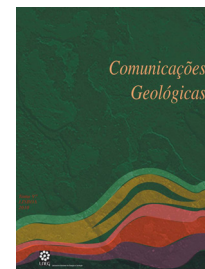


Sismo de Áquila (2009): influência do modelo de fonte sísmica e da estrutura para a simulação de movimentos sísmicos intensos

Áquila Earthquake (2009): influence of seismic source model and structure to modeling the strong ground motions

R. J. Oliveira^{1*}, B. Caldeira², J. F. Borges²



Artigo Curto
Short Article

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: O sismo, ocorrido em 6 de Abril de 2009 (Mw 6,3) junto à cidade de Áquila (Itália), provocou uma grande destruição. Uma das consequências deste evento foi o impacto na opinião pública em torno da capacidade científica para a estimação da perigosidade sísmica e a necessidade de criação de sistemas de alerta sísmico. A determinação dos mecanismos de fonte sísmica de eventos sísmicos ocorridos e registados permite melhores caracterizações dos movimentos sísmicos para uma determinada área de estudo e consequentemente melhores cenários de risco. Se a região em estudo possuir propriedades físicas específicas e muito distintas de local para local, capazes de provocar alterações locais dos movimentos sísmicos (efeitos de sítio), torna-se imperativo uma caracterização bem definida do meio de propagação das ondas sísmicas de forma a poder sintetizar informação capaz de contribuir para a boa estimação da perigosidade sísmica. No âmbito deste trabalho pretende-se estudar a influência do mecanismo de fonte sísmica e da estrutura na modelação de movimentos sísmicos no caso de Áquila. A metodologia adoptada consiste na determinação da distribuição de deslizamentos sobre o plano de falha e utilização desta informação na modelação de sismogramas sintéticos (com recurso ao algoritmo E3D). Será igualmente estabelecida uma comparação de resultados considerando-se um meio com e sem bacia e considerando-se uma fonte pontual e uma fonte extensa.

Palavras-chave: Sismo de Áquila, Sismotectónica, Mecanismo de fonte sísmica, Modelação de movimentos sísmicos fortes.

Abstract: The earthquake of April 6, 2009 (Mw 6,3), near the city of L'Aquila (Italy), caused a great destruction. One consequence of this event was the effect on public opinion about the scientific capacity to estimate the seismic hazard and the need to create seismic warning systems. The determination of seismic source mechanisms of seismic events occurred and recorded allows better characterization of ground motions for a particular study area and therefore better risk scenarios. If the study area has specific and very different physical properties from place to place, capable of causing local changes of seismic movements (site effects), it becomes imperative to a well-defined characterization of the medium of propagation of seismic waves in order to be able synthesize information capable of contribute to good estimation of seismic hazard. In this work we intend to study the influence of the seismic source mechanism and structure for modeling ground motions in the case of Aquila. The methodology consists in determining the slip distribution on the fault plane and uses this information in the modeling of synthetic seismograms (using E3D algorithm). It will also establish a

comparison of results considering a medium with and without basin and considering a point source and an extended source.

Keywords: Áquila earthquake, Seismotectonics, Seismic source mechanism, Strong motion modeling.

¹Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, Évora.

²Departamento de Física e Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, Évora.

*Autor correspondente / Corresponding author: ruio@uevora.pt

1. Introdução e enquadramento sismotectónico

A região de Áquila (Fig. 1) está localizada no interior da Cadeia Apennina, em Itália, que se formou no Oligocénico durante a orogenia alpina-himalaia. A partir do Pliocénico, esta região foi afectada por deformação extensional, que terá descolado as estruturas por tectónica compressiva (Cavinato & Celles, 1999), tendo-se originado falhas normais com direcção NW-SE, paralelas ao eixo da cadeia. Esta dinâmica compressiva originou a formação de diversas depressões intra-montanhas, resultantes da ocorrência de *half-grabens*, onde ocorreu deposição continental.

Estudos estruturais e paleo-sísmicos revelam que esta região exhibe sismicidade elevada em redor dos sistemas de falhas normais cuja direcção é paralela ao eixo da cadeia montanhosa (De Natale *et al.*, 1988; Bernard & Zollo, 1989; Westaway & Smith, 1989). Estes sistemas de falhas estão associados a eventos sísmicos de intensidade elevada nos últimos 1000 anos (Bachetti *et al.*, 1990; Lavecchia *et al.*, 1994; Galadini & Galli, 2000), ocorridos em 1349, 1461 e 1703 (IX-X Mercalli), existindo também diversas ocorrências de menor intensidade (VII-VIII Mercalli).

O sismo ocorrido em Áquila em 2009 (Mw 6,3) constitui um dos eventos com mecanismo de falha normal melhor registados e com dados disponíveis, por isso foi a escolha para este estudo. Áquila está localizada sobre um terraço fluvial que constitui a margem esquerda do rio Aterno. A sua altitude média ronda os 900 m na parte nordeste da cidade, diminuindo abruptamente para os 675 m no sector

sudoeste. As ocorrências litológicas nesta área consistem em depósitos fluviais quaternários, cuja espessura é da ordem das dezenas de metros, compostos por brechas com seixos e clastos de calcário envolvidos por uma matriz margosa, que assentam sobre níveis de areia e siltes e por vezes gravilhas de natureza lacustrina, com espessura entre 100 m, em redor do rio Aterno, e 250 m, no centro de Áquila (Blumetti *et al.*, 2002; De Luca *et al.*, 2005).

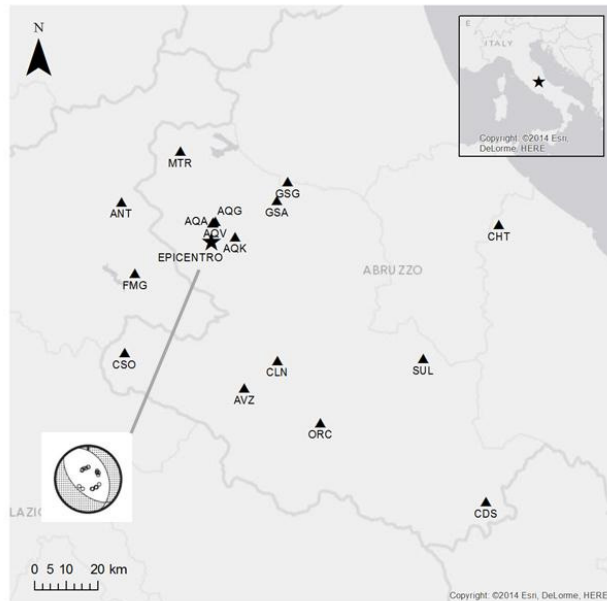


Fig. 1. Localização do epicentro do sismo de Áquila (2009) e das estações sísmicas da rede ITACA, da bacia sedimentar considerada nas simulações e representação do mecanismo focal resultante da modelação da fonte sísmica, compatível com o mecanismo focal do sismo.

Fig. 1. Locations of the epicenter of the earthquake of L'Aquila (2009) and seismic stations from ITACA network, the sedimentary basin considered in the simulations and representation of the focal mechanism resulted from modeling of seismic source, compatible with focal mechanism of the earthquake.

2. Mecanismo de ruptura

O sismo de Áquila foi originado por uma ruptura constituída por deslizamentos de mecanismo normal, sobre um plano de falha com traço orientado na direcção N133°E (*strike*) e com inclinação 54°SW (*dip*) (Cirella *et al.*, 2009). Para a modelação da fonte foram fixadas as dimensões do plano de falha: 24 km na direcção do comprimento por 18 km na direcção da inclinação.

A distribuição de deslizamentos sobre o plano de falha foi estimada por inversão da forma de onda com o algoritmo MOM3 (Kikuchi & Kanamori, 2003). Para o efeito foram usadas 23 componentes verticais de ondas de volume (P), registadas por estações telessísmicas de banda larga localizadas a distâncias angulares que variam entre 30° e 50°, obtidos no consórcio IRIS. O intervalo das distâncias angulares foi reduzido (de entre 30° e 90°) devido a que para distâncias superiores a razão sinal-ruído aumenta drasticamente, não permitindo uma boa determinação do mecanismo de fonte sísmica. Os dados

foram decimados para uma frequência de amostragem de 5 Hz, desconvolvidos do instrumento e filtrados com um filtro Butterworth, passa banda, entre 0,01 e 1 Hz.

