

Esperienze di monitoraggio integrato:
il caso della Rete Sismometrica
dell'Italia centro orientale e
dei suoi servizi

Quaderni di Geofisica



106

Quaderni di Geofisica

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

Esperienze di monitoraggio integrato: il caso della Rete Sismometrica dell'Italia centro orientale e dei suoi servizi

Experiences of integrated monitoring; the case of the Central Eastern Italy seismic network and its services

Giancarlo Monachesi¹, Marco Cattaneo¹, Chiara Ladina¹, Simone Marzorati¹,
Ezio D'Alema¹, Massimo Frapiccini¹, Simona Carannante¹, Maurizio Ferretti²,
Maurizio Sebastianelli², Alberto Delladio¹ e Giulio Selvaggi¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti)

²Regione Marche (Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza e per la Protezione Civile)

Esperienze di monitoraggio integrato: il caso della Rete Sismometrica dell'Italia centro orientale e dei suoi servizi

Viene presentata l'esperienza maturata dagli operatori della sede di Ancona dell'INGV (INGV-AN) nell'ambito delle collaborazioni tra l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e la Regione Marche per il miglioramento delle attività di monitoraggio sismico.

L'attività dell'INGV-AN aveva due scopi: migliorare le conoscenze sulla sismicità regionale a fini scientifici e perfezionare il servizio di informazione svolto per il Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza e per la Protezione Civile (DPISPC).

Per il raggiungimento degli scopi si è proceduto all'incremento del numero di stazioni, alla trasformazione in *real-time* della vecchia rete *dial-up*, alla installazione di nuove stazioni accelerometriche, e all'utilizzo del complesso dei dati raccolti dalle stazioni accelerometriche e velocimetriche in funzione nel territorio regionale e in quelli immediatamente limitrofi, nonché allo scambio dati tra la sede INGV di Ancona e quella di Roma.

I costi dell'intera operazione sono stati contenuti grazie all'utilizzo delle infrastrutture radio wireless della Regione Marche, della economica trasmissione UMTS, di acquisitori GAIA sviluppati dall'INGV e di economici ma efficaci accelerometri MEMS SF3000L della Colybris.

Gli obiettivi raggiunti sono i presupposti per il proseguimento della collaborazione tra i due enti rivolta alla copertura più ampia possibile del territorio regionale con reti di rilevamento accelerometrico a basso costo e alla realizzazione di servizi sempre più finalizzati all'emergenza sismica.

This paper describes the results of a joint venture undertaken by the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) and the regional government of the Marches for the improvement of earthquake monitoring in the regional territory. Besides adding many new monitoring stations to the original network, strong motion stations have been installed resorting – in order to keep down the costs of the operation - to selecting cheap but effective devices and using the existing regional wireless radio infrastructure. The data recorded by the apparatus operating within the region and in its immediate vicinity, together with a regular practice of data swapping that has been established between the Ancona branch of INGV and the INGV headquarters in Rome, allowed to achieve a dual aim: improving knowledge on the regional seismicity and supplying the Marches regional Department of Civil Protection with an efficient information service especially tailored to its particular requirements.

Introduzione

La Regione Marche gestisce da più di un decennio il settore del monitoraggio sismico in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) di Roma, sulla base di rapporti convenzionali stipulati con INGV dal suo Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza e per la Protezione Civile (DPISPC).

In questo ambito, nel 2008, la Regione Marche ha chiesto agli operatori della sede INGV di Ancona (INGV-AN) di

migliorare/ottimizzare il settore incrementando il numero di stazioni sismometriche e avviando lo sviluppo del monitoraggio accelerometrico su scala regionale [Monachesi G. e Cattaneo M., 2007].

La Regione intendeva così contribuire al miglioramento dell'attività di monitoraggio per scopi di protezione civile e scientifici, per perfezionare il servizio di informazione svolto dall'INGV per il DPISPC rendendolo maggiormente flessibile e calibrato sulle esigenze specifiche dell'utente.

Fino al 2008 il monitoraggio sismico nel territorio regionale e in quello più vasto dell'Italia centro-orientale veniva effettuato utilizzando i dati delle stazioni della rete sismometrica regionale *dial-up*, quelli delle stazioni della rete nazionale *real-time* e quelli delle reti regionali *dial-up* ricadenti nelle regioni limitrofe.

Nel progettare lo sviluppo delle attività si doveva tener conto di possibili sinergie. Per questo si è sviluppato il progetto integrando quanto già esistente, aumentando il numero di stazioni e omogeneizzando gli apparati. Infine nella installazione di nuove stazioni, si è pensato di utilizzare, ove possibile, le esistenti infrastrutture regionali per la trasmissione dei dati e, per i nuovi apparati di rilevamento ed acquisizione dei dati, di scegliere quelli che garantivano il migliore rapporto efficienza/costo.

Questo lavoro rende conto delle attività sperimentali che il personale INGV-AN ha svolto, dal 2008 a oggi (2012), nel settore del monitoraggio strumentale della sismicità. Queste attività hanno portato:

- allo sviluppo del monitoraggio sismico con la realizzazione della Rete Sismometrica Integrata in Italia Centro-Orientale (ReSIICO);
- all'avvio del monitoraggio accelerometrico a scala regionale nella regione Umbro-Marchigiana;

- alla realizzazione di sistemi automatici per la redazione di mappe di scuotimento e per lo scambio dei dati.

1. Evoluzione della rete di monitoraggio

In figura 1 viene riportata la distribuzione delle stazioni sismometriche operative nel territorio dell'Italia centro-orientale alla fine del 2001 poco prima che l'INGV assumesse - attraverso gli operatori della sua sede di Ancona - il ruolo di coordinamento delle attività di monitoraggio a scala regionale con una rete integrata di acquisitori *dial-up* in gran parte distribuiti dallo stesso INGV ad operatori locali.

Come visibile dalla figura 1 le stazioni sismometriche afferivano in proporzioni analoghe alla rete nazionale *real-time* dell'INGV e alla rete *dial-up* della Regione Marche. La gran parte di queste ultime era in registrazione locale (con *floppy disk*) e, in minore misura, in trasmissione radio VHF.

Gli ottimi rapporti di collaborazione tra il Dipartimento per le Politiche Integrate di Protezione Civile della Regione Marche e l'INGV, definiti nelle convenzioni annuali stipulate a partire dal 2002 tra i due Enti, hanno permesso un ampliamento della rete ed un suo ammodernamento tecnologico realizzato - come descritto più dettagliatamente nei paragra-

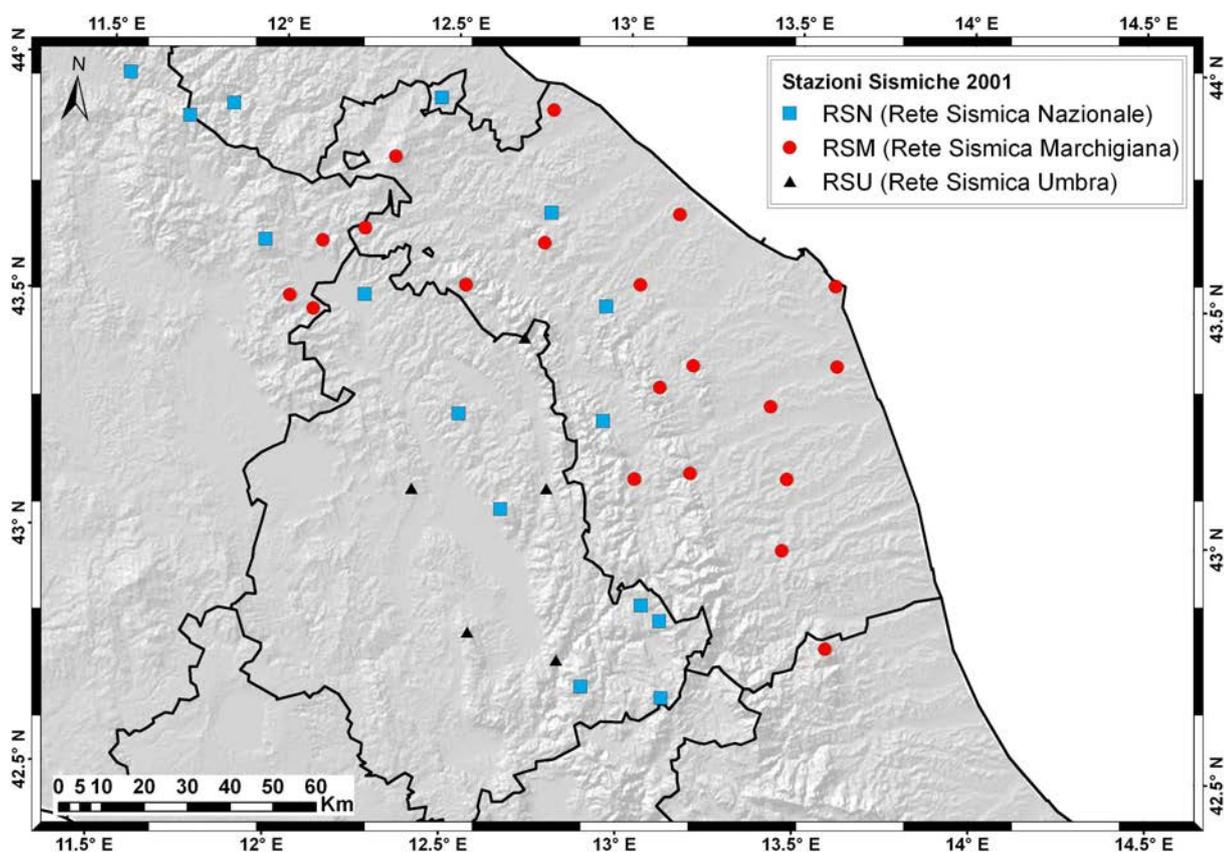


Figura 1 Distribuzione delle stazioni funzionanti alla fine del 2001 in Italia centro orientale.
Figure 1 Stations distribution in central oriental Italy at the end of 2001.

fi successivi - con un notevole risparmio economico grazie all'uso di acquisitori e sensori a basso costo e di infrastrutture radio *wireless* preesistenti, sulle quali sono stati dirottati anche i dati di alcune stazioni della Rete Sismometrica Nazionale che utilizzavano vettori di trasmissione più costosi.

L'ampliamento e l'ammodernamento sono stati realizzati alla luce dei risultati positivi delle seguenti attività sperimentali:

- trasmissione radio e *networking* dei dati sismometrici su dorsali *wireless*;
- realizzazione di misure di rumore in prossimità dei tralicci dei ponti radio delle dorsali;
- utilizzo di sensori accelerometrici MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*);
- trasmissioni dei dati via *router* UMTS accoppiati ad acquisitori GAIA2 prodotti dall'INGV.

L'espansione dell'azione di monitoraggio ha comportato anche l'adeguamento dei sistemi di acquisizione a standard più moderni e condivisibili. L'installazione di un *SEED-Link Server* presso il Centro di Acquisizione di Ancona ha permesso lo scambio dei dati in *real-time* con il Centro di Acquisizione INGV di Roma [Cattaneo et al., 2011].

Oggi i dati in *real-time* di 52 stazioni acquisiti direttamente ad Ancona vengono trasferiti in *real-time* anche a Roma; parallelamente, i dati di 41 stazioni installate nel territorio di interesse, acquisiti direttamente da Roma via satellite o via cavo telefonico, vengono trasferiti alla sede INGV-AN.

Nell'area dell'Italia Centro Orientale è quindi attiva una rete di 93 stazioni sismometriche (figura 2) che integra i dati (velocimetrici e/o accelerometrici) acquisiti direttamente ad Ancona con quelli acquisiti direttamente da Roma e li utilizza per fornire al DPISPC della Regione Marche servizi funzionali ai suoi compiti legislativi di riduzione del rischio sismico. In particolare i dati della Rete Integrata dell'Italia Centro Orientale (ReSIICO) contribuiscono alla realizzazione di carte di scuotimento regionali con l'obiettivo finale di elaborare automaticamente carte di danno a scala sovraumunale, realizzate incrociando dati di scuotimento e dati di vulnerabilità degli edifici; quest'ultimo settore è incentivato dalla Regione sulla base di progetti europei.

Nei prossimi paragrafi vengono descritte le attività sperimentali che la sede INGV-AN ha svolto prima di proporre al DPISPC della Regione Marche progetti di sviluppo e di ammodernamento della rete nel suo complesso. Il loro scopo è quello di documentare le difficoltà operative incon-

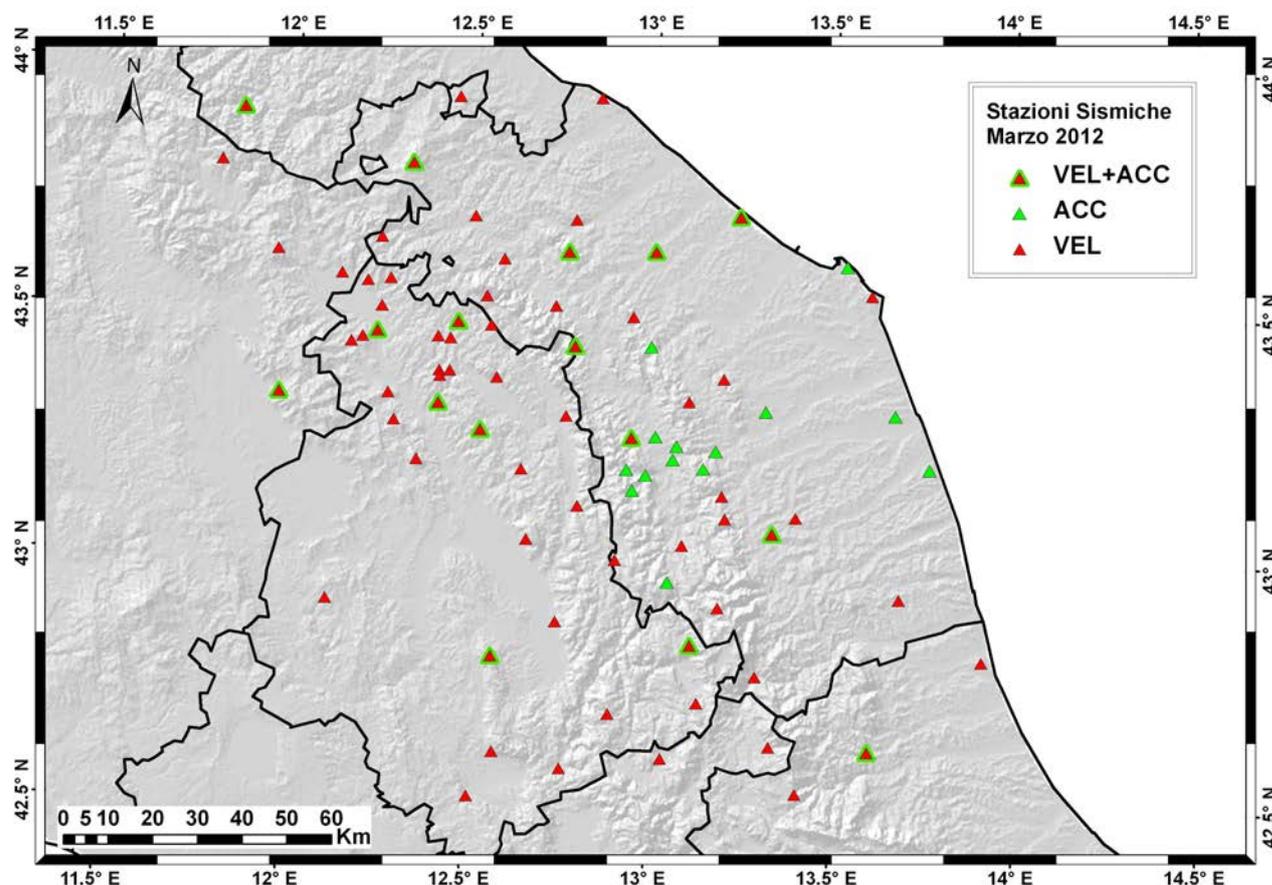


Figura 2 Distribuzione delle stazioni acquisite direttamente o indirettamente nel centro di acquisizione dati della sede INGV-AN alla data marzo 2012.

