

**OS SHAKEMAPS DO SISMO DE ARRAIOLOS
DE 15 DE JANEIRO DE 2018 (ML 4.9)**

Célia Marreiros
Técnica Superior
IPMA
Lisboa-Portugal

Paulo Alves
Técnico Superior
IPMA
Lisboa-Portugal

Bento Caldeira
Professor Auxiliar
ICT, ECT,
U. Évora
Évora-Portugal

Alexandre Araújo
Professor Associado
ICT, ECT,
U. Évora
Évora-Portugal

José Borges
Professor Auxiliar
ICT, ECT,
U. Évora
Évora-Portugal

Mourad Bezzegoud
Professor Associado
ICT, ECT,
U. Évora
Évora-Portugal

Fernando Carrilho
Técnico Superior
IPMA
Lisboa-Portugal

SUMÁRIO

No dia 15-01-2018, após a ocorrência do sismo de magnitude 4.9 ML na região de Arraiolos, foram produzidos automaticamente mapas para caracterizar o impacto do sismo [intensidade sísmica (escala de Mercalli Modificada, 1956), aceleração de pico (PGA) e velocidade de pico (PGV)], utilizando uma adaptação do software *ShakeMap* disponibilizado pelo U.S. Geological Survey (USGS). Os mapas produzidos (*shakemaps*) são baseados em constrangimentos regionais de dados observados e amplificações locais.

A progressiva adição de dados observados, consoante estão disponíveis, introduz melhoramentos na qualidade dos mapas. Em particular, os mapas produzidos com a integração de observações macrossísmicas são mais consistentes com essas observações. Neste trabalho iremos apresentar o efeito dos constrangimentos impostos pelos resultados macrossísmicos do sismo de Arraiolos, no processo automático de caracterização do impacto dos sismos em Portugal Continental.

ABSTRACT

On the 15-01-2018, after the occurrence of the earthquake of magnitude 4.9 ML at the region of Arraiolos, maps were produced automatically to characterize the impact of the earthquake [seismic intensity (Mercalli Modified scale, 1956), peak acceleration (PGA) and peak velocity (PGV)], using a modified version of the software *ShakeMap* made available by the U.S. Geological Survey (USGS). The maps produced (*shakemaps*) are based on regional constraints of data observed and local amplifications. The addition of

observed data, as they are available, introduce improvements at the quality of the maps. In particular, the maps produced with the integration of macroseismic observations are more consistent with these observations. In this work we will present the effect of the constraints made by the macroseismic results of the earthquake of Arraiolos, at the automatic process of characterization of the impact of the earthquakes at Portugal mainland

PALAVRAS-CHAVE: *shakemaps*, macro sísmica e Arraiolos.

1. INTRODUÇÃO

O *ShakeMap* está implementado no serviço sísmológico português desde 2008. A sua implementação tem como objetivo principal a obtenção de uma estimativa rápida de efeitos macro sísmicos em território português.

Os *shakemaps* [9] são mapas que representam a distribuição espacial do movimento do solo estimado e registado (velocidade de pico, aceleração de pico, e resposta espectral) e as correspondentes estimativas de intensidade sísmica numa região fornecendo informação importante para o planeamento de resposta de emergência e ao público em geral. Estes mapas identificam a área afetada pelo sismo e estimam a severidade do movimento sísmico do solo.

Desde 2014, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) disponibiliza por rotina, na sua página da *internet* mapas produzidos pelo *ShakeMap* para Portugal Continental e Arquipélago da Madeira através do link: <http://shakemap.ipma.pt/index.html>.

Os *shakemaps* são gerados automaticamente após a ocorrência de sismos de maior relevância, tipicamente os que são sentidos pela população ou que têm potencial para o terem sido, com magnitude $ML \geq 2,5$. Estes mapas são normalmente publicados poucos minutos após a hora de origem do sismo e sujeitos a atualizações em função de novos dados instrumentais e em particular de dados macro sísmicos.

A metodologia utilizada no *ShakeMap* (V3,5) permite a combinação natural de observações de movimento do solo e de intensidade macro sísmica com estimativas de movimento de pico, com um peso proporcional ao inverso das suas incertezas [11].

Os *shakemaps* são produzidos com constrangimentos regionais, impostos por dados instrumentais provenientes das estações da rede sísmica, observações de intensidade macro sísmica, estimativas de parâmetros do movimento do solo e de intensidade sísmica e condições locais.

O sismo de magnitude $ML = 4,9$ que ocorreu no dia 15 de janeiro de 2018, pelas 11 h 51m, na região de Arraiolos, foi o maior evento que ocorreu com epicentro localizado em Portugal continental desde que o *ShakeMap* está implementado na rede sísmica portuguesa.

O sismo de Arraiolos foi sentido pela população numa vasta região de Portugal continental, nomeadamente nos distritos de Évora, Portalegre, Santarém, Setúbal, Lisboa e, ainda, noutras zonas mais afastadas, não tendo sido reportados danos estruturais significativos.

Neste trabalho são apresentados os efeitos dos constrangimentos impostos no processo automático de geração dos *shakemaps* para o sismo de Arraiolos, com destaque para o efeito da incorporação das observações macro sísmicas.

2. CONSTRANGIMENTOS APLICADOS AOS SHAKEMAPS DO SISMO DE ARRAIOLOS

Os *shakemaps* são construídos tendo como base uma grelha geográfica, com valores de amplitude dos parâmetros do movimento do solo em cada ponto. Nos locais onde não existem observações, os valores de amplitude são obtidos por interpolação de uma combinação de observações do movimento do solo e de amplitudes estimadas, tendo em conta as amplificações locais em todos os pontos de interpolação [9].

