

# Rapporti tecnici

## INGV

**Esperimento di sismica passiva per lo studio di dettaglio dei vulcani di fango nella Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano (Modena)**

# 382



## **Direttore Responsabile**

Silvia MATTONI

## **Editorial Board**

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.173 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



# Rapporti tecnici INGV

## ESPERIMENTO DI SISMICA PASSIVA PER LO STUDIO DI DETTAGLIO DEI VULCANI DI FANGO NELLA RISERVA NATURALE REGIONALE DELLE SALSE DI NIRANO (MODENA)

Lucian Giovani<sup>1</sup>, Massimiliano Vallocchia<sup>1</sup>, Verónica Antunes<sup>2</sup>, Matteo Lupi<sup>2</sup>, Anne Obermann<sup>3</sup>,  
Adriano Mazzini<sup>4</sup>, Alessandra Sciarra<sup>5</sup>, Tullio Ricci<sup>5</sup>, Milena Moretti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti)

<sup>2</sup>UNIGE (University of Geneva, Department of Earth Sciences, Switzerland)

<sup>3</sup>SED (Swiss Seismological Service, ETH Zürich, Switzerland)

<sup>4</sup>CEED (Centre for Earth Evolution and Dynamics, University of Oslo, Norway)

<sup>5</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Sismologia e Tettonofisica)

# 382

**Come citare:** Giovani L. et al., (2017). Esperimento di sismica passiva per lo studio di dettaglio dei vulcani di fango nella Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano (Modena). Rapp. Tec. INGV, 382: 1-28.



## **Indice**

Introduzione	7
1. La Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano	7
2. L'esperienza di sismica passiva	9
Conclusioni	12
Ringraziamenti	15
Bibliografia	15
Allegato: Schede stazioni	17



## Introduzione

I vulcanelli di fango rappresentano l'espressione superficiale di sistemi geologici spesso caratterizzati da elevate pressioni dei fluidi in profondità che deviano dalle condizioni idrostatiche e che determinano la fuoriuscita di fluidi e fango. Morfologicamente un vulcano di fango è rappresentato da una piccola collina, alta da pochi decimetri a parecchi metri, che erutta argilla mista ad acqua, unita a sostanze saline come acque salso-bromo-iodiche, ed anche metano e idrocarburi (bitume).

I vulcani di fango sono presenti in tutto il mondo e sono noti anche in Italia, dove sono spesso saliti alla ribalta in occasioni di sequenze sismiche importanti come in Emilia nel 2012 o nel centro Italia nel 2016 [EMERGEIO, 2016]. Tra il 2012 e il 2013 sono stati svolti degli studi multidisciplinari per testare gli effetti pre- e post-sismici generati dai terremoti lontani ed è stata usata come laboratorio naturale la Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano presso il comune di Fiorano Modenese (Modena), nota fin dall'antichità per tale fenomeno geologico [Lupi *et al.*, 2016]. A seguire, nella primavera del 2016, per far luce sui segnali sismici associati all'attività di emissione di fango, è stata implementata una piccola rete sismica temporanea composta da 7 stazioni all'interno della Riserva. Lo scopo dell'esperimento era l'acquisizione continua per un periodo sufficiente da poter identificare i diversi tipi di segnali generati da questo sistema attivo e caratterizzarlo da un punto di vista sismologico. L'esperimento è frutto di una collaborazione internazionale tra il Dipartimento di Scienze della terra dell'Università di Ginevra (*Université De Genève, Section of Earth and Environmental Sciences*) e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

In questo rapporto tecnico, viene descritto l'esperimento di sismica passiva, ovvero la progettazione ed l'implementazione della rete temporanea che ha acquisito in locale dall'inizio del mese di aprile sino a fine giugno.

### 1. La Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano

Le Salse di Nirano, un'importante fenomeno geologico di rilevanza internazionale, rappresentano un esempio riuscito di valorizzazione ambientale e turistica tanto da essere stata definita, dal 1982, Riserva Naturale ad opera della Regione Emilia-Romagna, con l'obiettivo di salvaguardare e preservare le caratteristiche naturali e ambientali del sito. La Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano è localizzata sulle prime pendici dell'Appennino Modenese, a circa 30 km da Modena e 35 km da Reggio Emilia (Figura 1). Questa zona, appartenente al comune di Fiorano Modenese (MO), nei tempi antichi è stato chiamato "il bel paese" grazie ai suoi paesaggi collinari che si formano ai piedi degli Appennini [Stoppani, 1873; Sciarra *et al.*, 2015].