Figure 2 Map of the stations directly or indirectly received at the data acquisition center of the INGV headquarters in Ancona (INGV-AN) in March 2012.

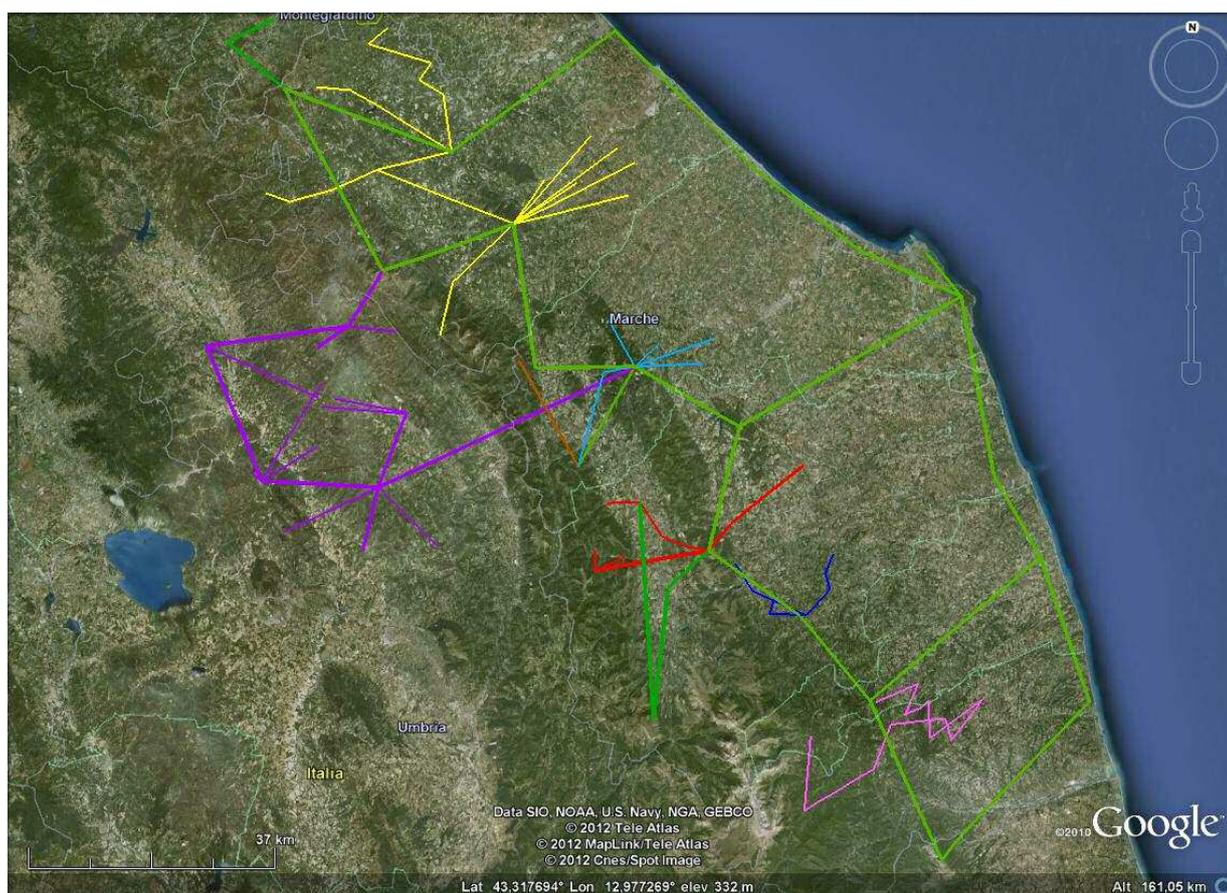


Figura 3 Topologia schematica di alcune delle più importanti dorsali di comunicazione radio operative nel territorio della regione Marche. In verde la dorsale di primo livello SDH Marche Way, in giallo, celeste, rosa e blu alcune dorsali di diversi enti territoriali. In viola la dorsale HIPERLAN Altotiberina realizzata recentemente dall'INGV con i link a 5.4 Ghz che collegano le stazioni remote ai nodi della dorsale.

Figure 3 Topology schematic view of some of the most important radio communication backbones operating in the Marche region. In green the dorsal tier SDH Marche Way, in yellow, blue, pink some backbones of various local entities. In purple the Altotiberina HIPERLAN recently made by INGV at 5.4 Ghz with links connecting remote stations to the backbone nodes.

trate nel corso di un'esperienza pluriennale nonché mostrare come sia stato possibile ottenere uno sviluppo sinergico e relativamente poco oneroso nel settore del monitoraggio sismico. Inoltre si intende favorire una valutazione oggettiva della qualità dei dati utilizzabili per un miglioramento delle conoscenze sulla sismicità regionale e dei sempre più dettagliati servizi di informazione forniti al DPISPC.

1.1 Sperimentazione della trasmissione radio e del networking dei dati

Nella regione Marche è operativa dal 2006 la dorsale radio "Marche Way" nella banda 6,4 GHz con tecnologia SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) che garantisce una banda di 155 Mbps e copre l'intero territorio regionale (figura 3). In questo territorio sono attive numerose altre dorsali - generalmente HIPERLAN (*High Performance Radio Local Area Network*) o PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) - installate da enti territoriali (Comuni, Province, Comunità Montane etc ...) molte delle quali connesse alla dorsale regionale (figura 3).

Un progetto di sviluppo del monitoraggio sismico, che fosse al tempo stesso sinergico ed economico, doveva prendere in considerazione la possibilità di utilizzare le esistenti dorsali di comunicazione radio come vettore di trasmissione dei dati delle stazioni sismometriche remote. A questo scopo era però necessario sperimentare le modalità di trasmissione, il *networking* e l'efficienza del sistema trasmissivo.

La dorsale radio regionale SDH a 155 Mbps è composta da 25 nodi che realizzano una rete integrata multi-modale per il servizio di comunicazione e trasporto dati e fonia. Il sistema di connettività *wireless* è realizzato con ponti radio a frequenza 6,4 Ghz e attualmente, attraverso diverse reti secondarie con tecnologia di accesso HIPERLAN e HIPERLAN-2, interconnette 190 sedi della pubblica amministrazione locale di circa 155 comuni. Marche Way viene utilizzata per soli scopi di protezione civile, polizia municipale, emergenza sanitaria e di *e-government* [Maggiulli, 2010].

Il protocollo SDH consente di raggiungere elevatissimi livelli di qualità di servizio (disponibilità di servizio del 99.9 %).

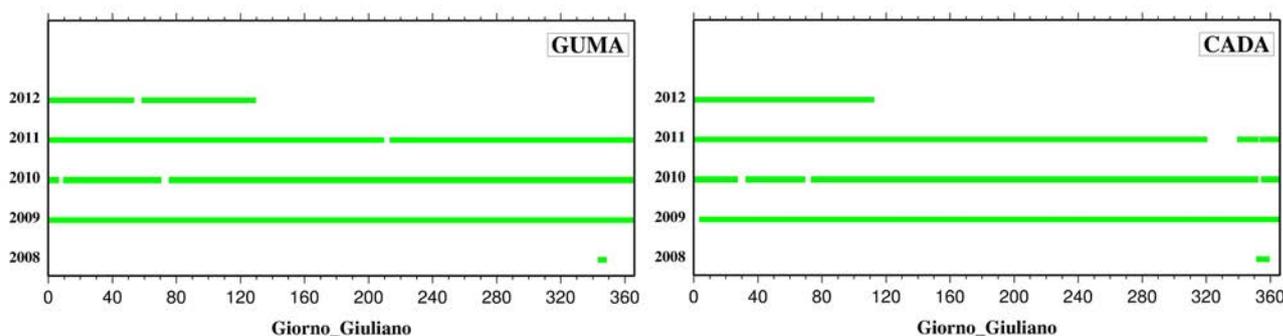


Figura 4 Diagramma di funzionamento delle stazioni GUMA e CADA a partire dalla data della loro installazione.
Figure 4 GUMA and CADA stations working diagram since their starting time.

Ciò nonostante, per garantire la sua continuità di funzionamento, la Regione Marche ha sviluppato la dorsale principale con una topologia ad anello e ne ha collegato i diversi nodi in modo da costituire un insieme di sotto-dorsali (figura 3) su cui dirottare il flusso dei dati in caso di guasti nella dorsale principale. Il blocco del flusso dei dati può quindi verificarsi solo nell'improbabile caso della rottura contemporanea di due nodi di una sotto-dorsale.

Infine per una celere individuazione dei guasti e per una rapida possibilità di intervento, anche da remoto, per il ripristino delle funzionalità delle diverse tratte, sono stati implementati diversi strumenti per il controllo e monitoraggio in tempo reale dell'intera rete di trasmissione. Infatti tutti i nodi sono dotati di gruppi di continuità e di sistemi di controllo remoti appositamente progettati. Infine un contratto di manutenzione prevede un servizio di tele assistenza/sorveglianza h24 e - in caso di condizioni critiche - l'intervento di una squadra tecnica sui nodi entro le prime 2 ore dal guasto e la sua risoluzione entro le prime 4 ore.

Alla fine del 2008 è stata avviata una fase sperimentale attraverso la connessione a Marche Way di due nuove stazioni: (Gualdo-GUMA), inizialmente dotata di solo velocimetro, poi (2009) anche di accelerometro e connessa via radio *wireless* (2.4 GHz) al sotto-nodo di San Ginesio, e (Capodarco di Fermo-CADA) dotata di accelerometro e connessa via cavo *ethernet* ad uno *switch* di un nodo della dorsale.

Per il *networking* ci si è affidati all'esperienza della ditta ARSCOMM s.r.l. [www.arscomm.it] che gestisce la dorsale regionale ed è l'unica autorizzata dalla Regione Marche ad accedere agli apparati *hardware* (*router*, *switch* e radio); la sua efficienza è stata testata anche nel caso della connessione *wireless* di alcune stazioni sismometriche di una non estesa dorsale radio HIPERLAN molisana, realizzata dall'INGV sulla base di un accordo stipulato con la Regione Molise.

Inizialmente l'ARSCOMM aveva deciso di trasmettere i dati sismometrici sul traffico della dorsale attraverso una *route* statica implementata in un *router* a valle di Marche Way. Tale scelta si rendeva necessaria data l'impossibilità di creare delle

VLAN, non essendo l'infrastruttura Marche Way dotata in tutti i nodi dello *switch* di sito con funzionalità di VLAN *management*. In seguito la Regione Marche ha implementato tutti i nodi della dorsale con *switch* Cisco Catalyst 2960 che hanno permesso la separazione del traffico *broadcast* per ogni tipo di servizio. La Regione ha destinato al monitoraggio sismometrico i 254 indirizzi IP statici della *subnet* 10.198.16.0 che transitano nella VLAN 116, separando così il traffico dei dati sia a livello 3 (*network*) che a livello 2 (*datalink*).

La figura 4 mostra i grafici del funzionamento delle stazioni GUMA e CADA dalla loro installazione sperimentale a oggi. Problemi trasmissivi sono stati registrati solo durante la fase iniziale di prova o in occasione di temporanei disservizi dovuti a periodici interventi di manutenzione della rete. I pochi e brevi periodi di mancata acquisizione dei dati sono principalmente imputabili a:

- guasti o malfunzionamenti dell'acquisitore quali il blocco degli applicativi;
- mancata sincronizzazione del GPS; rottura delle schede AGDF o TN2 degli acquisitori GAIA2;
- problemi di comunicazione nelle porte *ethernet* o seriale dell'acquisitore.

Alla maggior parte dei guasti si è rimediato implementando gradualmente *watchdog* e/o sistemi di controllo e riarmo automatici o semiautomatici che da remoto permettono il riavvio delle funzionalità dell'acquisitore [Monachesi et al., 2011]. Anche la progressiva evoluzione dei *firmware* degli acquisitori ha permesso con il tempo di eliminare alcuni dei problemi inizialmente riscontrati negli acquisitori stessi, migliorandone l'affidabilità.

L'occupazione di banda nel caso di un acquisitore GAIA2 [Salvaterra et al., 2008; Rao et al., 2010] equipaggiato con un sensore a tre componenti e configurato con una frequenza di campionamento di 100 sps (*sampling time* = 10 msec), è mediamente compresa nel *range* 6-10 kbps con variazioni legate al livello di compressione del segnale. L'occupazione di banda per il monitoraggio sismico rappre-

senta quindi una frazione minima rispetto ai 155 Mbps della dorsale marchigiana.

Sulla base dei risultati sperimentali nella trasmissione radio e nel *networking* sopra descritti e delle prove di rumore sui nodi della dorsale (paragrafo 1.2), si è proceduto alla progettazione degli sviluppi futuri delle attività di monitoraggio in Italia centro-orientale fino alla realizzazione, nel 2010 e 2011, della dorsale Altotiberina progettata e realizzata dalla sede INGV-AN nell'ambito del progetto FIRB-Airplane [Boschi et al., 2008] e connessa a Marche Way attraverso due suoi nodi

[Monachesi e Cattaneo, 2010; D'Alema et al., 2011].

In particolare, nel 2009 è stato avviato il rinnovamento del monitoraggio sismico (velocimetrico e/o accelerometrico) attraverso due azioni:

- trasformazione in *real-time* di alcune delle stazioni della vecchia rete regionale *dial-up* [<http://protezionecivile.regione.marche.it/dbasm/index.htm>] scelte tra quelle più facilmente collegabili a Marche Way, affiancando degli accelerometri ai velocimetri;
- installazione di nuove stazioni dotate solo di accelerometri.