O plano de falha modelado é composto por 56 sub-falhas quadradas com 3 km de lado, com hipocentro localizado a 14,1 km de profundidade. De acordo com esta geometria, o traço do plano de falha encontra-se a cerca de 3,41 km da superfície. A velocidade máxima de ruptura foi fixada em 3 km/s e foi usado um modelo de ruptura de três janelas múltiplas para cada sub-falha, governadas por funções temporais, triangulares e parcialmente sobrepostas, cada uma com duração de 0,8 s.

Os resultados da inversão conduzem a uma distribuição de deslizamentos sobre o plano de falha com um *rake* médio de -106°, que correspondente a um mecanismo de falha normal com componente de desligamento direito. O momento sísmico escalar total foi de 0,161x10¹⁹ N.m, que corresponde a $M_w = 6,07$, e o deslizamento máximo foi de 1,26 m. O plano de falha possui uma asperidade (Fig. 2a), localizada próximo do hipocentro, que terá libertado momento sísmico no início da ruptura. A figura 2b representa a função temporal da fonte, com a distribuição do momento sísmico sobre o plano de falha ao longo de cerca de 6,6 s. Os sismogramas sintéticos assemelham-se aos sismogramas observados, no entanto, existem algumas formas de onda sintéticas que divergem dos dados observados, provavelmente devendo-se a algum efeito de sítio ou problemas de anisotropia não contemplada no modelo de velocidades usado.

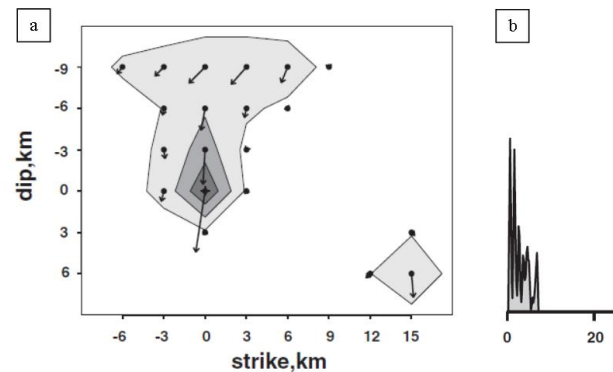


Fig. 2. a) Distribuição de deslizamentos sobre o plano de falha; b) evolução temporal da libertação do momento sísmico.

Fig. 2. a) Slips distribution on the fault plane; b) temporal evolution of liberation of seismic moment.

3. Simulações de movimento sísmico

Calculado o modelo de fonte sísmica, pretendendo-se testá-lo, pondo-o à prova ao simular-se os movimentos sísmicos fortes próximos da fonte, os movimentos responsáveis pela grande destruição verificada, cujos registos foram disponibilizados pelo Italian ACcelorometric Archive. Para se estabelecer uma boa base para a comparação dos movimentos sintéticos e observados, ensaiaram-se quatro situações de simulação usando uma metodologia de cálculo de propagação de ondas sísmicas em meios 3D. As

situações são fonte sísmica extensa ou pontual, considerando um modelo de velocidades com e sem a bacia de Áquila. O cálculo da propagação de ondas foi feito com o algoritmo E3D, um código explícito de diferenças finitas, desenvolvido por Larsen & Schultz (1995), baseado no trabalho de Madariaga (1976).

Os parâmetros que definem o meio elástico, onde as ondas sísmicas se propagam, são: a) geometria e dimensão da grelha de diferenças finitas; b) velocidade das ondas P e S, densidade e parâmetros de atenuação em todas as células dessa grelha. Para o efeito foi usada uma grelha com origem a cerca de 125 km a SW do epicentro, com 220 km na direcção N-S, 240 km na direcção E-W e 50 km de profundidade. A malha dessa rede é cúbica com 0,5 km de aresta. Os parâmetros usados para definir o meio para fora da bacia foram determinados por Bagh *et al.* (2007) e para o interior da bacia foram determinados por Ameri *et al.* (2012). Os movimentos sísmicos são simulados para os locais das 16 estações sísmicas espalhadas pela área de estudo, dos quais se possui dados observados que irão ser comparados. A fonte sísmica pontual é governada temporalmente por uma função temporal triangular com 3,4 s de duração, normalizada; na situação de fonte extensa foi usado o modelo de distribuição de deslizamentos obtido por inversão de ondas P a distâncias telessísmicas, governada temporalmente por uma função temporal triangular com 0,5 s de duração, normalizada.

Para se poder estabelecer uma comparação quantificada entre os dados sintéticos e correspondentes observados é necessário o mesmo tratamento a ambas as colecções (sintéticos e observados): taxa de amostragem, filtragem e normalização das amplitudes. Finalmente, a comparação é feita através do cálculo do desvio quadrático médio normalizado (NRMSD) das amplitudes dos sismogramas sintéticos e observados (Tabela 1).

Tabela 1. Desvio quadrático médio normalizado entre sismogramas sintéticos e sismogramas observados para as estações sísmicas da área de estudo. As células assinaladas representam o melhor ajuste de cada estação.

Table 1. Normalized root mean square deviation between observed seismograms and synthetic seismograms for seismic stations of the study area. The cells marked represent the best fit for each station.

Estação	Fonte pontual	Fonte pontual	Fonte extensa	Fonte extensa
	Com bacia	Sem Bacia	Com bacia	Sem bacia
ANT	1,5210	1,4485	1,1131	1,2238
AQA	0,6856	0,6736	0,5956	0,3960
AQG	0,6674	0,6637	0,5785	0,3973
AQK	0,0789	0,2902	0,1733	0,0381
AQV	0,4693	0,5743	0,4184	0,2586
AVZ	0,5105	0,4523	0,7015	0,7691
CDS	7,3896	6,3784	4,1025	4,0245
CHT	0,2905	0,2268	0,2805	0,3719
CLN	0,3020	0,2801	0,5648	0,5644
CSO	0,6704	0,6411	0,9848	0,9438
FMG	1,5467	1,5156	1,5800	1,4999
GSA	0,0446	0,2702	0,1541	0,1990
GSG	0,3345	0,2257	0,1631	0,2612
MTR	2,3896	2,2014	1,2415	1,2397
ORC	0,5784	0,4372	0,7045	0,6516
SUL	0,1202	0,1558	0,3186	0,2452

O desvio entre dados sintéticos e observados é tanto mais próximo de zero quanto melhor seja a similitude entre os dados observados e sintéticos. Para a maioria das estações, o NRMSD é muito baixo, o que significa que os sismogramas observados e sintéticos são semelhantes. Na figura 3 pode-se ver o exemplo da estação que possui o menor desvio dos dados observados. Dos quatro cenários analisados, é evidente que o movimento sísmico para estações próximas do epicentro fica melhor modelado se se considerar a fonte extensa; para estações afastadas a modelação que melhor se adequa é com fonte pontual, no entanto, de uma forma geral, a fonte extensa origina melhores resultados. A existência de bacia não provoca melhorias na modelação, provavelmente devendo-se a uma inadequada parametrização da atenuação das ondas sísmicas no interior da bacia.

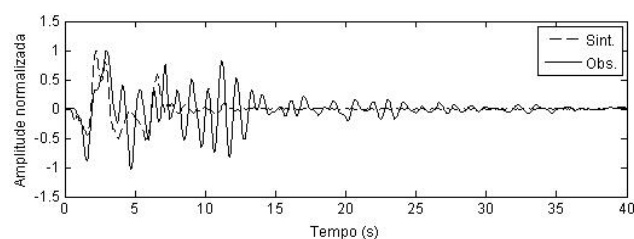


Fig. 3. Comparação entre sismograma sintético e sismograma observado referente à estação AQK (NRMSD = 0,0381).

Fig. 3. Comparison between synthetic seismogram and observed seismograms for station AQK (NRMSD = 0,0381).

4. Conclusão

A análise dos resultados permite retirar algumas conclusões sobre a fonte sísmica e sobre o meio geológico da área de estudo. O modelo de fonte sísmica extensa que se calculou por inversão explica os principais efeitos do sismo sentido em Áquila em 2009. A distribuição de deslizamentos mostra uma grande coerência na direcção dos movimentos produzidos nas várias sub-falhas, compatível com um mecanismo de falha normal. O modelo de distribuição de deslizamentos mostra que o momento sísmico foi libertado maioritariamente numa asperidade, junto ao hipocentro, de forma elíptica alongada na direcção da largura da falha concentrando a totalidade do momento sísmico escalar total. A ruptura propaga-se nos primeiros 2,4 s sobre a asperidade à volta do hipocentro com ligeira deslocação para SW. Relativamente à importância de se considerar ou não as estruturas da bacia no cálculo da propagação das ondas, verifica-se que quando a bacia é considerada não existem melhorias nos dados sintéticos, devendo-se provavelmente a uma inadequada escolha dos valores de atenuação da propagação das ondas sísmicas. Relativamente aos modelos de ruptura verifica-se que os modelos de fonte extensa conduzem para a generalidade das estações a melhores sismogramas sintéticos face ao modelo de fonte pontual ainda que este fosse definido com uma função temporal da fonte semelhante ao da fonte extensa. Para as estações localizadas no interior e nas proximidades da

bacia é evidente que o modelo de fonte extensa produz os sismogramas sintéticos mais próximos dos dados observados, validando a estimativa de distribuição de deslizamentos determinada neste trabalho.

