

3 - BREVE ANÁLISE DA SISMICIDADE NO COMPLEXO VULCÂNICO DAS SETE CIDADES

*João Fontiela **

O arquipélago dos Açores localiza-se na junção tripla das placas litosféricas Americana, Euroasiática e Nubia o que confere características singulares do ponto de vista sísmico e vulcânico ao arquipélago. Desde o povoamento no séc XV a ilha de São Miguel foi afetada por vários eventos sísmicos e vulcânicos que causaram elevados prejuízos sociais (e.g. mortos, feridos e desalojados) e económicos. O sismo com maior impacto foi, sem dúvida, o de 1522 que associado a uma escoada de lama soterrou Vila Franca do Campo e onde pereceram cerca de 5.000 pessoas. As erupções vulcânicas de 1563, no vulcão do Fogo, e de 1630, no vulcão das Furnas tiveram um forte impacto na sociedade de então. Isto sem mencionar os restantes fenómenos naturais (e.g. tempestades costeiras) que afetaram ou ocorreram na ilha e com impactos diretos para a população.

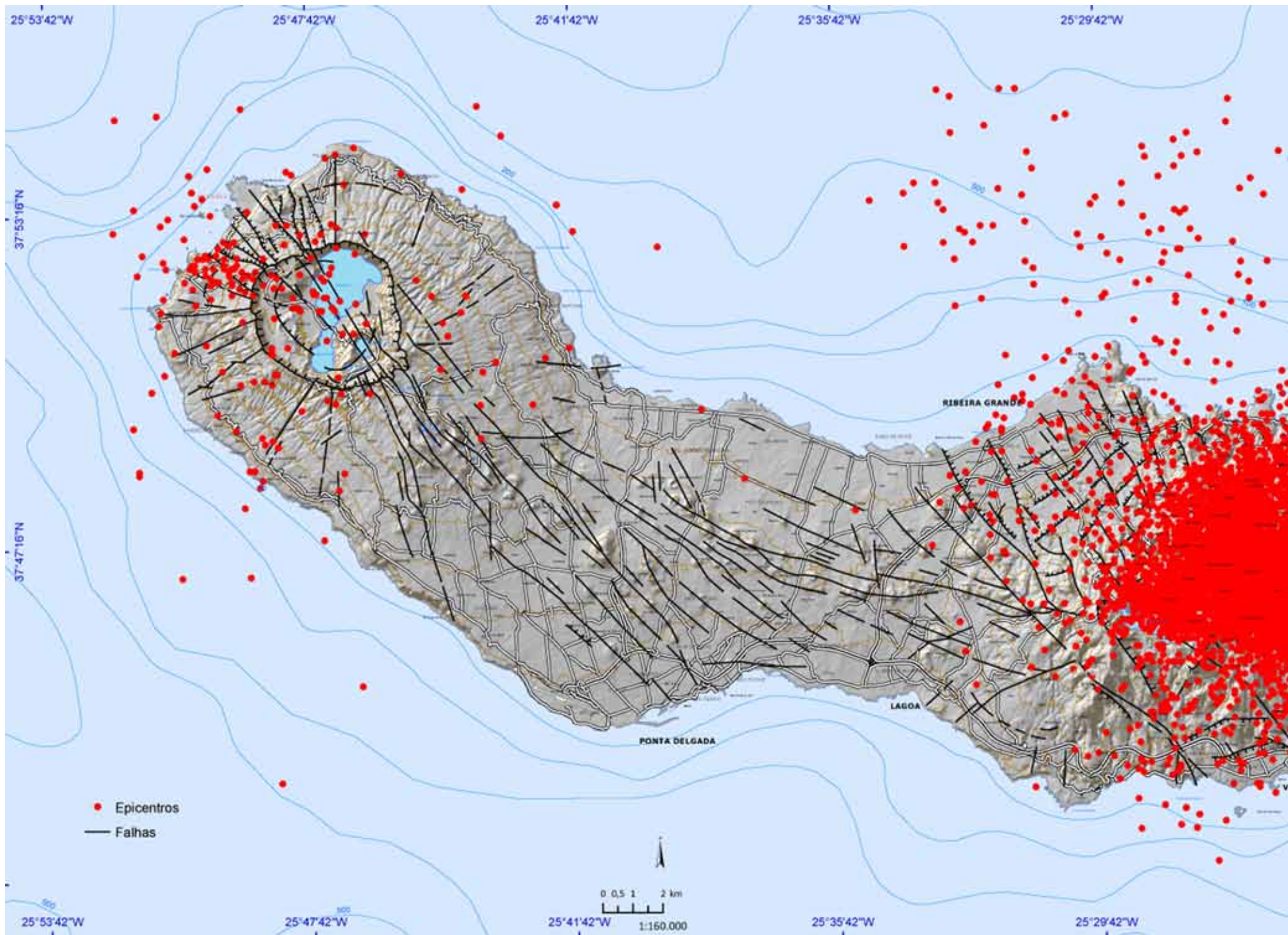
Na ilha de São Miguel, os Complexos Vulcânicos do Nordeste, Povoação e Picos têm sismicidade reduzida; o Complexo Vulcânico das Sete Cidades apresenta sismicidade moderada, sobretudo na caldeira e no flanco oeste do aparelho vulcânico, enquanto que nos Complexos Vulcânicos das Furnas e do Fogo a sismicidade é elevada. Assinale-se

3 - BRIEF ANALYSIS OF THE SEISMICITY IN THE SETE CIDADES VOLCANO

The archipelago of the Azores is located in the triple junction of the American, Euroasian and Nubia lithospheric plates, which gives unique characteristics to the archipelago from the point of view of seismicity and volcanism. Since its settlement in the 15th century, the island of São Miguel has been affected by several earthquakes and volcanic eruptions that have caused social (e.g. dead, injured and homeless) and economic losses. The event with the greatest impact was the earthquake of 1522 which triggered a landslide that buried Vila Franca do Campo and killed approximately 5,000 people. The volcanic eruptions of 1563, in the Fogo volcano, and the one of 1630, in the Furnas volcano, had a strong impact on the society of the time, not to mention the other natural phenomena (e.g. coastal storms) that have affected or occurred on the island with direct impact on the population.