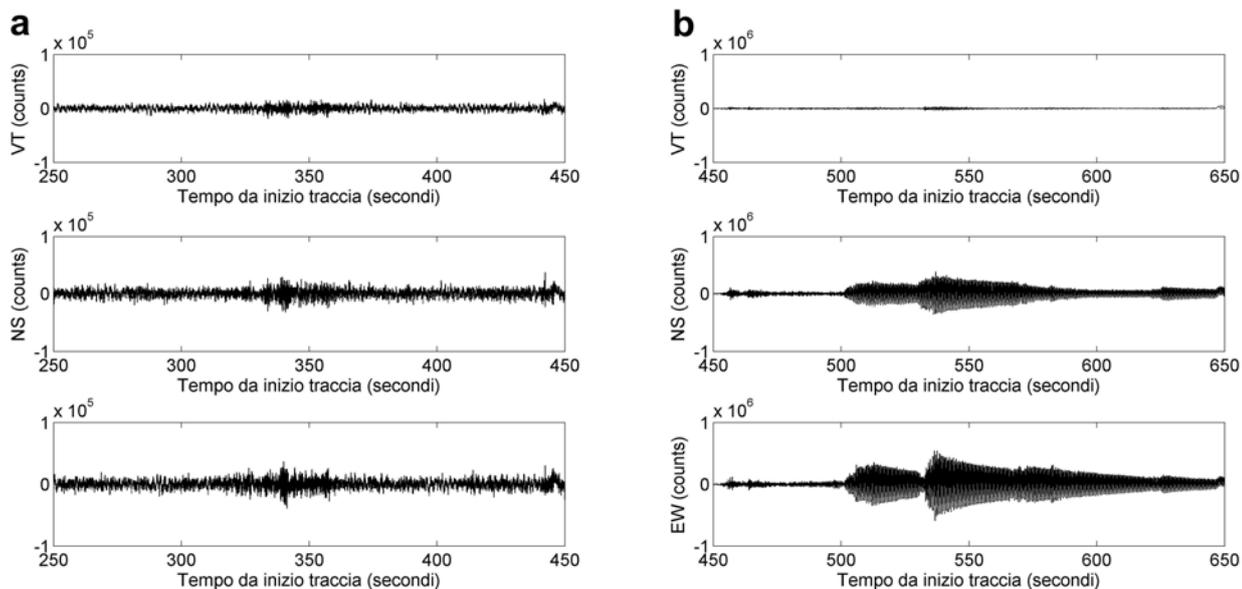


Figura 5 In alto, visione dal traliccio di Pietralacroce (PCRO) delle misure e (in basso) tracce registrate senza (a) e con (b) sollecitazione del traliccio.

Figure 5 Top: panoramic view from the Pietralacroce (PCRO) mast during the measurements. Bottom: results without (a) and with (b) stress of the mast.

Si è pensato di contenere i costi verificando la possibilità di installare gli apparati nelle infrastrutture esistenti nei nodi della dorsale regionale e di connettere direttamente con un cavo *ethernet* gli acquisitori agli *switch* di ingresso alla dorsale. Questo avrebbe permesso di abbattere i costi di allestimento di un sito, e di realizzazione di un *link* radio tra sito e nodo, con un risparmio di circa € 20.000 a stazione.

Per valutare questa possibilità si rendeva però necessario verificare il livello del rumore e la gamma di frequenze indotte sul segnale sismico dalle vibrazioni delle infrastrutture generalmente presenti in un nodo (*shelter* con gruppi di raffreddamento, pali e tralicci).

1.2 Prove di rumore sui nodi della dorsale

Nel 2009 è stata avviata una campagna di prove di rumore effettuate in collaborazione con la Sezione INGV di Milano su 6 nodi della dorsale Marche *Way* (Monte Carpegna-CPGN, Monte Murano-MMUR, Pietralacroce-PCRO, Monte D'Aria-MDAR, Civitanova Marche-CIMA e Monte Piselli-AT6). Scopo della campagna era la verifica della risposta sismica di alcuni siti e dei disturbi indotti dai tralicci sul segnale sismometrico.

Durante la campagna tutte le misure sono state effettuate utilizzando i sensori e acquisitori omogenei sotto elencati:

- 2 Acquisitori Reftek 130 utilizzati con una frequenza di campionamento di 100 Hz, completi di GPS [<http://www.reftek.com/products/seismic-recorders-130-01.htm>];
- 2 Sensori Lennartz 3D con periodo proprio di 5 secondi [<http://www.lennartz-electronic.de/>];
- 2 Sensori Lennartz 3D lite con periodo proprio di 1 secondo [<http://www.lennartz-electronic.de/>].

La scelta di due sensori 'differenti' è stata obbligata dalla indisponibilità di altri modelli; ma, come meglio si vedrà in seguito, nella banda di frequenze di maggior interesse i due sensori sono equivalenti. In ogni caso l'analisi è stata effet-

tuata correggendo i segnali per la risposta del sensore.

Operativamente in ognuno dei 6 nodi sono state eseguite più registrazioni secondo le seguenti modalità:

- le registrazioni con i due diversi tipi di sensori sono state effettuate in contemporanea e i sensori sono stati posizionati a distanze crescenti e secondo due direttrici ortogonali alla/e struttura/e principale/i;
- le misure sono sempre iniziate con un sensore velocimetrico Lennartz da 5 sec. posizionato sempre alla base del traliccio;
- nei siti PCRO, e MDAR è stato possibile posizionare i sensori fino ad una distanza di 60 metri dal traliccio allo scopo di acquisire informazioni utili alla formulazione preliminare di una legge di attenuazione in funzione della distanza. In questi casi si è energizzato il traliccio;
- l'acquisizione dei dati si è generalmente protratta per un tempo non inferiore a 30 minuti e, nei casi con presenza di infrastrutture più complesse, fino a 1 ora;
- i sensori sono stati interrati per evitare che subissero l'impatto del vento;
- unicamente a PCRO è stato possibile posizionare il sensore anche a diverse altezze sul traliccio per meglio identificare la frequenza fondamentale della struttura e gli eventuali modi superiori di vibrazione.

Relativamente al trattamento dei dati si è proceduto secondo le seguenti modalità:

- le *Power Spectral Density* (PSD) sulle registrazioni di *noise* sismico ambientale sono state calcolate con finestre mobili di 10 secondi sovrapposte del 75%;
- il segnale è stato inizialmente elaborato in modo da eliminarne l'*offset*, è stato filtrato tra 0.5 e 25 Hz ed ad ogni finestra di analisi è stato applicato un *tapering* coseno del 10%;
- gli spettri ottenuti sono stati 'lisciati' calcolando il valore medio del segnale tra più e meno il 10% di frequenze centrali equispaziate in scala logaritmica;

Punto di Misura	r (metri)	Ampiezze norm.	Sigma	Ampiezza norm. attesa per 1/r	Scarto con 1/r	Ampiezze norm. attesa per 1/r ²	Scarto con 1/r ²
R	12.0	1		1	0	1	0
O1	20.0	0.53	0.03	0.60	+0.08	0.36	-0.17
O2	31.3	0.72	0.23	0.64	-0.08	0.41	-0.31
N1	12.9	1		1	0	1	0
N2	24.5	0.38	0.04	0.53	+0.15	0.27	-0.11
N3	37.2	0.52	0.02	0.66	+0.14	0.43	-0.09
N4	51.0	0.51	0.02	0.73	+0.22	0.53	+0.02

Tabella 1 Valutazione preliminare delle attenuazioni a Pietralacroce (PCRO).
Table 1 Preliminary assessment of attenuations in Pietralacroce (PCRO).

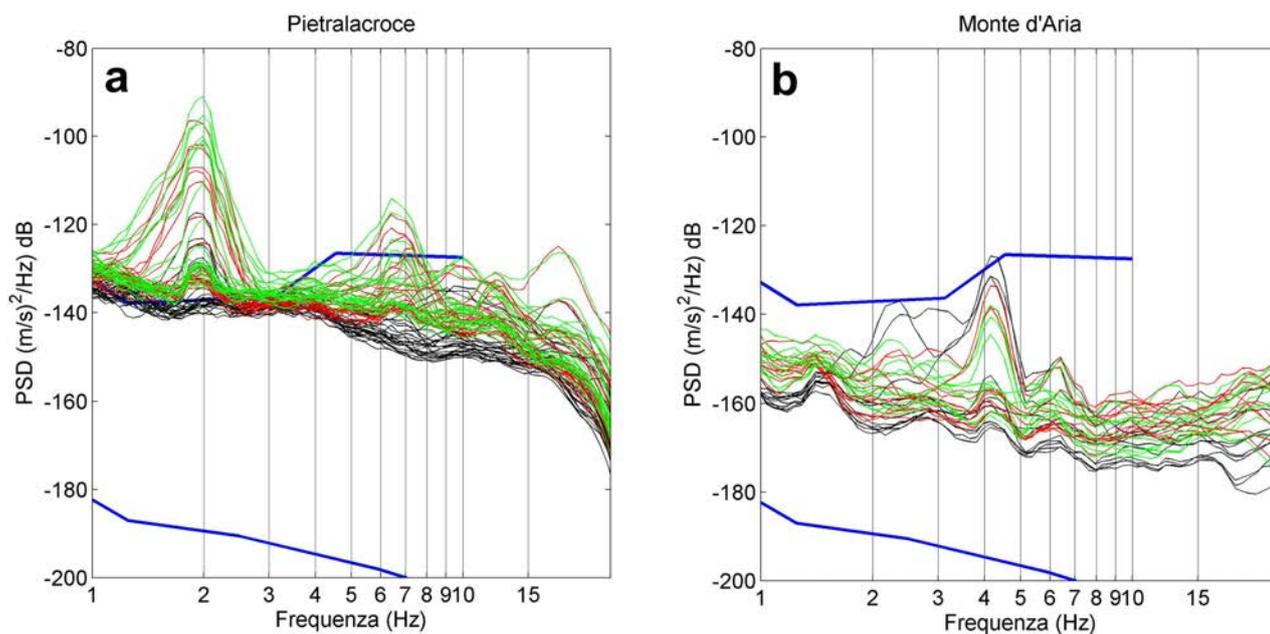


Figura 6 Calcolo delle PSD nei nodi di Pietralacroce (PCRO), e Monte D'Aria (MDAR). Le curve nere rappresentano la componente verticale, in verde la componente EW, in rosso la componente NS e in blu sono rappresentate le curve di Peterson [1993].

Figure 6 PSD computation at the nodes of Pietralacroce (PCRO) and Monte D'Aria (MDAR). Black curves represent the vertical component; green and red ones represent the EW and the NS components; the blue ones are Peterson curves [1993].

- l'analisi della rumorosità dei siti è stata condotta anche sulla base delle registrazioni di terremoti analizzate tramite la tecnica HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) a singola stazione [Field and Jacob, 1995; Bard, 1999];
- per tutte le registrazioni degli eventi sismici è stato individuato il tempo d'arrivo della fase S e, a partire da questo, è stata selezionata una porzione di segnale della durata di 20 secondi. Inoltre i rapporti spettrali sono stati calcolati per azimuth (α) tra 0° e 180° , ruotando le tracce con passo costante di 5° . Per ogni azimuth α , sono state calcolate le medie dei rapporti HVSR e rappresentate attraverso polarigrammi, in modo da evidenziare l'eventuale anisotropia della risposta sismica.

Come esempio dell'attività svolta viene di seguito riportato il caso del nodo di Pietralacroce (figura 5).

In Tabella 1 sono riportate le misure effettuate a varia distanza dal traliccio di PCRO spostandosi prima in direzione circa Ovest (punti di misura R, O1, O2) e successivamente in direzione Nord (N1, N2, N3, N4). Effettuando le misure a coppie è stato possibile stimare un'attenuazione delle ampiezze del segnale a differenti distanze dal traliccio. È stata calcolata l'attenuazione delle ampiezze tra due punti di misura adiacenti per cui si disponeva di misure contemporanee attraverso il calcolo dell'*rms* (*root mean square*) su finestre mobili di segnale di 4 secondi; in Tabella 1 è indicata anche la deviazione standard (Sigma) dell'*rms*. Nel caso in questione la porzione di segnale selezionata è stata filtrata tra 1 e 3 Hz, cercando di eliminare il disturbo dovuto ad altre sorgenti di *noise*

sismico ambientale. Inoltre sono state selezionate finestre di segnale in cui era evidente la vibrazione a 2 Hz circa dovuta all'oscillazione fondamentale del traliccio (figura 6).

Le frequenze fondamentali di vibrazione della struttura dei tralicci sono in generale facilmente riconoscibili come evidenti picchi spettrali nelle tre componenti (figura 6); a PCRO la frequenza fondamentale di oscillazione del traliccio si trova a 1.9 Hz. In questo sito il posizionamento del sensore anche a diverse altezze del traliccio ha consentito di evidenziare anche due picchi di minore ampiezza a 6.5 e 12 Hz visibili principalmente nelle sole componenti orizzontali che rappresentano i successivi modi di vibrare del traliccio stesso. Frequenze fondamentali di vibrazione diverse da quelle viste per il traliccio di Pietralacroce sono risultate negli altri casi giustificabili dalla diversa altezza e conformazione dei tralicci (cfr. tabella 2). In figura 6 viene riportato a titolo di esempio anche il caso di Monte D'Aria (MDAR) con una frequenza fondamentale a 4.2 Hz evidente su tutte e tre le componenti. Come indicato in precedenza, a verifica dei risultati emersi con il calcolo delle PSD, l'analisi della rumorosità dei siti è stata condotta anche sulla base delle registrazioni di terremoti analizzati tramite la tecnica HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) a singola stazione [Field and Jacob, 1995; Bard, 1999].

Nella figura 7 sono riportati le forme d'onda e gli spettrogrammi dell'evento del 20 Settembre 2009 (MI 4.6) per le tre componenti del segnale della stazione PCRO. Filtrando le forme d'onda originali (nere in figura 7) per bande di frequenza interessate dall'oscillazione del traliccio (1-3 Hz, 6-9

Hz, 11-14 Hz) ed investigate con le misure di *noise*, è possibile evidenziare il contributo alle ampiezze registrate nelle differenti bande (tracce rosse in figura 7). Il contributo maggiore è presente nella banda 11-14 Hz sulla componente EW del segnale. Questa caratteristica è visibile anche dagli spettrogrammi del segnale, in cui il riquadro nero indica un lieve persistere delle ampiezze del segnale sismico tra i 10 e i 15 Hz, soprattutto sulla componente EW del moto; queste frequenze sono quelle interessate dall'oscillazione dei modi superiori delle strutture dei tralicci investigate tramite le misure di *noise* ambientale.

Elaborando le forme d'onda di 17 eventi sismici registrati dalla stazione PCRO, è stato possibile calcolare i rapporti spettrali con la tecnica HVSR a singola stazione. Ruotando le componenti del segnale per azimuth α compresi tra 0° e 180° , con passo costante di 5° , sono stati ottenuti gli HVSR medi per ogni α (curve verdi in figura 8) che sono stati utilizzati per comporre un polarigramma (figura 8, riquadro in alto a sinistra) allo scopo di evidenziare l'eventuale anisotropia della risposta sismica e quindi l'eventuale influenza delle strutture ubicate nelle vicinanze della stazione sul segnale registrato.

