

Acknowledgements. Subprogram S3 2008-2009 of the National Civil Defense of Italy and the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) supported this research.

References

- Atkinson G., Wald D. J.; 2007: "Did You Feel It?" Intensity data: a surprisingly good measure of Earthquake ground motion. *Seismological Research Letters* 78(3), 362-368.
- Bakun W. H., Wentworth C. M.; 1997: Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(6), 1502-21.
- Hauksson E., Felzer K., Given D., Giveon M., Hough S., Hutton K., Kanamori H., Sevilgen V., Wei S., Yong A.; 2008: Preliminary report on the 29 July 2008 Mw 5.4 Chino Hills, eastern Los Angeles Basin, California, earthquake sequence. *Seismological Research Letters* 79(6), 855-866.
- Magri L., Mucciarelli M., Albarello D.; 1994: Estimates of site seismicity rates using ill-defined macroseismic data, *Pure and Applied Geophysics* 143 (4), 617-632.
- Michellini A., Faenza L., Lauciani V., Malagnini L.; 2008: ShakeMap implementation in Italy. *Seismological Research Letters* 79(5), 688-697.
- Pettenati F., Sirovich L., Cavallini F.; 1999: Objective Treatment, and Synthesis of Macroseismic Intensity Data Sets Using Tessellation. *Bulletin of the Seismological Society of America* 89(5):1203-1213.
- Sirovich L., Pettenati F., Chiaruttini C.; 2001: Test of Source-Parameter Inversion of Intensity Data. *Natural Hazards*, 24(2), 105-31.
- Sirovich L., Pettenati F. and Sandron D.; 2008: South Los Angeles: low seismic intensities from the July 29, 2008 earthquake do not imply permanent safety. *NGGTS 2008, Riassunti estesi delle comunicazioni*, 295-298.
- Sirovich L., Pettenati F.; 2009: Validation of a Kinematic and Parametric Approach to Calculating Intensity Scenarios. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 29, 1113-1122.
- Sirovich L., Pettenati F. and Sandron D.; 2009: Source- and site-effects in the intensities of the M5.4 July 29, 2008 Earthquake in South Los Angeles. *Seismological Research Letters*, 80, 6, in press.
- Wald D. J., Quitoriano V., Heaton T. H., Kanamori H., Scrivner C. W., Worden C. B.; 1999: TriNet "ShakeMaps": Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California. *Earthquake Spectra* 15, 537-555.
- Wald D. J., Worden B. C., Quitoriano V., Pankow K. L.; 2006: ShakeMap® Manual; technical manual, users guide, and software guide, Version 1.0 6/19/06, 1-156. Borchardt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60, 29-61.
- Wald D. J., Allen T. I.; 2007: Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America* 97(5), 1379-1395.

PRIMI RISULTATI DEL PROGETTO "MICROZONAZIONE SISMICA_AQ": LE MACROAREE 1 (L'AQUILA CENTRO) E 2 (L'AQUILA OVEST: CANSATESSA-PETTINO-COPPITO)

M. Tallini¹, G.P. Cavinato², G. Cavuoto², G. Decaterini¹, F. Del Monaco¹, M. Di Filippo³, V. Di Fiore⁴, M. Di Nezza³, G. Leone¹, P. Marsan⁵, G. Milana e gruppo di lavoro Microzonazione_INGV⁵, M. Moscatelli², A. Rapolla⁷, T. Sanò⁵, D. Tarallo⁷, P. Zaffiro¹

1 *DISAT, Università dell'Aquila*

2 *IGAG -CNR, Roma*

3 *Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Roma "La Sapienza"*

4 *IAMC-CNR, Napoli*

5 *Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Roma*

6 *INGV, Roma*

7 *Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Napoli "Federico II"*

Introduzione. Vengono presentati i primi risultati e indicate alcune tematiche da approfondire che le attività e le indagini multidisciplinari hanno evidenziato per le macroaree 1 (centro dell'Aquila) e 2 (L'Aquila Ovest: Cansatessa-Pettino-Coppito) nell'ambito del progetto "Microzonazione Sismica dell'Aquila – MS_AQ". Il progetto, coordinato dal DPC, è finalizzato alla realizzazione di carte di primo e secondo livello per la pianificazione urbanistica futura del comprensorio aquilano che ha subito il sisma del 6 aprile 2009 (Mw= 6.3).