On São Miguel island, the Nordeste, Povoação volcanoes and Waist zone have low seismicity; the Sete Cidades volcano has moderate seismicity, particularly inside the Caldera and on the west flank of the volcano, while, in the Furnas and Fogo volcanoes, the seismicity is high. It should be noted that the historical eruptions of 1563, in Fogo volcano,

* Instituto Ciências da Terra, IIFA e Dept. de Física, ECT, da Univ. Évora. Rua Romão Ramalho, 59; jfontiela@uevora.pt



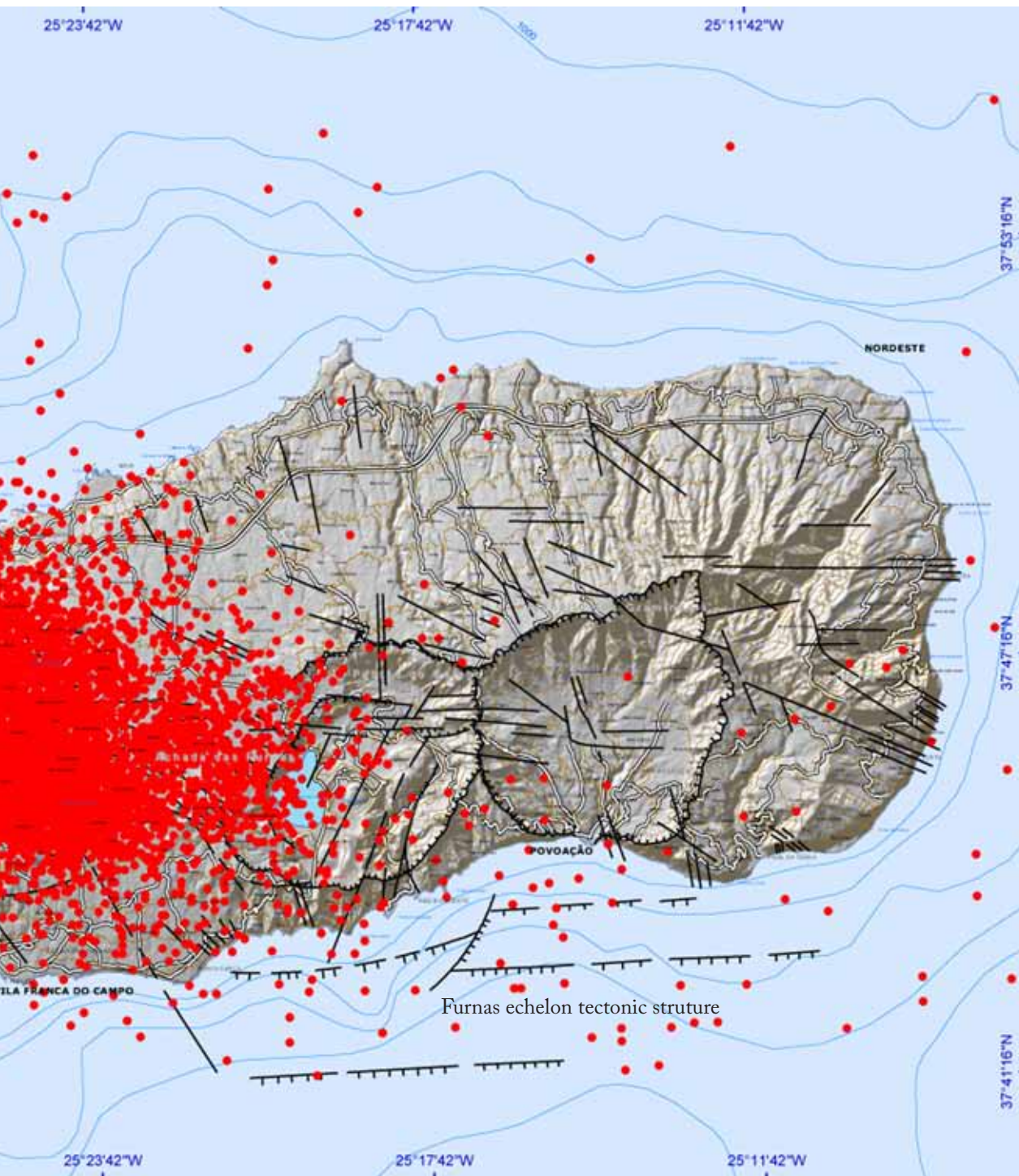
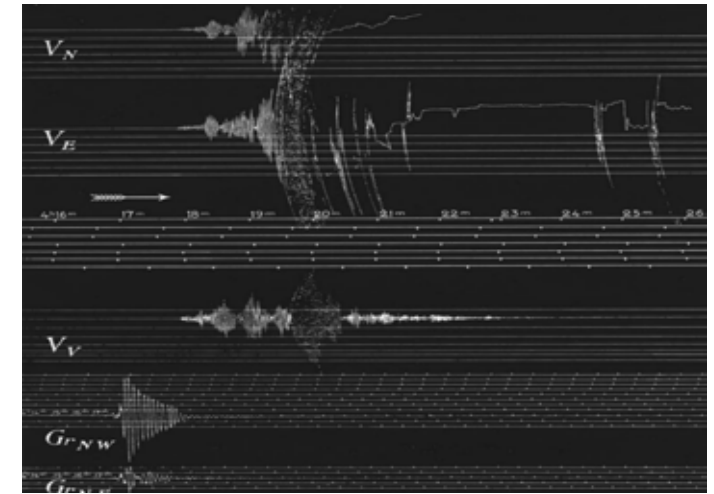


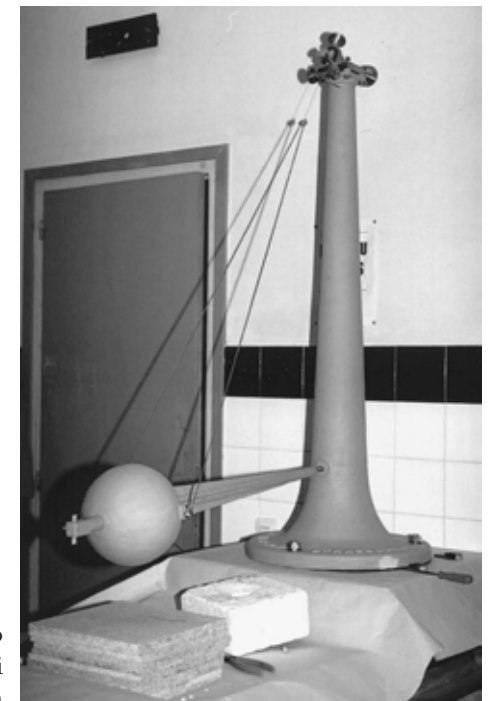
Figura 1. Mapa com a distribuição dos epicentros registados entre 1995 e 2014 na ilha de São Miguel.

Figure 1. Map with the epicentres recorded between 1995 and 2014 on São Miguel Island.

Tectónica / Tectonics: V. H. Forjaz, I. G. A., 1977.



Sismograma em papel negro de fumo
Seismogram on black smoke paper



Sismógrafo
Bosch Omori
Seismograph

que as erupções históricas de 1630 e 1563 ocorreram nos extremos leste e oeste, respetivamente. A figura 1 atesta a variação da sismicidade nos diferentes Complexos Vulcânicos. Analisando em detalhe a sismicidade na ilha de São Miguel entre 1995 e 2014 (figura 2) verifica-se um significativo aumento da sismicidade devido a um enxame sísmico, elevado número de sismos num curto período de tempo, localizado na região entre o Fogo e o Congro. Entre junho de 2004 e junho de 2005 observa-se um aumento significativo da sismicidade e nos 18 meses seguintes a sismicidade atingiu níveis muito elevados, diminuindo em 2007 para níveis ligeiramente superiores aos de 2004 (figura 2). Entre 2004 e 2007 foram registados mais de 8.000 sismos nesta região. A sismicidade antes e após o enxame sísmico encontrava-se em níveis baixos. A magnitude no período em análise varia entre 0¹ e 4 enquanto que a magnitude mínima, é geralmente superior a 1, exceto entre 2004 e 2006 onde a magnitude mínima é 0 (figura 3). Após o enxame sísmico, há períodos de tempo igual ou superior a seis meses com sismicidade muito reduzida (até 5 eventos) ou sem atividade sísmica. A distribuição da frequência da magnitude (figura 4) corresponde a uma distribuição normal, estando as várias classes de magnitudes bem representadas, no entanto, a frequência de sismos de baixa magnitude é elevada. A figura 5 apresenta o perfil da distribuição dos hipocentros na direção A-B, onde se identificam dois aglomerados de sismos. O primeiro (distância até aos 16 km do perfil, figura 5) está associado ao Complexo Vulcânico das Sete Cidades, onde maioria dos eventos está localizada até aos 6 km de profundidade. Já o segundo aglomerado de hipocentros (entre os 30 e os 52 km de distância do perfil, figura 5) é relativo aos Complexos Vulcânicos do Fogo e Furnas, incluindo a região do Congro e a maioria dos hipocentros não ultrapassa os 10 km.

¹ A magnitude pode assumir valores negativos ou zero porque os cálculos são baseados em logaritmos.

and 1630, in Furnas volcano, occurred at the east and west limits of a region with high seismicity. Figure 1 shows the variation of seismicity in the different volcanoes of São Miguel Island. Analysing in detail the seismic activity on the island from 1995 to 2014 (Figure 2), there is a significant increase in seismic activity, mainly due to a seismic swarm, a high number of earthquakes in a short period of time, located in the region that comprises the Fogo and Congro volcanoes. Between June 2004 and June 2005, there was a significant increase in the seismicity. Over the following 18 months, the seismic activity reached very high levels, decreasing in 2007 to levels slightly higher than those of 2004 (Figure 2). Between 2004 and 2007 more than 8,000 earthquakes were recorded in this region. The seismicity before and after the seismic swarm was at background levels. The magnitude in the period under review varies between 0¹ and 4, but the minimum magnitude is usually greater than 1, other than in the time span 2004 to 2006, where the minimum magnitude is 0 (Figure 3). After the seismic swarm, there are periods of time equal to or greater than six months with seismicity very low (up to five events) or even without seismicity. The distribution of the frequency of magnitude (Figure 4) corresponds to a normal distribution, wherein the various classes of magnitudes are well represented; however, the frequency of earthquakes of low magnitude is high. Figure 5 shows the profile with the hypocentres distribution (toward A-B), where two earthquake clusters are noticeable. The first (from west to east) is associated with the Sete Cidades volcano, where most of the events are located up to 6km deep. The second cluster of hypocentres (located between kilometre 30 and 52 of the profile, Figure 5) is related to the region that comprises the Fogo and Furnas volcanoes, including Congro region, and most hypocentres do not exceed 10km deep.

¹ The magnitude can take negative values or zero because the calculations are based on logarithms.

Figura 2. Frequência da sismicidade (histograma) e sismicidade acumulada (linha) entre 1995 e 2014.
 Figure 2. Frequency distribution of seismicity (histogram) and cumulative seismicity (line) between 1995 and 2014.