Le stesse analisi condotte sul sito PCRO sono state eseguite su tutti gli altri siti di interesse (tabella 2); alcune osservazioni generali emergenti, già discusse in Ladina et al. [2009] cui

si rimanda per ulteriori dettagli, sono così sintetizzabili:

- i disturbi indotti dall'oscillazione dei tralicci possono essere individuati osservando un'anomala attenuazione delle alte frequenze nella coda degli eventi, nonché una maggior durata della fase più energetica del segnale alle frequenze in cui ci si aspetta il disturbo;
- le osservazioni, ricavate dall'indagine delle frequenze di vibrazione dei tralicci e dall'elaborazione dei terremoti, mostrano che i segnali registrati durante gli eventi sismici potrebbero venire perturbati dalla presenza delle strutture solo quando lo scuotimento del suolo superi una certa soglia che non è ancora stata stimata;
- l'attenuazione più rilevante sull'ampiezza dei disturbi generati dai tralicci avviene a brevi distanze, per cui si è deciso di installare i sensori allontanandosi per quanto possibile dai tralicci stessi, ma rimanendo ad una distanza tale da consentire una logistica semplice e di basso costo;
- i disturbi rilevati non influiscono sul calcolo dei parametri focali dei terremoti e la scelta logistica di installare stazioni sismiche nei pressi dei tralicci per le telecomunicazioni, che minimizza i costi di installazione e di trasmissione, non sembra influenzare significativamente la qualità dei segnali registrati, quanto meno ai livelli di scuotimento finora registrati.

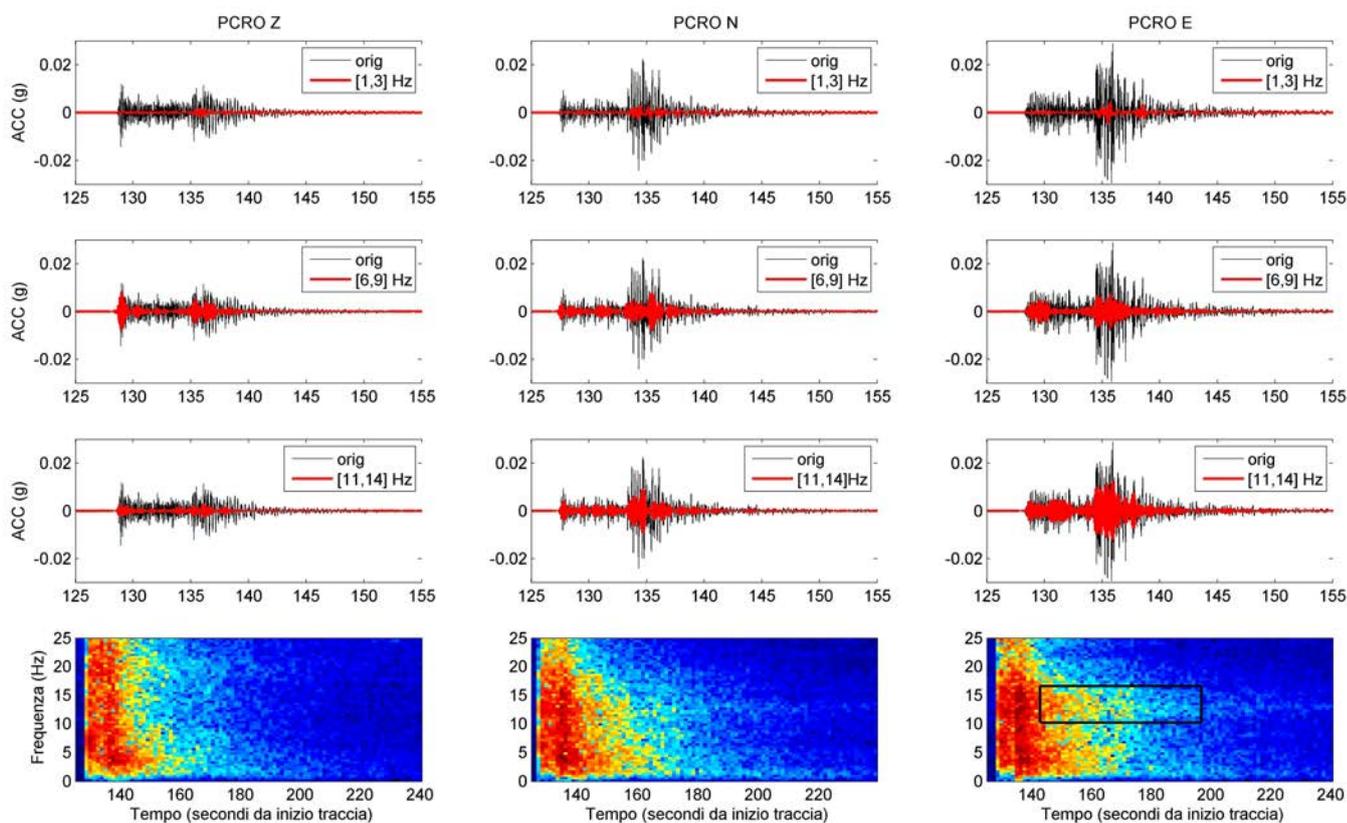


Figura 7 Evento sismico del 20 settembre 2009 (ML 4.6) registrato alla stazione PCRO. In alto: forme d'onda originali (nero) e filtrate (rosso) nelle bande di frequenza 1-3 Hz, 6-9 Hz, 11-14 Hz. In basso: spettrogrammi delle tre componenti del segnale (sinistra: UP; centro: NS; destra: EW).

Figure 7 The September 20th, 2009 seismic event recorded at PCRO station. Top: original waveforms (black) and filtered (red) in the frequency band 1-3 Hz, 6-9 Hz, 11-14 Hz. Bottom: spectrograms (left Z, middle N-S and right E-W components).

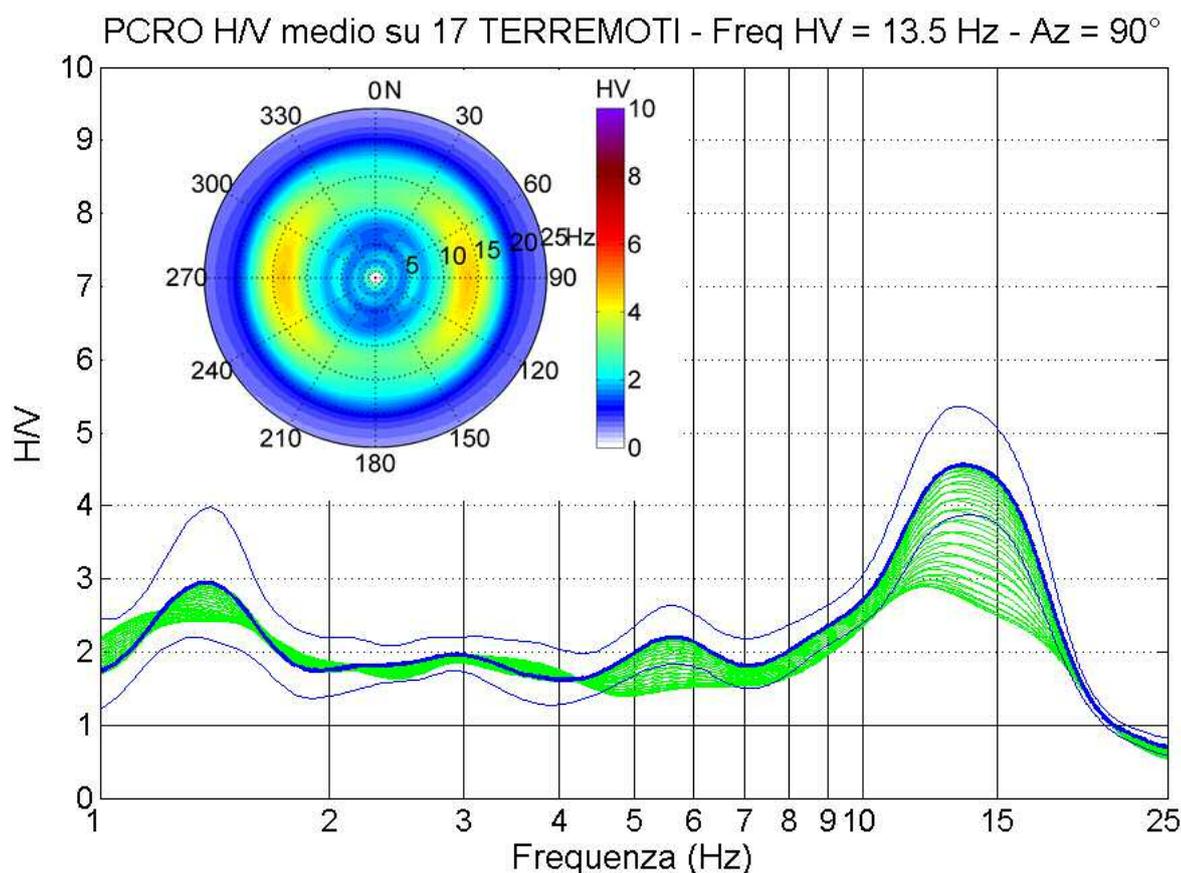


Figura 8 HVSR medi e polarigramma relativi a PCRO. Curve verdi: HVSR medi per ogni azimuth tra 0° e 180°, con passo 5°. Curva blu spessa: HVSR medio corrispondente al massimo HVSR registrato tra tutti gli azimuth. Curva blu fini: deviazione standard dell'HVSR medio massimo. Pannello in alto a destra: polarigramma degli HVSR medi; la scala di colori corrisponde al valore di HVSR.

Figure 8 HVSR and polar plots related to PCRO. In green HVSR for each azimuth between 0 and 180° (step 5°). In thick blue maximum HVSR. In thin blue standard deviation of maximum HVSR. At the right-top panel polar plot of mean HVSR.

Alla luce dei risultati delle prove e sperimentazioni si è proceduto nel 2009 alla installazione di 8 stazioni accelerometriche in altrettanti nodi della dorsale Marche Way e di 3 accelerometri in stazioni preesistenti ma dotate di soli velocimetri.

In ognuno dei nodi di dorsale si è installato all'esterno degli *shelter* che ospitano gli apparati della dorsale un accelerometro *Episensor FBA ES-T (Force Balance Accelerometer, Kinematics)* con fondo scala 2g, secondo gli standard INGV. Gli accelerometri sono stati collegati ad un acquirente GAIA2 [Salvaterra et al., 2008 e Rao et al., 2010] quest'ultimo posizionato all'interno degli *shelter* stessi (figura 9).

La scelta degli acquirenti GAIA2 progettati e costruiti dalla Unità Funzionale "Laboratorio di Sismologia" dell'INGV [Salvaterra et al., 2008] è stata fatta in considerazione della affidabilità e, soprattutto, economicità dell'apparato, che ha costi inferiori ai 2.500 €.

Inoltre la presenza di un *SEEDlink server* all'interno delle GAIA rende possibile l'accesso dei dati direttamente ai *SEEDlink server* di acquisizione operativi nella sede INGV di

Ancona dalla fine del 2008 e utilizzati anche per lo scambio dati con la sede INGV di Roma.

Per allinearsi agli standard adottati dalla Rete Sismica Nazionale si è scelto di campionare i segnali accelerometrici ad una frequenza di 200 sps (*sampling time* = 0,005 secondi).

1.3 Utilizzo di sensori accelerometrici MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*)

Nel 2010, nell'ambito delle attività convenzionali, la Regione Marche, visti anche gli ottimi risultati raggiunti nel 2009, ha espresso all'INGV il suo interesse a estendere l'azione di monitoraggio nel suo complesso, e quello accelerometrico in particolare. Per quest'ultimo la Regione chiedeva di verificare la possibilità di minimizzare i costi così da avere l'opportunità di installare un accelerometro in ogni Comune connesso indirettamente a Marche Way attraverso singole reti *wireless* locali/provinciali. L'obiettivo primario della Regione era una copertura territoriale più ampia possibile della rete accelerometrica utile alla realizzazione di carte di scuotimento a carattere sovra-comunale.



Figura 9 Immagini di alcune stazioni accelerometriche posizionate nei pressi di un nodo della dorsale Marche Way. In alto a sinistra il pozzetto di alloggiamento dei sensori e, a destra, lo *shelter* di contenimento degli apparati di dorsale e dell'acquisitore GAIA2 a Monte Carpegna (CPGN); in basso a sinistra il pozzetto che ricopre il sensore a Civitanova Marche (CIMA). In basso a destra vista dell'interno dello *shelter*, con l'armadio di contenimento degli apparati del nodo della dorsale *wireless* a Monte Murano (MMUR).

Figure 9 Images of some accelerometric stations located near a node of the Marche Way backbone. Top left the sensor vault and, right, the shelter hosting the backbone and GAIA-2 equipment at Monte Carpegna (CPGN), bottom left the sensor vault at Civitanova Marche (CIMA). Bottom right, inside view of the shelter, and the cabinet containing the wireless backbone node equipment in Monte Murano (MMUR).

Anche in questa occasione si è scelto un approccio sperimentale utile alla verifica delle possibilità di contenere al massimo i costi degli apparati e quelli di connessione dei siti alla sede INGV-AN.

La Regione ha inoltre individuato l'area della Comunità Montana di San Severino Marche (MC) come quella coperta da una rete di comunicazione radio in parte PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) e in parte HIPERLAN e SDH che all'epoca del progetto collegava 9 Comuni (Treia, San Severino Marche, Gagliole, Sefro, Castelraimondo, Pioraco, Fiuminata, Esanatoglia e Matelica) ed era connessa alla dorsale regionale attraverso il nodo di Monte D'Aria (figura 10). Compito degli operatori INGV di Ancona era sperimentare sensori e acquisitori a basso costo e installare la rete accelerometrica.

Lo scavo di gallerie della infrastruttura stradale "Quadrilatero" [<http://www.quadrilaterospa.it/>] è stata l'occasione per sperimentare le risposte di diversi tipi di accelerometri.

Dopo una prima valutazione e *test* di diversi marche e modelli di accelerometro (*Episensor*, *Colibrys*, *Titan*, etc.) ci si è orientati su due possibili alternative: gli *Episensor* FBA ES-T con tecnologia *force balance* (già utilizzati nella prima fase dei lavori e ampiamente usati in INGV) ed il modello SF3000L della *Colibrys* [<http://www.colibrys.com>] un sensore capacitivo costruito con tecnologia MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*). Entrambi i sensori hanno alto *range* dinamico, alto guadagno e basso rumore; tuttavia il secondo, grazie alla tecnologia MEMS consente un significativo abbattimento dei costi fino al 50 %.

Per effettuare prove comparative, un accelerometro *Episensor* FBA ES-T e un *Colibrys* SF3000L connessi ad un acquisitore GAIA2 (figura 11) sono stati montati su una stessa base e posizionati a circa 50 metri dal punto di scoppio delle volate innescate per lo scavo delle gallerie.

I risultati dei *test* comparativi sono visibili in figura 12 dalla quale è possibile evidenziare come le risposte dei due sensori siano praticamente identiche per frequenze tra i 10 e i 40 Hz.

Nodo		Frequenza fondamentale (Hz)
Civitanova Marche (CIMA)		2.3
Monte Carpegna (CPGN)		5.0
Monte D'Aria (MDAR)		4.5
Monte Piselli (AT6)		1.4
Monte Murano (MMUR)		2.2
Pietralacroce (PCRO)		1.9

Tabella 2 Frequenze fondamentali di vibrazione della struttura dei tralicci nei sei nodi.
Table 2 Fundamental frequencies of vibration of the masts structure in the six nodes.

