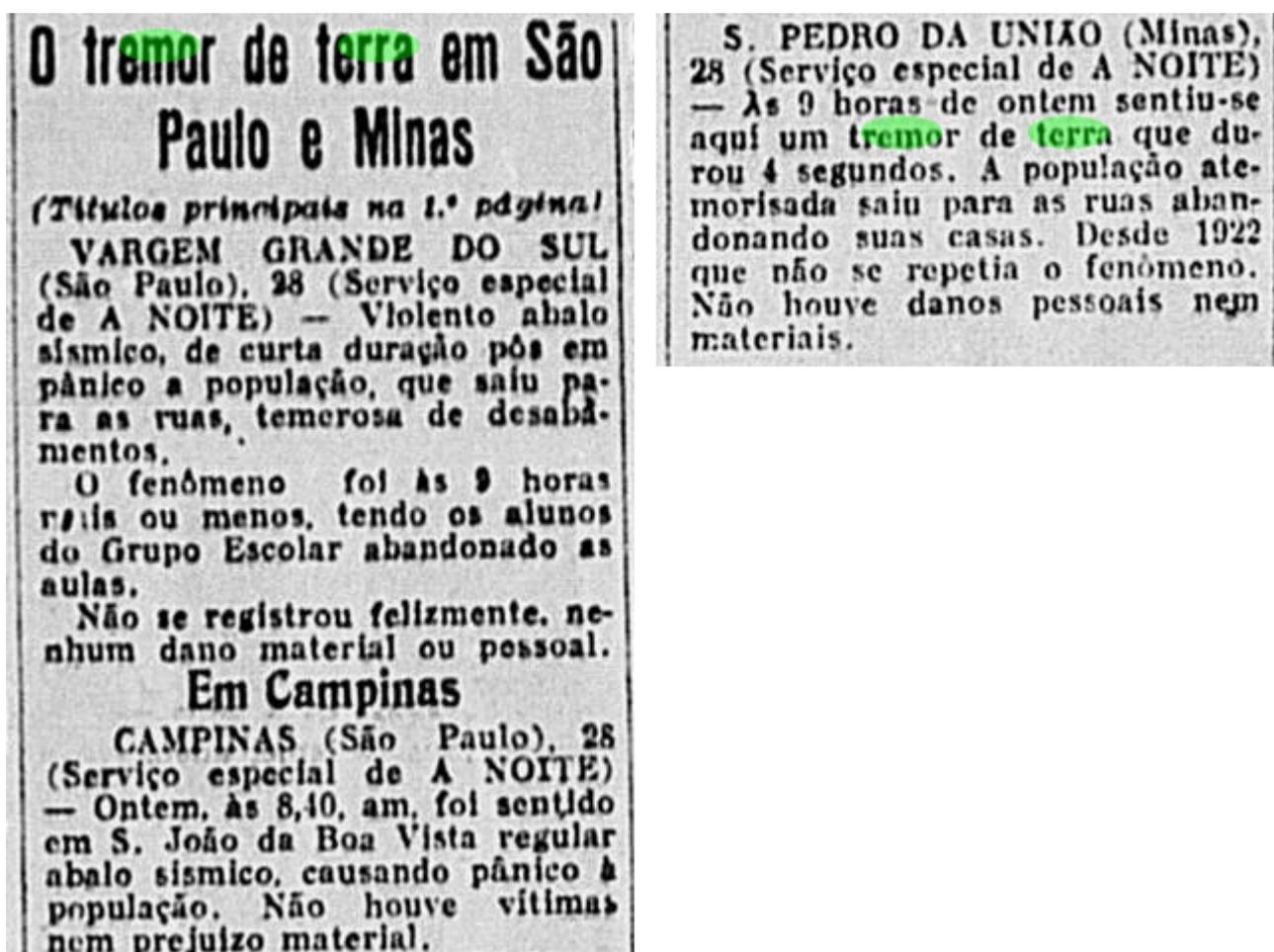


Figura A.25: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (4) Diário da Noite, Rio de Janeiro, 28/02/1950

Tremeu a terra em vastas regiões de Minas Gerais e São Paulo

Populações inteiras tomadas de pânico — Em Itoibi o povo saiu para as ruas em manifestações de pavor — Não há vítimas a lamentar

DEZ SEGUNDOS DE DURAÇÃO

S. PAULO, 27 (Meridional) — Vasta área do território paulista e uma pequena faixa do território de Minas foram surpreendidas, na manhã de ontem por um tremor de terra que variou entre dois e dez segundos de duração. A população das cidades atingidas pelo fenômeno foi tomada de quase pânico, conforme se depreendeu dos comentários passados pelos correspondentes do "Diário de São Paulo", pois é certo que toda uma geração paulista, desconhecida p.r. completo o fenômeno. Apenas em algumas localidades, entretanto, se verificaram casos de vidrucas partidas ou quedas de utensílios, pois o tremor não teve longa duração nem grande intensidade.

FAVOR POPULAR EM ITOIBI

ITOIBI, São Paulo, 28 (Meridional) — Tremeu ontem a terra deste Município durante dois segundos aproximadamente. O fenômeno foi imediatamente seguido pelo povo que saiu para as ruas manifestando pavor de maiores consequências. Todavia, não houve vítimas nem danos.