L'area epicentrale della sequenza sismica del mainshock è localizzata nei pressi della piana dell'Aquila Ovest, che rappresenta uno dei bacini quaternari intramontani più tipici dell'Appennino

centrale, anche se con sue specifiche peculiarità. È un graben asimmetrico di 30 km² a forma triangolare bordato a N dalla faglia principale distensiva del M. Pettino e a sud, lungo la linea pedemontana tra Pagliare di Sassa e Campo di Pile, da una faglia distensiva antitetica nord-immersa ad attività tettonica almeno mediopleistocenica. La faglia del M. Pettino è considerata sismogenica con attività di crescita che ha condizionato fortemente la sedimentazione e l'asimmetria del graben; è orientata NW-SE ed E-W e ribassa verso la piana, a SW, di almeno 1000 m le unità pre-quadernarie. Il bacino, con il depocentro attuale spostato verso la faglia del M. Pettino, è stato in parte colmato da circa 200 m di depositi clastici continentali quadernari di ambiente lacustre, fluviale e di versante. Il substrato pre-Quaternario e i rilievi circostanti sono costituiti da unità meso-cenozoiche silico-calcareo-marnose con apporti calcareo-detritici, di transizione (unità dell'area Gran Sasso), e calcareo-dolomitiche di piattaforma carbonatica con soglia inclusa (unità dell'area dei Monti d'Ocre) deformate dalla dinamica orogenetica neogenica in pieghe e sovrascorrimenti.

Attività e task. Le attività del progetto MS_AQ per le due macroaree sono state condotte da differenti gruppi di lavoro nell'ambito dei seguenti task tematici:

- Task 1: reperimento e archiviazione dei dati pregressi (DISAT, DPC, IGAG);
- Task 2: definizione del modello geologico e geologico-tecnico del sottosuolo e fenomeni cosismici (DISAT, DPC, IGAG);
- Task 3: Caratterizzazione geofisica dei terreni (IAMC, UNINA, UNIROMA1);
- Task 4: Analisi strumentali degli aftershock e dei microtremiti (INGV);
- Task 5: Simulazioni numeriche (DPC).

Per le simulazioni numeriche (task 5) sono state utilizzate le informazioni relative alla determinazione del terremoto di riferimento fornite, nell'ambito del progetto, dall'Università di Chieti.

Task 1. Sono stati acquisiti oltre 600 sondaggi quasi tutti superficiali (profondità < di 30 m) e distribuiti in maniera discontinua, eseguiti negli anni passati prevalentemente per la caratterizzazione geognostica dei terreni di fondazione (archivi Bruno Taddei, Marco Tallini e DPC), che sono stati informatizzati dall'IGAG in un database territoriale creato ad hoc di tipo Open Source con piattaforma Arcgis. Il substrato calcareo-arenaceo è stato incontrato nella macroarea 2 in alcuni sondaggi, presso il Campo di Pile, la Valle dell'Aterno presso Cansatessa e la Reiss Romoli. Nella macroarea 1 due sondaggi a distruzione di nucleo eseguiti presso le due stazioni accelerometriche della RAN (Aquilpark e castello cinquecentesco) hanno raggiunto il substrato ad elevate profondità confermando, in parte, il modello geologico del sottosuolo estrapolato dai dati gravimetrici.

Task 2. È stato ricostruito un modello geologico del sottosuolo a partire da carte geologiche inedite ed inedite e rilievi eseguiti ad hoc che hanno portato all'elaborazione di una carta geologica di base alla scala 1:5.000 (DISAT, IGAG). Quindi sono stati elaborati una serie di profili geologici trasversali e longitudinali alla scala 1:10.000, disposti a griglia, interpretati fino al limite fra il Quaternario indifferenziato e il substrato calcareo-terrigeno sottostante (DISAT), limite calibrato con il dato gravimetrico (UNIROMA1). Per la caratterizzazione geologica e sismica dei terreni sono stati quindi pianificati e seguiti per ognuna delle macroaree 7 sondaggi a 30 metri su cui sono state eseguite le prove DH per la misura del profilo delle Vs e della Vs30 (IAMC, UNINA). Inoltre i rilievi geologico-geomorfologici eseguiti subito dopo il mainshock (DISAT, DPC, IGAG) hanno evidenziato, nelle due macroaree, alcuni fenomeni cosismici fra cui cedimenti, crolli di roccia in scarpate e della calotta di cavità superficiali, una frana rototraslazionale (nei pressi del Ponte del Belvedere) e un fenomeno locale di liquefazione (in un terrazzo alluvionale olocenico del F. Aterno nei pressi di Porta Napoli). Evidenti fessurazioni beanti estese diversi decine di metri sul bordo delle scarpate antropiche o, più raramente, naturali, del versante sud-ovest del colle dell'Aquila, a volte in vicinanza di edifici fortemente danneggiati (per es. nei pressi della casa dello studente) o addirittura crollati come quello nei pressi del Borgo Rivera, sono state sismoindotte. In alcuni casi è accertato il coinvolgimento con rotazioni o crolli parziali della struttura di contenimento, a volte costituita dalle mura medioevali. Non è chiaro al momento se tali fessurazioni siano imputabili a cedimenti superficiali o se abbiamo coinvolto livelli più profondi e che unità litotecniche abbiano inte-