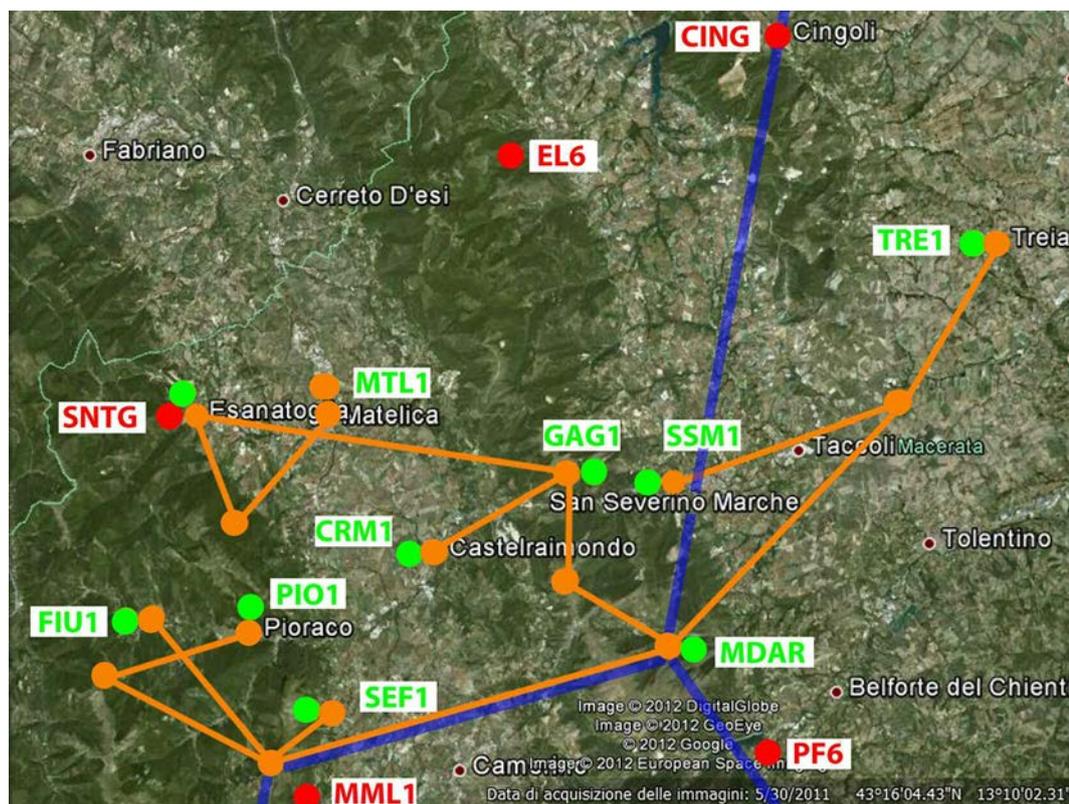


Figura 10 Geometria della dorsale della Comunità Montana di San Severino Marche (arancione) e in blu la dorsale Marche Way. In verde le stazioni accelerometriche; in rosso le stazioni già esistenti con soli velocimetri.

Figure 10 Backbone geometry of the Comunità Montana di San Severino Marche (orange) and Marche Way (blue); the accelerometric stations (green dots) and the existing stations equipped only with velocimeter sensors (red dots).

Leggere differenze sono visibili tra 50 e 90 Hz, e potrebbero essere legate a fenomeni di imperfetto accoppiamento tra la base ed il terreno, mentre per frequenze basse il Colibrys SF3000L presenta una rumorosità nettamente superiore, come era preventivabile già a priori. Comunque i livelli di ampiezza di questo rumore di fondo sono nettamente inferiori ai livelli di interesse in un monitoraggio accelerometrico.

Al termine del 2010 sono stati installati 8 accelerometri Colibrys SF3000L (posizionati negli scantinati o al piano terra di altrettante sedi o edifici comunali) nel territorio della Comunità Montana di San Severino Marche (MC), collegati ad acquisitori GAIA2 posizionati nelle vicinanze di un accesso ethernet della LAN della Comunità stessa.

Il networking è stato deciso dall'Ufficio Informatica della Comunità Montana e dall'ARSCOMM. Nel caso specifico le modalità di instradamento dei dati presentavano un grado di complessità maggiore di quello adottato per Marche Way perché alcuni digitalizzatori GAIA2 non erano in prossimità della dorsale radio ma vicini agli ingressi ethernet delle LAN comunali. Nei casi più complessi sono stati assegnati alle GAIA2 gli indirizzi IP di una subnet dedicata (192.168.252.0). Inoltre per non aggiungere complessità al sistema e fare in

modo che gli apparati appartenenti a due diverse reti venissero visti come unica subnet 10.198.16.0 sono stati 'ruotati' e 'nattati' gli indirizzi fra le due reti nel router di Monte D'Aria (lato Marche Way) che gestisce l'ingresso dei dati della dorsale della Comunità Montana di San Severino Marche in quella SDH regionale. Nei casi più semplici alle GAIA2 sono stati assegnati indirizzi propri della subnet utilizzata per l'instradamento dei dati sismometrici sulla dorsale Marche Way (10.198.16.0).

La figura 13 mostra alcune delle installazioni delle stazioni accelerometriche equipaggiate con Colibrys SF3000L.

In questa fase del progetto il Centro Nazionale Terremoti dell'INGV si è infine fatto carico dell'installazione di un accelerometro Episensor FBA ES-T nelle stazioni di Esanatoglia (SNTG), afferente alla rete nazionale, e di Sassoferato (SSFR) e del loro collegamento a Marche Way mediante radio link a 5.4 Ghz. In precedenza la stazione SNTG era collegata al centro di acquisizione di Roma con una linea analogica mentre SSFR era collegata ad Ancona con un costoso collegamento dial-up in telemetria GSM. Inoltre la stazione di Monte Urbino (MURB), precedentemente funzionante in trasmissione satellitare, data la sua ubicazione in un nodo della dorsale Altotiberina, è stata



Figura 11 Accelerometri *Episensor* FBA ES-T e *Colibrys* SF3000L posizionati sulla stessa base per la prova comparativa.
Figure 11 Episensor and Colibrys accelerometers positioned on the same basis for the comparative test.

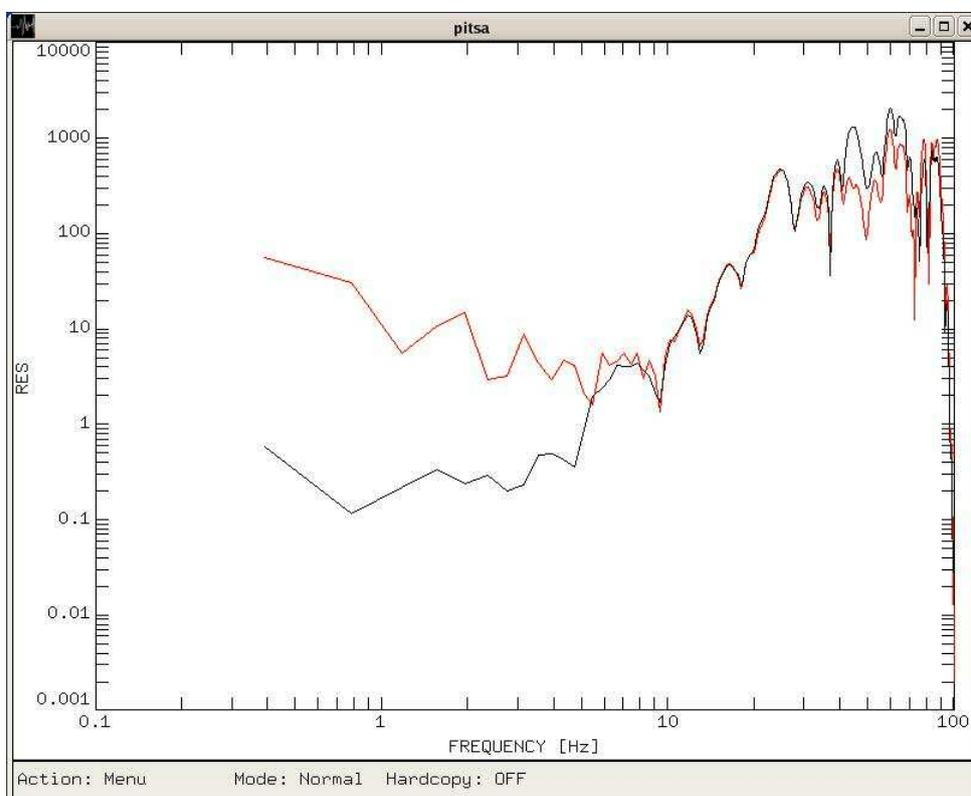


Figura 12 Risposta di un accelerometro *Episensor* FBA ES-T (in nero) e un *Colibrys* SF3000L (in rosso).
Figure 12 Transfer function of an accelerometer Episensor FBA ES-T (black) and a Colibrys SF3000L (red).

collegata direttamente allo *switch* della dorsale con un notevole risparmio economico e guadagno di banda tale da poter utilizzare in continuo e con alta frequenza di campionamento l'accelerometro prima utilizzato unicamente *on-demand*.

1.4 Utilizzo di Radio-Modem UMTS

La scelta di utilizzare come vettore trasmissivo anche il sistema di telecomunicazioni UMTS nasce dopo i risultati positivi della sperimentazione fatta dall'INGV [Govoni et al. 2012], e in caduta delle seguenti considerazioni tecniche ed economiche:



Figura 13 Alcune immagini delle stazioni installate nel territorio della Comunità Montana di San Severino Marche.
Figure 13 Some pictures of the stations deployed in the territory of Comunità Montana di San Severino Marche.

- necessità di creare una ridondanza del sistema trasmissivo visto che la maggior parte delle stazioni direttamente acquisite ad Ancona utilizzavano la dorsale *wireless* Marche Way;
- risparmio economico del vettore trasmissivo UMTS che ha costi inferiori a 10 € mensili contro il GSM o linee telefoniche analogiche dedicate che hanno costi ben più di dieci volte superiori all'UMTS;
- ampia copertura territoriale (a maggiore ragione se si considera la possibilità di utilizzare SIM di diversi gestori della telefonia mobile) senza i limiti nelle distanze, di altimetria e di banda delle radio VHF, utilizzabile quindi nei casi in cui i siti non siano facilmente collegabili alla dorsale *wireless* regionale.

Questa soluzione è stata adottata per la trasformazione in *real-time* delle stazioni *dial-up* della rete regionale distanti dai nodi della dorsale *wireless* regionale; in collaborazione con la Regione Marche sono stati installati 9 *router* UMTS con SIM card fornite dalla Regione stessa che rappresentano l'inizio di

una ridondanza attiva rispetto all'esclusivo utilizzo della dorsale radio regionale.

Inoltre l'INGV ha fornito 8 SIM per nuove stazioni installate nel territorio d'interesse o per abbattere i costi di trasmissione di alcuni siti preesistenti.

Complessivamente nel *server SEEDlink* del centro di acquisizione della sede INGV-AN transitano i dati di 38 stazioni equipaggiate con accelerometri (in 23 casi anche con velocimetri) che sommati ai dati delle 55 stazioni dotate di soli velocimetri contribuiscono alla realizzazione di mappe di scuotimento.

2. Analisi di funzionamento e primi risultati

L'utilizzo di una rete sismometrica mista, composta di velocimetri ed accelerometri, presenta notevoli vantaggi ed alcune problematiche. Il vantaggio principale dell'utilizzo di strumenti *strong-motion* è la garanzia della non saturazione del segnale anche in caso di eventi molto energetici. Questo consente di

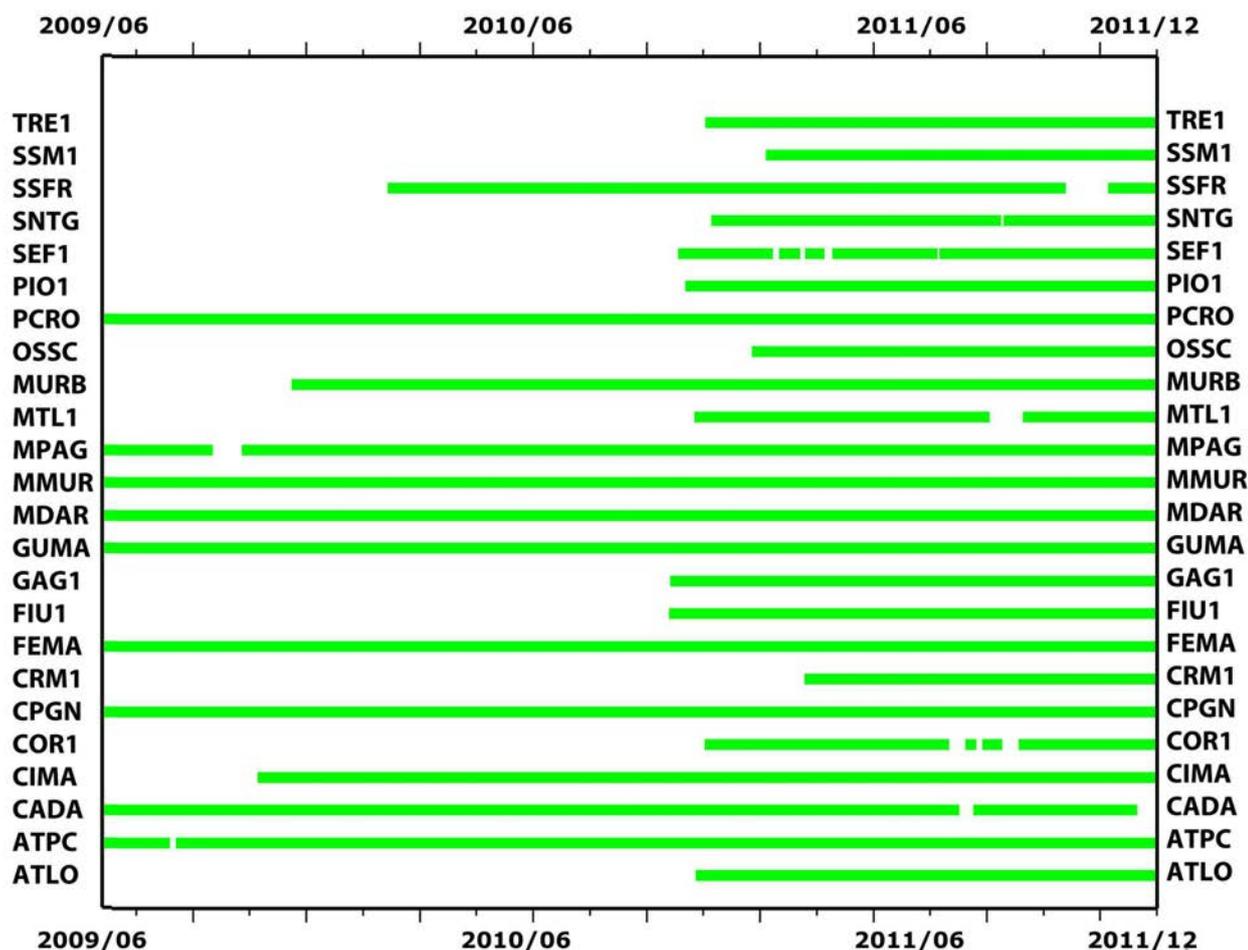


Figura 14 Diagramma di funzionamento (da giugno 2009 a dicembre 2011) delle stazioni dotate di accelerometro acquisite direttamente dal Centro di Acquisizione della sede INGV-AN.