EM S. CARLOS

S. CARLOS, 28 (Meridional) — O povo dessa cidade não tomou conhecimento senão pelo noticiário das emissoras paulista do tremor de terra que alarmou uma grande área do nosso Estado e de Minas. Entretanto, pessoas que trabalhavam nos Edifícios do Fórum e da

(Continúa na 6ª pág. — Letra B)

Prefeitura, pela manhã de ontem, perceberam que pequeno tremor moveu os Edifícios citados, fato que apenas foi rapidamente comentado. Em face das notícias chegadas depois, as pessoas que sentiram o fenômeno chegaram à conclusão de que o leve tremor dos móveis e, especialmente, das paredes, deviam relacionar-se com o tremor que se verificou na zona da Casa Branca.

FRACO TREMOR EM POÇOS DE CALDAS

POÇOS DE CALDAS, 28 (Meridional) — Durante 10 segundos tremeu ontem a terra, fenômeno que se iniciou precisamente, às 19 e 10 horas. O tremor, entretanto, foi fraco, o que não permitiu que a população se manifestasse excessivamente alarmada.

ALARMA EM S. JOSE' DO RIO PARDO

S. JOSE' DO RIO PARDO, 28 (Meridional) — Durante meio segundo apenas tremeu ontem pela manhã a terra, fato que provocou verdadeiro alarma entre os habitantes da cidade.

Figura A.26: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (5) Folha da Manhã, São Paulo, 28/02/1950

Tremeu a terra no interior paulista

VARIAS CIDADES SACUDIDAS POR ABALOS SISMICOS -- NÃO SE REGISTROU, ENTRETANTO, NENHUMA VITIMA

Em varias cidades do interior verificaram-se ontem, pela manhã, abalos sismicos que sobressaltaram as populações. Não teve o fenomeno, entretanto, muita intensidade nem duração, não

ocasionaram vitimas pessoais nem grandes prejuizos. Em algumas delas, entretanto, o povo, tomado de panico, saiu à rua a gritar e a correr, temendo repetições desastrosas. Apenas em Caconde, segundo nos comunicam nossos correspondentes, o fenomeno se repetiu, mas com muito menor impeto. Eis as noticias que nos chegam dos nossos agentes:

Em Caconde

CACONDE, 27 (Correspondente) — A população desta cidade foi hoje surpreendida por um tremor de terra, que

(Conclui na 3.a pag. deste cad.)

Tremen a terra no interior paulista

★ (Conclui. da 1.a pag. deste cad.)

teve a duração de meio minuto. Partiram-se vidracas de algumas casas e racharam as paredes de outras. Vieram abaixo utensilios de cozinha e objetos suspensos nas residencias. Não houve vitimas pessoais e os prejuizos se consideram pequenos.

O povo, tomado de panico, saiu a correr para as ruas. Momentos depois, o fenomeno se repetiu, embora com menor intensidade.

Poços de Caldas

POÇOS DE CALDAS, 27 (Correspondente) — Às 8 h 40 de hoje ocorreu aqui ligeiro abalo sismico, que talvez tenha durado uns dez segundos. Não se verificaram vitimas pessoais nem prejuizos materiais.

Noticias provindas de Botelhos, Muzambinho, São José do Rio Pardo, Campestre e Aguias de Prata revelam que também essas cidades foram abaladas por tremores de terra, mas sem gravidade.

Geologos que se encontram atualmente em Poços de Caldas fizeram declarações, attribuindo o fenomeno a deslocamento espontaneo de rochas, em lugares que poderiam ser brevemente localizados.

São João da Boa Vista

SÃO JOÃO DA BOA VISTA, 27 (Correspondente) — Leve tremor de terra registrou-se hoje nesta cidade. Não há vitimas nem danos materiais. A ocorrência, que durou por alguns segundos, atingiu toda a região circunvizinha. A população não se mostrou alarmada.

Pinhal

PINHAL, 27 (Correspondente) — Ligeiro tremor de terra verificou-se nesta cidade, hoje, às 9 horas. Não houve vitimas nem prejuizos. A população mantém-se calma.

Vargem Grande do Sul

VARGEM GRANDE DO SUL, 27 (Correspondente) — Forte e rapido abalo sismico ocorreu hoje, às 9 horas, nesta cidade, sem causar danos nem vitimas pessoais. Apesar disso, a população foi tomada de panico.

Monsanto

MONSANTO, 27 (Correspondente) — Verificou-se hoje nesta cidade, às 9 horas, ligeiro tremor de terra, observado também em diversos pontos do municipio. Não houve danos.