Agradecimentos

Um agradecimento ao Italian Accelerometric Archive pela cedência dos dados sísmicos observados e ao Centro de Geofísica de Évora pelo apoio e facilidade dos meios de cálculo necessários através do Cluster Terra.

Referências

- Ameri, G., Gallović, F., Pacor, F., 2012. Complexity of the Mw 6.3 2009 L'Aquila (central Italy) earthquake: 2. Broadband strong motion modeling. *Journal of Geophysical Research*, **117**, B04308.
- Bachetti, C., Blumetti, A.M., Calderoni, G., Ridolfi, M., 1990. Attività neotettonica e paleosismica nel settore meridionale e dei Monti della Laga. *Rendiconti Società Geologica Italiana*, **13**, 9–16.
- Bagh, S., Chiaraluce, L., Gori, P., Moretti, M., Govoni, A., Chiarabba, C., Bartolomeo, P., Romanelli, M., 2007. Background seismicity in the Central Apennines of Italy: The Abruzzo region case study. *Tectonophysics*, **444**, 80-92.
- Bernard, P., Zollo, A., 1989. The Irpinia 1980 earthquake: detailed analysis of a complex normal faulting. *Journal of Geophysical Research*, **94**, 1631–1648.
- Blumetti, A.M., Di Filippo, M., Zaffiro, P., Marsan, P., Toro, B., 2002. Seismic hazard of the city of L'Aquila (Abruzzo - Central Italy): new data from geological, morphotectonic and gravity prospecting analysis. *Studi Geologici Camerti*, **1**, 7–18.
- Cavinato, G., De Celles, P., 1999. Extensional basins in the tectonically bimodal central Apennines fold thrust belt, Italy: response to corner flow above a subducting slab in retrograde motion. *Geology*, **27**, 955-958.
- Cirella, A., Piatanesi, A., Cocco, M., Tinti, E., Scognamiglio, A., Michelini, A., Lomax, A., Boschi, E., 2009. Rupture history of the 2009 L'Aquila (Italy) earthquake from non-linear joint inversion of strong motion and GPS data. *Geophysical Research Letters*, **36**, L19304, 15 p.
- De Luca, G., Marcucci, S., Milana, G. and Sanò, T., 2005. Evidence of Low-Frequency Amplification in the City of L'Aquila, Central Italy, through a Multidisciplinary Approach Including Strong- and Weak- Motion Data, Ambient Noise, and Numerical Modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 1469-1481.
- De Natale, G., Pingue, F., Scarpa, R., 1988. Seismic and ground deformation monitoring in the seismogenetic region of the Southern Apennines, Italy. *Tectonophysics*, **152**, 165–178.
- Galadini, F., Galli, P., 2000. Active tectonics in the central Apennines (Italy) - input data for seismic hazard assessment. *Natural Hazards*, **22**, 225–270.
- Kikuchi, M., Kanamori, H., 2003. Note on Teleseismic Body-Wave Inversion Program. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/ETAL/KIKUCHI> (consultado em 22/03/2014).
- Larsen, S., Schultz, C., 1995. *ELAS3D, 2D/3D Elastic Finite-Difference Wave Propagation Code*, Lawrence Livermore National Laboratory. UCRLMA-121792, 18 p.
- Lavecchia, G., Brozzetti, F., Barchi, Keller, M., Menichetti, M., 1994. Seismotectonic zoning in east-central Italy deduced from an analysis of the Neogene to Present deformations and related stressfields. *Geological Society of America Bulletin*, **106**, 1107–1120.
- Madariaga, R., 1976. Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66(3)**, 639–666.
- Westaway, R., Smith, R., 1989. Strong ground motion in normal faulting earthquakes. *Geophysical Journal*, **96**, 529–559.