ressato. I crolli di roccia sismoindotti si sono attivati in scarpate scolpite nelle brecce dell'Aquila alte da qualche metro ad oltre 10 metri con corpi franati da qualche metro cubo a qualche decina di m³ (Aquilpark, Colle Macchione, Coppito) che hanno interessato aree antropizzate (imbocco di gallerie, abitazioni, strade). Crolli di cavità cosismici sono stati identificati nel centro storico (via De Bartholomaeis e Via S. Andrea) e nei pressi del convento di S. Giuliano. È ancora da quantificare il ruolo delle cavità superficiali sulla stabilità degli edifici in caso di scuotimento sismico. Si può ipotizzare un eventuale effetto di "martellamento" o amplificazione della calotta sulle fondazioni superficiali oppure il crollo subitaneo della calotta che creerebbe una criticità sulla stabilità del complesso edificio-fondazione sovrastante.

Task 3. Le indagini gravimetriche sono state condotte da UNIROMA1 e hanno portato all'elaborazione di una carta gravimetrica delle anomalie di Bouger e delle anomalie residue. È stata quindi eseguita una modellazione numerica della gravimetria in 2D sulle sezioni geologiche basandosi su una semplificazione delle unità geologiche. Sono state infatti distinte quattro macrounità gravimetriche: le brecce dell'Aquila, il Quaternario indifferenziato (in cui sono stati raggruppati i depositi lacustri, alluvionali e di versante, oltre alle coltri colluviali), il substrato calcareo e quello arenaceo. Quest'ultima unità e i "limi lacustri antichi" si ritiene abbiano valori di densità simili e questo ha permesso di elaborare un modello geologico-gravimetrico che ha tenuto conto sia dei dati della geologia di superficie che di quello gravimetrico. Infatti i dati geologici di superficie (DISAT), corroborati da quelli dell'analisi sismica strumentale (INGV), inducono a ritenere che nel centro della piana affiori in maniera discontinua un retroscorrimento orientato circa E-W e immergente verso N con bassi valori di inclinazione. Il retroscorrimento produce la sovrapposizione delle unità calcaree di transizione (formazione della Maiolica del Colle dei Grilli) al di sopra delle arenarie torbiditiche facenti parte della parte più alta della monoclinale immergente a N, costituita dai calcari-marne-arenarie miocenici delle unità dei Monti d'Ocre (letto del retroscorrimento).

Le prospezioni sismiche sono state condotte da IAMC-UNINA nella macroarea 2 e sono consistite in 11 profili MASW e un profilo di sismica a riflessione lungo la sezione orientata NE-SW (dalla faglia del M. Pettino al F. Aterno), aventi come finalità, rispettivamente, la caratterizzazione della stratigrafia e la stima della velocità delle onde di taglio dei depositi di conoide e la ricostruzione del modello geologico del sottosuolo fino a 400 m di profondità dell'hangingwall della faglia del M. Pettino. Inoltre nelle due macroaree IAMC-UNINA hanno eseguito le prove DH dei 14 sondaggi eseguiti. Queste indagini hanno permesso di stimare per le quattro macrounità gravimetriche i valori delle Vs da adottare nella modellazione numerica.

Task 4. In sintesi il gruppo di lavoro INGV ha registrato gli aftershock (oltre 300 eventi) in 37 siti differenti dal 27 maggio al 3 luglio con 25 strumenti. Inoltre in oltre 130 siti è stata eseguita l'acquisizione dei microtremiti (INGV e in parte il DISAT). I dati di alcuni siti esemplificativi selezionati sono stati analizzati con la tecnica dei rapporti spettrali. I primi risultati confermano la presenza di forti amplificazioni nelle due macroaree. Il centro dell'Aquila è caratterizzato da un forte segnale a bassa frequenza (circa 0.6 Hz) sulle componenti orizzontali e un chiaro effetto anche su quella verticale con una frequenza leggermente più alta (1-1.5 Hz). Nella macroarea 2 si evidenziano forti amplificazioni che si distribuiscono da 2 a 4.5 Hz.

Task 5. Il DPC ha eseguito le simulazioni numeriche mono- e bi-dimensionali per la stima del fattore di amplificazione e l'elaborazione delle carte di secondo livello. Il DISAT e UNIROMA1 hanno elaborato le mappe e i profili geologici a scala 1:10.000 con le macrounità gravimetriche. Per ognuna delle quattro unità sono state indicate sinteticamente, a partire dai dati acquisiti con le indagini in situ e in laboratorio (DH e MASW fra tutte: misure eseguite da IAMC-UNINA), i valori di densità e Vs. È stata eseguita quindi sui profili semplificati un'analisi monodimensionale, con il software SHAKE ver. 91, dove questi presentano geometrie semplici (spessori costanti delle unità o limiti debolmente inclinati), e un controllo bidimensionale, con il software BESOIL, dove si incontrano nei profili variazioni laterali o limiti molto inclinati fra le unità. Quindi i valori di amplificazione ottenuti dalla modellazione sui profili è stata distribuita in pianta sulle mappe semplifica-

te alle quattro macrounità. Tutte le operazioni di cartografia automatica sono state eseguite ed elaborate dal DISAT secondo un protocollo proposto dall'IGAG.

Le tematiche da approfondire. Alcune tematiche necessitano ad oggi di una più approfondita analisi; di seguito se ne riportano quelle ritenute più cruciali:

1. migliore definizione degli spessori, della distribuzione areale e del comportamento sismico di eventuali terreni di riporto, dalle caratteristiche scadenti, ipoteticamente connessi alle macerie del terremoto del 1703. Sono stati con certezza identificati da sondaggi presso il ponte di Santa Apollonia e presso palazzo Camponeschi.
2. quantificazione del ruolo delle cavità superficiali sulla stabilità degli edifici in caso di scuotimento sismico.
3. entità delle fessurazioni indotte dal mainshock sulle scarpate mal o per nulla contenute della zona rossa e loro ruolo sulla stabilità degli edifici.
4. migliore definizione della distribuzione delle coltri eluvio-colluviali e degli orizzonti limosi dalle caratteristiche scadenti appoggiate o intercalate alle brecce dell'Aquila. Sono stati individuati dai sondaggi presso il Tribunale, l'imbocco di Via Roma e Via D'Annunzio (macroarea 1) e nella zona di Via Milonia (macroarea 2).
5. quantificazione del ruolo delle accelerazioni verticali nella modellazione numerica e nella stima del fattore di amplificazione.

Per un loro approfondimento si auspica che nel futuro si possano perseguire le seguenti attività:

1. infittire i dati del sottosuolo (sondaggi e prospezioni geofisiche) soprattutto per il centro dell'Aquila, area caratterizzata dalla pressoché totale copertura antropica.
2. esecuzione di sondaggi profondi per chiarire in via definitiva le geometrie in profondità dei calcari affioranti nell'area di Colle dei Grilli e lo spessore dei depositi quaternari.
3. rientrando questo progetto nell'ambito delle problematiche tipiche della geologia urbana è auspicabile che vi sia una verifica del modello geologico del sottosuolo integrando dati relativi alla storia urbanistica della città dell'Aquila, considerando il suo sviluppo storico-architettonico in relazione ai diversi eventi sismici, con relative distruzioni, che hanno colpito la città.
4. correlazione semiquantitativa o statistica fra le caratteristiche geotecniche dei terreni e quelle sismiche (frequenze di risonanza) al fine di parametrizzare e classificare i terreni in uno schema semplificato.
5. modellazioni numeriche sul comportamento sismico delle cavità superficiali e delle scarpate morfologiche relativamente alle situazioni geologico-morfologiche del colle dell'Aquila.

Ringraziamenti. Si ringrazia Giuseppe Naso, coordinatore del progetto MS_AQ, per i consigli e il continuo incoraggiamento nelle attività; Daniele Barnabei, Giancarlo Boscaino, Fabio Capaldi, Flavio Di Eusebio, Katia Di Nisio, Katia D'Onofrio, Mauro Manetta, Paola Monaco, Edoardo Peronace, Giorgio Pipponzi, Bruno Quadrio, Danilo Ranalli, Francesco Tironi e Gianfranco Totani che nelle diverse fasi hanno fornito utili informazioni o un aiuto logistico.

MICROZONATION OF THE CAMPI FLEGREI AREA EXTRAPOLATED FROM THE COMBINED ANALYSIS OF LITHOLOGICAL AND SEISMOLOGICAL INFORMATION

A. Tramelli , D. Galluzzo, M.A. Di Vito, E. Bellucci Sessa

INGV, Sezione di Napoli – Osservatorio Vesuviano

Campi Flegrei is a highly populated active caldera located in the South of Italy characterized by an highly complex geological and topographical structure (Di Vito et al., 1999). Several hundred thousand people leave within its active portion, also characterized by seismicity and ground deformation episodes, named “bradyseism”. For this reason this area falls in a high-risk category pressing the Italian Civil Defense to ask for a detailed site effect estimation. In order to determine the

local amplification of the seismic waves for a high number of sites we analyzed the seismic recordings of three seismic networks that were deployed in the Campi Flegrei area in different time periods: the Wisconsin network that recorded the earthquakes of the 1982-84 bradiseismic crises, the mobile seismic network deployed by the Osservatorio Vesuviano that is still working in the area and the seismic network that was deployed during the SERAPIS experiment of September 2001. Depending on the data available we applied different techniques to determine the seismic transfer functions. The Generalized Inversion Technique (Andrews, 1986) and the H/V spectral ratio method (Lermo et al., 1993) were applied both to the S and coda waves of the earthquakes; the Nakamura technique (Nakamura, 1989) was applied to the seismic noise recorded by the SERAPIS network (Gasparini, 1998). Due to the complexity of the geological and topographical structure, the seismic waves can behave peculiarly and have different amplifications also in nearby sites (Borcherdt, 1970). Because the area is widely extended it would be difficult and expensive to deploy a seismic network to define a microzonation. We aim to reach the same result extrapolating the punctual seismic information to all the surrounding area using morphological and lithological characteristics. The results show that the high topographical heterogeneity of the sites located inside of the caldera has an important influence on the seismic wave amplification. The transfer functions of the sites located outside the caldera are much more regular, probably due to the more regular topography and geology. In particular we notice that for the station located inside a basin, as the Astroni crater (Fig. 1), the site transfer function calculated with the H/V method is different from the one calculated with the Generalized Inversion Technique. This happens because the seismic wave vertical component is highly influenced by the topography effects. Also the stations located at the top of the

Camaldoli hill (Fig. 1) show peculiar site amplification. In this case the site transfer functions change also for stations that are less than 500 m far away. Interesting results are also found on La Starza marine terrace and in the Solfatarra crater (Fig. 1). Both this sites show an amplitude peak (higher for the Solfatarra) in the transfer function calculated with the H/V method in the frequency band 4-7 Hz. These two areas are characterized by thick sequences of

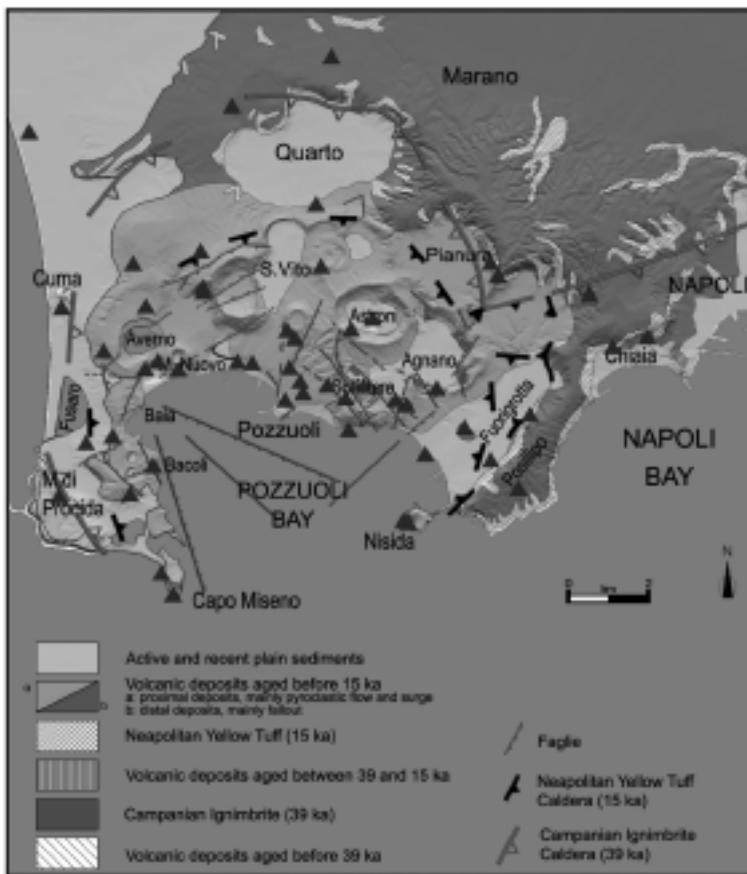


Fig. 1 - Geostructural map of Campi Flegrei modified after Orsi et al. (1996) and Di Vito et al. (1999). The seismic stations used for the analysis are indicated with blue triangles.