Figura A.27: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (6) O Globo, Rio de Janeiro, 28/02/1950

<h2>A TERRA TREMEU em varias regiões de S. Paulo e Minas</h2>	<p>BELO HORIZONTE, 28 (Especial para O GLOBO) — Verificou-se ontem, em Areado, no sul de Minas, um tremor de terra que durou vinte segundos. O fenômeno, que já se havia manifestado domingo, embora com menor intensidade, causou sobressalto à população, mas não fez nenhuma vítima pessoal nem provocou danos materiais.</p> <p>Tambem em Poços de Caldas, Pinhal, Vargem Grande, Aguas da Prata e outras foi sentido o abalo cismico.</p>
<p>Não houve, porem, nem vítimas nem danos materiais</p>	
<p>SÃO PAULO, 28 (Especial para O GLOBO) — Confirma-se hoje, que, numa extensa zona que compreende a media Mogiana, foram sentidos tremores de terra, na manhã de ontem. Parece que a localidade que sentiu mais nitidamente o fenômeno, foi Caconde. De outra parte, do interior, como Botelho, Casa Branca, São José do Rio Pardo e Itobi, chegam notícias do mesmo teor. Houve grande alarma das populações dessas cidades, não se registrando, porem, danos materiais nem vítimas.</p>	
<p>Tambem em São Carlos e São João da Boa Vista, que estão fora daquela zona, situando-se na Paulista, informa-se igualmente que houve tremores de terra por volta das 9 horas. A terra chegou a tremer sensivelmente, não havendo, porem, desabamentos.</p>	

Figura A.28: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (7) A manhã, Rio de Janeiro, 01/03/1950



Figura A.29: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (8) Correio da Manhã, Rio de Janeiro, 01/03/1950

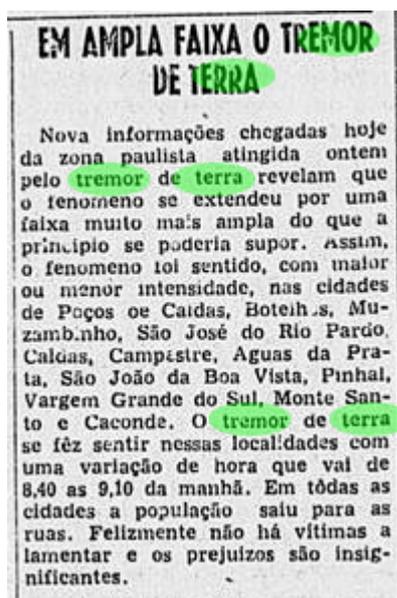


Figura A.30: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (9) Diário da Noite, Rio de Janeiro, 01/03/1950

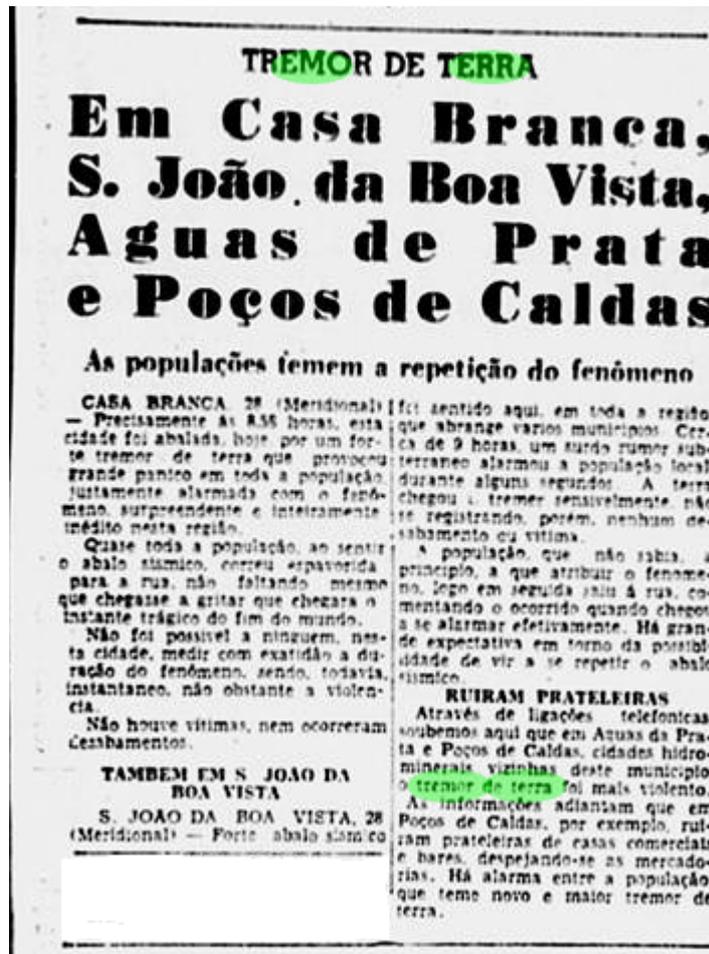


Figura A.31: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (10) Diário de Notícias, Rio de Janeiro, 01/03/1950



Figura A.32: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (11) Gazeta de Notícias, Rio de Janeiro, 01/03/1950