Figure 14 Working diagram (2009 June-2011 December) of stations equipped with accelerometer directly received at the Acquisition Center of INGV headquarters in Ancona.

un lato di ottenere letture accurate del tempo di arrivo delle onde S - molto importanti per la determinazione di localizzazioni stabili in profondità - e dall'altro di stimare correttamente i picchi massimi di movimento del suolo, fondamentali per il calcolo della magnitudo e per la redazione di *shakemaps*.

In teoria l'approccio adottato potrebbe presentare due punti deboli:

- l'uso di strumenti *strong-motion* che per la loro minore sensibilità sono generalmente considerati inefficaci per l'analisi di routine della sismicità di basso livello energetico;
- l'adozione di vettori trasmissivi a basso costo e non dedicati ritenuti generalmente non in grado di dare sufficienti garanzie di continuità del funzionamento.

I risultati della nostra esperienza descritti nei paragrafi successivi, dimostrano però che gli accelerometri, sia pure con ovvie limitazioni, sono in grado di fornire dati utili anche per eventi di magnitudo molto bassa. Al contempo, le percentuali di funzionamento dei vettori trasmissivi adottati sono state molto incoraggianti e hanno garantito un alto livello di affidabilità del sistema.

2.1 Realizzazione delle procedure automatiche di calcolo delle *shakemap*

Le procedure automatiche per la realizzazione di *shakemap* implementate dagli operatori della sede INGV-AN sono descritte in dettaglio in D'Alema e Carannante [2012] cui si rimanda per maggiori dettagli. In forma sintetica qui si vuole ricordare che:

- i dati sono acquisiti in *real-time* con il programma SeisComp3 [www.seiscomp3.org];
- la *detection* automatica viene eseguita utilizzando il programma *Earthworm* [http://folkworm.ceri.memphis.edu/ew-dist/];
- la procedura di taglio delle finestre di *triggering* e di conversione dal formato SEED a SAC viene eseguita da un applicativo appositamente implementato [Cattaneo et al., 2011];
- il *picking* automatico dell'evento viene eseguito dal programma *SacPicker* [Spallarossa et al., 2011] così come la parametrizzazione dei valori di accelerazione di picco utilizzati da *ShakeMap*;
- *Shakemap* utilizza in *input* i parametri ipocentrali dell'evento ed i valori di ampiezza di picco registrati nelle singole stazioni e disegna le mappe di scuotimento in funzione delle leggi di attenuazione calibrate per tutto il territorio nazionale dal Gruppo di Lavoro "Scuotibilità" dell'INGV [Michelini e Emolo, 2007];
- dopo poco meno di 10 minuti dall'evento è possibile visualizzare una carta di scuotibilità. *Off-line* è possibile correggere eventuali errori di *picking*, e di conseguenza di localizzazione, e rilanciare la procedura di calcolo e disegno delle mappe.

2.2 Analisi della stabilità delle trasmissioni, della sensibilità delle stazioni accelerometriche e dell'efficienza del sistema di calcolo delle procedure automatiche

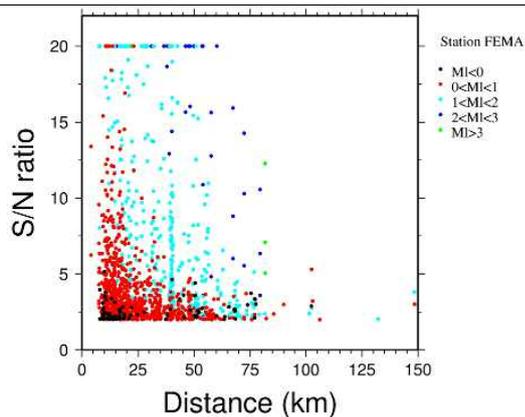
Nella figura 14 sono riportati i diagrammi di funzionamento delle stazioni dotate di accelerometro e acquisite direttamente nella sede di Ancona. Dalla figura emerge la buona affidabilità dei sistemi trasmissivi utilizzati (sia *wireless* che UMTS); i pochi periodi di non funzionamento derivano principalmente da guasti degli acquisitori o, limitatamente ad alcune tratte o singoli nodi di Marche Way, dalla interruzione del servizio a seguito di condizioni meteorologiche locali particolarmente avverse. Relativamente alla sensibilità delle stazioni l'analisi è stata fatta calcolando il rapporto segnale/rumore di circa un migliaio di eventi localizzati negli ultimi 2 anni. I valori di rapporto superiori a 20 sono riportati a questo valore (ampiamente superiore a quanto necessario per un corretto utilizzo dei dati) per migliorare la risoluzione grafica delle figure nell'area più interessante.

I risultati vengono mostrati nella figura 15 separando le stazioni dotate di accelerometri *Episensor* da quelle dotate di *Colibrys* e, per una migliore valutazione delle sensibilità, confrontandoli anche con due diversi velocimetri. Gli esempi di figura 15 sono stati scelti tra estreme e diverse tipologie di siti: quelli poco rumorosi (poco antropizzati e geologicamente ubicati su roccia) e quelli rumorosi (fortemente antropizzati e/o geologicamente ubicati su depositi incoerenti).

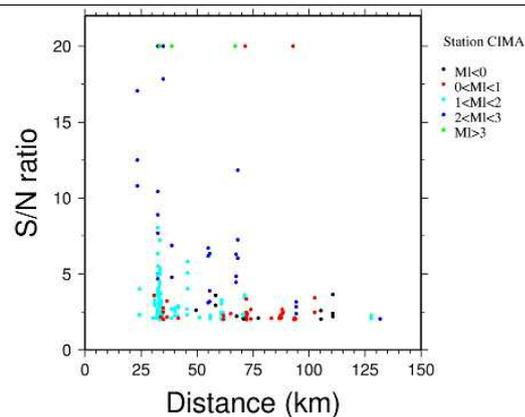
Dal confronto di figura 15 emerge, come ci si aspettava, una sensibilità leggermente superiore degli *Episensor* ES-T rispetto agli SF3000L della *Colibrys*. La capacità di *detection* degli accelerometri in generale è sorprendente: per esempio a FEMA la *detection* è migliore di quella di un velocimetro tradizionale alloggiato in un sito con debole antropizzazione ma su terreni incoerenti (COR1), benché ovviamente rimanga di molto inferiore a quella di una buona stazione ipogea su roccia (FDMO). In particolare, a FEMA, il rapporto segnale-rumore mediamente rimane a livelli significativi (tra 3 e 5) anche per eventi debolissimi ($M < 1$) e distanti fino a 25 km. Anche nei siti più penalizzanti/rumorosi il rapporto segnale-rumore rimane mediamente a livelli superiori a 5 per eventi di magnitudo compresa tra 2 e 3 a distanze fino a 75 km (CIMA) o 50 km (TRE1).

Questo comportamento si riflette anche sull'efficacia delle varie stazioni nel monitoraggio di *routine* della microsismicità.

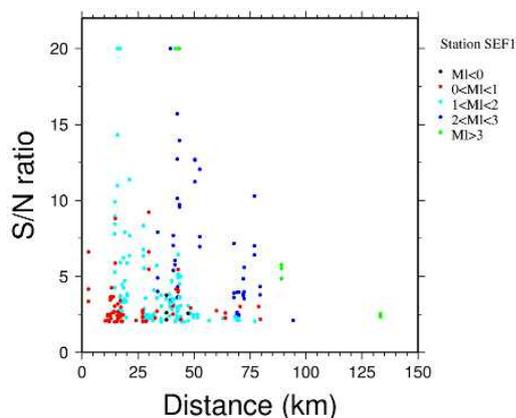
Limitando l'analisi ai primi 6 mesi del 2012, periodo in cui la rete era ormai a regime, la stazione FEMA ha prodotto 1481 fasi P e 1467 fasi S utilizzabili per le localizzazioni. Questa quantità di dati è ovviamente inferiore a quella prodotta da una stazione di ottima qualità come FDMO (4707 fasi P e 4534 fasi S), ma nettamente superiore a quella di un velocimetro installato in un sito 'non ideale' come COR1 (325 fasi



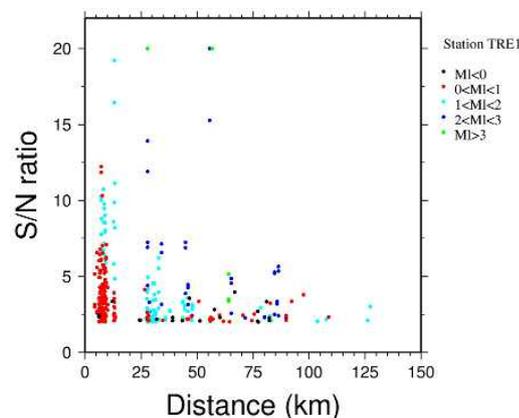
FEMA. Sensore: *Episensor*. Area: non antropizzata, componte radio. Geologia: calcari.
 FEMA. Sensor: *Episensor*. Area: not populated, radio link.
 Geology: limestone.



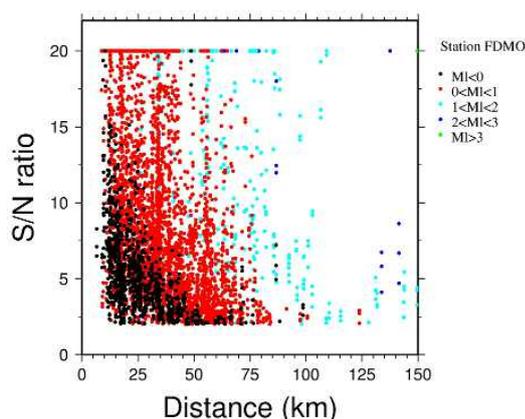
CIMA. Sensore: *Episensor*. Area: antropizzata, con un ponte radio. Geologia: marne plio-pleistoceniche.
 CIMA. Sensor: *Episensor*. Area: populated, radio link.
 Geology: Plio-Pleistocene marls.



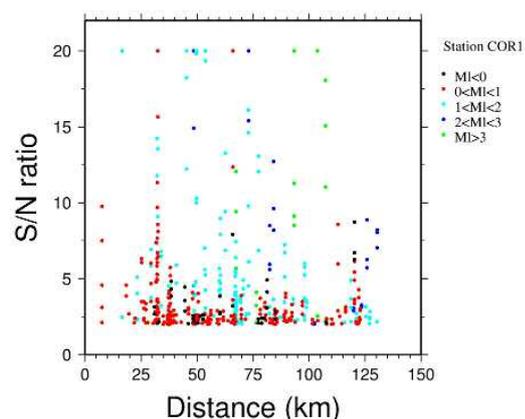
SEF1. Sensore: *Colibrys*. Area: antropizzata (città). Geologia: calcari.
 SEF1. Sensor: *Colibrys*. Area: populated (city).
 Geology: limestone.



TRE1. Sensore: *Colibrys*. Area: antropizzata (città). Geologia: alternanze di arenarie marnose e marne.
 TRE1. Sensor: *Colibrys*. Area: populated (city).
 Geology: alternated marly sandstones and marls.



FDMO. Sensore: *Trillium 240 s* (in pozzo -7 m). Area: debolmente antropizzata. Geologia: calcari marnosi.
 FDMO. Sensor: *Trillium 240 s* (borehole, -7 m). Area: weakly populated. Geology: limestone marl.



COR1. Sensore: *Lennartz 1 s* Area: debolmente antropizzata. Geologia: peliti.
 COR1. Sensor: *1 s Lennartz*. Area: weakly populated.
 Geology: pelites.

Figura 15 Confronto delle capacità di *detection* delle stazioni equipaggiate con diversi tipi di sensori.
Figure 15 Comparison of the detection capability of stations equipped with different types of sensors.

P e 258 fasi S) le cui prestazioni sono influenzate anche da una posizione geografica, molto più distante dalle principali strutture sismogenetiche rispetto a FEMA o FDMO.

Anche le stazioni equipaggiate con l'accelerometro SF3000L della *Colibrys* contribuiscono significativamente al monitoraggio: per esempio la stazione SEF1 ha fornito 432 fasi P e 425 fasi S. Risultati inferiori, anche qui influenzati dalla posizione geografica, sono stati ottenuti da TRE1 (192 fasi P e 166 fasi S) e da CIMA (120 fasi P e 93 fasi S), quest'ultima dotata di un *Episensor* FBA ES-T.

Nelle figure 16 e 17 vengono riportate le tracce di alcuni eventi registrati da alcune stazioni velocimetriche e accelerometriche. Le figure confermano l'efficienza delle stazioni accelerometriche che nel *far-field* rispondono bene anche per eventi di debole magnitudo.

Per valutare l'affidabilità del sistema di localizzazione automatica e del successivo calcolo delle mappe di scuotimento

sono state analizzate tutte le localizzazioni automatiche calcolate dall'INGV-AN dal 2011 a oggi facendo sì che per l'iniziale periodo di prova venisse fissata al valore 2.4 la soglia di magnitudo oltre il quale si procede al calcolo automatico.

Questi dati sono stati poi confrontati con quelli ottenuti a partire dalle localizzazioni manuali dell'INGV (figura 18). Nel confronto non sono state considerate le 'errate' localizzazioni automatiche di telesismi e più generalmente di eventi regionali fuori rete che ovviamente portano al calcolo di falsi terremoti e, di conseguenza, di false mappe.

Gli eventi interni alla rete sono generalmente ben localizzati dalle procedure automatiche. Dalla figura 18 a sinistra si evidenzia come nel 76 % dei casi le localizzazioni automatiche si differenziano da quelle manuali per meno di 8 km di distanza epicentrale; la percentuale sale al 91% se si pone la soglia a 15 km. Per le distanze ipocentrali le percentuali sono del 76 % sotto i 12 km e del 90 % sotto i 18 km.