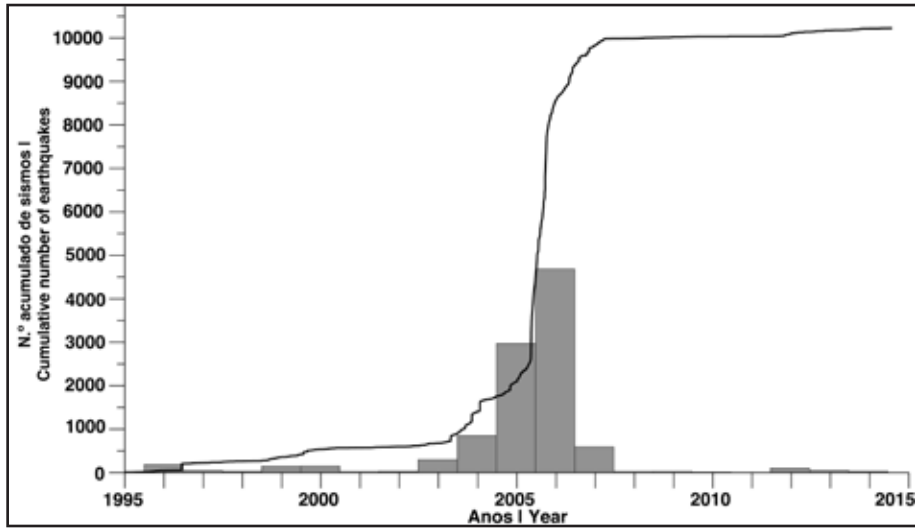


Figura 3. Evolução da magnitude com o tempo na ilha de São Miguel.
 Figure 3. Evolution of the magnitude over time on São Miguel Island.

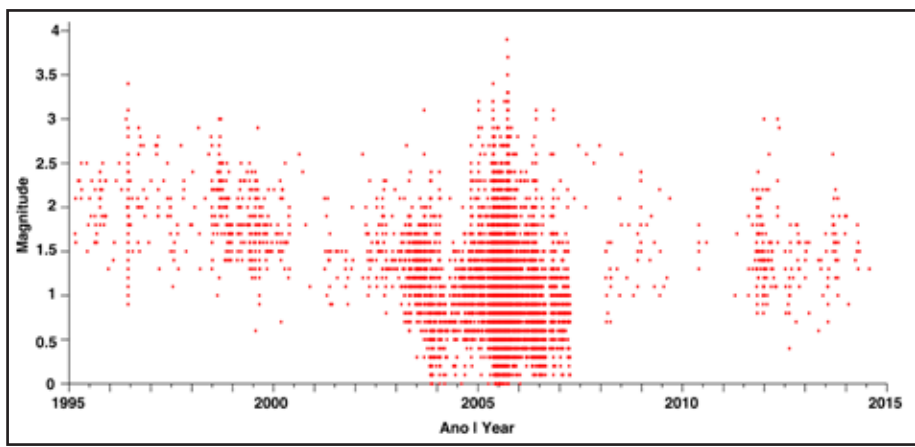


Figura 4. Distribuição da frequência da magnitude na ilha de São Miguel. Os sismos sem magnitude determinada foram removidos.
 Figure 4. Frequency magnitude distribution on São Miguel Island. The earthquakes without determined magnitude were removed.

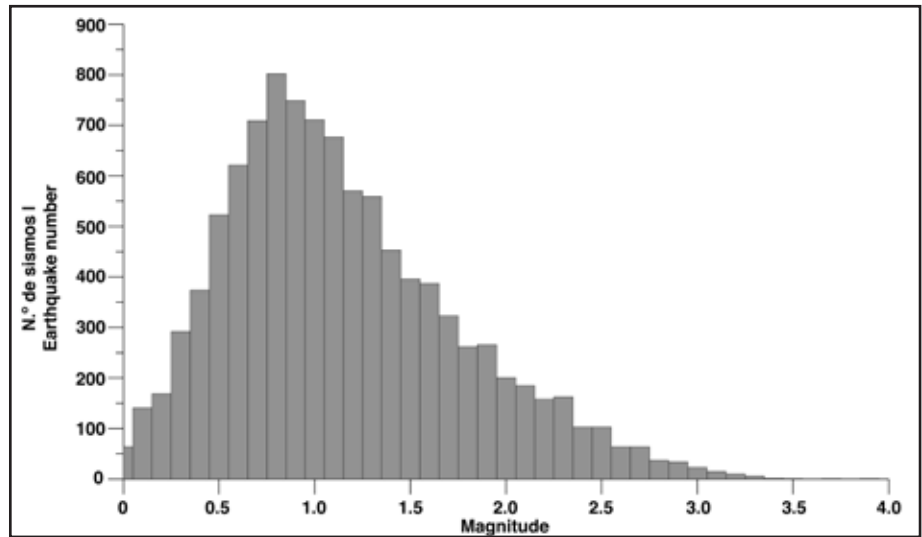
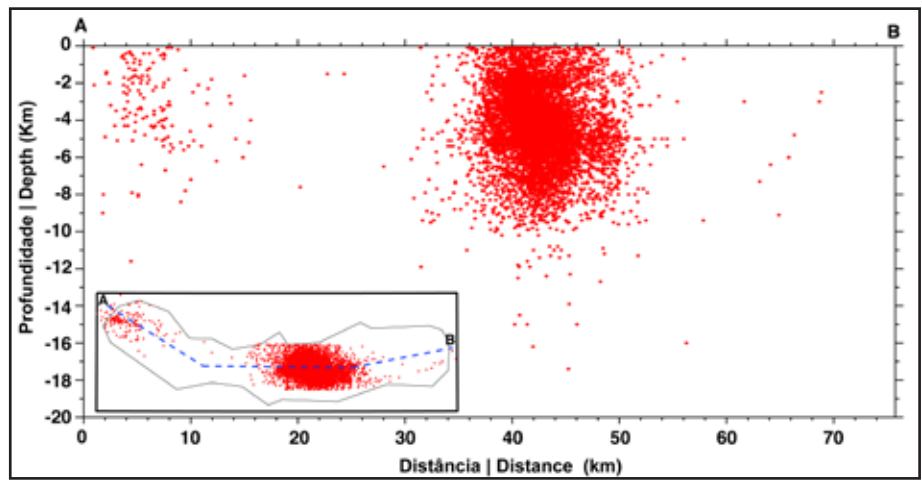


Figura 5. Perfil com a distribuição dos hipocentros na ilha de São Miguel. A inserção no canto inferior esquerdo mostra a linha do perfil e os sismos selecionados para o perfil.
 Figure 5. Profile with the distribution of hypocentres on São Miguel Island. The insertion in the lower left corner shows the line of the profile and the earthquakes that have been selected for the profile.



O Complexo Vulcânico das Setes Cidades está localizado na parte ocidental da ilha de São Miguel e no rift da Terceira. A principal característica morfológica do Complexo é o estratovulcão das Sete Cidades, com um lago vulcânico no interior da caldeira. Os alinhamentos tectónicos neste Complexo onde se inclui o Graben dos Mosteiros, apresentam uma orientação NW-SE (Forjaz, 1997). A tectónica no Complexo Vulcânico das Sete Cidades coincide com a orientação das principais estruturas tectónicas do arquipélago como seja o rift da Terceira, o de São Jorge ou o do Faial - Pico (Lourenço, 2007).

A primeira descrição contendo referências à sismicidade no Complexo Vulcânico das Sete Cidades pertence a Gaspar Frutuoso (1522 - 1591) e está associada à erupção de 1439 (Weston, 1964). A 26 de junho de 1638 tem início uma crise sísmica que culmina com uma erupção submarina a duas milhas da Ferraria (Arquivo dos Açores, 1881). A erupção foi acompanhada por uma sequência sísmica e o sismo mais forte foi sentido com intensidade VI-VII da Escala Macrosísmica Europeia de 98 (EMS98) (Gomes, 2003). Em novembro e dezembro de 1713 uma violenta crise sísmica assola a parte ocidental do Complexo Vulcânico culminando com o sismo do dia 8 de dezembro, intensidade máxima VIII na escala Mercalli Modificada (MM), causando elevados danos no edificado dos Ginetes e da Várzea (Nunes et al., 2001). Durante o mês de junho de 1810 observou-se um incremento da atividade sísmica que durou cerca de 13 meses. De 17 de Junho de 1810 até 24 de Junho a intensidade máxima do sismo mais forte foi VII-VIII (EMS98). A atividade sísmica, apesar de mais fraca continuou a ser sentida pela população até final de Janeiro de 1811. No dia 29 de janeiro a sismicidade aumentou e no dia 1 de fevereiro foi sentido um forte sismo, precursor da erupção que iria ocorrer horas mais tarde e que durou até 8 de fevereiro (Webster, 1821). Quatro meses mais tarde, a 13 de junho de 1811, foi sentido um sismo seguido por outros eventos, mais ou menos violentos, até que na manhã do dia seguinte teve início uma nova erupção submarina.

The Sete Cidades volcano is located in the western part of São Miguel Island, in the Terceira rift axis. Sete Cidades is stratovolcano with a lake inside the caldera. Concerning the tectonic, the main structures have a general orientation NW-SE, including the Mosteiros Graben (Forjaz, 1997) In general, the tectonic coincides with the orientation of the main tectonic structures of the archipelago, the Terceira rift, São Jorge or the Faial - Pico volcanic ridges (Lourenço, 2007).

The first historical descriptions containing references to seismic activity in the Sete Cidades volcano were by Gaspar Frutuoso (1522 - 1591) and were associated with the eruption of 1439 (Weston, 1964). June 26, 1638 saw the start of a seismic crisis that culminated with an underwater eruption two miles away from the Ferraria (Arquivo dos Açores, 1881). The eruption was accompanied by a seismic sequence, where the stronger earthquake was felt with intensity VI-VII on the European Macroseismic Scale 1998 (EMS98) (Gomes, 2003). In November and December 1713, an earthquake crisis took place in the western part of the volcano. On December 8, an earthquake with maximum intensity VIII on the Mercalli Modified scale (MM) caused severe damage to the building stock of Ginetes and Várzea (Nunes et al., 2001). During June 1810, an increase was observed in the seismic activity that lasted about 13 months. From June 17, 1810 until June 24, the stronger earthquake had maximum intensity VII-VIII (EMS98). The seismic activity, although weaker, continued to be felt by the population until the end of January 1811. On January 29, the seismicity increased and, on February 1, a strong earthquake was felt, the precursor of the eruption that would occur a few hours later and last until February 8 (Webster, 1821). Four months later, on June 13, 1811, an earthquake was felt followed by other events, more or less violent. In the morning of the next day a new submarine eruption began. During the eruption, some of the volcanic explosions were accompanied by strong earthquakes. A maximum intensity of IX was estimated during the eruption of June (Silveira, 2002). Table 1 summarises

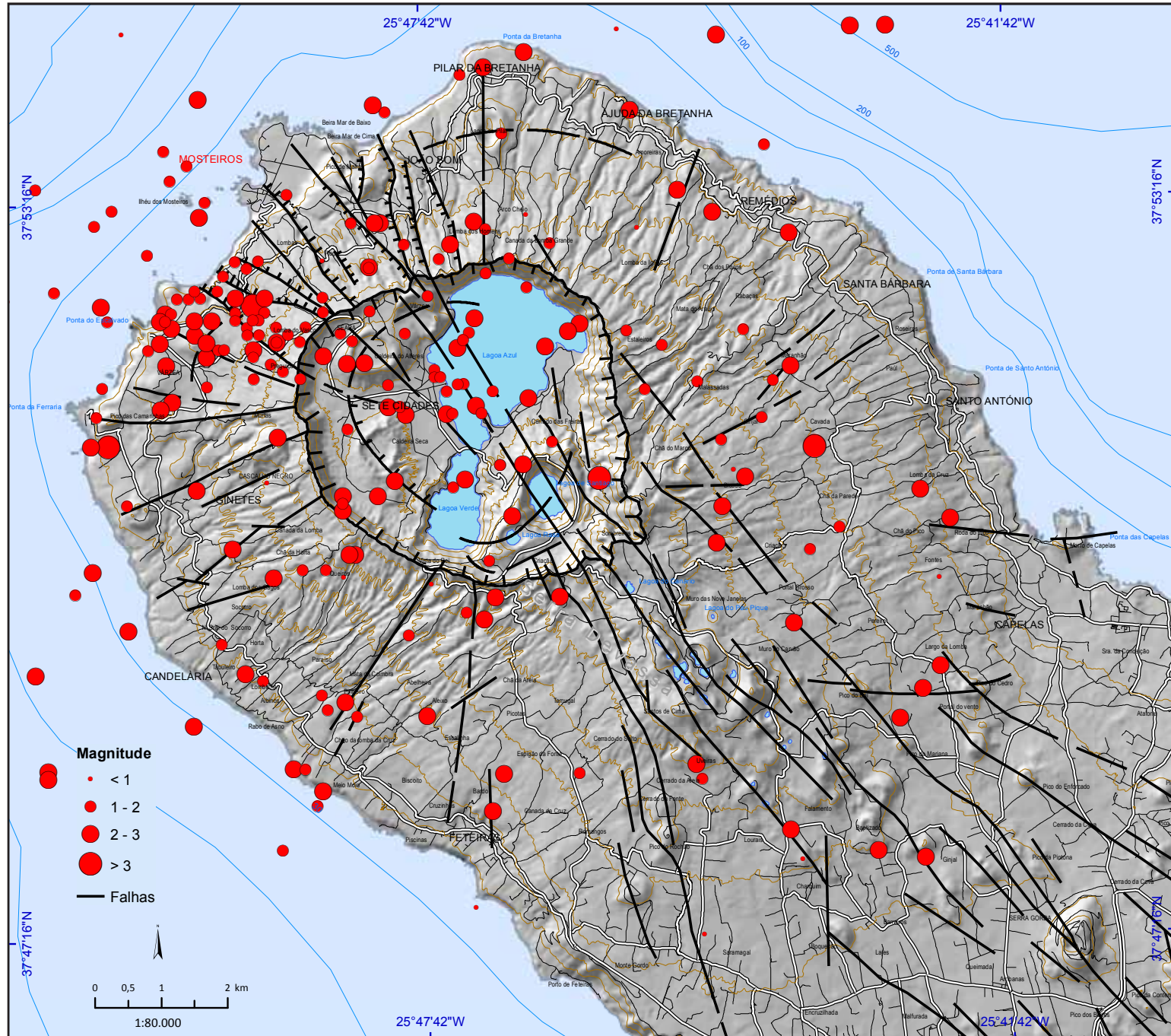


Figura 8. Mapa com a distribuição dos epicentros no Complexo Vulcânico das Sete Cidades no período Março 1982 -Julho 2009.
Figure 8. Map with the epicentres distribution in Sete Cidades volcanoes between March 1982 up to July 2009.

Durante a erupção, algumas das explosões eram acompanhadas por sismos fortes. Estima-se que a intensidade máxima terá sido IX durante a erupção de junho (Silveira, 2002). A tabela 1 sumariza os principais episódios sísmicos no Complexo Vulcânico das Sete Cidades.

O início da sismicidade instrumental ocorre em 1902 com a instalação do primeiro sismógrafo no Observatório Afonso Chaves, em Ponta Delgada, atual delegação regional do Instituto Português do Mar e Atmosfera. A instalação da estação sísmica em Ponta Delgada possibilitou o registo e identificação dos sismos mais energéticos e de crises sísmicas, como a de 1927 e a de agosto de 1967 na zona do Fogo - Congro. A 17 de julho de 1968 é registado um sismo de magnitude 4.6, sentido na Várzea com intensidade máxima VII (MM). Em setembro de 1996, foi registado um enxame sísmico com 180 eventos em sete horas (Forjaz et al., 1996). A figura 6 apresenta uma secção do sismograma onde são visíveis as formas de onda de vários sismos registados pela componente horizontal (N-S) da estação sísmica das Sete Cidades (SETA). De acordo com os autores, os eventos mais energéticos tiveram magnitude 2.7 e 2.8 enquanto que o foco dos eventos variava entre os 2 os 4 km e estavam localizados no Graben dos Mosteiros e na região da ilha Sabrina onde teve lugar a erupção de 1811 (figura 7). Mais tarde, em agosto de 1998 num espaço de três horas foram registados 120 sismos, cinco dos quais sentidos pela população com intensidade máxima V (MM) nos Ginetes e na Várzea (*Global Volcanism Program*, 1998). A 2 de setembro do mesmo ano foi registado novo enxame sísmico próximo da costa entre a Ponta da Ferraria e os Mosteiros, sendo registados 120 sismos num período de quatro horas (*Global Volcanism Program*, 1998). A mesma fonte refere que foram sentidos cinco sismos tendo um dos eventos atingido intensidade máxima V (Mercalli Modificada).

O catálogo sísmico de referência mundial (*International Seismological Centre-ISC*) e o Catálogo Sísmico da Região Açores (Nunes et al. 2004) demonstram que a sismicidade no Complexo Vulcânico das Sete Cidades

the main earthquake and seismic sequences in the Sete Cidades volcano.

The beginning of the instrumental seismicity occurred in 1902 with the installation of the first seismograph in the Afonso Chaves observatory, in Ponta Delgada, the current regional delegation of the Portuguese Institute of Sea and Atmosphere. The installation of the seismic station in Ponta Delgada enabled the registration and identification of the energetic earthquakes and some seismic crises, such as the ones of 1927 and August 1967 in the Fogo - Congro area. On July 17, 1968, an earthquake of magnitude 4.6 was recorded with the epicentre in Várzea and maximum intensity VII (MM). In September 1996, a seismic swarm with 180 events in seven hours was recorded (Forjaz et al., 1996). Figure 6 shows a section of the seismogram where are visible the waveforms of some earthquakes recorded by the horizontal component (N-S) of the Sete Cidades seismic station (SETA). According to the authors, the magnitude of the strongest was 2.7 and 2.8, while the focus of the events differed between the 2km and the 4km marks and were located in the Mosteiros Graben and in the region where the eruption of 1811 took place (Figure 7). Later, in August 1998, in the space of three hours 120 earthquakes were recorded, five of them felt by the population with maximum intensity V (MM) in Ginetes and Várzea (*Global Volcanism Program*, 1998). On September 2 of the same year, a new seismic swarm was recorded with 120 earthquakes within a period of four hours near the coast between Ponta da Ferraria and Mosteiros (*Global Volcanism Program*, 1998). The same authors report that there were felt five earthquakes, one of the events having maximum intensity V (Mercalli Modified).

The earthquake catalogue from the International Seismological Center (ISC) and the Catalog of the Region Azores (Nunes et al., 2004) depict that the seismicity in Sete Cidades volcano is characterised by a small number of events of low magnitude. The ISC catalogue contains 250 earthquakes, recorded between March 1982 and July 2009 in the area shown in Figure 8. Figure 9 shows that, during this period, the

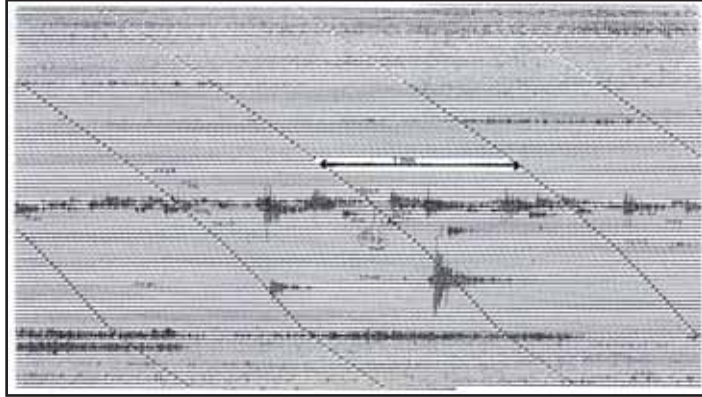


Figura 6. Sismograma registado pela componente horizontal (N-S) na estação sísmica das Sete Cidades (SETA) (fonte: Forjaz et al. 1996)
 Figure 6. Seismogram recorded by the horizontal component (N-S) on the Sete Cidades seismic station (SETA) (source: Forjaz et al. 1996)

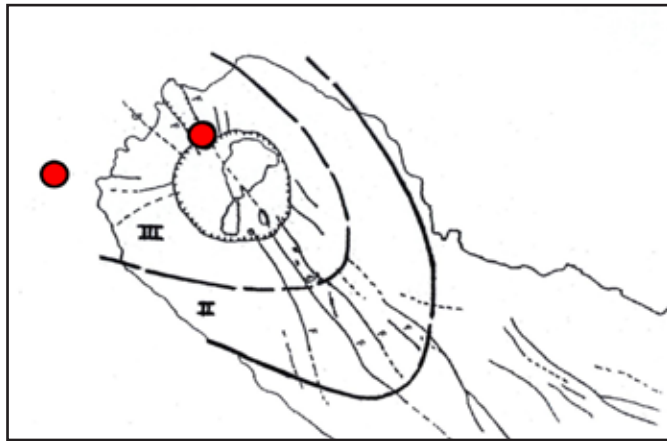


Figura 7. Mapa de isossistas dos eventos mais fortes que ocorreram durante o swarm. Os pontos a vermelho indicam a região epicentral do swarm sísmico (modificado de Forjaz et al, 1996)
 Figure 7. Isoseismal map of the stronger stronger than occurred during the swarm. The red points indicate the epicentral region of the earthquake swarm (modified from forjaz et al, 1996)

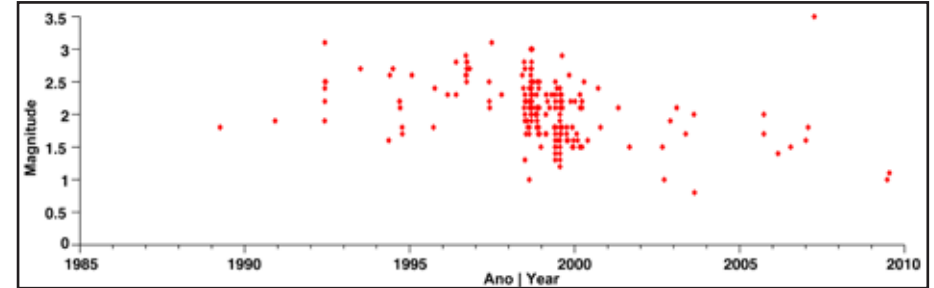


Figura 9. Distribuição da magnitude com o tempo. Os sismos sem magnitude determinada foram removidos.
 Figure 9. Distribution of the magnitude over the time. The earthquakes without magnitude determined were removed.

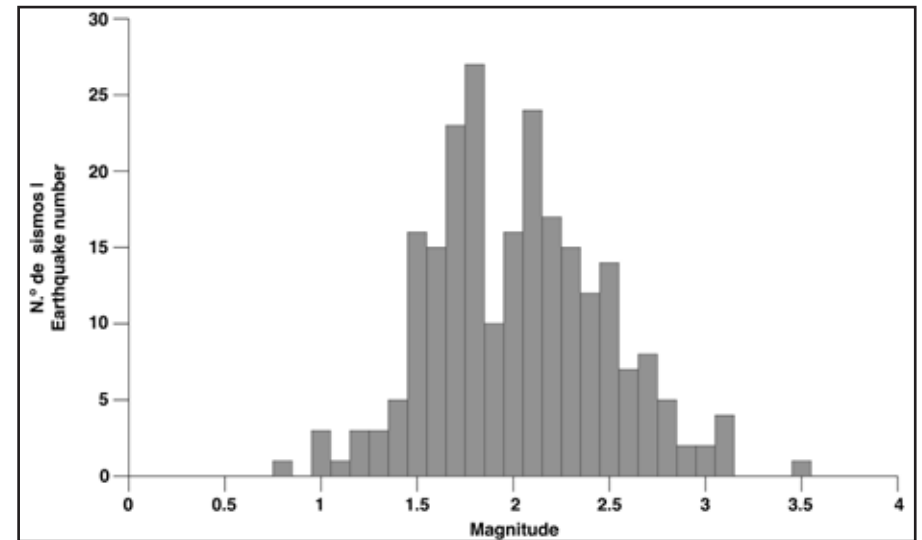


Figura 10. Distribuição da frequência da magnitude no Complexo Vulcânico das Sete Cidades. Os sismos sem magnitude determinada foram removidos.
 Figure 10. Frequency magnitude distribution in Sete Cidades volcanoes. The earthquakes without magnitude determined were removed.

Agradecimentos:

O autor é financiado pelo projeto M3.1.2/F/060/2011 do Fundo Regional da Ciência e Tecnologia - Governo Regional Açores. Este trabalho é cofinanciado pela União Europeia através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, enquadrado no COMPETE 2020 (Programa Operacional da Competitividade e Internacionalização) através do projeto ICT (UID/GEO/04683/2013) com a referência POCI-01-0145-FEDER-007690.

é caracterizada por um reduzido número de eventos de baixa magnitude. No catálogo do ISC foram registados 250 sismos na área apresentada na figura 8 entre março de 1982 e julho de 2009. A figura 9 mostra que neste período a magnitude variou entre 0.1 e 3.5, verificando-se um aumento significativo da sismicidade entre o segundo semestre de 1998 e o final do ano de 1999. Neste período de maior sismicidade, a magnitude máxima foi 3. Excetuando o referido período, a frequência dos sismos é muito baixa. A figura 10 mostra que as magnitudes mais frequentes no Complexo Vulcânico das Sete Cidades se situam entre 1.5 e 2.7.

A distribuição da sismicidade no Complexo Vulcânico das Sete Cidades não apresenta um padrão distinto, exceto um aglomerado de eventos localizado entre a Várzea e a Caldeira do Alferes. Este aglomerado está associado a várias estruturas tectónicas com orientação WNW-ESE e NW-SE e que fazem parte do sistema de falhas radiais do vulcão das Sete Cidades. Indubitavelmente a tectónica está ativa nesta área do Complexo, assim o demonstram os vários sismos e enxames sísmicos registados na zona da Várzea (Tabela 1 e figura 8). Apesar de identificado uma região com potencialidades geotérmicas no vulcão das Sete Cidades (Forjaz, 1994) não é possível estabelecer uma relação entre a sismicidade e a presença de fluídos hidrotermais devido principalmente à reduzida sismicidade e dispersão no complexo vulcânico.

magnitude ranged between 0.1 and 3.5. There is a noticeable increase in the seismicity between the second half of 1998 up to the end of 1999. During this period, the maximum magnitude was 3, while, for the rest of the time, the earthquake frequency was very low. According to Figure 10, the most common magnitude interval was between 1.5 and 2.7.

The distribution of seismicity in the Volcanic Complex of Sete Cidades does not exhibit a clear pattern, except for the cluster located between Várzea and Caldeira do Alferes. This cluster is associated with several structures' tectonics, with orientation ENE-ESE and NW-SE, that belong to the tectonic system of the volcano of Sete Cidades. Undoubtedly, the tectonics are active in this area of the Complex, as seen by the various earthquakes and seismic swarms recorded in the area of the Várzea (Table 1 and Figure 8). Although identified as a region with geothermal potential in the Sete Cidades volcano (Forjaz, 1994), it is not possible to establish a relationship between the seismicity and the presence of hydrothermal fluids due to the reduced seismicity and dispersion by volcano.

Tabela 1. Principais sismos sentidos no Complexo Vulcânico das Sete Cidades com intensidade igual ou superior a V.
As intensidades marcadas com * referem-se à EMS98.
Table 1. Earthquakes with intensity equal or higher than V
in Sete Cidades Volcano.
Intensities marked with * refers to the EMS98 intensity scale

Data / Date	Intensidade (MM) / Intensity	Local / Local	Observações / Obs.
2.º semestre / 2 nd semester 1639	VI - VII*	Várzea, Ginetes	Erupção a duas milhas Ferraria Eruption at 2 miles from Ferraria
08/12/1713	VIII	Ginetes	
Junho/June 1810	VI - VII*	Várzea, Ginetes	Erupção Sabrina / Sabrina eruption
Junho/June 1811	IX*	Várzea, Ginetes	Erupção Sabrina / Sabrina eruption
17/05/1968	VII	Várzea	
02/09/1998	V-VII	Várzea	
19/09/1998	V	Várzea	