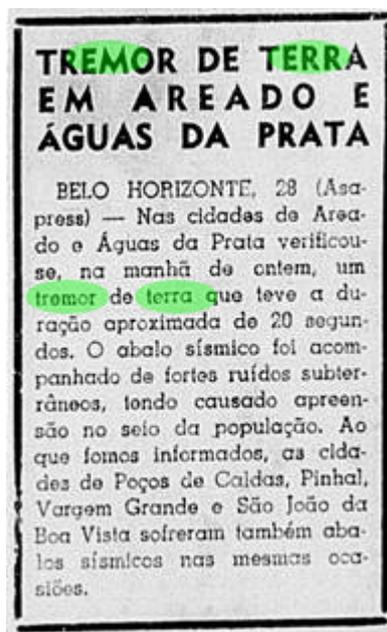


Figura A.33: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (12) Jornal de Notícias, São Paulo, 04/03/1950

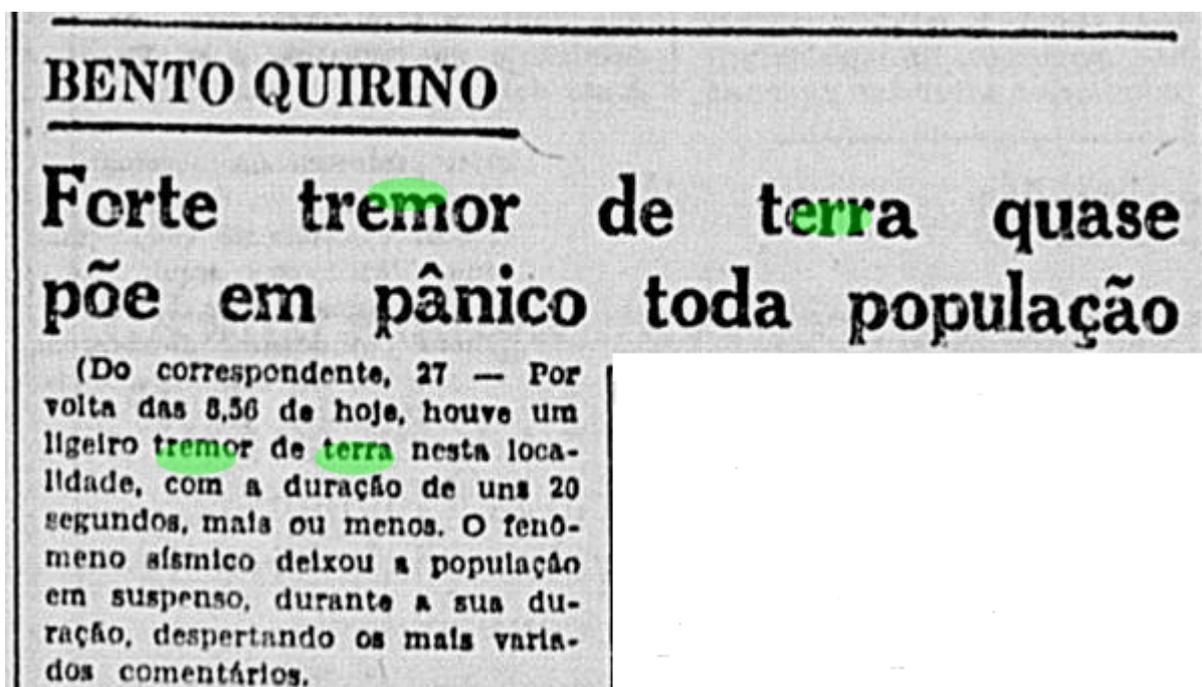


Figura A.34: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (13) Jornal de Notícias, São Paulo, 05/03/1950

TREMOR DE TERRA — Esta cidade foi hoje alarmada pelas 9 horas da manhã, com um generalizado tremor de terra. Em muitas casas, o fenómeno derrubou louças das prateleiras nas cozinhas, fendeu paredes, derrubou telhas à beira dos telhados e etc. Assustou o povo todo mas, nada houve de grave. Apenas muito susto e muito comentário pelas ruas e praças da cidade.

Figura A.35: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- (14) Jornal de Notícias, São Paulo, 08/03/1950

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

ABALO SISMICO
(Do correspondente, 1) — Segunda-feira última, poucos minutos antes das 9 horas da manhã, a nossa cidade foi sacudida por um abalo sísmico, durante dois segundos, mas suficientemente perceptível, pois chegou a produzir o conhecido tremor do solo, fazendo trepidar durante o fenómeno edifícios e móveis.

Com exceção da natural apreensão que o fenómeno provocou, não foi constatado dano de qualquer espécie.

Foi, o abalo sísmico, motivo para o assunto do dia, provocando a curiosidade coletiva do ponto de partida. Entretanto, pela zona abalada, se percebe que atingiu uma área que parte de Mogi Mirim a Ribeirão Preto e Guaxupé.

As grandes chuvas, a penetração de água no subsolo, pode ser a causa do fenómeno, o deslocamento de uma massa respeitável do solo, provocando o tremor tão perfeitamente notado nas localidades que abaixo anotamos.

É possível que haja outra causa para o fenómeno, porém, o deslocamento de uma grande área subterrânea do solo não é improvável. Mas, a palavra cabe aos entendidos, já que o fenómeno deve aguçá-los o gosto pela investigação das suas causas.

A duração do abalo foi de 2 a 3 segundos, em nossa cidade, Pirassununga, Poços de Caldas, São Simão, Guaxupé, Ribeirão Preto, Cravinhos, Casa Branca, Mococa, Santa Rita, Caconde, Vargem Grande do Sul, Franca, Tambau, Santa Rita do Passa Quatro, Altinópolis, Batatais, Pinhal, Gramma, São José do Rio Pardo e outras da zona Mogiana.

Felizmente, repetimos, além do susto, a terra continua a sua marcha, dando de vez em quando, uma lição de que um ligeiro tremor será capaz de atirar por terra os mais sólidos bastiões materiais erguidos pelos homens.

Mas, a vida continua, com ou sem tremor de terra...

Figura A.36: Notícia sobre o sismo de 27/02/1950 extraída de jornal da época.

- Biblioteca Municipal do Espírito Santo do Pinhal, São Paulo - consulta em 14/07/2015

Semanário A Folha, consulta nos jornais de 26/02/1950 e 05/03/1950. Não há notícias de sismos nesses dias nem em outros dias de março e início de abril. Na época existia um outro jornal: A Gazeta, mas biblioteca não tem cópia.

- Museu Histórico de Poços de Caldas, Minas Gerais - Hemeroteca - consulta em 15/07/2015. Consultas nos jornais dos dias:
 - 28/02/1950 - n. 1503;
 - 08/03/1950 - n. 1511;
 - 04/04/1950 - n. 1534.

Nem uma destas publicações cita qualquer informação sobre o sismo.

Estado de São Paulo

“**Caconde**, 27 (Correspondente) - A população desta cidade foi hoje surpreendida por um tremor de terra, que teve duração de meio minuto. Partiram-se vidraças de algumas casas e racharam as paredes de outras. Vieram abaixo utensílios de cozinha e objetos suspensos nas residências. Não houve vítimas pessoais e os prejuízos se consideram pequenos. O povo, tomado de pânico, saiu à correr para as ruas. Momentos depois, o fenômeno se repetiu, embora com menor intensidade.” (5)

“**Caconde** - Esta cidade foi hoje alarmada pelas 9 horas da manhã, com um generalizado tremor de terra. Em muitas casas, o fenômeno derrubou louças das prateleiras nas cozinhas, fendeu paredes, derrubou telhas à beira dos telhados e etc. Assustou o povo todo mas, nada houve de grave. Apenas muito susto e muito comentário pelas ruas e praças da cidade.”

“**Casa Branca**, 28 (Meridional) - Precisamente às 8:55 horas esta cidade foi abalada, hoje por um forte tremor de terra que provocou grande pânico em toda a população justamente alarmada com o fenômeno. Quase toda a população ao sentir o abalo sísmico, correu espavorida para a rua. Não foi possível ninguém nesta cidade, medir com exatidão a duração do fenômeno, sendo, todavia, instantâneo, não obstante a violência. Não houve vítimas, nem ocorreram desabamentos.” (9)

“**Itobi**, São Paulo, 28 (Meridional) - tremeu ontem a terra deste município durante dois segundos aproximando. O fenômeno foi imediatamente seguido pelo povo que saiu para as ruas manifestando pavor de maiores consequências. Todavia, não houve vítimas nem danos.” (4)

“**Pinhal**, 27 (Correspondente) - Ligeiro tremor de terra verificou-se nesta cidade, hoje, às 9:00 horas. Não houve vítimas nem prejuízos. A população mantém-se calma.” (5)

“**São Carlos**, 28 (Meridional) - o povo dessa cidade não tomou conhecimento senão pelo noticiário das emissoras paulista do tremor de terra que alarmou uma grande área do nosso Estado e de Minas. Entretanto, pessoas que trabalhavam nos Edifícios do Fórum e da Prefeitura pela manhã de ontem, perceberam que o pequeno tremor moveu os edifícios citados, fato que apenas foi rapidamente comentado. Houve leve tremor dos móveis e, especialmente, das paredes.” (4)

“**São João da Boa Vista**, 28 (Meridional) - Forte abalo sísmico foi sentido aqui, em toda região que abrange vários municípios. Cerca de 9 horas um rumor subterrâneo alarmou a população local, durante alguns segundos. A terra chegou a tremer sensivelmente não se registrando, porém, nenhum desabamento ou vítima. A população que não sabia, a princípio, a que atribuir o fenômeno, logo em seguida saiu à rua, comentando o ocorrido quando chegou a se alarmar efetivamente.” (4)

“**São João da Boa Vista**, 27 (Correspondente) - Leve tremor de terra registrou-se hoje nesta cidade. Não há vítimas nem danos materiais. A ocorrência que durou por alguns segundos, atingiu toda a região circunvizinha. A população não se mostrou alarmada.” (5)

“**São João da Boa Vista** (Do correspondente, 1) - Segunda-feira última, poucos minutos antes das 9:00 horas da manhã, a nossa cidade foi sacudida por um abalo sísmico, durante dois segundos, mas suficientemente perceptível, pois chegou a produzir o conhecido tremor do solo, fazendo trepidar durante o fenômeno edifícios e móveis. Com exceção da natural apreensão que o fenômeno provocou, não foi constatado dano de qualquer espécie. Foi, o abalo sísmico, motivo para o assunto do dia, provocando a curiosidade coletiva.” (1)

“**São José do Rio Pardo**, 28 (Meridional) - Durante meio segundo apenas tremeu ontem pela manhã a terra, fato que provocou verdadeiro alarma entre os habitantes da cidade.” (4)

“**Vargem Grande do Sul**, 27 (Correspondente) - Forte e rápido abalo sísmico ocorreu

hoje, às 9 horas, nesta cidade, sem causar danos nem vítimas pessoais. Apesar disso, a população foi tomada de pânico.” (5)

“**Vargem Grande do Sul** (São Paulo), 28 (Serviço especial de A NOITE) - Violento abalo sísmico, de curta duração pôs em pânico a população, que saiu para as ruas, temerosa de desabamentos. O fenômeno foi às 9 horas mais ou menos, tendo os alunos do Grupo Escolar abandonado as aulas. Não se registrou felizmente, nenhum dano material ou pessoal.” (3)

Estado de Minas Gerais

Areado, “Belo Horizonte, 28 (Especial para O GLOBO) - Verificou-se ontem, em Areado, no sul de Minas, um tremor de terra que durou vinte segundos. O fenômeno, que já se haiva manifestado domingo, embora com menor intensidade, causou sobressalto à população, mas não fez nenhuma vítima pessoal nem provocou danos materiais.” (6)

Areado e Águas da Prata, “Belo Horizonte, 28 (Asapress) - Nas cidades de Areado e Águas da Prata verificou-se na manhã de ontem um tremor de terra que teve a duração aproximadamente de 20 segundos. O abalo sísmico foi acompanhado de fortes ruídos subterrâneos, tendo causado apreensão no seio da população.” (11)

“**Guaxupé**, (Do correspondente, pelo telefone, 27) - Às 8 horas e 45 minutos da manhã de hoje, foi a população desta cidade surpreendida por um forte tremor de terra, o que não deixou de causar algum pânico. Embora o tremor de terra que durou alguns segundos, tenha colocado a população em sobressalto, não houve, felizmente nenhuma vítima a se lamentar.” (2)

“**Monsanto**, 27 (Correspondente) - Verificou-se hoje, nesta cidade, às 9:00 horas, ligeiro tremor de terra, observado também em diversos pontos do município. Não houve danos.” (5)

“**Poços de Caldas**: através de ligações telefônicas adiantam que em Poços de Caldas, ruíram prateleiras de casas comerciais e bares, despejando-se as mercadorias. Há alarma entre a população que teme novo e maior tremor de terra.” (9)

“**Poços de Caldas**, 28 (Meridional) - Durante 10 segundos tremeu ontem a terra, fenômeno que se iniciou precisamente, às 9 e 10 horas. O tremor, entretanto, foi fraco, o que não permitiu que a população se manifestasse excessivamente alarmada.” (4)

“**Poços de Caldas**, 27 (Correspondente) - Às 8 h 40 de hoje ocorreu aqui ligeiro abalo

sísmico, que talvez tenha durado uns dez segundos. Não se verificaram vítimas pessoais nem prejuízos materiais.” (5)

“**São Pedro da União** (Minas), 28 (Serviço especial A NOITE) - Às 9 horas de ontem sentiu-se aqui um tremor de terra que durou 4 segundos. A população atemorizada saiu para as ruas abandonando suas casas. Não houve danos pessoais nem materiais.” (3)

Tabela A.2 - Localização de cada cidade em que sismo de 1950 foi sentido e o valor de intensidade correspondente.

Cidade	Latitude	Longitude	Intensidade (MM)
Águas da Prata (SP)	-21.95	-46.72	V
Altinópolis (SP)	-21.02	-47.37	F
Areado (MG)	-21.36	-46.15	IV
Batatais (SP)	-20.89	-47.59	F
Botelhos (MG)	-21.64	-46.39	F
Caconde (SP)	-21.53	-46.64	V
Caldas (MG)	-21.92	-46.39	F
Campestre (MG)	-21.71	-46.25	F
Campinas (SP)	-22.91	-47.06	NF
Casa Branca (SP)	-21.77	-47.09	IV
Cravinhos (SP)	-21.34	-47.74	F
Guaranésia (MG)	-21.30	-46.80	F
Guaxupé (MG)	-21.31	-46.71	IV
Itobi (SP)	-21.73	-46.97	IV
Mococa (SP)	-21.46	-47.01	F
Mogi Mirim (SP)	-22.43	-46.95	F
Monte Santo (MG)	-21.21	-46.94	F
Muzambinho (MG)	-21.37	-46.52	F
Pinhal (SP)	-22.19	-46.75	II-III
Pirassununga (SP)	-22.00	-47.43	F
Poços de Caldas (MG)	-21.79	-46.56	IV-V
Ribeirão Preto (SP)	-21.17	-47.81	F
Santa Rita do Passa Quatro (SP)	-21.69	-47.49	F
São Carlos (SP)	-22.01	-47.89	II
São João da Boa Vista (SP)	-21.97	-46.79	IV
São José do Rio Pardo (SP)	-21.60	-46.89	III
São Pedro da União (MG)	-21.13	-46.62	III
São Simão (SP)	-21.48	-47.55	F
Vargem Grande do Sul (SP)	-21.83	-46.89	IV

Escala de Intensidade Mercalli Modificada (MM)

Esta escala é uma modificação e condensação da escala Mercalli-Cancani tal como formulada por Sieberg (Wood e Newman, 1931).