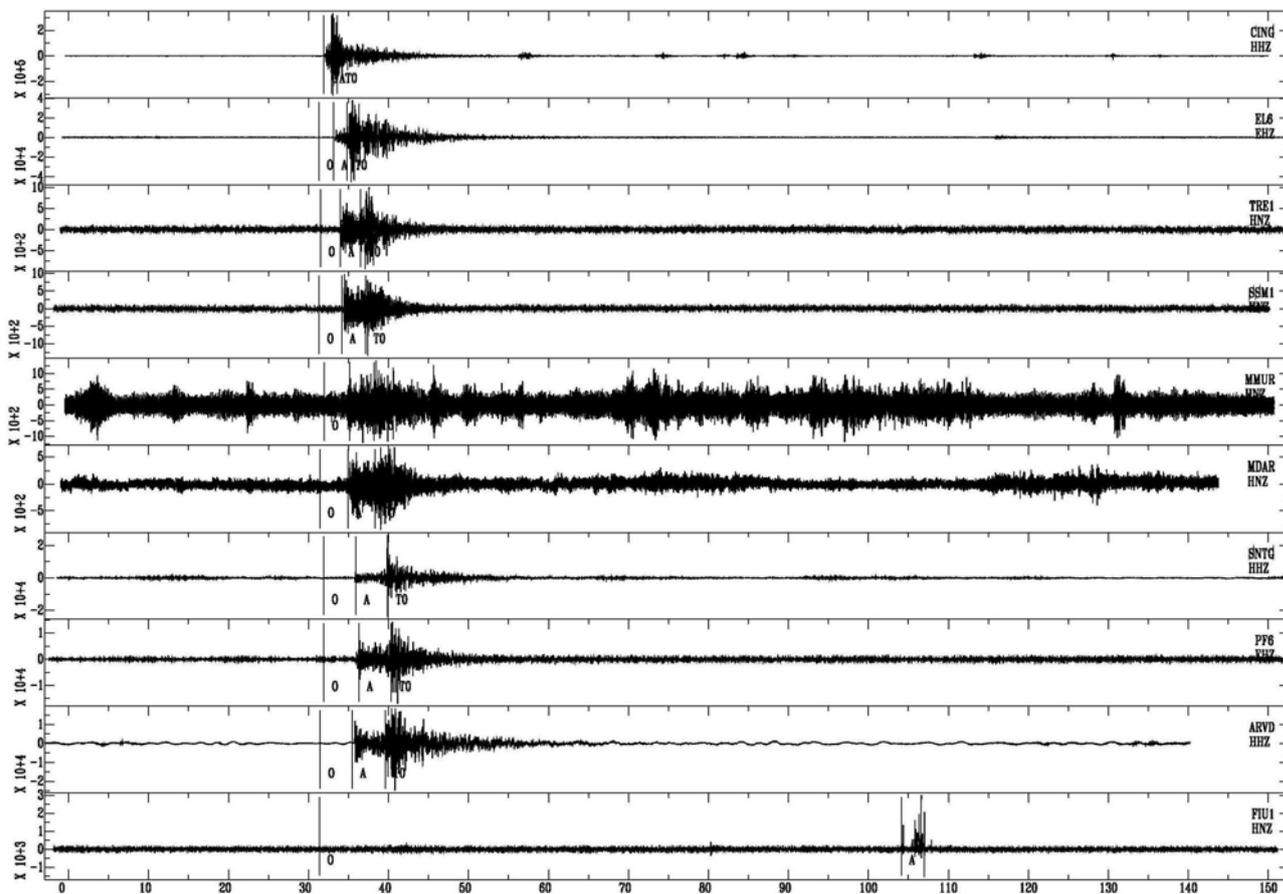


Figura 16 Evento sismico del giorno 24 aprile 2012 alle ore 15:05 (UTC) di magnitudo 2,5 e localizzato a Cingoli (MC). La terza dall'alto è la traccia dell'accelerometro di Treia (TRE1, *Colibrys* SF3000L, distanza 13 km); seguono quelle di San Severino Marche (SSM1, *Colibrys* SF3000L, distanza 16 km), quella di Monte Murano (MMUR, *Episensor*, distanza 18 km) e di Monte D'Aria (MDAR, *Episensor*, distanza 20 km). L'ultima è quella dell'accelerometro *Colibrys* SF3000L di Fiuminata (FIU1) distante 30 km dall'epicentro, in cui il picker automatico è stato ingannato da un disturbo.

Figure 16 Seismic event of April 24th, 2012 at 15:05 (UTC) magnitude 2.5 and located in Cingoli (MC). Third from the top the trace of the Treia accelerometer (TRE1, *Colibrys* SF3000L, distance 13 km), followed by those of San Severino Marche (SSM1, *Colibrys* SF3000L, distance 16 km), Monte Murano (MMUR, *Episensor*, distance 18 km) and Monte D'Aria (MDAR, *Episensor*, distance 20 km). Latest is the signal from the accelerometer *Colibrys* SF3000L of Fiuminata (FIU1) 30 km away from the epicenter, where the automatic picker was deceived by a disturbance.

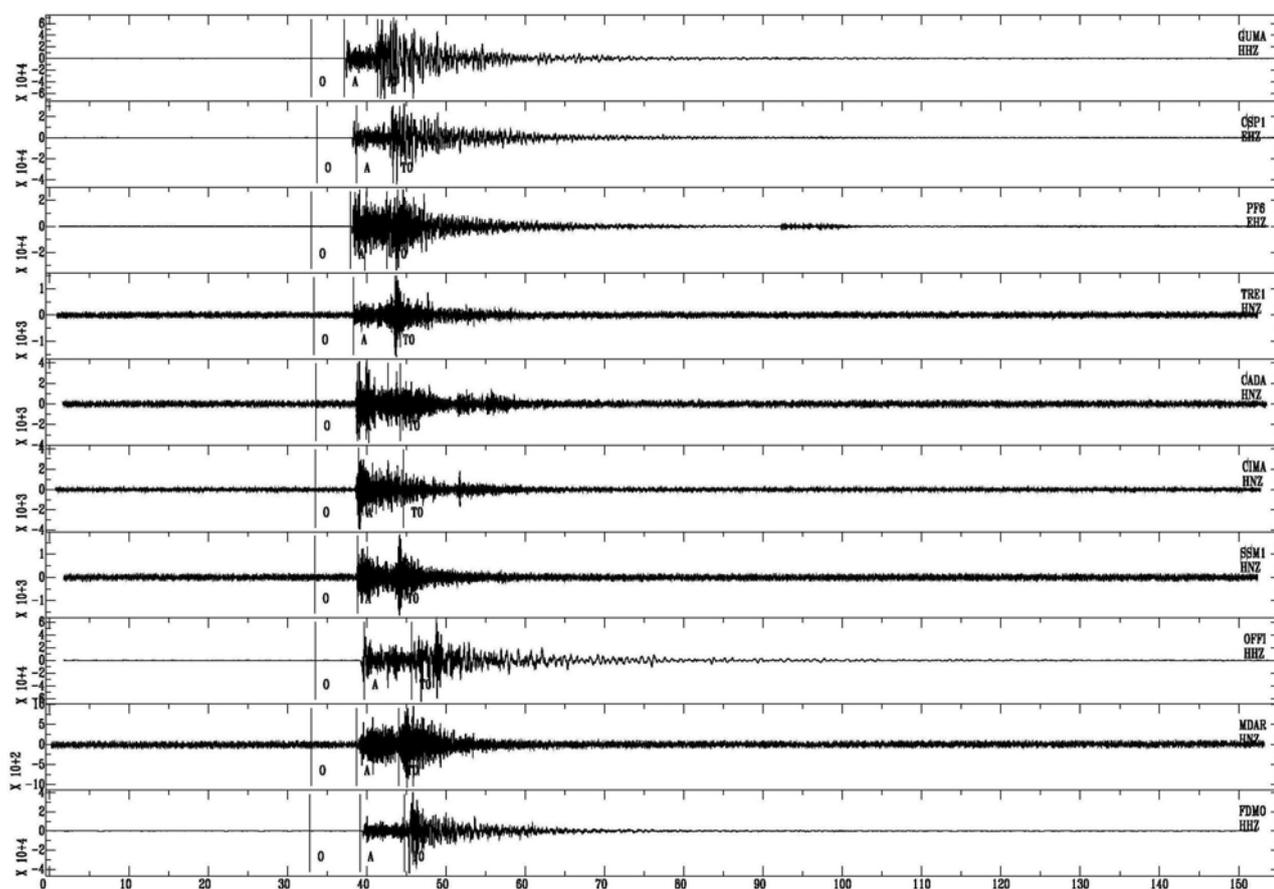


Figura 17 Evento sismico del giorno 10 aprile 2012 alle ore 22:37 (UTC) di magnitudo 3.2 e localizzato nel territorio fermano-maceratese. La quarta dall'alto è la traccia dell'accelerometro di Treia (TRE1, *Colibrys* SF3000L distanza 33 km); seguono quella di Capodarco (CADA, *Episensor*, distanza 34 km), di Civitanova Marche (CIMA, *Episensor*, distanza 34 km) e di San Severino Marche (SSM1, *Colibrys* SF3000L distanza 34 km). La penultima traccia è quella dell'accelerometro *Episensor* di Monte D'Aria (MDAR) distante 34 km dall'epicentro.

Figure 17 Seismic event of April 10th, 2012 at 22:37 (UTC) magnitude 3.2 and located in the territory of Fermo-Macerata. Fourth from the top is the trace of the Treia accelerometer (TRE1, *Colibrys* SF3000L distance 33 km). Following: Capodarco (CADA, *Episensor*, distance 34 km), Civitanova Marche (CIMA, *Episensor*, distance 34 km) and San Severino Marche (SSM1, *Colibrys* SF3000L distance 34 km). Last but one track is the accelerometer *Episensor* Monte D'Aria (MDAR) 34 kms from the epicenter.

Un ulteriore miglioramento dei risultati si ottiene selezionando solamente gli eventi localizzati dalle procedure automatiche con un errore stimato minore di 5 km (figura 18 destra). In questo caso le differenze tra localizzazioni automatiche e manuali si concentrano per il 72% dei casi sotto i 5 km, e per l'89% sotto gli 8 km di distanza epicentrale, mentre per quella ipocentrale il 72 % è sotto gli 8 km e il 91 % sotto i 12 km. I buoni risultati raggiunti nella localizzazione con processi automatici consentono di ottenere mappe di scuotimento disegnate mediante procedure automatiche del tutto simili a quelle calcolate dall'INGV di Roma sulla base delle interpretazioni manuali, almeno nei casi per i quali è stato possibile procedere al confronto (figura 19).

2.3 Diffusione dei risultati

I dati del calcolo automatico non vengono resi pubblici. I motivi di questa scelta sono essenzialmente legati ai potenziali errori nelle procedure automatiche di interpretazione

dei dati e al desiderio di evitare discrepanze (potenzialmente generatrici di confusione) rispetto ai dati ufficiali diffusi dalla sede INGV di Roma.

Su richiesta dei responsabili regionali, i dati della scuotibilità calcolata da localizzazioni automatiche vengono però pubblicati, con l'obbligo della riservatezza, in un'area del *web* regionale il cui accesso con *password* e *username* è possibile solo agli stessi responsabili regionali ed al personale dell'INGV di Ancona che lo amministrano.

In ogni caso l'elaborazione delle mappe viene effettuata impostando una soglia di magnitudo che ne determina sia il calcolo che la possibilità di diffusione riservata. Secondo gli accordi la soglia di magnitudo per l'avvio del processo è il valore 4.0.

Le mappe di scuotimento diffuse al pubblico sono unicamente quelle elaborate dalla sede INGV di Roma a partire da una localizzazione manuale calcolata/verificata dal personale in servizio h24 nella sala operativa romana.

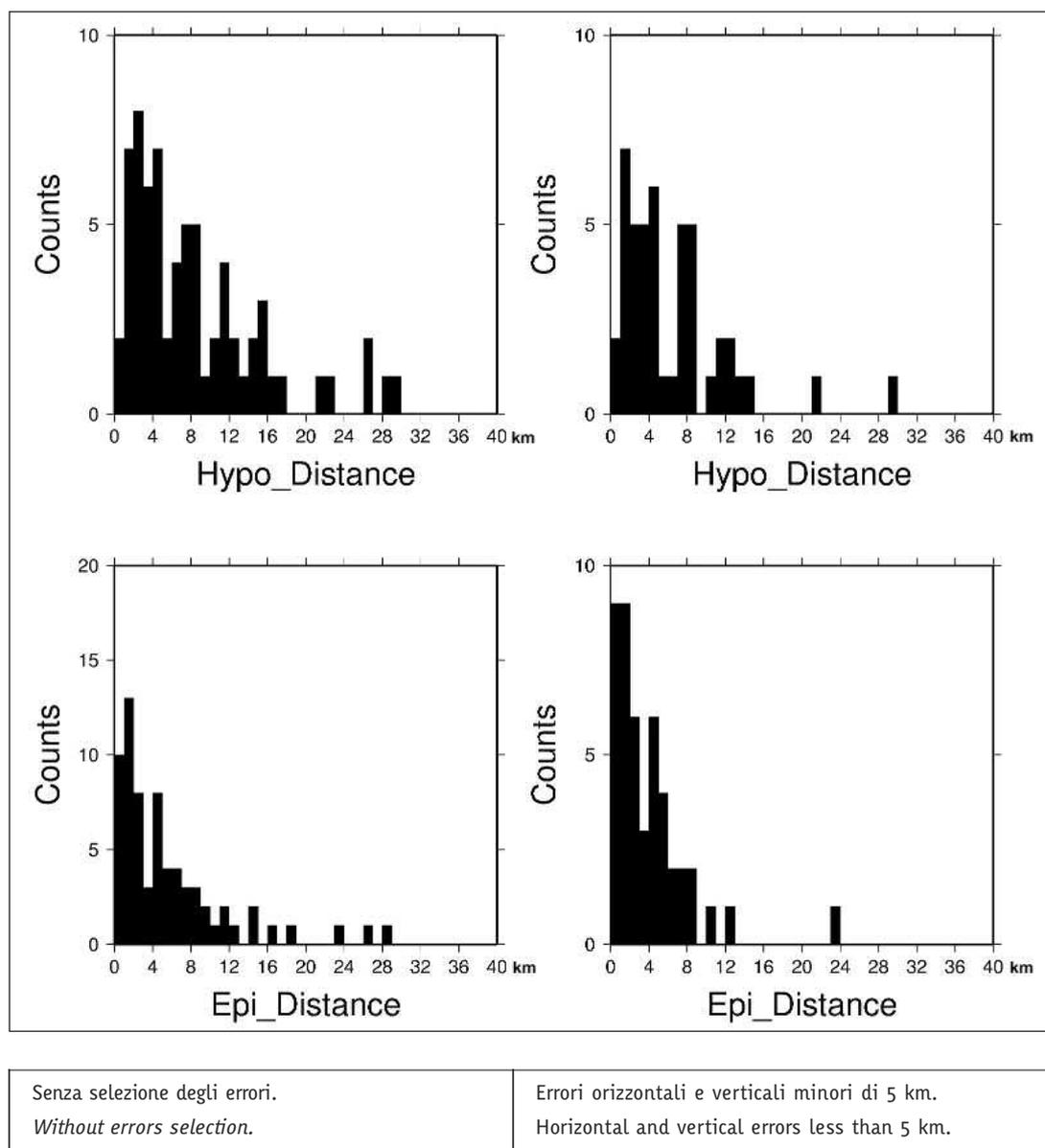


Figura 18 Variazioni delle distanze epicentrali e ipocentrali tra soluzioni del calcolo automatico e manuale per tutti gli eventi interni alla rete per cui si è calcolata la *shakemap*.

Figure 18 Variations of hypocentral and epicentral distances between automatic and manual calculation of solutions for all the events inside the network for which the *Shakemap* was computed.