De particular importância, quando se produzem os *shakemaps* é a incorporação de dados observados, para reproduzir com a maior fiabilidade possível o movimento do solo provocado pelo sismo, em particular em locais próximos da fonte. Por outro lado, são utilizadas leis de atenuação empíricas (GMPE – Ground Motion Prediction Equation) que relacionam amplitudes dos parâmetros do movimento do solo (PGA e PGV), com a distância e a magnitude, para a obtenção de estimativas de parâmetros do movimento do solo nos diferentes pontos da grelha geográfica. Em zonas com fraca cobertura de estações ou nos casos em que se perdem os dados (por exemplo, saturação dos sinais) os *shakemaps* assentam principalmente nas estimativas de GMPE. Os parâmetros do movimento do solo são também usados para obtenção de estimativas de intensidade sísmica, através de expressões que relacionam os parâmetros do movimento do solo e a intensidade sísmica (GMICE – Ground Motion Intensity Conversion Equation).

2.1. Constrangimentos específicos do evento

2.1.1. Dados da rede sísmica

Os dados provenientes das estações da rede sísmica nacional que permitem constrear os *shakemaps*, são por um lado, os parâmetros básicos do sismo (localização e magnitude), e por outro lado, as medições instrumentais de PGA e de PGV efetuadas em cada estação.

No sistema de monitorização sísmica do IPMA os sismos são detetados automaticamente sendo possível obter os parâmetros básicos de eventos sísmicos relevantes em menos de 4 min após o registo da onda P na estação sísmica mais próxima. Na fase seguinte, as medições instrumentais de PGA e de PGV são feitas automaticamente nos registos sísmicos, e preparados os ficheiros de *input* para o *ShakeMap*. Por fim são desencadeados, os procedimentos para a geração dos *shakemaps*.

Para efetuar as medições instrumentais foi utilizado o sistema de análise e processamento sísmico SEISAN [5]. Para fazer a interface entre o SEISAN e o *ShakeMap* foi utilizada a aplicação *Seisan2ShakeMap* que foi desenvolvida, no IPMA, especificamente para fazer a interface entre os dois sistemas [5]. Esta aplicação prepara dois ficheiros (formato xml) para *input* do *ShakeMap*. No essencial, um dos ficheiros contém a informação sobre a localização e magnitude do sismo e o outro contém informação sobre as medições instrumentais.

Na figura 1 está representada a localização do epicentro do sismo (estrela vermelha) e estão representadas as estações sísmicas (triângulos castanhos) que forneceram dados para produzir os *shakemaps* para este sismo.

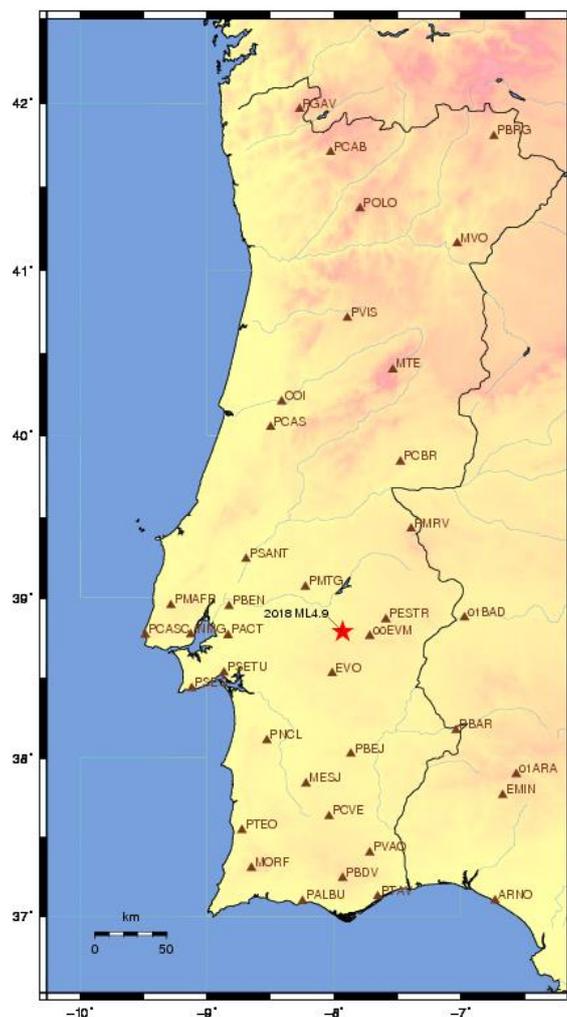


Fig. 1 – Mapa com a localização do epicentro do sismo que ocorreu a 10 km NE de Arraiolos, em 15-01-2018, com ML = 4,9 (estrela vermelha) e a localização das estações sísmicas que forneceram dados para produzir os *shakemaps* do sismo de Arraiolos (triângulos castanhos).

Os dados de algumas das estações representadas no mapa, que não são recebidos regularmente e/ou em tempo quase-real no centro operacional de sismologia (COS) do IPMA, só ficaram disponíveis passado algum tempo (que podem ser alguns dias) após a ocorrência do sismo, como são os casos de 00EVM, 01BAD e 01ARA, as duas últimas pertencentes à rede sísmica espanhola.

Os constrangimentos impostos pelas medições instrumentais efetuadas nas estações sísmicas permitem obter mapas mais realistas.

2.1.2. Observações macrossísmicas

As observações macrossísmicas utilizadas para constranger os mapas de intensidade instrumental apresentados neste trabalho são provenientes, por um lado, de respostas ao questionário que se encontra na página da internet do IPMA e que é dirigido a qualquer observador direto de um sismo e, por outro lado, de recolha de dados no campo. No primeiro caso, as respostas foram entregues no centro operacional do IPMA via e-mail, tendo sido depois avaliadas pela aplicação *WebMInt* (WEB Macro seismic INTensity) que foi desenvolvida, no IPMA, para proceder à avaliação automática dessas respostas [1]. Os resultados, com a forma de intensidade sísmica por DCF (Distrito, Concelho, Freguesia), foram depois convertidos em dados de input para o *ShakeMap*. Na figura 2 estão representados no *W_EMAP*, (aplicação que foi desenvolvida no IPMA

[6]) os resultados obtidos no caso do sismo de Arraiolos (ML = 4,9). Nos 5 dias após a ocorrência do sismo foram recebidas 567 respostas ao questionário das quais 408 foram validadas. A figura 2-a) mostra a distribuição de intensidade macrossísmica em Portugal continental. São também apresentadas ampliações de 2 regiões que permitem ver com mais detalhe a distribuição da intensidade macrossísmica obtida em cada uma. Na figura 2-b) está representada a região de Arraiolos, região mais próxima do epicentro, onde os valores de intensidade macrossísmica observada foram os mais elevados. De acordo com alguns testemunhos locais, o sismo foi sentido com intensidade máxima de V/VI na escala de Mercalli Modificada (IMM) na zona de São Gregório, Arraiolos. Foi sentido com intensidade V em vários outros locais da região. Na figura 2-c) está representada a região de Lisboa, de onde foi recebido um grande número de respostas ao questionário macrossísmico, embora o sismo tenha sido sentido com intensidades menores do que na região de Arraiolos. Atualmente, a aplicação WebMInt permite obter uma intensidade máxima IX. O número de indicadores associado a cada grau da escala é variável e está diretamente ligado à própria escala, pelo que a fiabilidade é variável em cada grau.

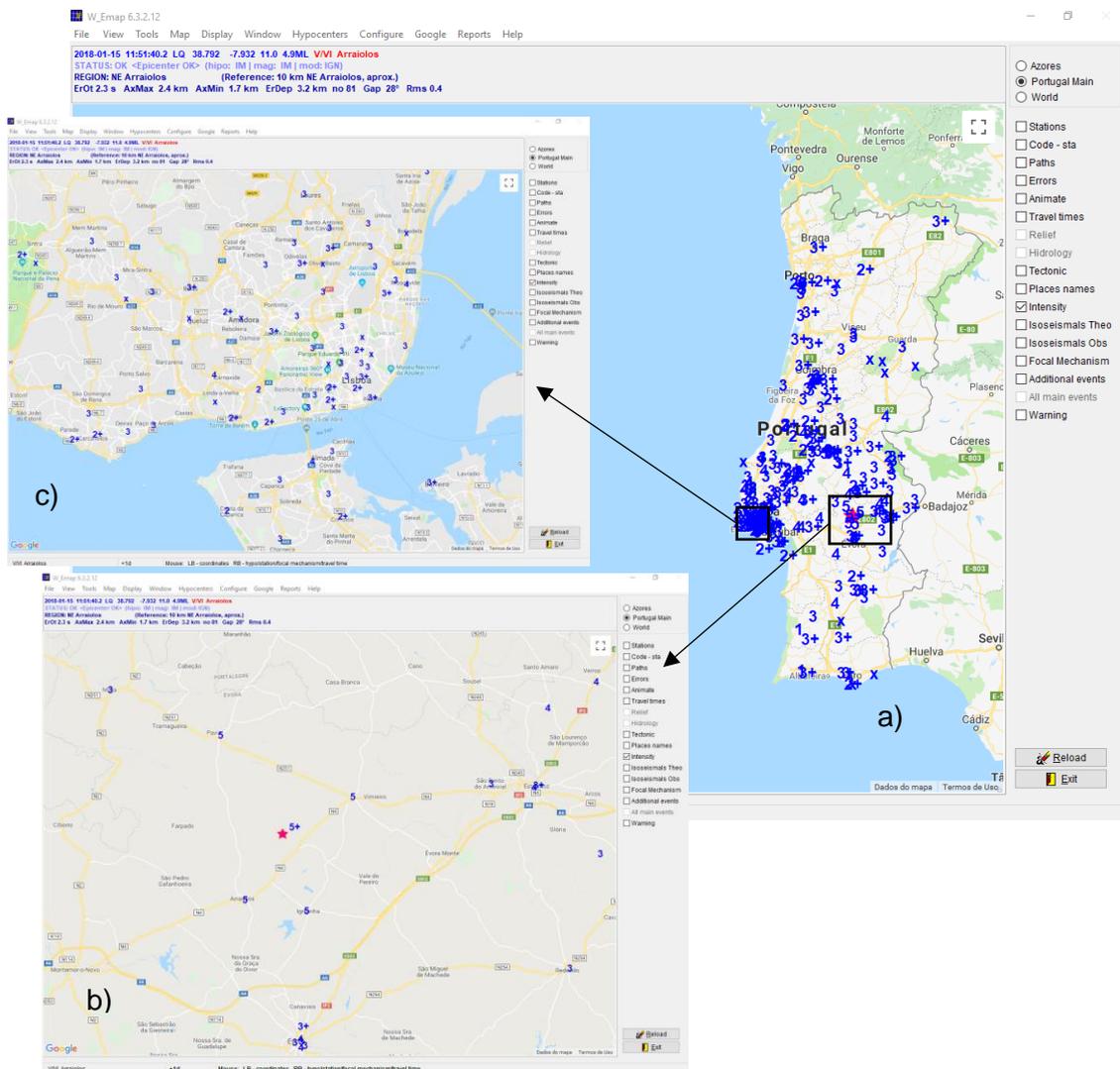


Fig. 2 – Resultados da avaliação macrossísmica automática efetuada pelo WebMInt representados no W_EMAP no caso do sismo que ocorreu a 10 km NE de Arraiolos, 2018-01-15, com ML = 4,9 em: a) Portugal continental; b) região de Arraiolos; região de Lisboa. A estrela a vermelho indica a localização do epicentro do sismo e os números a azul indicam os valores de intensidade sísmica obtida de forma automática (WebMInt).