I. Não Sentido - ou, salvo em circunstâncias especialmente favoráveis. Sob certas condições, dentro e fora da área na qual um grande terremoto é sentido:

- algumas vezes pássaros e animais ficam inquietos ou perturbados;
- algumas vezes sente-se tontura ou enjoô;
- algumas vezes árvores, estruturas, líquidos, massas de água podem oscilar, portas podem balançar, muito lentamente.

II. Sentido dentro de casa por poucos, especialmente em andares superiores, ou por pessoas sensíveis ou nervosas.

- Também como no grau I, mas frequentemente mais perceptível;
- algumas vezes **objetos suspensos podem balançar**, especialmente quando suspensos delicadamente;
- algumas vezes árvores, estruturas, líquidos, massas de água, podem oscilar, portas podem balançar bem lentamente;
- algumas vezes pássaros e animais ficam inquietos ou perturbados;
- algumas vezes sente-se tontura ou enjoô.

III. Sentido dentro de casa por várias pessoas, movimento normalmente vibração rápida.

- Algumas vezes não é inicialmente reconhecido como um tremor.
- **Duração estimada** em alguns casos.
- Vibração como à devida a caminhões leves, levemente carregados ou pesados passando a alguma distância.
- **Objetos pendurados podem balançar um pouco.**
- Movimentos podem ser apreciáveis em andares superiores de edifícios altos.
- Carros parados são balançados levemente.

IV. Sentido dentro de casa por muitos, e fora por poucos.

- **Acorda poucas pessoas**, especialmente as de sono leve.
- **Não assusta ninguém**, a menos que já estejam apreensivos de experiência anterior.
- Vibração como a causada pela passagem de caminhões pesados ou pesadamente carregados.
- Sensação de um pesado objeto batendo no edifício, ou queda de objetos pesados dentro de casa.
- **Chacoalhar de louças, janelas, portas**; cerâmicas e vidraria tinem e se chocam.
- **Rangido de paredes, armações** especialmente na faixa superior deste grau.
- **Objetos pendurados balançam**, em numerosos casos.
- Líquidos em vasos abertos são levemente agitados;
- Carros parados são balançados perceptivelmente.

V. Sentido dentro de casa por quase todos, fora por muitos ou pela maioria: direção, fora de casa, estimada.

- **Acorda muitos**, ou a maioria.
- **Assusta poucos** - leve excitação, algumas pessoas correm para rua.
- Edifícios tremem inteiramente.
- **Quebram-se louças**, vidraria, com certa frequência.
- **Janelas trincadas** - em alguns casos mas não generalizadamente.
- **Vasos, objetos pequenos ou instáveis tombados**, em vários casos, com eventual queda.
- **Objetos pendurados, portas, balançam** generalizadamente ou consideravelmente.
- Quadros batem nas paredes, ou são virados fora de lugar.
- Portas, venezianas são abertas, ou fechadas, abruptamente.
- **Relógios de pêndulo param**, iniciam marcha ou andam mais rápido ou mais devagar.
- **Pequenos objetos e mobiliário são movidos**, o último apenas levemente.
- **Líquido derramado**, em pequena quantidade, de recipientes abertos e bem cheios.
- **Árvores, arbustos tremem levemente.**

VI. Sentido por todos, dentro e fora de casa.

- **Assusta muitos**, excitação geral, algum alarde, muitos correm às ruas.
- **Acorda todos.**
- Pessoas se movem sem firmeza.
- **Árvores e arbustos sacodem de leve a moderadamente.**

- Líquidos são bastante agitados.
- Sinos pequenos tocam (igreja, capela, escola, etc.).
- **Danos leves** em construções fracas.
- **Queda de reboco** em pequena quantidade.
- **Rachadura no reboco em certa quantidade**, especialmente pequenas rachaduras em chaminés, em alguns casos.
- **Louça e vidraria quebradas** em quantidades consideráveis, bem como algumas janelas.
- **Queda de bibelôs, livros e quadros.**
- Móveis tombados, muitos casos.
- **Deslocamento de mobília** moderadamente pesada.

VII. Assusta a todos - alarde geral, todos correm para fora.

- Alguns, ou muitos, têm dificuldade em manter-se em pé.
- Percebido por motoristas dirigindo.
- **Árvores e arbustos tremem de moderada a fortemente.**
- Ondas em piscinas, lagos e água corrente.
- Água é sujada com a lama agitada.
- Queda, em alguns casos, de barrancos de areia.
- Grandes sinos tocam.
- Objetos suspensos trepidam.
- **Danos desprezíveis** em edifícios de construção sólida, **leves** a moderados em edifícios normais, **consideráveis** em edifícios de construção ruim, casas de adobe, muros velhos, tor.
- **Danos desprezíveis** em edifícios de construção sólida, **leves** a moderados em edifícios normais, **consideráveis** em edifícios de construção ruim, casas de adobe, muros velhos, torres finas, etc.
- **Chaminés rachadas** consideravelmente, alguns muros rachados.
- **Queda de reboco** em quantidade considerável e também algum estuque.
- **Quebra de numerosas janelas** e alguns móveis.
- Queda de tijolos soltos e telhas.
- Quebra de chaminés fracas na linha do telhado (às vezes danificando o telhado).
- **Queda de cornijas** de torres e edifícios altos.
- Pedras e tijolos deslocados.
- **Mobília pesada é tombada**, com danos de quebra.
- Dano considerável a valas de irrigação de concreto.

VIII. Medo geral - alarme perto do pânico.

- Pessoas dirigindo automóveis são perturbadas.
- **Árvores fortemente sacudidas** - galhos e troncos quebrados, especialmente palmeiras.
- Areia e lama expelidas em pequenas quantidades.
- Mudanças temporárias e permanentes no fluxo de fontes e poços; poços secos recomeçam o fluxo; mudanças na temperatura da água de fontes e poços.
- **Danos leves** em estruturas (de tijolo) feitas especialmente para resistir terremotos.
- **Danos consideráveis** em edifícios normais, colapso parcial: casas de madeira, em alguns casos, destroçadas e reviradas; divisórias e paredes de casas pré-fabricadas são atiradas; quebra de telhas.
- **Queda de muros.**
- **Sérias rachaduras e quebra em muros de pedra sólida.**
- Rachaduras em solo molhado, às vezes, e também em solo bem inclinado.
- **Torção e queda de chaminés, colunas, monumentos,** e também de pilhas e torres de fábricas.
- **Móveis muito pesados movidos visivelmente e tombados.**

IX. Pânico geral

- **Solo conspicuamente rachado.**
- **Danos consideráveis** em estruturas (alvenaria) construídas especialmente para resistir a terremotos, tais como:
 - tiradas de prumo algumas casas com estrutura de madeira construídas especialmente para resistir a terremotos;
 - sérios danos em construções de grande porte (alvenaria), algumas desmoronam em grande parte; ou estruturas deslocam-se completamente das fundações, armações destroçadas;
 - sérios danos em barragens; tubulações subterrâneas algumas vezes quebradas.

X. Solo rachado, especialmente quando solto e úmido, até larguras de várias polegadas; fissuras de até quase um metro de largura correm paralelas a barrancos de canais e riachos.

- Desmoronamentos consideráveis de margens de rios e encostas marinhas escarpadas.
- Deslocamento de areia e lama horizontalmente em prais e regiões planas.
- Mudança no nível de água de poços.
- Água é lançada nas margens dos canais, lagos, rios, etc.
- **Sérios danos** em barragens, diques e aterros.
- **Danos severos** para estruturas de madeira bem construídas e pontes, algumas destruídas.

- Rachaduras perigosas produzidas em muros de tijolos de boa qualidade.
- Destruídas a maioria das alvenarias e armações de estruturas, também suas fundações.
- Estradas de ferro levemente entortadas.
- Tubulações subterrâneas partidas ou amassadas.
- Abertas rachaduras e amplas ondulações em pavimentos de cimento e estradas asfaltadas.

XI. Muitos distúrbios gerais no solo, variando com o material do solo.

- Larguras fissuras, subsidências, deslizamentos de terra em terrenos soltos e úmidos.
- Água é expelida em grande quantidade carregada de areia e lodo.
- Causa ondas marinhas (tsunamis) de tamanho significativo.
- **Danos severos** em edifícios com estruturas de madeira, especialmente perto do epicentro.
- **Grandes danos** em barragens, diques e aterros, geralmente por longas distâncias.
- Poucas estruturas (alvenaria), ou nenhuma, permanecem de pé.
- Destruição de grandes pontes bem construídas pelo rompimento das pilastras ou pilares de sustentação.
- Pontes de madeira são menos afetadas.
- Trilhos de estradas de ferro são bastante entortados e empurrados nas juntas.
- Tubulações subterrâneas postas completamente fora de serviço.

XII. Danos totais - praticamente todas as construções são grandemente danificadas ou destruídas.

- Grandes e variados distúrbios no solo, e numerosas rachaduras de cisalhamento.
- Desmoronamentos, desabamentos de rochas de caráter significativo, numerosos desmoronamentos de grandes proporções de margens de rios, etc.
- Grandes massas de rocha são arrancadas ou despregadas.
- São produzidas falhas em rocha firme, com notáveis deslocamentos verticais e horizontais.
- Canais de água, superficiais e subterrâneos, são perturbados e bastante modificados.
- Lagos represados, quedas d'água produzidas, rios desviados de seus cursos, etc.
- Ondas observadas na superfície do terreno (na realidade vistas, provavelmente, em alguns casos.)
- Mudanças nas linhas de nível e de visão.
- Objetos atirados para cima.