Conclusioni

Dal 2009 a oggi l'INGV e la Regione Marche hanno fortemente sviluppato le attività di monitoraggio con il duplice obiettivo di:

- 1) ottenere informazioni sempre più dettagliate e complete sulla sismicità del territorio a scopi di protezione civile e di ricerca scientifica;
- 2) contenere i costi dell'operazione utilizzando infrastrutture esistenti senza penalizzare la qualità dei segnali acquisiti.

Ad oggi l'installazione di un accelerometro in un edificio/sito dove è presente una LAN collegata alla dorsale

regionale Marche Way ha costi non superiori ai 3500-4000 € e riducibili di circa 1000 € quando sarà disponibile l'acquirente GAIA_3 progettato dall'INGV appositamente per ottimizzare prestazioni e costi.

Con costi del tutto analoghi è possibile installare una stazione accelerometrica nei siti non raggiungibili dalla dorsale regionale utilizzando un *router* UMTS. In questo caso bisogna considerare anche i costi attualmente economici (10 € mese a stazione) per il traffico telefonico. Non si è tuttavia ancora sperimentata la solidità del sistema trasmissivo UMTS nel caso di un forte evento sismico in occasione del quale le molte chiamate cellulari potrebbero causare disservizi sul traffico dati; anche se la recente esperienza emiliana

è stata incoraggiante [Marzorati et al., 2012].
Comunque l'utilizzo di due diversi vettori trasmissivi è sempre consigliabile per creare la necessaria ridondanza del sistema.
L'iniziativa di dotare di un accelerometro un numero crescente di Comuni della Regione Marche è nei desideri del Dipartimento regionale, come è stato possibile verificare

anche in occasione di riunioni con i responsabili dei Servizi di Protezione Civile di diverse amministrazioni locali.
Si è visto inoltre che gli accelerometri danno ottimi risultati nello *strong-motion* ma anche buoni risultati nel *weak-motion* contribuendo così al miglioramento qualitativo dei parametri focali degli eventi di debole energia.

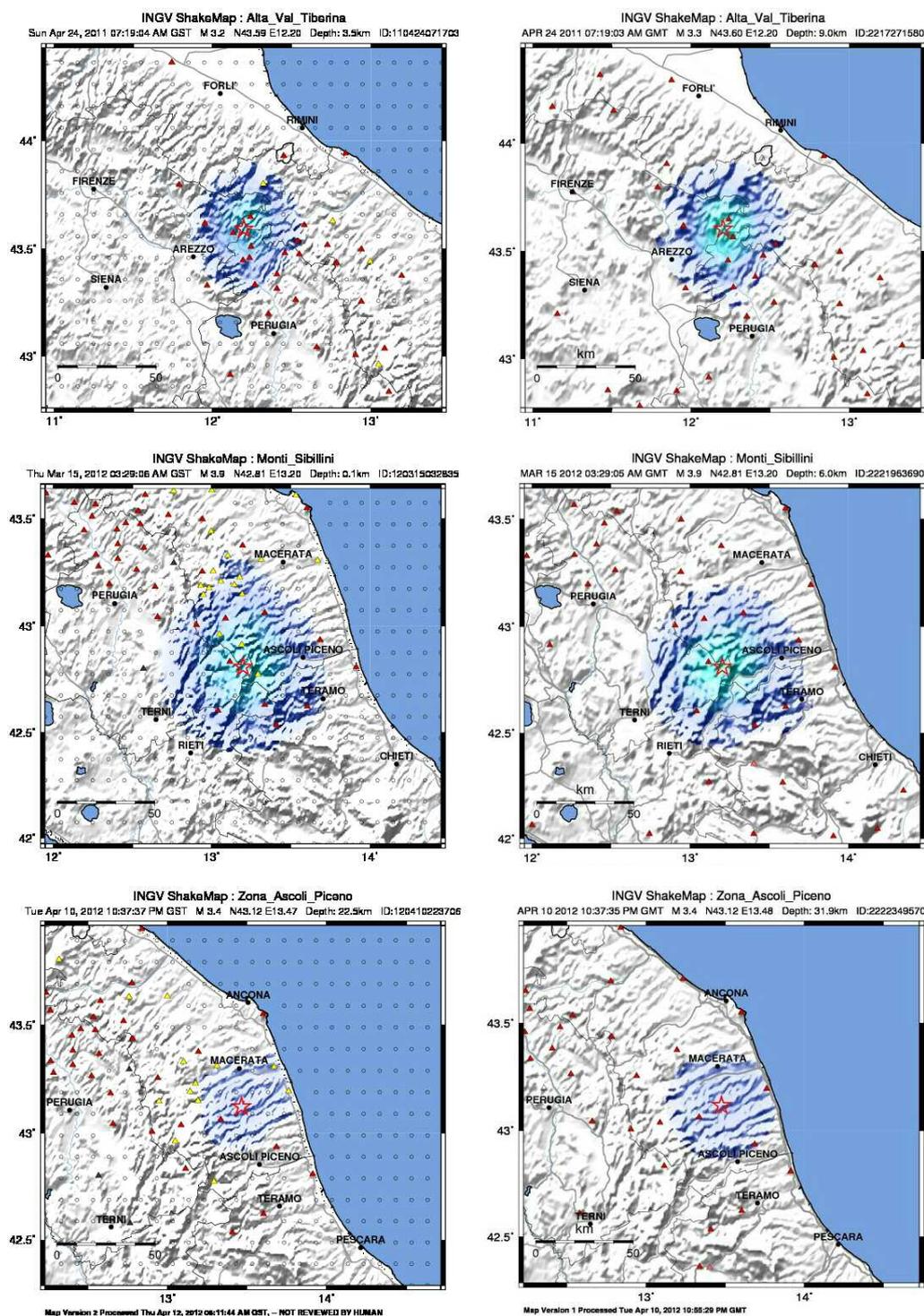


Figura 19 Alcuni esempi di confronto tra mappe di scuotimento calcolate per uno stesso evento. A sinistra quelle elaborate a 10 minuti dall'evento attraverso le procedure di localizzazione automatica messe a punto nella sede INGV di Ancona; a destra quelle pubblicate dopo 20 minuti dalla sede INGV di Roma ed elaborate da procedure di localizzazione non automatiche.

Figure 19 Some examples of comparison between shaking maps computed for the same event. At left, those produced 10 minutes after the event through the automatic location procedures developed in the INGV headquarters in Ancona, on the right, those published 20 minutes later at the INGV headquarters in Rome and produced by non-automatic localization procedures.

L'elevato numero di stazioni attualmente funzionanti e il loro buon livello della qualità del segnale permettono di parametrizzare automaticamente gli eventi interni alla rete sismometrica e di conseguenza di ottenere mappe di scuotimento disegnate mediante procedure automatiche del tutto simili a quelle calcolate dall'INGV di Roma sulla base delle interpretazioni manuali, almeno nei casi per i quali è stato possibile procedere al confronto.

In attesa di poter avviare un monitoraggio accelerometrico a scala sovracomunale sulla porzione di territorio regionale più ampia possibile, gli sforzi dovranno essere concentrati per un migliore utilizzo dei dati a scopi di protezione civile. In particolare i responsabili del Dipartimento regionale chiedono un sempre maggiore impegno per arrivare al disegno di mappe di danno, obiettivo raggiungibile attraverso la realizzazione di progetti sinergici che richiedono il coinvolgimento di tutti gli enti interessati all'iniziativa.

Ringraziamenti

Si ringrazia:

Il personale della U.F. Laboratorio di Sismologia del Centro Nazionale Terremoti dell'INGV ed in particolare: Catello Acerra, Lucian Giovani, Ulderico Piccolini, Sandro Rao, Carlo Salvaterra e Leonardo Salvaterra per la collaborazione, i consigli e la disponibilità.

Il personale del Centro Funzionale Multirischi del Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza e per la Protezione Civile della Regione Marche ed in particolare Gianluca Pierni, Luca Abeti e Paola Melonaro.

Michele Brizi del CED della Regione Marche per le prove di *networking* e per la disponibilità di un cortese "guardia di porta". Tiziano Ferraiuolo, Ciro Ferraiuolo e Andrea Duca della ditta ARSCOMM s.r.l. per la competenza nel settore della trasmissione radio ed il *networking* e soprattutto per la disponibilità offerta nel trasferirci informazioni basilari per lo sviluppo e la progettazione di reti *wireless*.

Viviana Castelli per gli spunti critici e la rilettura del testo.

Roberto Oreficini Rosi, direttore del Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza e Protezione Civile della Regione Marche, che ha sostenuto l'espansione dell'azione di monitoraggio in sinergia con l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Bibliografia

- Bard P-Y., (1999). *Microtremor measurements: a tool for site effect estimation ?*, in *The Effects of Surface Geology on seismic Motion*, K. Irikura, K. kudo, H. Okada and T. Sasatani (Editors), Balkema, Rotterdam, 1251-1279.
- Boschi E., Amato, A., Cocco M., D'Agostino, N., (2008).

Progetto Airplane. Piattaforma di ricerca multidisciplinare su terremoti e vulcani. Progetto Esecutivo.

- Cattaneo M., D'Alema E., Frapiccini M., Marzorati S., Monachesi G., (2011). *Acquisizione presso la sede di Ancona*, Miscellanea INGV, 10, 124-127. ISSN 2039-6651.
- D'Alema E., Carannante S., (2012). *Procedura automatica per il calcolo delle ShakeMaps e rilocalizzazione degli eventi presso la sede di Ancona dell'INGV_CNT*. Rapporti Tecnici INGV, 25, 30 pp. ISSN 2039-7941.
- D'Alema E., Cattaneo M., Frapiccini M., Marzorati S., Monachesi G., Ferretti M., (2011). *Rete Sismometrica Marchigiana e sua integrazione con la RSN e Rete AVT*. In Cattaneo M. e Moretti M (eds). *Monitoraggio sismico del territorio nazionale: stato dell'arte e sviluppo delle reti di monitoraggio sismico*. Miscellanea INGV, 10, 19-21. ISSN 2039-6651.
- Field E. H., Jacob, K. H.A, (1995). *Comparison and Test of Various Site-Response Estimation Techniques, Including 3 That Are Not Reference-Site Dependent*, Bulletin of the Seismological Society of America, Aug, Volume 85, Issue 4, 1127-1143.
- Govoni A., Monachesi G., Cattaneo M., Moretti M., Delladio A., Frapiccini M., (2012). *La sequenza sismica del 2010 nelle province di Macerata e Fermo e la sperimentazione della trasmissione dei dati in tempo reale via UMTS*. Quaderni di Geofisica, 102. 27 pp. ISSN 1590-2595.
- Ladina C., Marzorati S., Cattaneo M., Frapiccini M., Monachesi G., (2009). *Valutazione di sorgenti di disturbo dei segnali sismici: il caso dei tralicci per le telecomunicazioni*. 28° convegno nazionale GNGTS, Trieste 16-19 novembre 2009. Poster section.
- Marzorati S., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Frapiccini M., Ladina C., Monachesi G., (2012). *Emergenza sismica 2012 in Emilia Romagna: attività sperimentali di supporto alla rete sismica mobile INGV svolte dal personale della sede di Ancona*, Rapporti Tecnici INGV, 236, pp.38. ISSN 2039-7941.
- Michellini A., Emolo A., (2007). *Progetto S3 all'interno della Convenzione INGV-DPC 2007-2009 - Valutazione rapida dei parametri e degli effetti dei forti terremoti in Italia e nel Mediterraneo*. Task 2: Servizio Shakemap (WP2.2 Omogeneizzazione ShakeMap®: leggi di attenuazione e parametri per gli effetti locali. <http://istituto.ingv.it/1-ingv/progetti/progetti-finanziati-dal-dipartimento-diprotezione-civile-1/progetti-dpc-convenzione-2007-2009/progetti-s/progetto-s3>.
- Maggiulli M. L., (2010). *Il Piano Telematico Regionale come modello di sviluppo per il territorio marchigiano*. Convegno "Comuni in rete" San Severino Marche, 14 marzo 2010. <http://www.ecommunity.marche.it/LinkClick.aspx?fileticket=OtGPrsXq7Z%3d&tabid=81&mid=586>. Consultazione 8 maggio 2010.

- Monachesi G., Cattaneo M., (2007). *Allegato tecnico al Decreto Direttore Servizio Protezione Civile della Regione Marche n. 21/DPS del 24/04/2007*; convenzione tra la Regione Marche e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per attività di monitoraggio sismico del territorio regionale e servizi nel settore della protezione civile per gli anni dal 2007 al 2009.
- Monachesi G., Cattaneo M., (2010). *La dorsale radio Wi-Fi per il monitoraggio multiparametrico in Alta Val Tiberina*. Rapporti Tecnici INGV, 129, 36 pp.
- Monachesi G., Cattaneo M., D'Alema E., Frapiccini M., Marzorati S., Ferretti M., (2011). *Sistemi di controllo in uso al centro di acquisizione della sede di Ancona*. In Cattaneo M. e Moretti M (eds). *Monitoraggio sismico del territorio nazionale: stato dell'arte e sviluppo delle reti di monitoraggio sismico*. Miscellanea INGV, 10, 103-107. ISSN 2039-6651.
- Peterson J., (1993). *Observations and modeling of background seismic noise*. U. S. Geol. Surv. Open File Rep., 93-322.
- Rao S., Salvaterra L., Acerra C., (2010). *Software per l'installazione e la configurazione della stazione sismica GAIA2*. Rapporti Tecnici INGV, 130, 52 pp.
- Rao S., Salvaterra L., (2011). *Webmon: piccola interfaccia web della stazione sismica digitale Gaia2*. Rapporti Tecnici INGV, 212, 24 pp. ISSN 2039-7941.
- Salvaterra L., Pintore S., Badiali L., (2008). *Rete sismologica basata su Gaia2*. Rapporti Tecnici INGV, 28 pp.
- Spallarossa D., Ferretti G., Scafidi D., Pasta M., (2011). *Picking automatico nella rete sismica dell'Italia Nord-Occidentale (RSNI)*. *Monitoraggio sismico del territorio nazionale: stato dell'arte e sviluppo delle reti di monitoraggio sismico*. Miscellanea INGV, 10, 141-146. ISSN 2039-6651.

Indice

Introduzione	4
1. Evoluzione della rete di monitoraggio	5
1.1 Sperimentazione della trasmissione radio e del <i>networking</i> dei dati	7
1.2 Prove di rumore sui nodi della dorsale	10
1.3 Utilizzo di sensori accelerometrici MEMS (<i>Micro Electro-Mechanical System</i>)	13
1.4 Utilizzo di Radio-Modem UMTS	18
2. Analisi di funzionamento e primi risultati	19
2.1 Realizzazione delle procedure automatiche di calcolo delle <i>shakemap</i>	20
2.2 Analisi della stabilità delle trasmissioni, della sensibilità delle stazioni accelerometriche e dell'efficienza del sistema di calcolo delle procedure automatiche	20
2.3 Diffusione dei risultati	23
Conclusioni	24
Ringraziamenti	26
Bibliografia	26

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2013 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia