

Cooperazione Italia-Indonesia:
un sistema per il monitoraggio
sismologico del vulcano
Marapi (Sumatra)

Quaderni di
Geofisica

73



Quaderni di Geofisica

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (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

Cooperazione Italia-Indonesia: un sistema per il monitoraggio sismologico del vulcano Marapi (Sumatra)

Italy-Indonesia cooperation: a system for the seismological monitoring of Mt. Marapi (Sumatra)

Massimo Orazi¹, Rosario Peluso¹, Luca D'Auria¹, Antonio Caputo¹,
Martina Demartin⁷, Diego Franceschi⁷, Alberto Delladio⁷,
Agus Budianto³, Hendra Gunawan³, Jacopo Selva⁶, Alex Garcia⁶,
Flora Giudicepietro¹, Warner Marzocchi², Marcello Martini¹, Surono³,
Enzo Boschi^{4,5}

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano)

²INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Roma 1)

³CVGHM (Directorate of Volcanology and Geological Hazard Mitigation)

⁴INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)

⁵Università degli Studi di Bologna (Dipartimento di Fisica)

⁶INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

⁷INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti)

Cooperazione Italia-Indonesia: un sistema per il monitoraggio sismologico del vulcano Marapi (Sumatra)

L'Italia e l'Indonesia hanno avviato nel 2005-2006 un progetto di cooperazione sulle tematiche della mitigazione del rischio vulcanico. Nell'ambito di questo progetto è stata individuata la zona ovest di Sumatra come area di intervento. In particolare è stato preso in considerazione il vulcano Marapi. Questo vulcano ha avuto frequente attività eruttiva nelle ultime decine di anni. L'ultima eruzione si è verificata nel 2004. La sua attività, sebbene di moderata intensità, pone un problema di protezione civile, poiché dal 1980 ad oggi ha causato diversi feriti e alcune vittime tra i turisti che hanno visitato l'area craterica sommitale.

Allo scopo di monitorare lo stato di attività del Marapi, nell'ambito del citato progetto è stata realizzata una rete sismica a larga banda composta da 4 stazioni e basata su sensori Guralp GMG-40T da 60s di periodo e su acquisitori di tipo GAIA2, prodotti presso l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. La strumentazione è stata portata dall'Italia ed è stata installata da un gruppo di lavoro formato da italiani ed indonesiani. Oltre all'installazione della strumentazione in campagna è stato necessario allestire un vero e proprio Centro di Monitoraggio presso l'Osservatorio di Bukittinggi, in prossimità delle pendici nordoccidentali del vulcano, dotato di calcolatori per l'acquisizione, l'analisi dei dati e la loro archiviazione.

Il sistema per il monitoraggio sismologico realizzato al Marapi costituisce un importante strumento di prevenzione del rischio associato all'attività di questo vulcano e sta permettendo di creare un ricco *data set* utile a caratterizzare la sismicità della struttura vulcanica e dell'area circostante. Da un'analisi preliminare dei dati registrati nel periodo 19/10/2006 - 24/11/2008 si evidenzia che il vulcano manifesta una sismicità di tipo VT ed LP. Nell'agosto 2007 sono stati inoltre registrati segnali probabilmente attribuibili a modesta attività esplosiva nell'area sommitale.

Italy and Indonesia started a cooperation project in 2005-2006 to cover issues for the mitigation of volcanic risk. In this project, the west area of Sumatra was identified as the area for intervention. In particular, the Marapi volcano was considered. This volcano has shown frequent eruptive activity over recent decades, with the last eruption occurring in 2004. Although its activity is of moderate intensity, it creates a civil protection problem, because since 1980 it has resulted in several injuries and a number of deaths among the tourists who visit the summit crater area.

To monitor the activity of Marapi volcano as part of this project, a broadband seismic network has been implemented that consists of four stations based on Guralp GMG 40T sensors with period of 60 s and on GAIA2 data-loggers, which are produced at the INGV. The instrumentation was brought from Italy and was installed by a working group comprising Italians and Indonesians. In addition to the instrumentation in the field, it was necessary to set up a monitoring centre in the Bukittinggi Observatory, which is near the north-western slopes of the Marapi volcano. This is equipped with computers for data acquisition, analysis and archiving.

The system for seismological monitoring that has been realized at Marapi volcano is an important tool in the prevention of the risk associated with this volcano, and it is providing a rich dataset that will be of great use for the characterization of the seismicity of the Marapi volcanic structure and the surrounding area.

A preliminary analysis of the data recorded during the period 19/10/2006 - 24/11/2008 evidences that the volcano shows VT and LP seismicity. In August 2007 were also recorded signals probably attributable to small explosive activity in the summit area.

Introduzione

Il confronto delle esperienze di studio e di monitoraggio maturate su complessi vulcanici di diverse regioni della terra è di fondamentale importanza per il progresso della comunità scientifica vulcanologica sia sul piano culturale che sul piano operativo. Per questo motivo nel 2005 è stato proposto un progetto di cooperazione tra l'Italia e l'Indonesia. Le istituzioni coinvolte sono l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) per l'Italia e il *Directorate of Volcanology and Geological Hazard Mitigation* (CVGHM) per l'Indonesia. Il progetto è finalizzato ad uno scambio formativo ed alla promozione di attività congiunte per la mitigazione del rischio vulcanico nei due paesi [Boschi et al. 2008]. Sia l'Italia che l'Indonesia, infatti, sono caratterizzate dalla presenza di vulcani attivi. In Indonesia il fenomeno è diffuso su quasi tutto il territorio nazionale essendo questo paese situato su un margine della placca litosferica euroasiatica, sede di processi di subduzione. In Italia il vulcanismo attivo è limitato ad aree più ristrette tuttavia vulcani potenzialmente molto pericolosi si trovano in prossimità di zone intensamente urbanizzate come il distretto flegreo ed il Vesuvio rispetto all'area metropolitana di Napoli.

In questo contesto l'accordo di cooperazione si propone di accrescere la conoscenza dei processi pre-eruttivi di vulcani esplosivi ed in particolare dei segnali precursori e dei possibili scenari eruttivi, in modo da migliorare significativamente la capacità di gestire future crisi vulcaniche nel nostro territorio. Ha inoltre lo scopo di instaurare un'efficiente collaborazione tecnica e scientifica e favorire lo scambio di competenze tra i ricercatori dei due enti e di sviluppare database vulcanologici comuni.

Nell'ambito delle attività della cooperazione è stata scelta come area pilota la zona ovest di Sumatra e in particolare il vulcano Marapi, che ha avuto attività recente (ultima eruzione nel 2004) con notevoli implicazioni in termini di rischio per le aree circostanti. Quest'area è stata scelta perché, a fronte del grande interesse che può ricoprire data la presenza oltre che del Marapi anche di altri due vulcani attivi quali il Tandikat ed il Talang, prima dell'installazione della strumentazione oggetto del presente lavoro risultava particolarmente sguarnita dal punto di vista della strumentazione geofisica. Di conseguenza su di essa non esistevano che pochissime informazioni riguardo alla sismicità ed in generale allo stato di attività vulcanica. D'altro canto il gran numero di vulcani attivi presenti sul territorio nazionale e le limitate risorse di cui dispone l'Indonesia per queste attività impongono una esposizione di dette risorse secondo rigorosi criteri di priorità. In questo contesto il progetto di cooperazione ha fornito l'opportunità di iniziare una sistematica attività di osservazioni sismologiche in una regione quasi inesplorata da questo punto di vista.

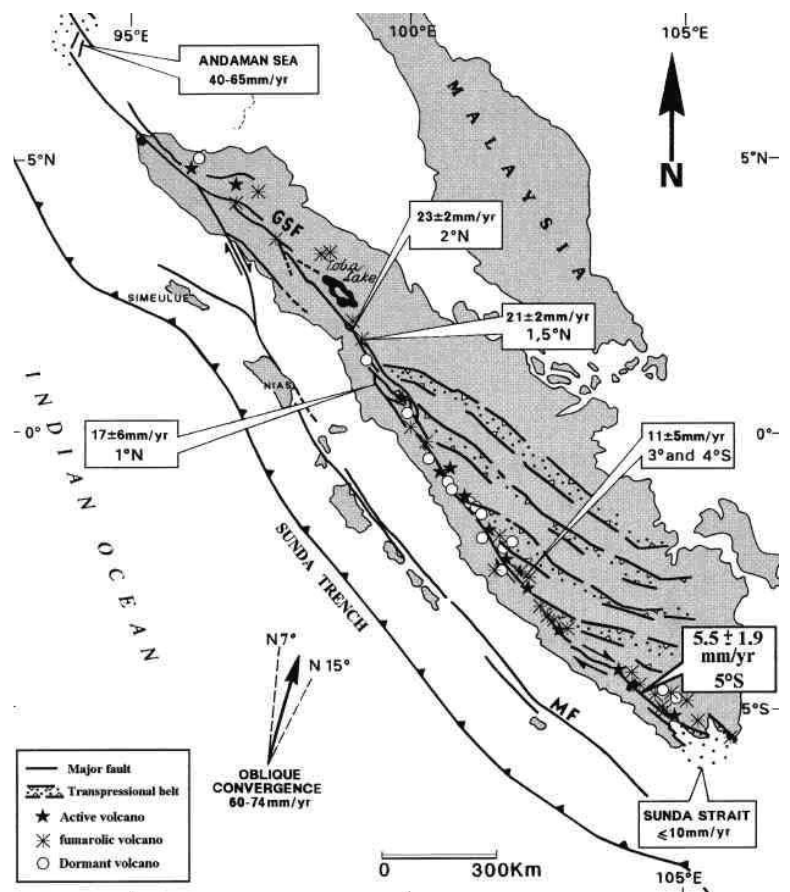


Figura 1 Schema geotettonico dell'area di Sumatra. Sono indicati i tassi di slip medi lungo la Great Sumatra Fault (GSF) [Bellier and Sebrier, 1995].
Figure 1 Sumatra Geotectonic map. The average slip rates along the Great Sumatra Fault (GSF) are indicated [Bellier and Sebrier, 1995].

Sul Marapi si è deciso di installare una rete sismica a larga banda al fine di poter adeguatamente registrare i diversi fenomeni sismici che possono presentarsi in un'area vulcanica. Questi fenomeni, come è noto, hanno contenuto in frequenza variabile in un ampio intervallo, che va da decine di Hz a diversi secondi di periodo [Chouet, 2003]. La rete sismica del Marapi è stata progettata e sviluppata in base all'esperienza maturata in altri contesti quali lo sviluppo e la gestione della rete per il monitoraggio dello Stromboli [De Cesare et al. 2009].

La rete sismica del Marapi ha il duplice scopo di consentire il monitoraggio dello stato di attività del vulcano e di raccogliere dati di alta qualità per lo studio dei processi sismogenetici che agiscono in questa area vulcanica. Per la realizzazione di questa rete è stato necessario l'allestimento di un centro di monitoraggio, la realizzazione di un'infrastruttura per la trasmissione dei dati oltre alla ricerca e l'allestimento dei siti. Nel seguito sarà descritta in dettaglio ciascuna di queste attività svolte principalmente nell'ambito di due distinte missioni tenutesi nell'Ottobre 2006 e nel Settembre 2007.

1. Contesto geotettonico dell'area

L'Indonesia è una regione del sud-est asiatico, costituita da un vasto arcipelago, situata a sud dell'Indocina e a Nord dell'Australia tra l'Oceano Indiano e quello Pacifico. Questo arcipelago si trova in corrispondenza della zona di subduzione della Sonda [W. Van der Werff, 1996]. Attualmente la placca indoaustraliana si sposta verso nord relativamente alla placca eurasiatica con una velocità di circa 60-75 mm/anno (Fig.1) e subduce al di sotto della placca della Sonda formando la fossa del sistema Java-Sonda [Le Pichon et al. 2005]. Detta zona di subduzione è caratterizzata da un sistema di arco vulcanico che si estende per oltre 1500 Km con circa 150 vulcani che hanno manifestato attività eruttiva in epoca storica (Fig.2). Tale sistema si sviluppa da Sumatra a Nord al Sulawesi nella parte meridionale dell'arcipelago. Sumatra in particolare è caratterizzata dalla presenza di molti vulcani, gran parte dei quali è in stato di quiescenza. Un importante complesso vulcanico di Sumatra è la caldera di Toba la cui struttura risulta condizionata dal sistema tettonico regionale [Hickman et al. 2004].

Tutta la regione del margine tra la placca australiana e quella della Sonda è molto attiva sismicamente e produce

terremoti di grande magnitudo con frequenza relativamente elevata. Mentre nella zona a sud di Java il movimento di subduzione è ortogonale rispetto alla fossa, lungo la *trench* della Sonda ad ovest di Sumatra il movimento di convergenza delle placche è obliquo rispetto alla direzione di allungamento della fossa. Si ritiene che la componente parallela al margine di questa convergenza obliqua alimenti il movimento di tipo *strike-slip* della Grande Faglia di Sumatra (GSF), nota anche come Faglia di Semangko e della faglia di Mentawai (MF) nel bacino di *fore-arc* di Sumatra [Bellier et al. 1999]. La GSF è stata responsabile di terremoti di forte magnitudo anche nel corso dell'ultimo secolo. L'area del Marapi è stata interessata dagli eventi del 1926 ($M > 7$). Dopo questi terremoti furono riconosciute delle chiare superfici di rottura lungo la traccia della GSF.

2. L'attività vulcanica di Sumatra Ovest

Nell'area di Sumatra Ovest sono presenti diversi vulcani (Fig.2 e Fig.3), tutti a carattere esplosivo con un chimismo variabile da riolitico ad andesitico tipico delle zone di subduzione. L'area vulcanica di Maninjau, circa 10 km ad Ovest di Bukittinggi, ha prodotto circa 50ka fa un'eru-



Figura 2 Distribuzione dei vulcani attivi dell'Indonesia [dal sito web dell'USGS].
Figure 2 Distribution of active volcanoes in Indonesia [from USGS website].

zione ignimbratica i cui depositi ricoprono estesamente tutta l'area circostante. Questa eruzione (volume eruttato di circa 220-250 km³) ha formato una caldera di 20x8 km, attualmente riempita da un lago. La zona circostante Bukittinggi si erge su un altopiano, formato dai depositi di questa eruzione, inciso da profondi canyon, come la valle del Sianok, che attraversano la città stessa. Il vulcano Talang, a Sud dell'area interessata, ha una struttura complessa composta da diversi centri eruttivi coalescenti. L'attività recente è rappresentata da diverse esplosioni freatiche di entità moderata. Nel 2005 è iniziata la più recente fase di *unrest*, che persiste tuttora. Nel Luglio 2005 fu decisa l'evacuazione di alcuni villaggi in prossimità del vulcano. Il Tandikat, ad Ovest del Marapi è uno stratovulcano la cui attività storica è consistita solo di moderate esplosioni a carattere probabilmente freatico. L'ultima eruzione del Tandikat risale al 1924. Il Marapi infine, è uno stratovulcano con una forma allungata in direzione NE-SW, con un'ampia area sommitale che forma una terrazza craterica (Fig.4). I crateri attivi sono anch'essi allineati in direzione NE-SW e sono caratterizzati da un'attività fumarolica sostenuta che produce un *plume* persistente. Spesso si verificano emissioni gas-

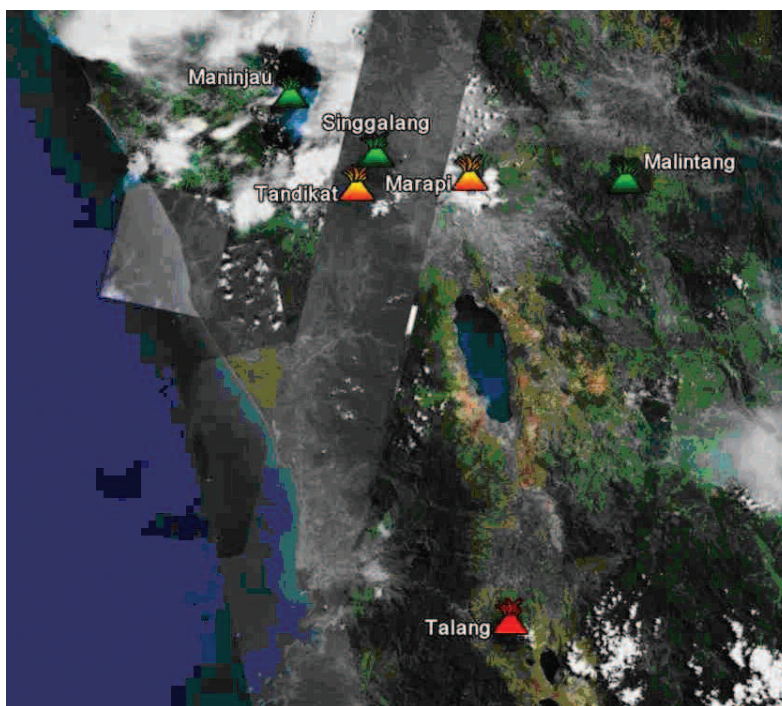


Figura 3 Vulcani attivi (arancio e rosso) ed inattivi (verde) dell'area. Il Talang è attualmente in fase di *unrest* [da Google Earth].

Figure 3 Active volcanoes (orange and red) and inactive volcanoes (green). Currently Talang volcano shows *unrest* [from Google Earth].

sose transienti miste a cenere. Occasionalmente si verificano esplosioni più violente, con lancio di materiale. La storia recente del vulcano Marapi è caratterizzata da moderata attività esplosiva localizzata in corrispondenza

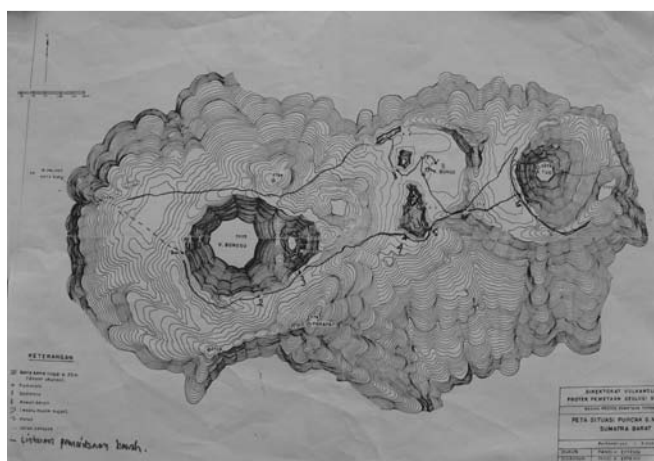


Figura 3 In alto a sinistra mappa schematica dell'area sommitale del Marapi; a destra vista del cratere Tuo; in basso vista panoramica a 360° della terrazza craterica.

Figure 3 On the top left panel the schematic map of the Marapi summit; on the right a view of the crater Tuo; at the bottom the 360° view of the crater terrace.

dei crateri sommitali. Negli ultimi decenni non sono mai stati osservati flussi di lava al di fuori del orlo della caldera. L'ultima eruzione è avvenuta il 5 agosto del 2004, ed è stata caratterizzata da una moderata attività esplosiva alimentata dal cratere centrale. Nel 1975 è avvenuta un'eruzione relativamente forte che è stata caratterizzata da attività esplosiva magmatica dalla bocca centrale e da esplosioni freatiche, *mudflows* e *lahars* e che hanno causato diverse vittime. Almeno dieci le eruzioni che si sono verificati dal marzo 1980, di solito dal cratere centrale, con intensità esplosiva da piccola a moderata. In alcuni casi, vi sono state vittime. Le vittime e i feriti dell'attività recente del Marapi sono stati prevalentemente turisti. Questo vulcano è infatti un'attrattiva turistica piuttosto nota nell'area. Detta area è anche colpita da forti terremoti che hanno origine tettonica nella zona di subduzione o nel sistema di faglie di tipo *strike-slip* di Sumatra.

3. Scelta e realizzazione dei siti della rete

L'Osservatorio Vulcanologico di Bukittinggi, visibile nella foto da satellite di Fig.5, ospita il personale e la strumentazione per il monitoraggio in continuo del Marapi. Il sistema di monitoraggio sismico preesistente contava su di un'unica stazione analogica monocomponente equipaggiata con un sensore elettromeccanico. I dati erano, e sono tuttora, trasmessi in continuo in modulazione di frequenza e registrati su carta con un apparato "trasportabile" della *Kinematics*.

Nonostante la distanza tra l'Osservatorio ed il vulcano non sia molto grande (~13km), la visione diretta tra di essi è resa difficoltosa dalla presenza di ostacoli naturali (alture) e



Figura 5 Vista da satellite dell'Osservatorio di Bukittinggi.
Figure 5 Satellite view of the Bukittinggi Observatory.

artificiali (edifici). A supporto di detto Osservatorio, esiste in località Batupalano una postazione di osservazione (POS) visiva dello stato del vulcano, con un'unità di personale ivi residente. Ogni evento viene annotato su di un registro e comunicato via radio all'Osservatorio di Bukittinggi. Da qui la comunicazione viene inoltrata su onde medie alla sede centrale del CVGHM nella città di Bandung (Java).

L'Osservatorio dispone di rete elettrica a 220V senza alcun sistema *no-break*. Per questo sono stati inclusi nel materiale spedito dall'Italia 3 gruppi di continuità (Fig.6).

Come la maggior parte degli edifici della zona, l'Osservatorio ha un unico piano con tetto in lamiera ondulata e sottotetto in legno. Due stanze di quest'edificio, di circa 35 m² ognuna sono state messe a disposizione dei nostri sistemi. Una è stata destinata a Centro di Monitoraggio e sala riunioni (Fig.6), mentre l'altra è stata utilizzata come deposito attrezzatura e laboratorio (Fig.6). Sulla base di queste destinazioni le stanze sono state arredate integrando l'arredamento preesistente con del mobiliario acquistato sul posto. Il Centro di Monitoraggio è stato dotato di macchine di acquisizione e visualizzazione dei dati (Fig.6), di sistemi radio per la ricezione dei segnali e di tutte le altre apparecchiature ed impianti di supporto necessari.

4. Il centro di monitoraggio di Bukittinggi

Elemento comune delle installazioni di strumentazione in aree vulcaniche è il condizionamento dovuto alla logistica dei luoghi generalmente di difficile accesso e privi di servizi per l'alimentazione elettrica e per la trasmissione dei dati. D'altra parte le finalità del monitoraggio richiedono l'uso di stazioni permanenti in trasmissione continua per avere un flusso di dati ininterrotto, disponibile in tempo reale. Questo implica che di volta in volta va ricercata la soluzione ottimale per la realizzazione delle installazioni. Nel caso del Marapi l'edificio vulcanico ha un'altezza di circa 2850 m s.l.m. e tutte le pendici sono ricoperte da una fitta vegetazione tropicale che si estende fino a quota 2500-2600 m. Questo ovviamente pone dei problemi nell'individuazione dei siti idonei ad ospitare le stazioni sismiche soprattutto in relazione alla possibilità di utilizzare sistemi ad energia solare per assicurare l'alimentazione alla stazione sismica, a causa della presenza di alberi ad alto fusto (anche fino a 30 m). La zona sommitale invece è priva di vegetazione e consiste in una terrazza craterica abbastanza estesa. Per raggiungere la sommità esiste un sentiero principale nel settore Ovest del vulcano frequentemente utilizzato dai turisti e dalla popolazione locale. Lungo tale sentiero, sebbene rappresenti la via preferenziale per l'accesso al vulcano, non si è ritenuto opportuno installare stazioni per timore di facili manomissioni o danneggiamenti della strumentazione. L'infrastruttura stra-



Figura 6 In alto la stanza del centro di monitoraggio dell'Osservatorio di Bukittinggi; in basso la stanza deposito e laboratorio dell'Osservatorio di Bukittinggi.

Figure 6 On the top the room of the monitoring centre of Bukittinggi, on the bottom the storage room of the laboratory of Bukittinggi Observatory.

dale nell'area circostante il vulcano è molto povera e non consente rapidi spostamenti anche considerando che la circonferenza approssimativa del vulcano è di 60 km. Secondo gli scopi del progetto, la geometria della rete dovrebbe essere costituita da stazioni disposte lungo direzioni radiali rispetto all'asse craterico del vulcano, con stazioni poste a quote diverse. Questa geometria è motivata dalla necessità di localizzare con precisione gli eventi all'interno della struttura vulcanica e di garantire un *dataset* adatto ad analisi di tipo più avanzato. La scelta di direzioni radiali soddisfa anche delle esigenze di carattere pratico, in quanto la presenza di sentieri radiali consentireb-

be di raggiungere più stazioni lungo lo stesso percorso. La configurazione attuale della rete è il risultato di un compromesso tra le esigenze succitate, le risorse umane e materiali che si avevano a disposizione e le caratteristiche logistiche dei luoghi. Attualmente detta rete consta di 4 stazioni digitali a larga banda installate a quota diversa sui versanti Nord e Ovest del vulcano. Rimangono scoperti i versanti Sud ed Est, di più difficile accesso e con maggiori problematiche per l'aspetto della trasmissione dei dati. In futuri interventi sarà affrontato lo studio e la progettazione dello sviluppo della rete nel settore meridionale (Fig. 7).

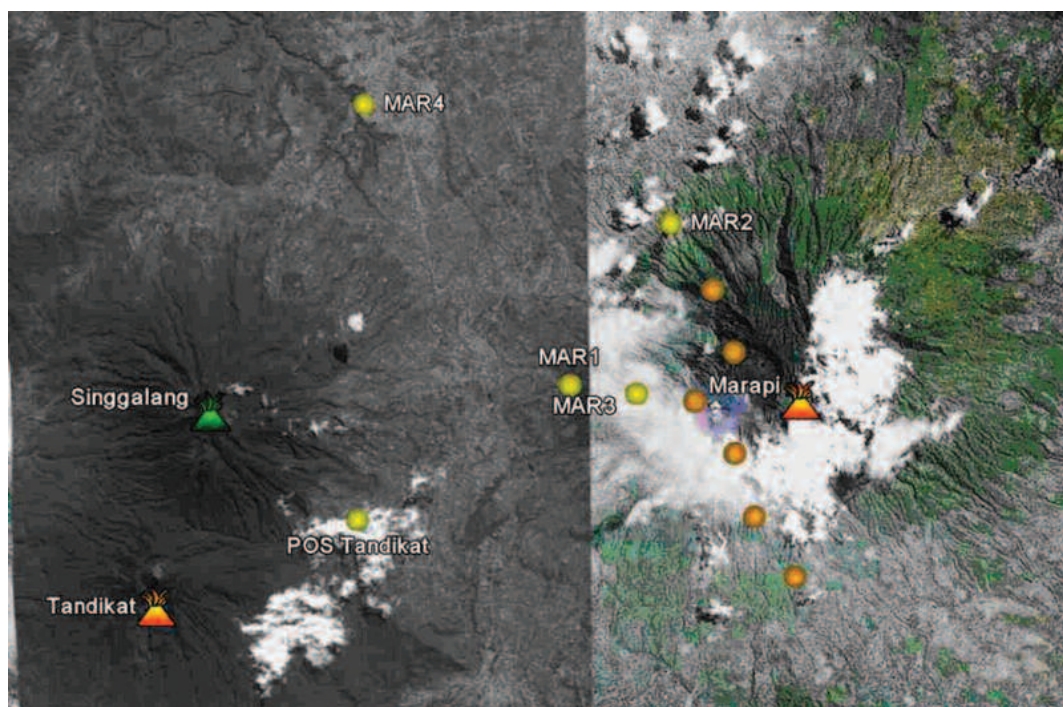


Figura 7 Mappa della rete sismica attuale (giallo) e posizione indicativa dei siti pianificati per i futuri interventi (arancio).

Figure 7 Map of the current seismic network (yellow) and indicative positions of the sites planned for the future installations (orange).

4.1 Aspetti tecnici delle installazioni

Prendendo spunto dall'esistente sito di Batupalano (MAR1 in Fig. 11) si è deciso di realizzare anche per le nuove stazioni uno *shelter* in muratura. La funzione degli *shelter* è principalmente quella di difendere la strumentazione dagli agenti atmosferici e da eventuali manomissioni e furti. La costruzione degli *shelter* è stata commissionata a persone del luogo, sotto la supervisione del personale CVGHM. La dimensione degli *shelter* in tutti i casi è di circa 1x1x1 m. L'orientazione della pianta è stata scelta in modo da facilitare l'installazione della struttura dei pannelli solari direttamente sul tetto conferendogli un'orientazione parallela alle direzioni cardinali. In questo modo la struttura dei pannelli solari, i quali per massimizzare l'energia raccolta devono essere orientati verso nord (il Marapi si trova nell'emisfero Sud), ha molti più punti disponibili per il suo ancoraggio sul tetto. La porta di accesso è collocata sempre sul lato che risulta a valle rispetto al pendio, per evitare accumulo di materiale davanti ad essa durante le frequenti piogge torrenziali. A causa dello spesso strato di suolo, nei siti di MAR2 e MAR3 sono stati realizzati, sulla base degli *shelter*, dei pozzetti profondi circa 1 m, sul cui fondo è presente un massetto di cemento per garantire un accoppiamento ottimale del sensore. Lo stesso pozzetto rappresenta inoltre un valido sistema di coibentazione. Per quanto riguarda il sistema di alimentazione, si è scelto di utilizzare due pannelli solari Kyocera da 85 W con regolato-

re di carica MorningStar ProStar da 30 A e 4 batterie *sealed* per autotrazione da 50 Ah ciascuna. Il sistema è sovradimensionato, rispetto alla radiazione solare teoricamente disponibile, a causa dei prolungati periodi di condizioni nuvolose, che si verificano spesso durante la stagione delle piogge. I pannelli e i regolatori sono stati spediti dall'Italia, mentre le batterie sono state acquistate nella città di Padang (90 km da Bukittinggi) non essendo disponibili nelle vicinanze.

4.2 MAR1 (Batupalano) 1503 m

La stazione è stata posizionata sul sito dell'unica pre-esistente stazione sismica indonesiana a corto periodo. MAR1 si colloca lungo l'asse radiale W del vulcano. Nel sito è presente uno *shelter* in cemento (Fig. 8-1) (circa 1x1 m) costruito circa 20 anni fa, allo scopo di ospitare la stazione. Questo sito non dista molto dal POS nella vicina località di Batupalano. La stazione *broadband* è stata affiancata alla stazione a corto periodo anche allo scopo di dare una continuità ai segnali registrati negli anni precedenti. Sul tetto dello *shelter* esiste un caposaldo GPS utilizzato per campagne di misura effettuate dal CVGHM. In prossimità dello *shelter* sono presenti due pali utilizzati per sostenere i pannelli solari e l'antenna VHF della stazione sismica indonesiana (Fig.8). Si è provveduto a fissare i pali con dei tiranti allo scopo di evitare oscillazioni indesiderate. L'antenna UHF della stazione MAR1 è stata installata direttamente sul tetto



Figura 8 1) Sito stazione MAR1 (Batupalano). 2) Stazione MAR2 (Lasimudo). 3) Stazione MAR3 (Pacet). 4) Pozzetto del sensore della stazione MAR4. Si noti il polistirolo per l'isolamento termico del sensore.

Figure 8 1) MAR1 station site (Batupalano). 2) MAR2 station (Lasimudo). 3) MAR3 station (Pacet). 4) Installation of the MAR4 sensor. Note the polystyrene for thermal insulation of the sensor.

dello *shelter* mentre i suoi pannelli solari sono stati montati su una struttura separata a pochi metri dallo *shelter*.

4.3 MAR2 (Lasimudo) 1482 m

La stazione MAR2 è posizionata a Nord del vulcano, in pian-tazioni di canna da zucchero. Il sito è stato scelto sulla base di diverse considerazioni logistiche. La principale è la vicinanza al villaggio di Lasimudo che ha consentito di usufruire del supporto di persone del posto per la ricerca e l'installazione del sito. Il sito si trova su un leggero pendio che è stato disboscato e sbancato per ospitare la stazione (Fig. 8-2). Questo pendio è stato scelto in quanto la presenza di una radura consentiva la visibilità diretta con Bukittinggi e la possibilità di ricevere un'adeguata insolazione.

4.4 MAR3 (Pacet) 2007 m

Questa stazione è collocata lungo la radiale W che comprende anche la stazione MAR1. Al fine di evitare furti e manomissioni, il sito non è stato collocato lungo il sentiero turistico, ma su un sentiero diverso e meno battuto.

Anche in questo caso il sito è posizionato su una piccola radura per gli stessi motivi discussi per MAR2. Per garantire una migliore visibilità radio sono stati abbattuti alcuni alberi di piccolo fusto. Si è comunque preferito ottimizzare le prestazioni, posizionando l'antenna su un palo distante dallo *shelter* (Fig.8-3) in modo da sfruttare un'apertura negli alberi di alto fusto della foresta circostante. Annotiamo che il nome della stazione, a differenza delle altre, non ha un significato geografico, ma indica nella lingua locale una specie di sanguisughe molto diffuse in quest'area che rendono ancora più difficile la logistica.

4.5 MAR4 (Bukittinggi) 933 m

Questa stazione è situata nel giardino retrostante l'Osservatorio di Bukittinggi (Fig.8-4). Essa serve principalmente come riferimento esterno all'area del vulcano. La trasmissione avviene direttamente tramite cavo seriale. In questa stazione non è presente uno *shelter* simile a quello delle altre stazioni, ma una struttura in muratura più semplice con coperchio apribile.

5. Il sistema di trasmissione e acquisizione dati

5.1 Gli apparati di acquisizione, trasmissione e ricezione

Come previsto dal piano di sviluppo del progetto di cooperazione, la rete sismica è basata su sensori *broadband*. I sensori scelti sono i *Guralp* GMG-40T da 60s di periodo massimo. Questi sensori sono diffusamente installati sui vulcani poiché la loro larghezza di banda copre un'ampia banda di frequenza dei fenomeni sismici che possono essere generati in ambiente vulcanico. L'elevata dinamica di questi sensori richiede l'utilizzo di acquisitori digitali a 24 bit individuati nel sistema GAIA2 [Salvaterra et al. 2008], in particolare la versione con il solo digitalizzatore ed uscita seriale. La trasmissione in continuo avviene in modalità punto-punto con l'utilizzo di radiomodem nella banda dei 400MHz (Fig.9). In base all'affidabilità dimostrata nell'utilizzo in continuo in altre installazioni realizzate, si è deciso di utilizzare come radiomodem i dispositivi Satel 3AS

con potenza impostabile fino ad un massimo di 1W. La scelta di utilizzare una trasmissione a 400MHz si è rivelata la più opportuna viste le distanze in gioco tra l'Osservatorio ed il vulcano (circa 15 km) e la mancanza di visibilità diretta. Tale frequenza radio, infatti, permette il miglior compromesso tra la banda dati supportata, la possibilità di garantire la trasmissione radio anche in condizioni di non diretta visibilità con la stazione ricevente e, infine, la distanza coperta (decine di chilometri). Ad esempio sistemi nella banda dei 2.4GHz avrebbero potuto soffrire della mancanza di visibilità diretta dovuta al fatto che le stazioni sismiche sono di fatto immerse nella fitta vegetazione tropicale. Non essendo stato possibile effettuare tali valutazioni a priori, essi sono stati comunque previsti e inviati sul posto e verranno utilizzati all'occorrenza dove necessario e dove possibile, in futuri ampliamenti della rete.

Le antenne di ricezione dei segnali digitali trasmessi dai radiomodem remoti sono state installate su un palo di circa 7 m, posto nel cortile interno dell'Osservatorio

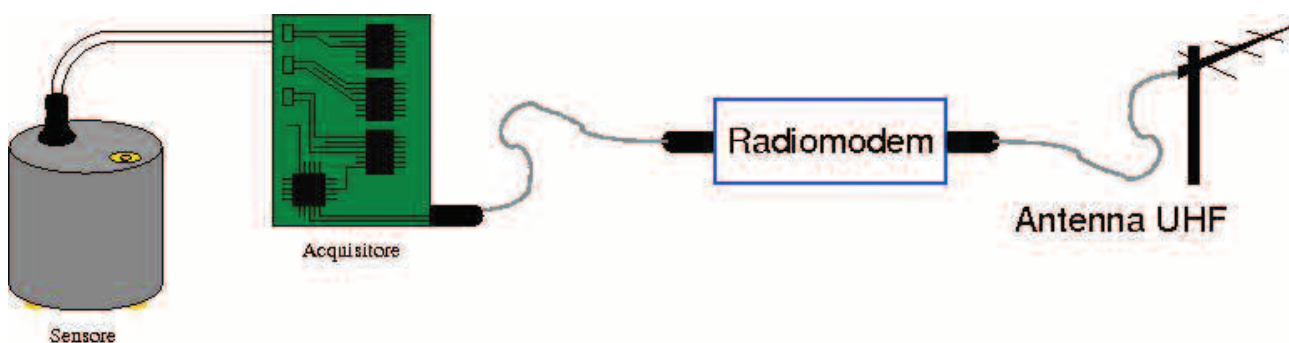


Figura 9 Illustrazione schematica di una stazione sismica.
Figure 9 Schematic illustration of a seismic station.



Figura 10 Foto del momento dell'installazione del palo delle antenne UHF che si possono notare all'estremità.
Figure 10 Photo of installation operation of the pile of UHF antennas which can be seen at the top.

(Fig.10). I cavi d'antenna sono stati instradati verso l'interno dell'edificio attraverso il sottotetto e da lì raggiungono la stanza del centro di acquisizione (Fig.6). Un secondo radiomodem in ascolto per ogni stazione rigenera il traffico seriale proveniente dalla stessa e lo invia ad un convertitore seriale-ethernet ad 8 porte (Lantronix ETS8PS) che lo trasforma in traffico TCP/IP diretto verso la macchina di acquisizione (Fig.11). Per l'allestimento del centro di monitoraggio sono state utilizzate due macchine gemelle, una delle quali dedicata all'acquisizione ed archiviazione dei dati in ambiente *Linux*. Essa è anche utilizzata come *workstation* per il controllo e l'analisi dei dati acquisiti. L'altra è invece dedicata alla visualizzazione in tempo reale dei segnali sismici in ambiente *Windows*. Ad essa sono collegati quattro dei sei *monitor* installati presso il centro di acquisizione ognuno dedicato alla visualizzazione di un canale sismico in tempo reale.

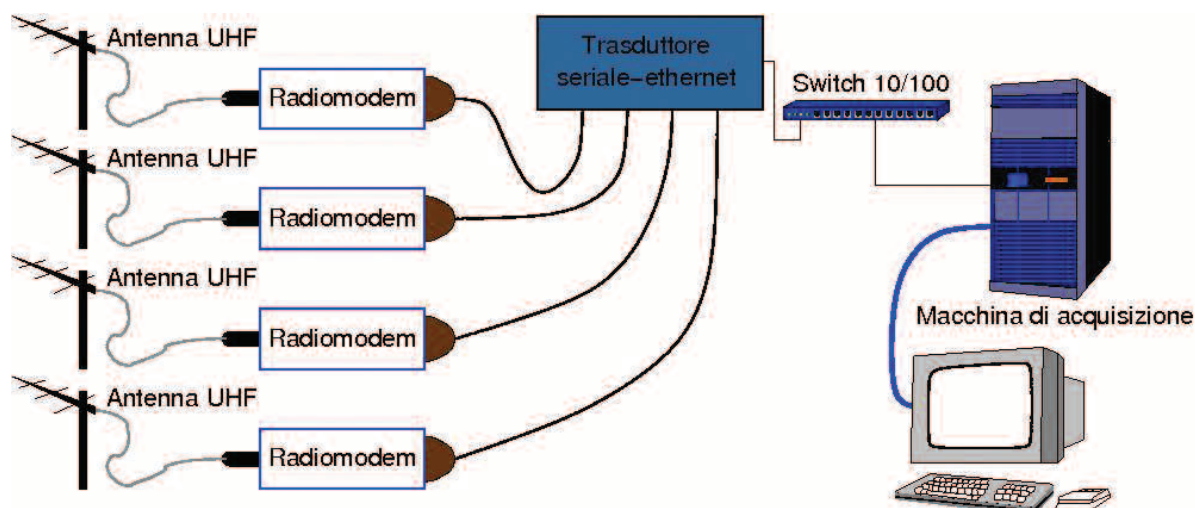


Figura 11 Schema del sistema di acquisizione.
Figure 11 Outline of the acquisition system.

Le macchine scelte sono delle *workstation* HP xw4300 modello PS988AV (Fig.11) di cui si riportano le principali caratteristiche:

- Scheda madre ITX HP-0A68H, *chipset* Intel 82801,
- Processore Intel Core2 a 2.66GHz,
- Memoria DIMM da 2GByte,
- Scheda di rete gigabit integrata,
- Doppio disco SATA da 250GByte.
- Doppia scheda video PCIXpress *dual-head* con possibilità di pilotare fino a quattro *monitor* contemporaneamente.

5.2 I programmi di acquisizione, analisi e visualizzazione

Per l'acquisizione ed il salvataggio dei dati sismici sono stati utilizzati alcuni programmi già in uso presso la Sezione di Napoli dell'INGV "Osservatorio Vesuviano". Essi sono basati sulla versione 6.2 del pacchetto standard *Earthworm* e sono stati sviluppati per rispondere a particolari esigenze nate all'interno della Sezione stessa:

- *lantronix2ring*: È il modulo che si occupa dell'acquisizione dei dati connettendosi via TCP/IP alla porta del convertitore seriale-ethernet.
- *ring2suds*: Viene utilizzato per salvare i dati nel formato SUDS demultiplexato.

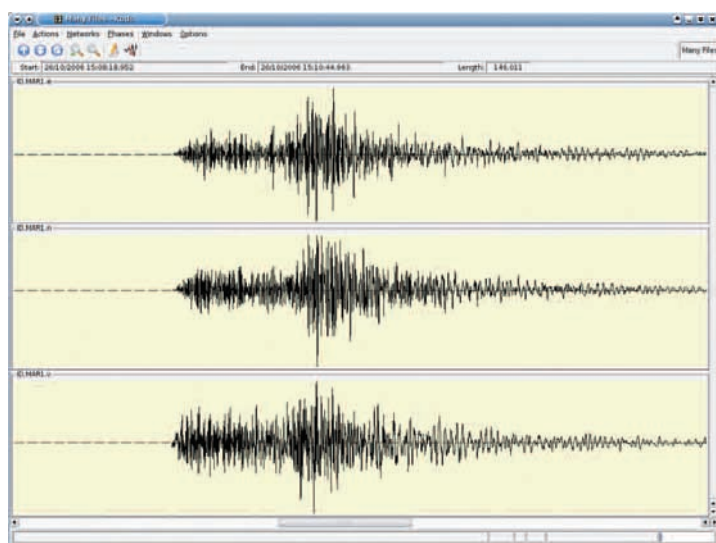


Figura 12 A sinistra un esempio di schermata del programma Kuds; a destra la schermata dei 4 monitor della visualizzazione in tempo reale mostranti la traccia del terremoto di Mw=8.5 del 12/9/2007.

Figure 12 On the left an example of the Kuds program layout ; on the right the 4 monitor showing the track of the earthquake of Mw = 8.5 of 12/9/2007 in real time.

La visualizzazione e alcune semplici analisi dei dati acquisiti sono possibili utilizzando sia i tradizionali programmi del pacchetto IASPEI, che il programma *Kuds* (Fig.12), anch'esso sviluppato presso la Sezione di Napoli, in ambiente *Linux*. *Kuds* consente di esportare i dati in formato SAC rendendo possibile l'utilizzo del programma *sac2000* che pure è stato installato sulla macchina di acquisizione.

Per la visualizzazione dei segnali in tempo reale viene utilizzato il programma *WinDrum* [Giudicepietro, 2001] sviluppato presso la Sezione di Napoli. Esso riceve i dati sismici sotto forma di *Trace Buffers* direttamente dal sistema *Earthworm* [<http://folkworm.ceri.memphis.edu/ewdoc/modules.html>] utilizzando il modulo standard *ringto-coax*. Le varie istanze del programma in esecuzione su uno o più calcolatori possono essere collegate tra di loro in

modo da eseguire le medesime operazioni su tutti i segnali visualizzati. In Fig.12 si può vedere una fotografia scattata nel centro di acquisizione poco dopo il terremoto di magnitudo 8.5 registrato alle 11:10:26 UTC del 12/09/2007.

6. I segnali sismici: analisi preliminare

Il dataset attualmente acquisito consiste di registrazioni continue dei segnali della rete *broadband*, nel periodo tra il 19/10/2006 ed il 24/11/2008. I dati sono in corso di elaborazione. La sismicità dell'area si presenta cospicua e variegata (Fig.13). Un tipo di evento comune nell'area è rappresentato da terremoti vulcano-tettonici (VT), molto locali, probabilmente localizzati entro poche decine di km dall'edificio vulcanico visti i tempi

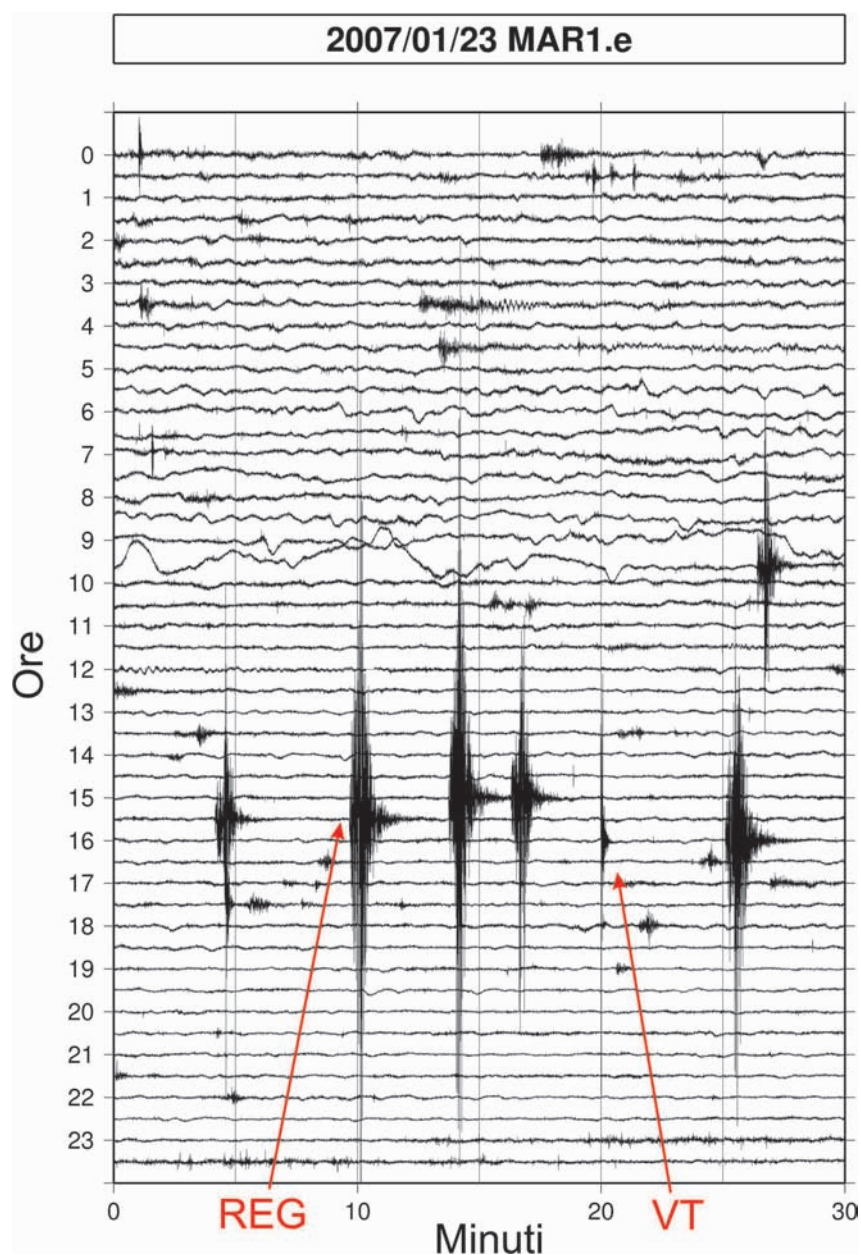


Figura 13 Una tipica giornata di registrazione con diversi eventi regionali (REG) e qualche evento vulcano-tettonico (VT).
Figure 13 A typical day of recording with several regional events(REG) and some volcano-tectonic events (VT).

T_s - T_p molto ridotti (in genere inferiore a 2 s) (Fig.14). La frequenza di occorrenza è in media di circa 2-3 eventi VT al giorno.

Insieme agli eventi locali sono frequenti eventi regionali (T_s - $T_p > 10$ s) e telesismi (Fig.15). Gli eventi regionali costituiscono la tipologia predominante con una frequenza di accadimento di circa 3-4 eventi al giorno. La maggioranza presenta forme d'onda tipiche con fasi Pn emergenti ed un treno di onde superficiali (Fig.15).

Alcuni invece presentano chiari arrivi impulsivi P ed S ed una polarizzazione P quasi verticale. L'ipocentro di tali eventi potrebbe verosimilmente essere localizzato in profondità, sul piano di subduzione al di sotto della regione (Fig. 16).

Nel corso del periodo considerato sono stati registrati diversi eventi di elevata magnitudo a breve distanza dalla rete. Il 6 Marzo 2007 sono stati registrati due eventi di magnitudo Mw 6.4 e 6.3 con epicentro prossimo al Marapi (Fig.17). Nel corso

dei giorni successivi è stata registrata una sequenza di centinaia di *aftershock* (Fig.18).

Tra il 12 ed il 13 Settembre 2007, la zona di subduzione di Sumatra è stata interessata da una sequenza di eventi iniziata con un terremoto di Mw=8.5 il cui epicentro è localizzato a meno di 500 km dall'area del Marapi (Fig.19). Il 13 un evento di Mw=7.9 è stato localizzato più a Nord del precedente ad una distanza di circa 100 km dal Marapi. Anche in questo caso la sequenza di *aftershock* è durata diverse settimane con centinaia di eventi.

La sismicità strettamente vulcanica è caratterizzata da eventi *Long-Period* (LP) di piccola ampiezza e con un contenuto spettrale molto ristretto. All'inizio degli eventi è spesso presente una piccola componente *Very-Long-Period* (VLP) compresa nella banda 0.1-0.5 Hz (Fig.20). Le due componenti sono entrambe legate allo stesso fenomeno, che plausibilmente consiste in un degassamento transiente del sistema magmatico e/o idroter-

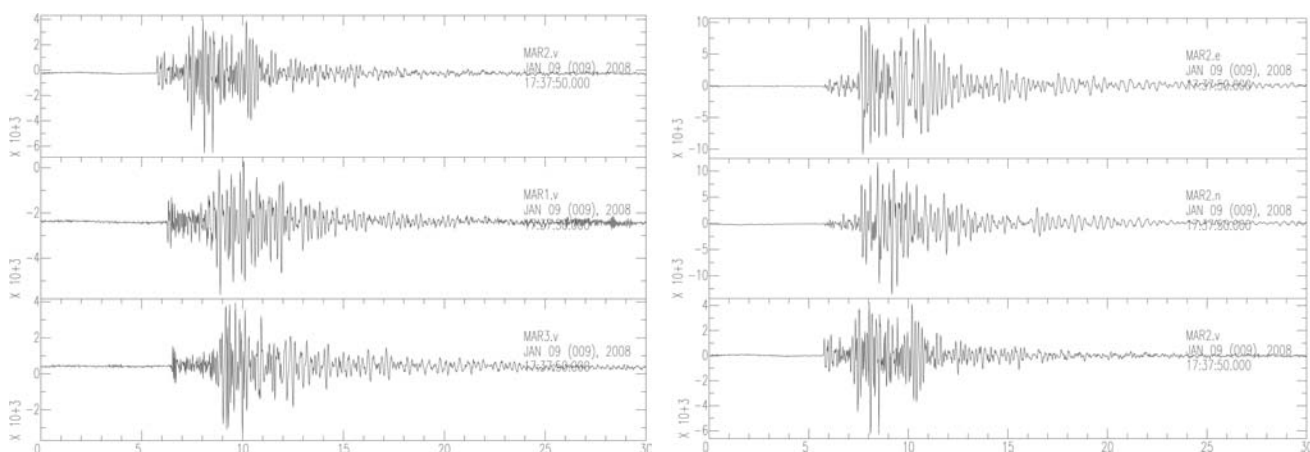


Figura 14 A sinistra componenti verticali di un tipico evento VT a tutte le stazioni sul vulcano; a destra la registrazione di un tipico evento VT alla stazione MAR2.

Figure 14 On the left the vertical components of a typical VT event at all the stations on the volcano, on the right the record of a typical VT event at MAR2 station.

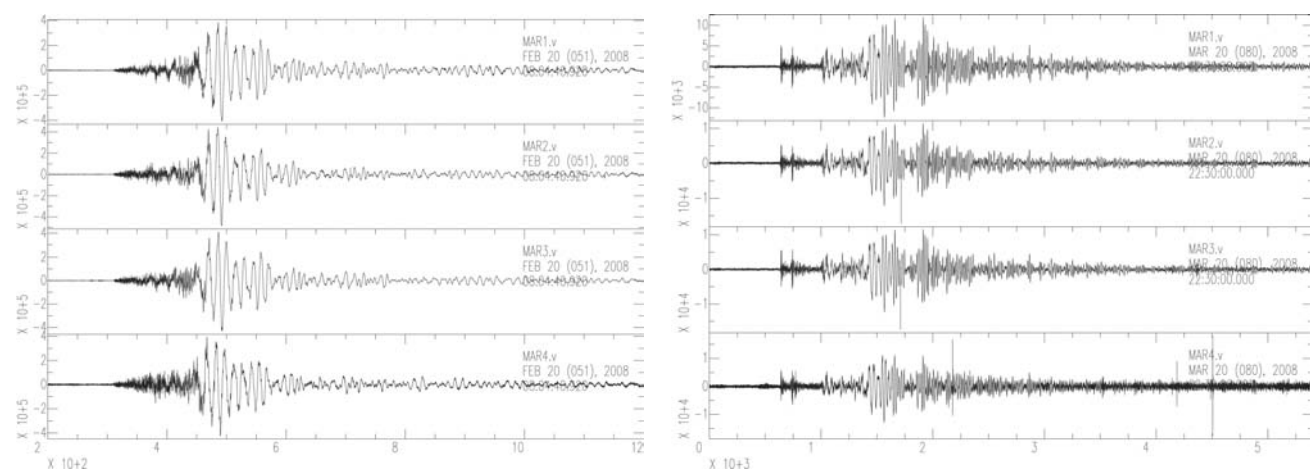


Figura 15 A sinistra un evento regionale (D=600 km) con Mw=7.4 ed epicentro sull'isola di Simelue (N Sumatra); a destra un telesisma del 20/3/2008 (Mw=7.2) localizzato in Tibet.

Figure 15 On the left a regional event (D = 600 km) with Mw = 7.4 and epicentre on the island of Simelue (N Sumatra); on the right a teleseisms occurred on 20/3/2008 (Mw= 7.2) located in Tibet.

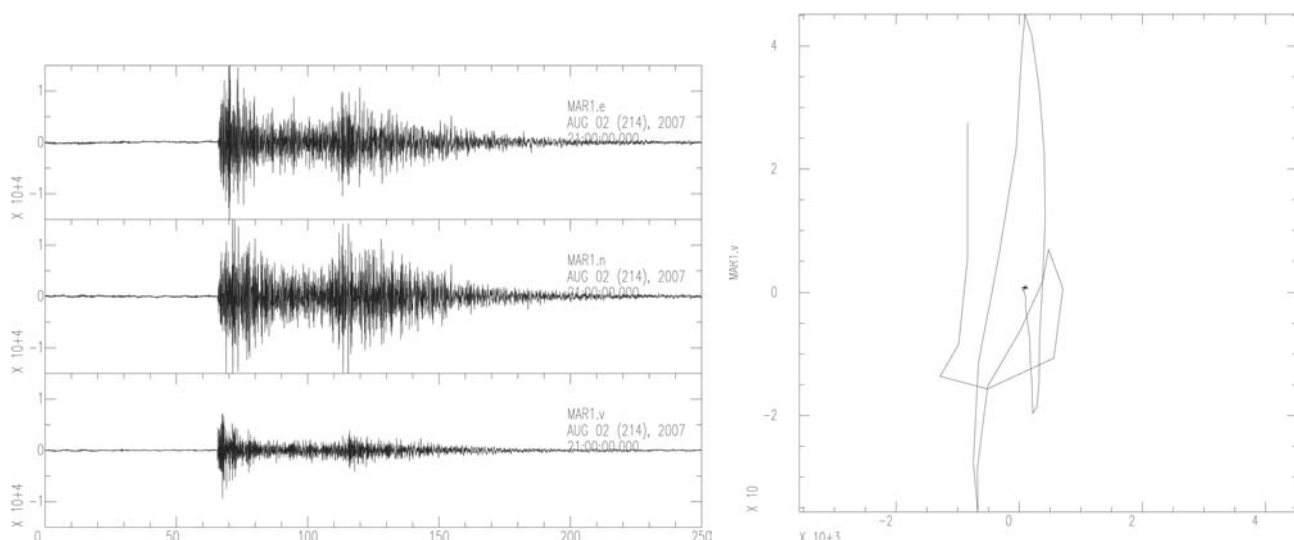


Figura 16 A sinistra un evento regionale con chiari arrivi P ed S; a destra il particle motion del primo arrivo P dove si evidenzia la polarizzazione quasi verticale.
Figure 16 On the left a regional event with evident P and S phases; on the right the particle motion of the P arrival where a near vertical polarization is evident.

male superficiale come osservato su altri vulcani [Chouet, 2003]. Il movimento dei fluidi causa sia una variazione volumetrica, che è responsabile della componente VLP, che l'innescio di oscillazioni risonanti dei condotti, che generano la componente LP.

In totale, nel periodo analizzato, sono state osservate alcune decine di eventi LP, ma l'analisi è ancora in corso dato che le

forme d'onda non consentono una discriminazione rapida con altri tipi di segnali naturali ed artificiali. In Agosto 2007 (il 1 ed il 9) sono stati registrati due eventi sismo-vulcanici di notevole ampiezza, probabilmente associati ad esplosioni ai crateri sommitali. Gli eventi sono caratterizzati da un evento LP iniziale e da una coda di tremore di lunga durata (circa 1h). Il tremore presenta una tipica struttura a bande (Fig.21).

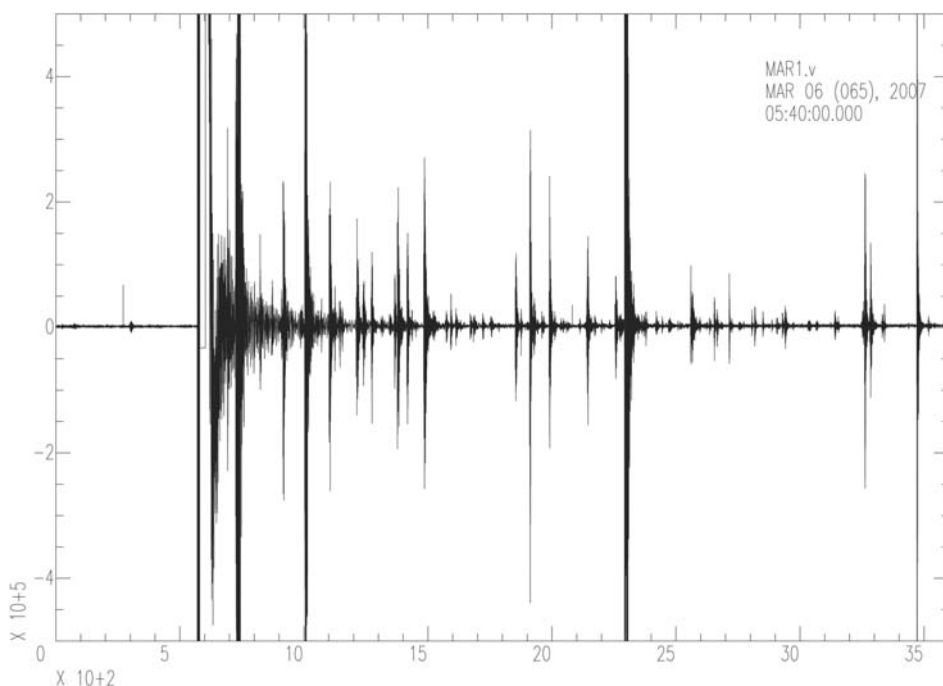


Figura 17 1 ora di registrazione alla stazione MAR1 con il primo evento (Mw=6.4) e l'inizio della sequenza.
Figure 17 1 hour-long recording at MAR1 station showing the first event (Mw = 6.4) and the beginning of the sequence.

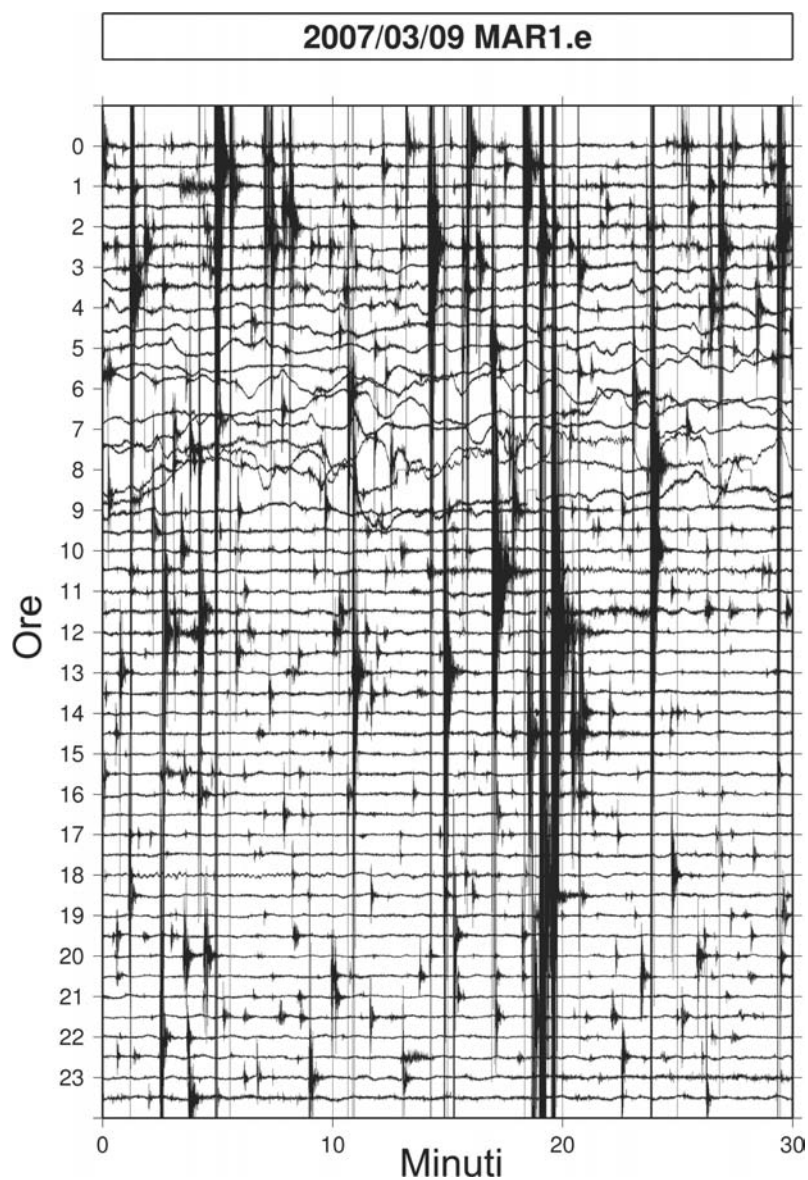


Figura 18 RegISTRAZIONI dell'intera giornata del 9 Marzo con la sequenza di *aftershock*.
Figure 18 Record of 9 March with the aftershock sequence.

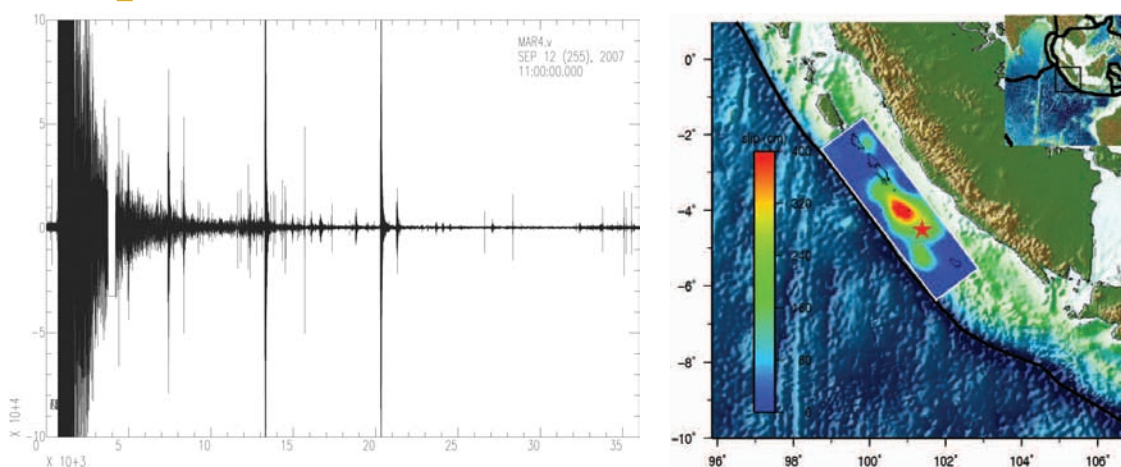


Figura 19 A sinistra 10 ore di registrazione a partire dall'evento del 12/9/2007 (Mw=8.5); a destra la mappa con modello di faglia finita dell'USGS per lo stesso evento.

Figure 19 On the left 10 hours starting from the registration of the earthquake of 12/9/2007 (Mw = 8.5), on the right the map with the model of finite fault from the United States Geological Survey (USGS) for the same event.

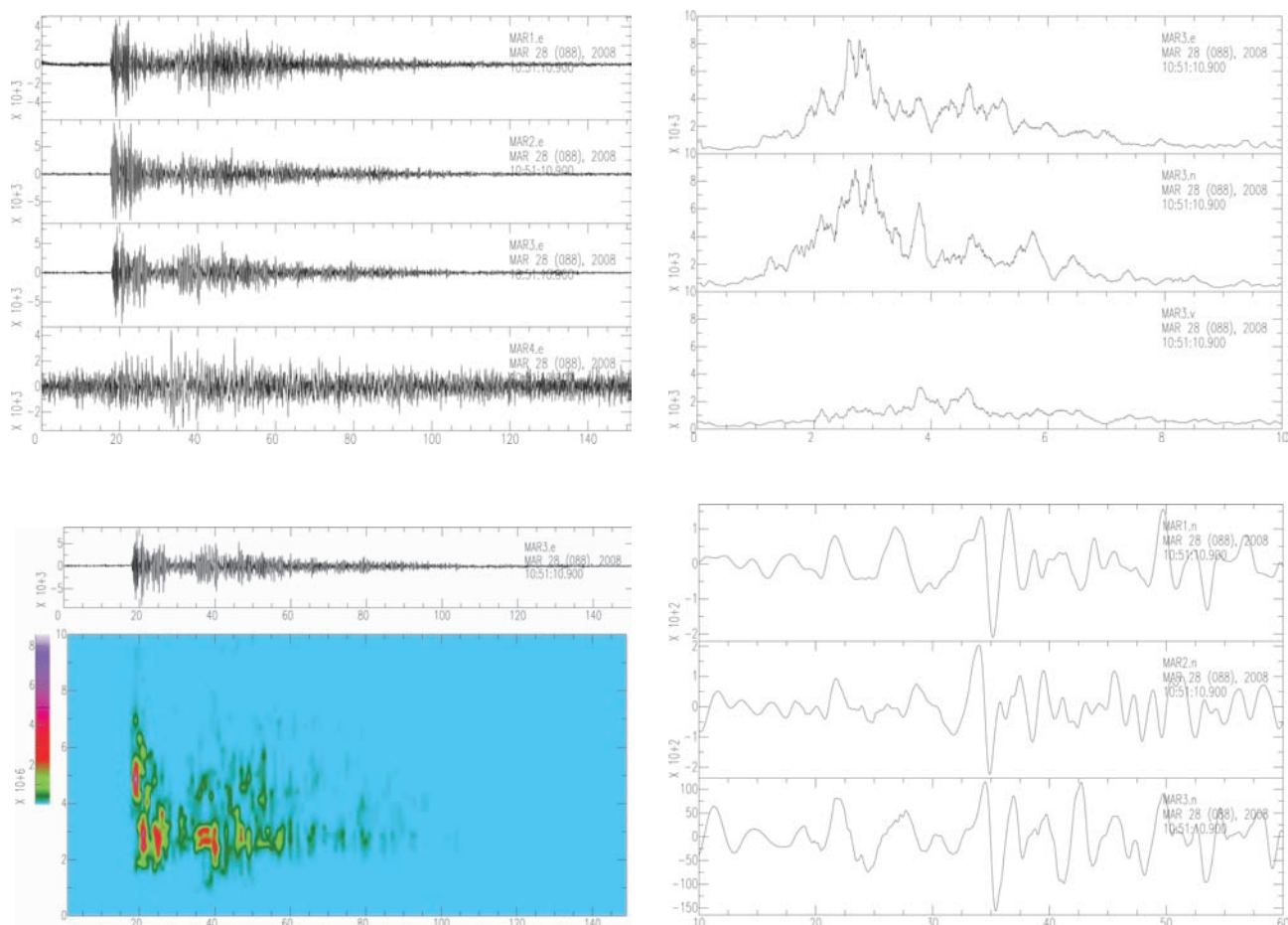


Figura 20 In alto a sinistra la registrazione di un tipico evento LP a tutte le stazioni. L'ampiezza a MAR4 (fuori dall'edificio vulcanico) è molto ridotta. In alto a destra lo spettro dell'evento LP sulle 3 componenti di MAR3. In basso a destra la componente VLP all'onset dell'evento LP. Il segnale è stato filtrato tra 0.1 e 0.5 Hz. In basso a sinistra lo spettrogramma della componente EW di MAR3 per l'evento LP.

Figure 20 On the top- left the record of a typical LP event at all stations. The amplitude at MAR4 (outside the volcano) is very small. In the top right the spectrum of the LP event on the 3 components of MAR3. In the lower right plot the VLP component of the LP event onset. The signal was filtered between 0.1 and 0.5 Hz. At the bottom left the EW component spectrogram of the MAR3 station.

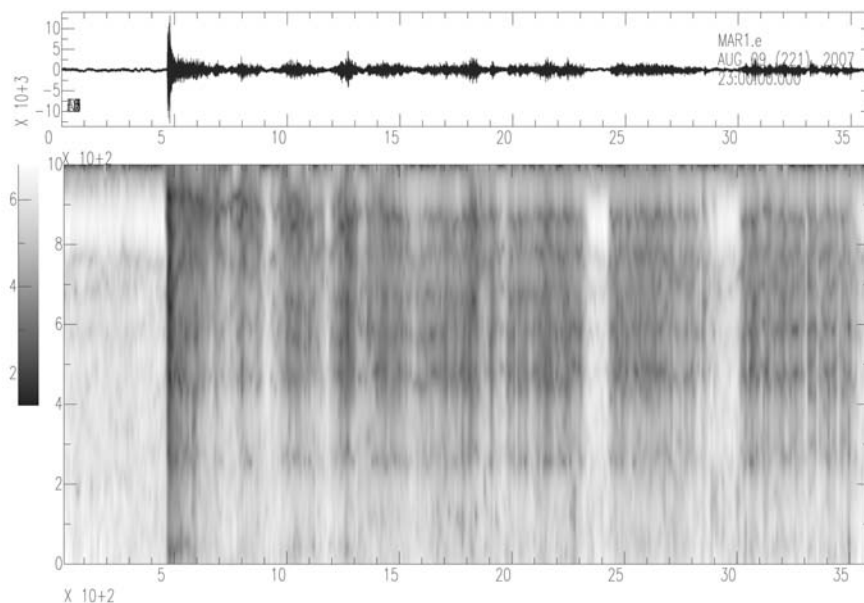


Figura 21 Spettrogramma del segnale dell'esplosione del 9/8/2007. La finestra rappresentata è 1 h. Sono visibili almeno 6 bande spettrali distinte.

Figure 21 Spectrogram of the signal from the explosion of 9/8/2007. The window represented is 1 h. 6 distinct spectral bands are visible.

7. COVINdat

Il catalogo della sismicità osservata al Marapi, così come tutte le informazioni disponibili relative al vulcano e al sistema di monitoraggio, sarà collezionato in una repository (COVINdat) di metafile XML WOVODat, un formato di interscambio (metafile) per raccogliere ed organizzare i dati che verranno inseriti in un database WOVODat; le caratteristiche generali di questo formato, realizzato in collaborazione con il progetto WOVODat, sono riportate nel paragrafo 7.2.1. La repository COVINdat è disponibile all'indirizzo <http://www.bo.ingv.it/~jacopo/WOVODat/MARAPI/repository/XMLrepository.php>. I dati contenuti in questi metafile saranno poi sottomessi al database centrale di WOVODat [<http://wovodat.org/WOVODat/index.html>].

In dettaglio, i seguenti dati saranno trattati:

- Informazioni generali sul Marapi.
- Struttura e caratteristiche dettagliate della rete sismica.
- Caratteristiche dettagliate di ogni strumento installato.
- Catalogo degli eventi sismici registrati e classificazione degli eventi.
- Catalogo degli eventi VT e tettonici con stima della magnitudo.
- Forme d'onda caratteristiche per ogni classe di eventi.

Attualmente, la repository COVINdat contiene i seguenti dati:

- Alcune informazioni generali sul vulcano.
- Informazioni sul network installato.
- La sismicità registrata nel periodo ottobre 2006 - settembre 2007 dalla singola stazione MAR1 (tempi origine, primi arrivi, tempo T_s - T_p , durata).

Questi dati sono stati preliminarmente inseriti nel prototipo del database WOVODat, sviluppato in collaborazione con il NIED (Giappone).

7.1 Sviluppo del formato di interscambio (metafile) XML per WOVODat

In coordinamento con il progetto WOVODat, è in fase di ultimazione il progetto di uno schema di formato di interscambio (metafile) per raccogliere ed organizzare i dati che verranno inseriti nel database (DB) centrale di WOVODat.

Lo scopo di questo metafile è quello di garantire la completezza, l'omogeneità dei dati e la coerenza con la struttura del DB centrale di WOVODat. Al tempo stesso, i metafiles garantiscono l'indipendenza tra la struttura fisica del DB centrale e i formati di input dei dati, in modo tale da garantirne la stabilità nel tempo indipendentemente dallo sviluppo e future revisioni del DB. Infine, il metafile gestisce la proprietà dei dati, la data di pubblicazione ed individua l'Osservatorio e il responsabile dell'input dei dati.

In coordinamento con il Technical Advisory Group di

WOVODat, la struttura di base scelta per i metafile è XML, garantendo in questo modo la compatibilità con standard internazionali e la flessibilità necessaria per i dati vulcanici, che sono in continua evoluzione sia nella qualità, sia nel tipo di dato. La gerarchia all'interno dei metafile XML è stata semplificata al massimo con il duplice scopo di garantire la completezza delle informazioni e semplificare al massimo l'input dei dati. Una completa e dettagliata descrizione del formato dei metafile XML WOVODat può essere trovata in http://www.bo.ingv.it/~jacopo/WOVODat/WOVODat_METAFILES.html.

In breve, i dati di input sono di tre tipi: (1) le informazioni generali sul vulcano, (2) le informazioni sul sistema di monitoraggio e (3) i dati effettivamente raccolti.

Le informazioni generali sul vulcano contengono tutte le informazioni disponibili sul vulcano (immagini, prospezioni sismiche, informazioni geo-strutturali, etc.), sulle eruzioni e fasi delle eruzioni, e sui forecast effettuati dall'osservatorio responsabile. Le informazioni sul sistema di monitoraggio contengono una descrizione dettagliata delle reti di monitoraggio (sismica, termica, gas, idrologica, deformazioni, etc.), delle stazioni e degli strumenti permanenti o mobili che vengono utilizzati dall'osservatorio. I dati effettivi sono dati elaborati: per esempio, per il monitoraggio sismico, si possono inserire cataloghi, localizzazioni, classificazioni, etc., ma non le forme d'onda. I dati inseribili possono essere di diverso tipo (sismici, misure termiche, idrologiche, di gas, deformazioni, misure geo-elettriche, gravitazionali, etc.). L'inserimento di ognuno di questi "tipi" di dato è stato parametrizzato seguendo la schematizzazione logica proposta per ogni "tipo" di dato per WOVODat in Venezky and Newhall [2007]. Ogni dato contiene un esplicito riferimento allo strumento/rete (pre-inserita in WOVODat e richiamata attraverso un codice definito dall'utente) con cui è stato raccolto.

8. Formazione del personale locale

Nel corso della missione dell'Ottobre 2006, contemporaneamente alla messa in opera del Centro di Monitoraggio è stata effettuata dell'attività di formazione scientifica e tecnologica rivolta al personale dell'Osservatorio di Bukittinggi. Il personale, all'epoca, consisteva di 3 unità, a cui si aggiunsero nel periodo dell'installazione 2 tecnici del vicino Osservatorio del Tandikat (Fig.22). Successivamente uno di questi due tecnici è stato destinato permanentemente al Centro di Bukittinggi e si occupa delle principali attività di manutenzione sia delle stazioni remote che del sistema di acquisizione.

I temi trattati durante i corsi e le attività sul campo, per una durata totale di circa 16 ore, sono stati:

- **Sensori broadband:** loro caratteristiche, installazio-

ne, calibrazione e manutenzione.

- **Sistemi di acquisizione digitale:** configurazione ed installazione delle schede GAIA2.
- **Procedure di installazione di una stazione:** sistema di energia con pannelli solari e batterie e suo dimensionamento, isolamento termico del sensore, accoppiamento ottimale con il suolo, etc...
- **Manutenzione di una stazione sismica:** verifica del corretto funzionamento ed interventi minimali di manutenzione.
- **Funzionamento del sistema di acquisizione:** descrizione di *Earthworm* e dei moduli per l'acquisizione e lo *storage* dei dati.
- **Gestione del sistema di acquisizione:** verifica del funzionamento, procedure di *backup* dati ed interventi minimali di manutenzione.
- **Procedure per la visualizzazione e l'analisi elementare dei dati acquisiti** usando *Kuds* e *SAC*.
- **Cenni alla Sismologia dei Vulcani:** eventi *Long-Period* e *Very-Long-Period*, loro caratteristiche principali, tecniche di analisi e significato vulcanologico.



Figura 22 Formazione del personale locale.
Figure 22 Training of local staff.

Conclusioni

La rete sismica installata sul Marapi allo stato attuale consente di registrare la sismicità del vulcano e quella generata dalle aree sismogenetiche attive nelle zone circostanti, oltre naturalmente ai telesismi. I dati raccolti sono attualmente in corso di analisi e consentiranno di caratterizzare l'attività sismica di questo vulcano. Già dalle prime osservazioni sui dati si è potuto constatare che il Marapi presenta una sismicità di tipo VT che consiste, in base ad una stima preliminare, in circa 2-3 eventi al giorno in genere non avvertiti dalla popolazione locale. Questa sismicità risulta molto locale e potrebbe presumibilmente essere localizzata all'interno dell'edificio vulcanico. Con minor frequenza di accadimento rispetto ai terremoti VT, nell'area in esame si registrano anche eventi di tipo LP. Sono stati registrati inoltre due segnali sismici probabilmente associabili ad esplo-

sioni freatiche nell'area craterica. Considerando il periodo di osservazione non molto prolungato nel tempo si può concludere che il vulcano Marapi è sede di interessanti fenomeni sismici il cui studio ed il cui monitoraggio potranno dare un contributo sostanziale alla definizione dello stato di attività della struttura vulcanica ed alla mitigazione del rischio.

Il risultato di queste pionieristiche osservazioni evidenzia l'importanza che assume un moderno sistema di monitoraggio sismico in un'area che ne è pressoché priva, caratterizzata da eruzioni recenti. Il centro realizzato può rappresentare uno strumento di controllo del territorio a supporto delle istituzioni locali preposte a questo scopo. Esso può inoltre rappresentare un primo nucleo di una infrastruttura di monitoraggio avanzato nel contesto dell'obiettivo strategico della cooperazione Italia-Indonesia per la mitigazione del rischio vulcanico nell'area occidentale di Sumatra.

In futuro sono previste interventi volti a migliorare la configurazione della rete in particolare nei settori Ovest e Sud del vulcano. Inoltre è allo studio un eventuale ampliamento dell'area di interesse sui vicini vulcani attivi del Tandikat e del Talang, che si trova attualmente in fase di *unrest*. Sul fianco del vulcano Tandikat è presente un altro Osservatorio (1260 m), di dimensioni più modeste, che ospita una stazione a corto periodo. Tale sito è in visibilità diretta con il fianco Sud del Marapi ed è in visibilità radio (anche se non in linea di vista) con Bukittinggi. Pertanto in futuro su tale sito potrebbe essere allestito un ripetitore radio che consentirebbe di acquisire stazioni dal lato Sud del Marapi. Inoltre consentirebbe di centralizzare la stazione del Tandikat presso l'Osservatorio di Bukittinggi e potrebbe essere sfruttato per acquisire dati anche dal vulcano Talang, circa 80 km a Sud.

Bibliografia

- Bellier O., Bellon H., Sebrier M., Sutanto, Maury C.R. (1999). *K–Ar age of the Ranau Tuffs: implications for the Ranau caldera emplacement and slip-partitioning in Sumatra (Indonesia)*. *Tectonophysics*, 312, pp. 347–359.
- Bellier O., Sebrier M., Pramumijoyo S., Beaudouin Th., Harjono H., Bahar I. and Forni O. (1997). *Paleoseismicity and seismic hazard along the Great Sumatran Fault (Indonesia)*. *Journal of Geodynamics*, Vol. 24, Nos 1-4, pp. 169-183.
- Bellier O., Sebrier M. (1995). *Is the slip rate variation on the Great Sumatran Fault accommodated by fore-arc stretching?* *Geophysical Research Letters*, 22, pp. 1969-1972.
- Boschi E., Surono, Martini M., Marzocchi W., Budianto A., Caputo A., Cattaneo M., D'Auria L., Delladio A., De Martin M., Franceschi D., Garcia A., Giudicepietro F., Gunawan H., Orazi M., Peluso R., Selva J. (2008). In: Acts of congress "ASIAN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MODELING OF VOLCANIC ERUPTION FOR VOLCANIC HAZARD ASSESSMENT" Bandung - Indonesia, December 1-4, 2008.
- Chouet B. (2003). *Volcano Seismology*. *Pure and Applied Geophysics*, 160, pp. 739–788.
- De Cesare W., Orazi M., Peluso R., Scarpato G., Caputo A., D'Auria L., Giudicepietro F., Martini M., Buonocunto C., Capello M., Esposito A. M. (2009). *The broadband seismic network of Stromboli volcano (Italy)*. *Seismological Research Letters*, 80, 3, pp. 435-439.
- Giudicepietro F. (2001). *WinDrum: a program for the continuous seismic monitoring - NEW VERSION*. INGV sezione di Napoli "Osservatorio Vesuviano", Open File Report n.2.
- Hickman R.G., Dobson P.F., van Gerven M., Sagala B.D., Gunderson R.P. (2004). *Tectonic and stratigraphic evolution of the Sarulla graben geothermal area, North Sumatra, Indonesia*. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23, iss. 3, pp. 435–448.
- Le Pichon X., Kreemer C., Chamot-Rooke N. (2005). *Asymmetry in elastic properties and the evolution of large continental strike-slip faults*. *Journal of Geophysical Research*, 110, B03405.
- Orazi M., Martini M. and Peluso R. (2006). *Data Acquisition for Volcano Monitoring*. *Eos*, 87, 38, pp. 385-392.
- Salvaterra, L., S. Pintore and L. Badiali (2008). *Rete sismologica basata su stazioni GAIA*. Rapporti Tecnici INGV n.68.
- Van der Werff W. (1996). *Variation in forearc basin development along the Sunda Arc, Indonesia*. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14, 5, pp. 331-349.
- Venezky D.Y. and Newhall C.G. (2007). *WOVOdat Design Document: The Schema, Table Descriptions, and Create Table Statements for the Database of Worldwide Volcanic Unrest (WOVOdat Version 1.0)*. USGS Open File Report 2007-1117.

Indice

Introduzione	5
1. Contesto geotettonico dell'area	6
2. L'attività vulcanica di Sumatra Ovest	6
3. Scelta e realizzazione dei siti della rete	8
4. Il centro di monitoraggio di Bukittinggi	8
4.1 Aspetti tecnici delle installazioni	10
4.2 MAR1 (Batupalano) 1503 m	10
4.3 MAR2 (Lasimudo) 1482 m	11
4.4 MAR3 (Pacet) 2007 m	11
4.5 MAR4 (Bukittinggi) 933 m	11
5. Il sistema di trasmissione e acquisizione dati	12
5.1 Gli apparati di acquisizione, trasmissione e ricezione	12
5.2 I programmi di acquisizione, analisi e visualizzazione	13
6. I segnali sismici: analisi preliminare	14
7. COVINdat	19
7.1 Sviluppo del formato di interscambio (metafile) XML per WOVodat	19
8. Formazione del personale locale	19
Conclusioni	20
Bibliografia	21

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2009 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