Nos primeiros 20 minutos após a ocorrência do sismo foram recebidas 66 respostas ao questionário correspondentes a 61 locais distintos. Após 3 horas foram recebidas 358 respostas ao questionário, dos quais 240 foram consideradas válidas e que são correspondentes a 210 locais (freguesias ou DCF) distintos. A distribuição do número de respostas ao questionário recebidas (Quest.), distribuição de número respostas consideradas válidas (Quest. Válidos) e distribuição de número de DCF (freguesias) de onde foram provenientes as respostas, por Distrito estão representadas na figura 3.

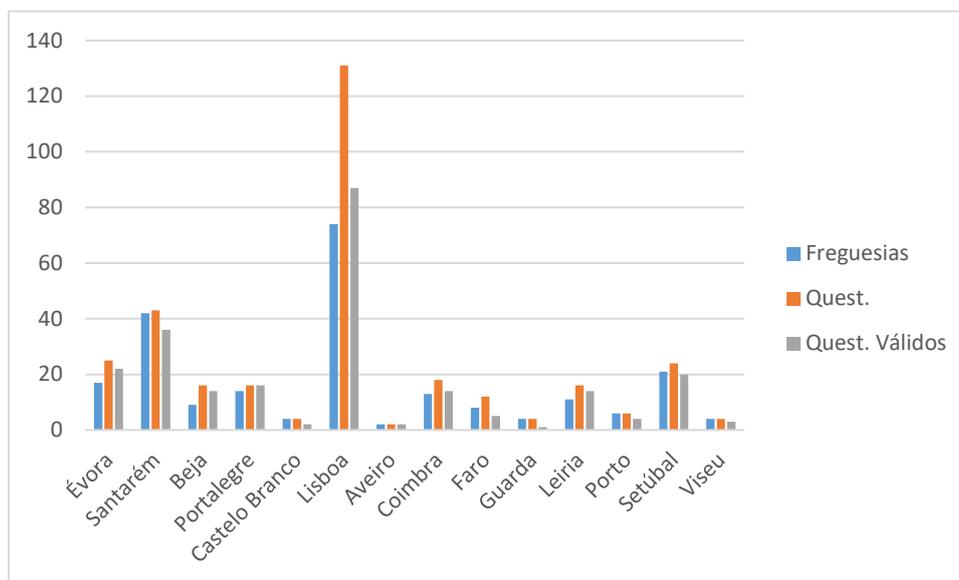


Fig. 3 – Distribuição do número de respostas ao questionário (Quest.) recebidas no IPMA, distribuição do número respostas consideradas válidas (Quest. Válidos) e distribuição do número de DCF (freguesias) de onde foram provenientes as respostas, por Distrito, nas 3 horas seguintes à ocorrência do sismo.

Algumas das respostas ao questionário macrossísmico não foram consideradas válidas por não terem informação completa sobre a localização, por serem repetidas, critérios de qualidade, etc.

No que diz respeito aos trabalhos de campo, o IPMA efetuou um levantamento macrossísmico em Arraiolos, Aldeia da Serra, Igreja e Vimieiro imediatamente após o evento.

Na sequência do sismo de Arraiolos, ML = 4,9, também o Instituto de Ciências da Terra (ICT, Universidade de Évora) levou a cabo inquéritos, usando o formulário do IPMA. Foram efetuados 371 inquéritos presenciais entre a latitude de Beja e de Abrantes e 430 por *internet*, tendo sido consideradas 614 respostas para apuramento de resultados. Os resultados, obtidos segundo o método proposto por [12], estão representados na figura 4.

É expectável que os mapas produzidos para zonas densamente povoadas sejam mais precisos, em virtude da existência de maior número de observações para constranger esses mapas.

A atualização da informação macrossísmica e dos *shakemaps* é efetuada quando existem dados suficientes.

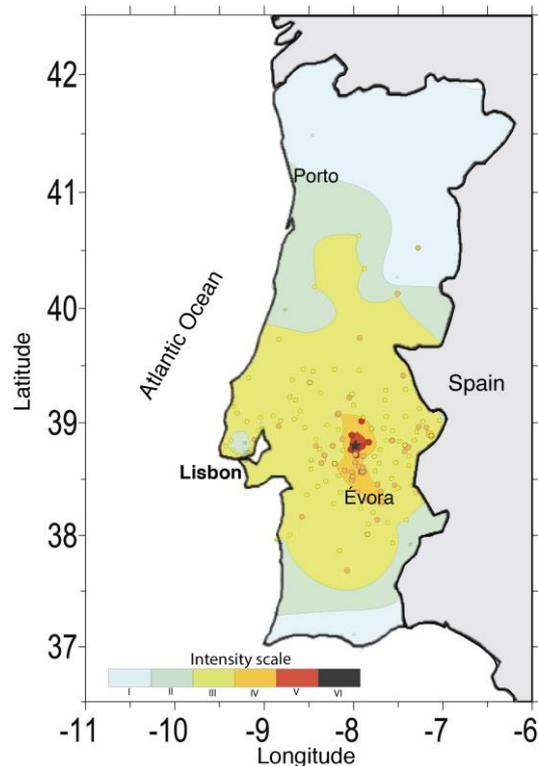


Fig. 4 – Resultados dos inquéritos macrosísmicos levados a cabo pelo ICT, usando o formulário do IPMA. Foram consideradas 614 respostas para o apuramento de resultados. A estrela representa o epicentro do sismo de Arraiolos (4,9ML). A escala de cores indica o valor da intensidade sísmica.

2.2. Constrangimentos regionais

2.2.1. Estimativas de parâmetros do movimento do solo

Para efetuar estimativas de parâmetros do movimento do solo foram usadas leis de atenuação empíricas para PGA (GMPE-PGA) e para PGV (GMPE-PGV).

No gráfico da figura 5-a) estão representados os valores de PGA (%g) medidos instrumentalmente para o sismo de Arraiolos e, a curva teórica que melhor se ajusta, a relação de atenuação com a distância em termos de PGA, para a magnitude 4,9ML. O maior valor de PGA (6,4 %g) foi medido na estação Évora (EVO).

No gráfico da figura 5-b) estão representados os valores de PGV (cm/s) medidos instrumentalmente para o sismo de Arraiolos e, a curva teórica que melhor se ajusta, a relação de atenuação com a distância em termos de PGV, para a magnitude 4,9ML. O maior valor de PGV (0,86 cm/s) foi medido na estação localizada em Evoramonte (00EVM).

Observa-se uma razoável aproximação entre os valores instrumentais e as curvas teóricas, tanto para PGA como para PGV. No entanto, por existir um problema de escala, foi necessário ajustar a curva teórica aos dados observados, utilizando uma magnitude aparente.

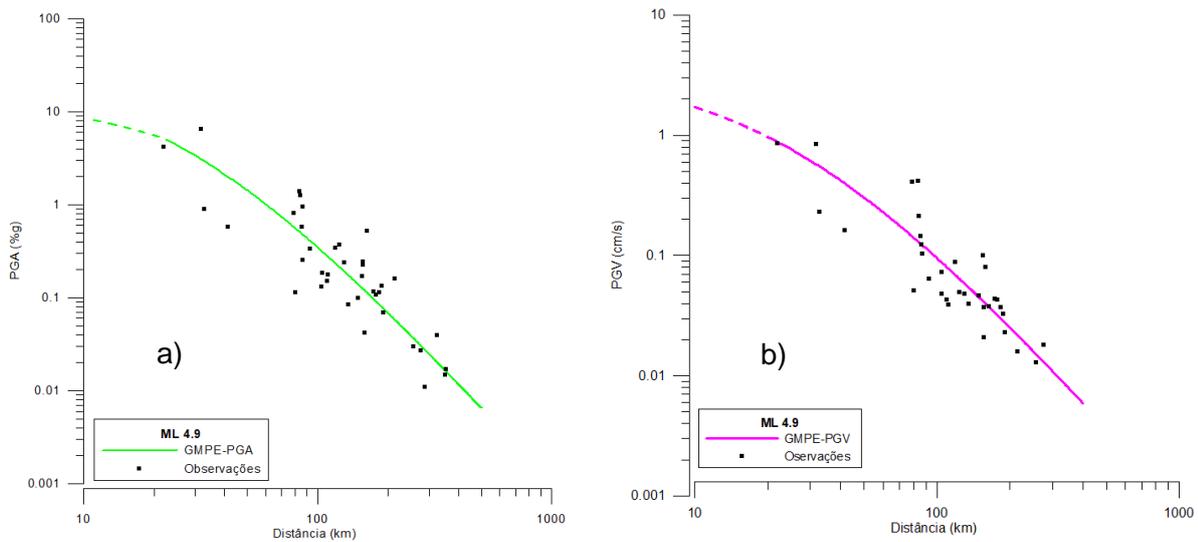


Fig. 5 – a) GMPE expressa em PGA, aplicada ao sismo de Arraiolos (ML 4,9). Os símbolos representam PGA (%g) medidos instrumentalmente. No caso de PGA, a magnitude aparente utilizada tem o valor $M^* = 4,57$. b) GMPE expressa em PGV, aplicada ao sismo de Arraiolos (ML 4,9). Os símbolos representam PGV (cm/s) medidos instrumentalmente. No caso de PGV, a magnitude aparente utilizada tem o valor $M^* = 4,71$.

2.2.2. Relações entre movimento do solo e intensidade

Para produzir os *shakemaps* de intensidade instrumental são aplicadas relações de conversão PGA/PGV em intensidade (GMICE) propostas por [2] e por [7] e adaptadas para aplicar aos sismos registados na rede sísmica nacional.

2.2.3. Condições Locais

A publicação, da Carta Geológica de Portugal [5], na escala 1:1.000.000, permitiu a incorporação de efeitos de sítio com dados geológicos no *ShakeMap*. Para esse efeito, foram integradas no sistema uma grelha de valores de V_{s30} (velocidade média das ondas S nos 30 metros superficiais) e relações entre amplificação e V_{s30} determinadas por [3]. Desta forma, foi possível obter para a região de Portugal continental, uma grelha de fatores de amplificação dependentes da geologia [6].

3. RESULTADOS

A seguir são apresentados resultados da aplicação do *ShakeMap* ao sismo de 15 de janeiro de 2018, magnitude $ML=4,9$, que ocorreu a cerca de 10 km a NE de Arraiolos (Évora). São apresentados os resultados obtidos, considerando vários tipos de dados de *input*, consoante estavam disponíveis.

Os *shakemaps* são rapidamente produzidos, usando procedimentos automáticos. No entanto, nos dias seguintes à ocorrência do evento, novos dados, quer instrumentais após revisão das leituras automáticas nos registos ou mesmo de estações que não transmitem dados em tempo-real, quer de observações macrossísmicas que ficam disponíveis e podem ser integrados nos mapas, o que permite a progressiva melhoria da qualidade dos mapas.

São apresentados, a seguir, vários *shakemaps* obtidos com diferentes conjuntos de dados, mostrando como o processo de integração de novos dados melhora substancialmente a qualidade destes mapas, tornando-os mais fiáveis e mais próximos das observações. Os *shakemaps* apresentados foram calculados com os valores de magnitude aparente obtidos pelo ajuste da curva teórica aos dados observados.

Na figura 6-a) está representado o mapa de distribuição de intensidade instrumental estimada pelo *ShakeMap* tendo como dados de *input*, apenas a localização hipocentral e a magnitude (os parâmetros básicos do sismo).

Na figura 6-b) está representado o mapa de distribuição de intensidade instrumental tendo como dados de *input*, por um lado, a localização hipocentral e a magnitude e, por outro lado, as medições instrumentais efetuadas nas estações sísmicas, que estavam disponíveis inicialmente. Nesta figura, observam-se os constrangimentos impostos pela presença de medições instrumentais efetuadas em estações sísmicas, nomeadamente na estação EVO próxima da zona epicentral.

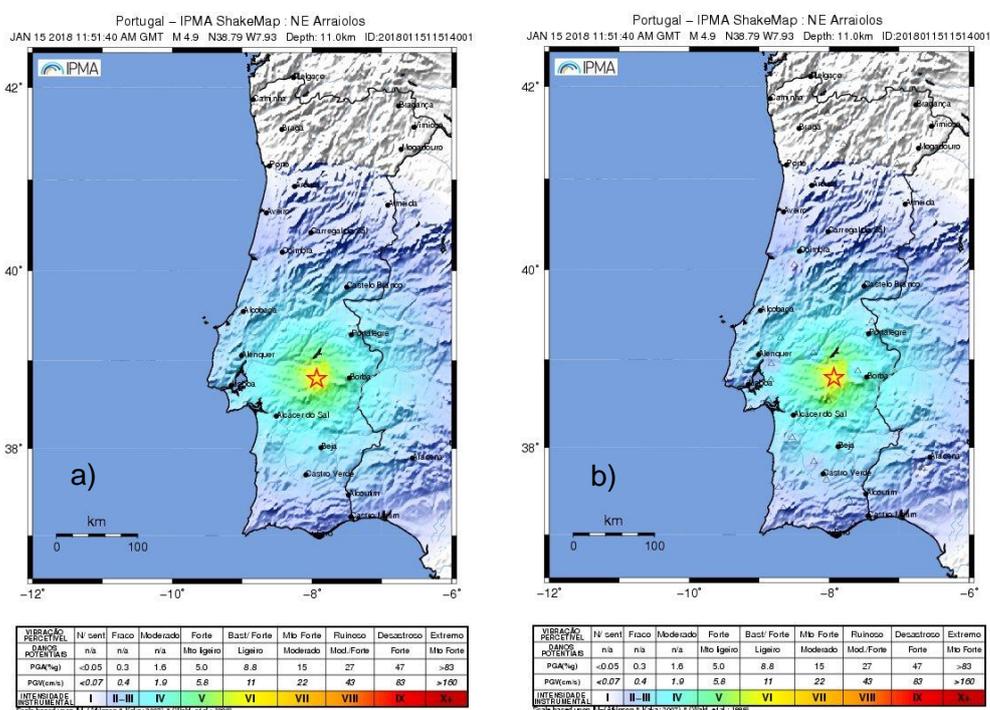


Fig. 6 – Mapa de intensidade instrumental para o sismo de Arraiolos ocorrido em 15-01-2018, ML= 4,9, com informação sobre: a) hipocentro e magnitude; b) hipocentro, magnitude e medições instrumentais. Os triângulos representam a localização das estações sísmicas e os pequenos círculos a localização das observações macrossísmicas.

Na figura 7-a) está representado o mapa de distribuição de intensidade instrumental como dados de *input* os parâmetros básicos do sismo, as medições instrumentais iniciais e observações macrossísmicas em vários locais, que estavam disponíveis 20min após a ocorrência do sismo. Estas observações macrossísmicas são todas resultantes da avaliação macrossísmica automática das respostas ao questionário macrossísmico da página da internet do IPMA. Ao fim de 20 minutos haviam 13 locais com observações macrossísmicas validadas. Observa-se que a distribuição de intensidade instrumental se aproxima dos valores das observações macrossísmicas nos locais onde estas existem.

Na figura 7-b) está representado resultado final do mapa de distribuição de intensidade instrumental estimada pelo *ShakeMap* tendo como dados de *input* todos os dados

disponíveis, que incluem além dos parâmetros básicos do sismo, todas as medições instrumentais revistas e todas observações macrossísmicas (apenas foram usados os resultados obtidos no IPMA). A figura realça a zona de maior impacto do sismo (zona de Arraiolos) e ainda a variação do nível de percepção do sismo. Verifica-se que os dados de medições instrumentais são fundamentais para obter mapas fiáveis assim como as observações de intensidades para constranger o campo macrossísmico.

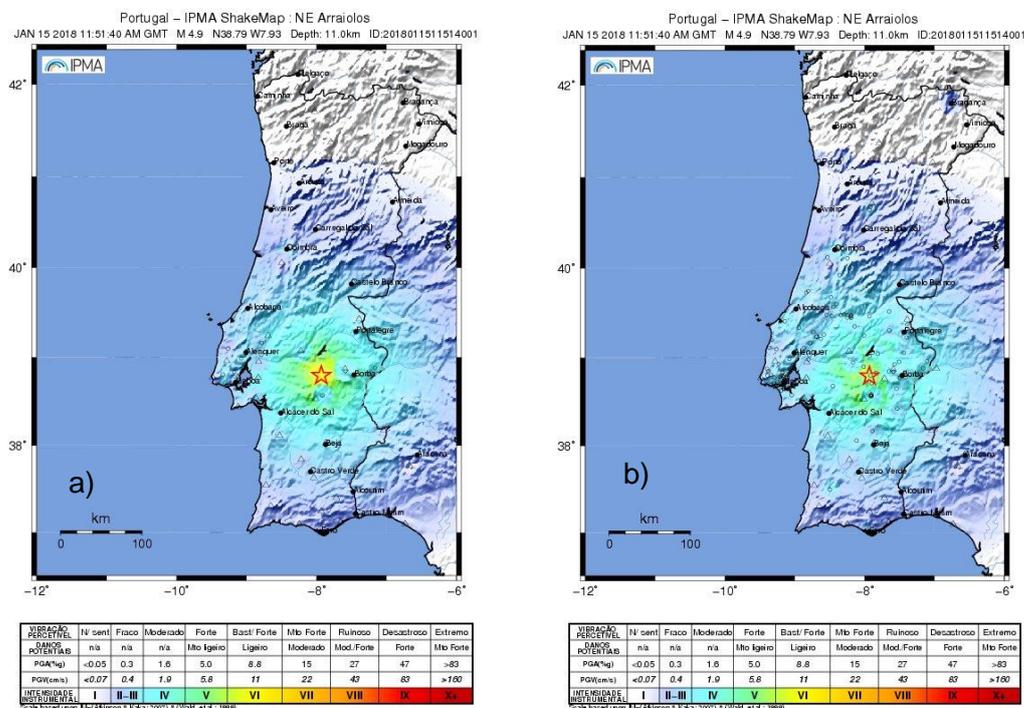


Fig. 7 – Mapa de intensidade instrumental para o sismo de Arraiolos ocorrido em 15-01-2018, ML= 4,9, usando como dados de *input*: a) parâmetros básicos do sismo, medições instrumentais e observações macrossísmicas disponíveis 20 minutos após a ocorrência do sismo; b) todos os dados disponíveis (parâmetros básicos do sismo, medições instrumentais e observações macrossísmicas).

Este sismo, de acordo com testemunhos locais, foi sentido com intensidade máxima V/VI (IMM) na zona de São Gregório (Arraiolos), tendo sido sentido com intensidades V em Arraiolos, Vimieiro, Igreja, Pavia e com menor intensidade em outros locais de Portugal continental, tendo sido sentido também em Espanha.

O ShakeMap gera um ficheiro no formato KML que permite representar as observações macrossísmicas e as estações sísmicas sobre o GoogleEarth (figura 8). É utilizada a escala de cores do *shakemap* de intensidade instrumental para indicar o valor da intensidade sísmica nos locais onde existem observações. São também utilizadas isolinhas para separar zonas de diferentes intensidades sísmicas. Na figura 8-a) estão representados os resultados obtidos com as observações macrossísmicas do IPMA.

Comparando estes resultados com os resultados dos inquéritos macrossísmicos levados a cabo pelo ICT (figura 8-b) de uma forma geral, verifica-se que os resultados obtidos pelo IPMA e pelo ICT são globalmente concordantes, sobretudo em termos de área ocupada por cada valor de intensidade. Contudo, em detalhe, a forma de cada isolinha é diferente. Existem fatores como número de observações macrossísmicas e os problemas inerentes à aquisição, tratamento e interpretação, sobejamente conhecidos, podem explicar as diferenças observadas. Para a obtenção destes dois resultados foi efetuado o mesmo procedimento, apenas são diferentes as observações macrossísmicas integradas no ShakeMap como dados de *input*.

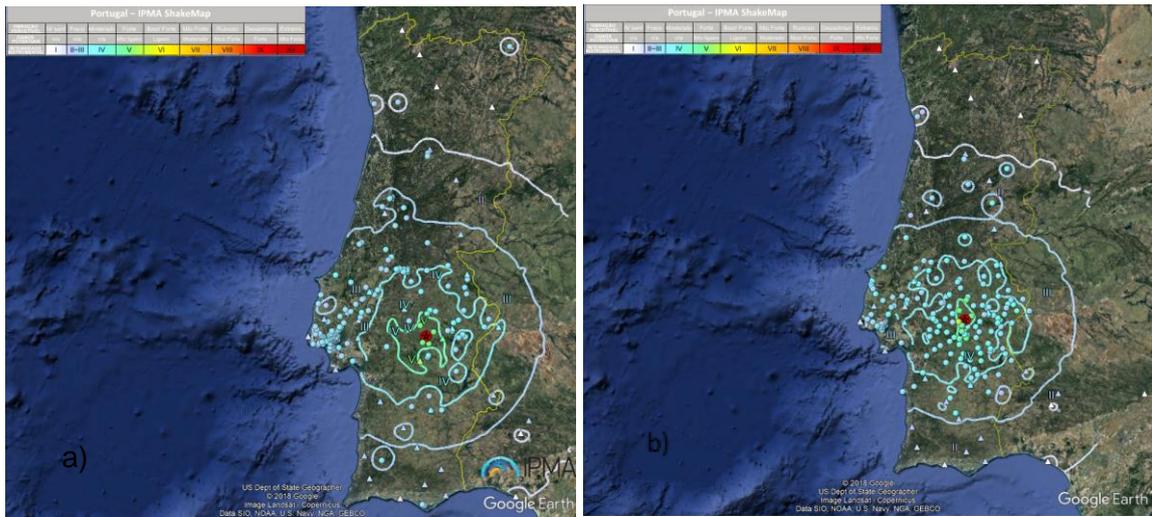


Fig. 8 – Representação sobre o GoogleEarth dos resultados do *ShakeMap* com integração de observações macrosísmicas que foram resultado de avaliação efetuada por: a) IPMA; b) ICT.

Na figura 9-a) os contornos representam a distribuição de PGA (%g) sobre o mapa topográfico da região e na figura 9-b) os contornos representam a distribuição de PGV (cm/s) sobre o mapa topográfico da região.

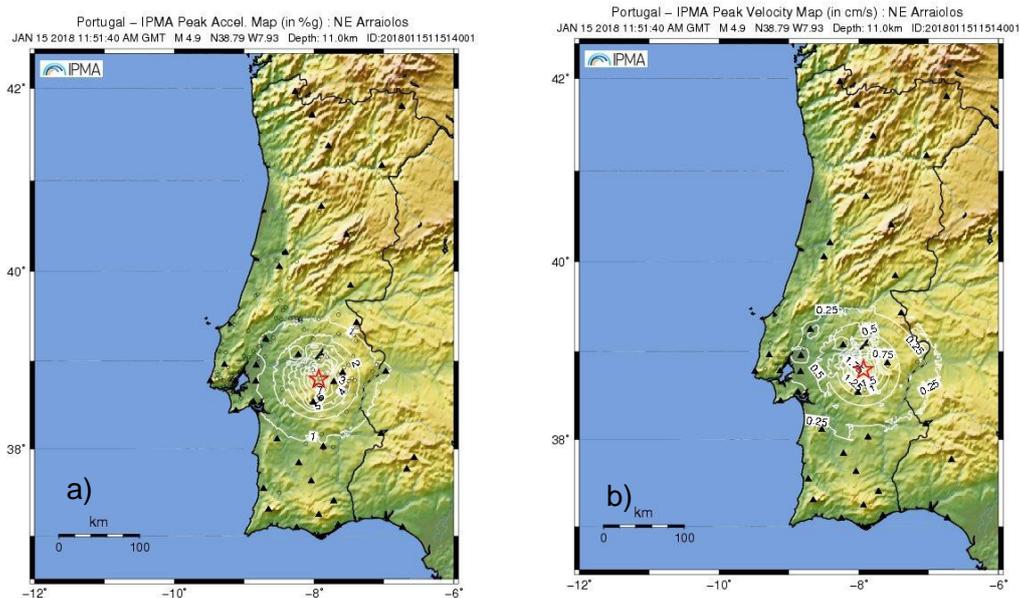


Fig. 9 – Mapa gerados pelo *ShakeMap* para o sismo ocorrido em 15-01-2018, ML= 4.9 (Arraiolos): a) PGA; b) PGV; os triângulos representam a localização das estações sísmicas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *ShakeMap* permite uma identificação/visualização rápida da zona de maior impacto do sismo. A incorporação dos dados, consoante estão disponíveis é importante para melhorar a qualidade dos mapas. A revisão dos dados é igualmente importante para evitar erros quase sempre presentes em processos automáticos.

No sentido de melhorar a qualidade dos *shakemaps* produzidos para Portugal é importante proceder ao melhoramento das leis de atenuação de PGA e de PGV.

Os mapas de intensidade instrumental produzidos com integração de observações macrossísmicas são mais consistentes com estas observações e revelam alguns detalhes que não são visíveis nos mapas onde não estão incluídas estas observações. Além disso, a integração destes dados é particularmente útil para locais onde não existem medições instrumentais.

Em termos de trabalho futuro, pretende-se adicionar ao sistema SEISAN medições automáticas de PSA (pseudo-aceleração espectral) e publicar por rotina *shakemaps* para a região dos Açores na página da *internet* do IPMA.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos às equipas de campo do IPMA e da Universidade de Évora.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Alves P.M., Marreiros C. & Carrilho F. (2012) New Developments on Automatic Macroseismic Evaluation Based on Internet Questionnaires at I.M., I.P. The 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisboa, Portugal, pp. 10.
- [2] Atkinson, G.M. & Kaka, S. (2007). "Relationships between Felt Intensity and Instrumental ground Motion in the Central United States and California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 497-510.
- [3] Borchardt, R.D. (1994) Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra*, 10, 617-654.
- [4] Havskov & J. Ottemoler L.(2005) SEISAN: The Earthquake Analysis Software. Department of Earth Science, University of Bergen, pp 254.
- [5] Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). (2010). Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000.000.
- [6] Marreiros C. & Carrilho F. (2012) The ShakeMap at Instituto de Meteorologia, I.P. The 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisboa, Portugal, pp. 8.
- [7] Teves-Costa P., I.M. Almeida, C. Marreiros & C. Catita. (2011). "Metodologia para a estimativa e implementação de VS30 nos *shakemaps*.", 7º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Setúbal, 28-30 Março.
- [8] Wald, D.J., V. Quitoriano, T.H. Heaton, H. Kanamori, C.W. Scrivner, and C.B. Worden (1999a) TriNet "ShakeMaps": Rapid Generation of Instrumental Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California. *Earthquake Spectra*, 15, 3, 537-556.
- [9] Wald, D.J., V. Quitoriano, T.H. Heaton, H. Kanamori (1999b) Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity and modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra*, 15, 3, 557-564.
- [10] Wald, D.J., B.C. Worden, V. Quitoriano and K.L. Pankow (2005) ShakeMap Manual: Technical Manual, User's Guide, and Software Guide. USGS Techniques and Methods 12-A1, 156 pp., <http://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/>.
- [11] Worden, C.B., Wald, D.J., Allen, T.I., Lin, K., Garcia, D. & Cua, G. (2010) A Revised Ground-Motion and Intensity Interpolation Scheme for ShakeMap. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 3083-3096.
- [12] Schenková, Z., Schenk, V., Kalogeras, I., Pichl, R., Kottnauer, P., Papatsimba, C., & Panopoulou, G. (2007). Iseismal maps drawing by the kriging method. *Journal of Seismology*, 11(1), 121-129