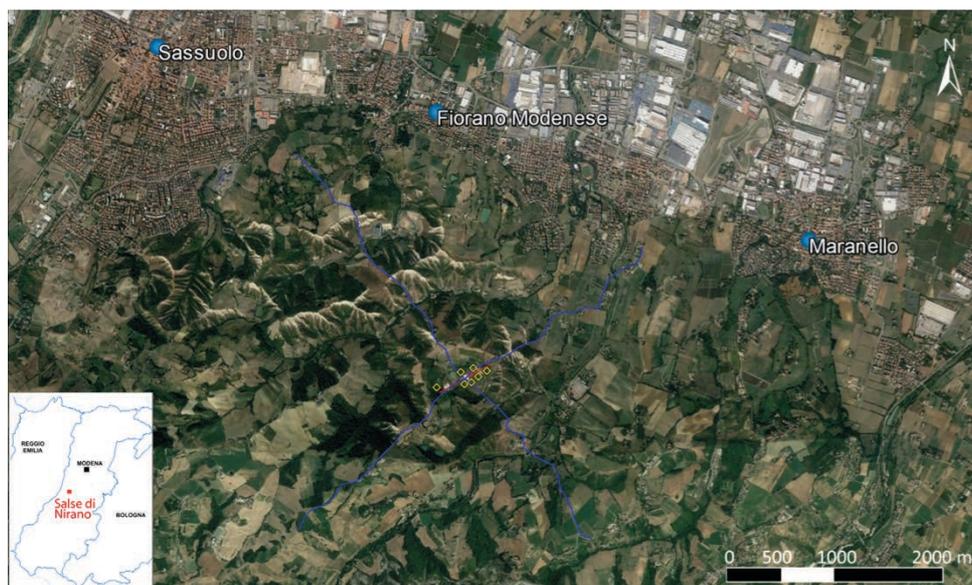


Figura 1. Localizzazione del sito di studio.

Le Salse di Nirano sono uno dei migliori esempi di tale fenomeno in tutto il territorio italiano e tra i più grandi d'Europa ed è conosciuto fin dai tempi antichi grazie agli studi di storici, scienziati e viaggiatori [per esempio Stoppani, 1873; Coppi, 1875; Pantanelli e Santi, 1896; Biasutti, 1907; Barbieri, 1947; Mucchi, 1966; 1968; Bertolani 1980; Ferrari e Vianello, 1985; Gorgoni *et al.*, 1988; Bertacchini *et al.*, 1999; Castaldini *et al.*, 2003; 2007; 2011; Gorgoni, 2003; Bonini 2008; 2009; 2012; Carobene *and* Gasperi, 2008; Bertacchini, 2009; Sciarra *et al.*, 2015; Lupi *et al.*, 2016], che hanno contribuito a creare un'importante documentazione sulla sua evoluzione.

Le Salse derivano da depositi di idrocarburi principalmente gassosi (metano) e idrocarburi in parte liquidi (petrolio) che, venendo in superficie, fluidificano le argille e danno luogo alle tipiche formazioni a cono, simili a dei piccoli vulcani. Questi fluidi freddi tendono a risalire verso la superficie lungo faglie e fratture. Il nome "salsa" deriva dall'elevato contenuto di "sale" di queste acque fangose (Figura 2).



**Figura 2.** Esempio di vulcano di fango delle Salse di Nirano visto dalla stazione NIR01 in Figura 4.

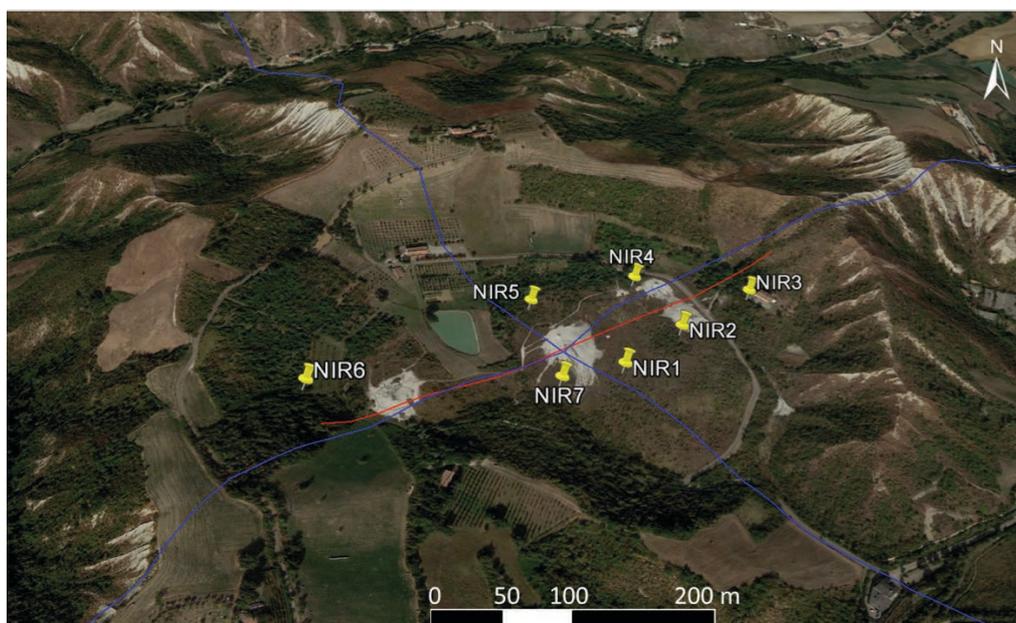
I vulcani di fango evidenziano la presenza di strutture permeabili, tettonicamente attive, ed il loro studio può fornire "finestre" utili alla comprensione del movimento dei fluidi attraverso la crosta superiore e la copertura sedimentaria verso la superficie. Studi geochemici sull'analisi delle acque emesse dalle salse hanno evidenziato l'origine connata di tali fluidi, a cloruro di sodio dominate [Gorgoni *et al.*, 1988]. Il gas emesso è chimicamente composto dal 93% di metano, il 5% di azoto, il 2% di ossigeno, 1% di anidride carbonica, e circa 660 ppm di etano [Sciarra *et al.*, 2015]. I fanghi prodotti dalle salse derivano in primo luogo dalla fluidificazione delle peliti dai fluidi, come la formazione di acqua e metano (biogeni e/o termogenici) dalle trappole di idrocarburi, che risale lungo le vie di fuga preferenziali, come faglie e/o fratture. I vulcani di fango sono quindi originati da uno o più serbatoi situati a diverse profondità in cui si accumulano le acque salate fossili miscelate con l'argilla e metano. La porzione liquida e l'argilla si accumulano prevalentemente nel serbatoio più superficiale e si vanno a mescolare con l'acqua piovana [Nanni and Zuppi, 1986; Capozzi and Picotti, 2002]. Infatti, la temperatura è di circa 15,5 °C, il pH circa 7,73, il  $\text{HCO}_3^-$  è 488 mg/L, il  $^{222}\text{Rn}$  disciolto è circa 41 Bq/L, conducibilità elettrica e Eh sono 14.24 mS/cm e -231 mV, rispettivamente [Sciarra *et al.*, 2015]. Lo sviluppo di vulcani di fango sembra quindi essere legato alla presenza di strati impermeabili che ostacolano idraulicamente la migrazione dei fluidi, favorendo lo sviluppo di sovrappressione e fluidificazione delle peliti. La maggior parte dei vulcani di fango sono localizzati nell'appennino emiliano e si caratterizza per spurgo di unità liguri, composte in gran parte da scisti che rendono questa copertura essenzialmente impermeabile.

Viste le sue caratteristiche geologiche, la Riserva è stata usata come laboratorio naturale per degli studi multidisciplinari finalizzati a testare gli effetti pre- e post-sismici generati dai terremoti lontani. Se da un punto di vista geologico e geochimico le Salse di Nirano sono state estensivamente investigate negli ultimi decenni, poche indagini sono state realizzate da un punto di vista geofisico [Accaino *et al.*, 2007; Manga and Bonini, 2012; Bonini *et al.*, 2016; Lupi *et al.*, 2016]. L'esperimento descritto nel presente lavoro permetterà l'identificazione dei diversi tipi di segnali associati al vulcanismo sedimentario delle Salse di Nirano e aiuterà a far luce sui segnali sismici associati all'attività dei vulcani di fango.

## 2. L'esperimento di sismica passiva

La strumentazione utilizzata nell'esperimento, il primo di sismica passiva realizzato nell'area delle Salse, è stata messa a disposizione dal Centro Nazionale Terremoti (CNT) dell'INGV previa valutazione del progetto da parte della Commissione Rete Mobile (Co.Re.Mo.) [Moretti *et al.*, 2010]. Per tale motivo, nell'implementazione e nella manutenzione della rete sono stati coinvolti, sin dalla preparazione della strumentazione, due tecnici del CNT esperti degli strumenti utilizzati nell'esperimento sismico.

La geometria della rete è stata disegnata al fine di identificare la presenza del *reservoir* da cui i fluidi risalgono verso la superficie (Figura 3). Questa decisione è stata basata sulla semplice supposizione che il segnale sismico fosse originato dall'interno della caldera e che non fosse legato al singolo condotto. Si evidenzia che i condotti principali (quelli caratterizzati dalla classica forma a cono) sono 5, ma che nel complesso sono presenti 18 *macroseeps*, caratterizzati da evidente gorgogliamento [Sciarra *et al.*, 2016].



**Figura 3.** Geometria teorica della rete sismica temporanea installata all'interno della caldera delle Salse di Nirano. In blu e in rosso sono mostrate le tracce dei profili gravimetrici e di resistività elettrica misurati contestualmente all'esperimento di sismica passiva.

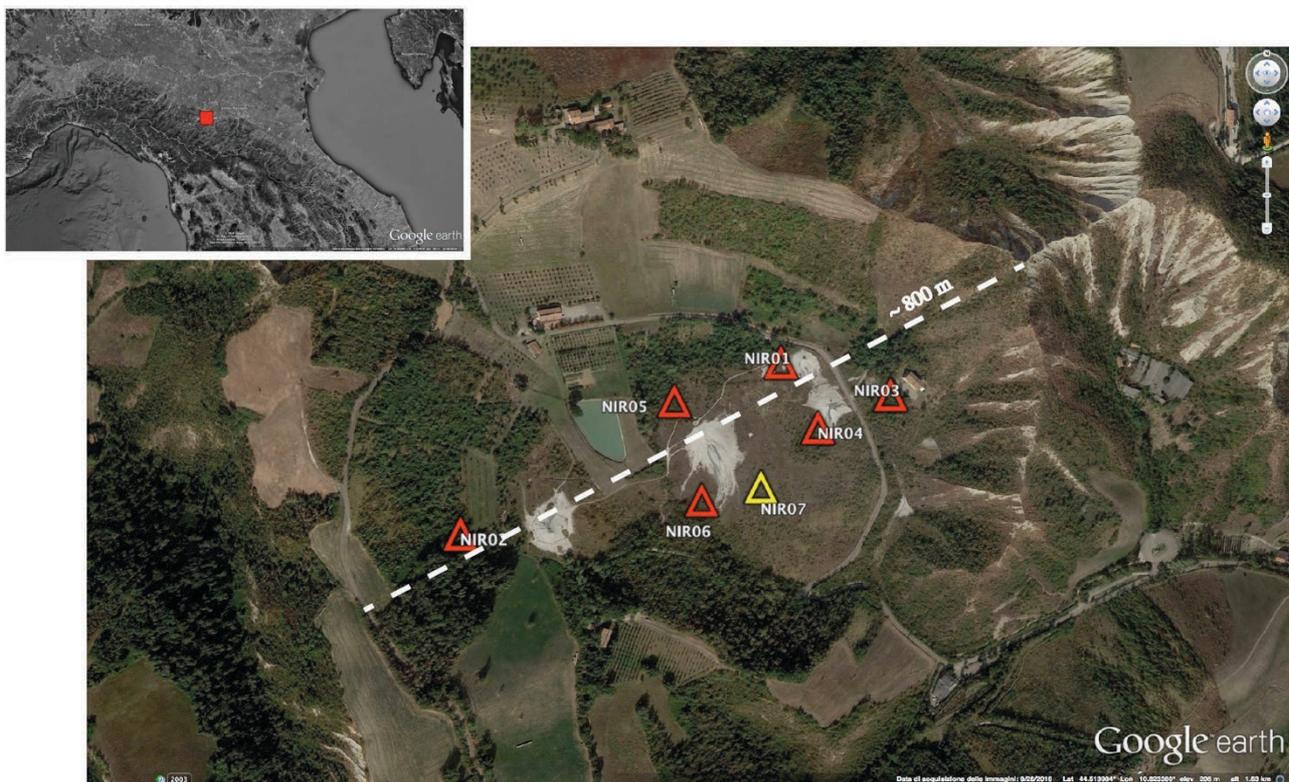
L'installazione della rete, realizzato in sinergia con i colleghi dell'*Université De Genève, Section of Earth and Environmental Sciences* (UNIGE), è avvenuto tra il 16 e 17 marzo 2016 (Tabella 1).

In totale sono state installate 7 stazioni sismiche temporanee costituite da acquisitori digitali REF TEK-130s-01 a 24 bit di cui 6 equipaggiati con sensori velocimetri a corto periodo *Lennartz LE 3D/5s* (triangoli rossi in Figura 4) e uno con sensore a larga banda *Trillium 120c* (triangolo giallo in Figura 4). Completava la configurazione di ogni stazione: un'antenna GPS per la sincronizzazione dei dati, un pannello solare di 60W e una batteria da 42 Ah per la totale autonomia della stazione, e un disco di memoria rimovibile da 2Gb per l'archiviazione locale dei dati. In Tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche tecniche della strumentazione installata.

La registrazione è stata posta in modalità continua con una frequenza di campionamento di 100 sps, gain 1 e memorizzazione dei dati in formato compresso su *compact flash*. In Figura 5 un esempio d'installazione.

Sigla	LAT (°N)	LON (°E)	Quota (m)	Datalogger	Sensore	IN	OUT	Sps
NIR01	44.514550	10.824747	204	REF TEK 130S-01	Le 3D/5s	17/03/2016	13/06/2016	100
NIR02	44.512785	10.820155	221	REF TEK 130S-01	Le 3D/5s	17/03/2016	30/06/2016	100
NIR03	44.514208	10.826357	199	REF TEK 130S-01	Le 3D/5s	16/03/2016	30/06/2016	100
NIR04	44.513860	10.825297	197	REF TEK 130S-01	Le 3D/5s	16/03/2016	30/06/2016	100
NIR05	44.514145	10.823178	202	REF TEK 130S-01	Le 3D/5s	16/03/2016	30/06/2016	100
NIR06	44.513082	10.823585	187	REF TEK 130S-01	Le 3D/5s	16/03/2016	30/06/2016	100
NIR07	44.513228	10.824463	195	REF TEK 130S-01	Trillium 120c	16/03/2016	30/06/2016	100

**Tabella 1.** Elenco delle 7 stazioni temporanee INGV installate in occasione dell'esperimento alle Salse di Nirano.



**Figura 4.** Mappa della rete sismica temporanea installata presso le Salse di Nirano tra marzo e giugno del 2016. La rete era costituita da 7 stazioni di cui 6 (triangoli rossi) equipaggiate con velocimetro *Lennartz* LE 3D/5s e una (triangolo giallo) con sensore a larga banda *Trillium* 120c. La rete copre un'area molto piccola di circa 500 x 180 m.

Foto Strumento	Tipo	Foto	Caratteristiche tecniche	
REF TEK 130s-1 [Ref Tek] <a href="http://www.reftek.com">http://www.reftek.com</a>	Acquisitore		Dinamica	> 135 dB
			Risoluzione	24 bit – 40 VPP
LE 3D 5/s [Lennartz] <a href="http://www.lennartz-electronic.de">http://www.lennartz-electronic.de</a>	Sensore velocimetro		Poli	-0.888 / +0.888j -0.888 / -0.888j -0.220 / 0.000j
			Zeri	Triplo zero all'origine
			Banda frequenza	0.2 Hz, 40 Hz
Trillium 120C [Nanometrics] <a href="http://www.nanometrics.ca">http://www.nanometrics.ca</a>	Sensore broad-band		Poli	-0.03691 ±0.03712i -371.2 -373.9 ±475.5i 588.4 ±1508i
			Zeri	0 0 -434.1
			Banda frequenza	0.0083-180 Hz

**Tabella 2.** Caratteristiche tecniche della strumentazione usata per l'acquisizione sismica.



**Figura 5.** Alcuni particolari delle stazioni installate durante l'esperimento sismico alle Salse di Nirano.

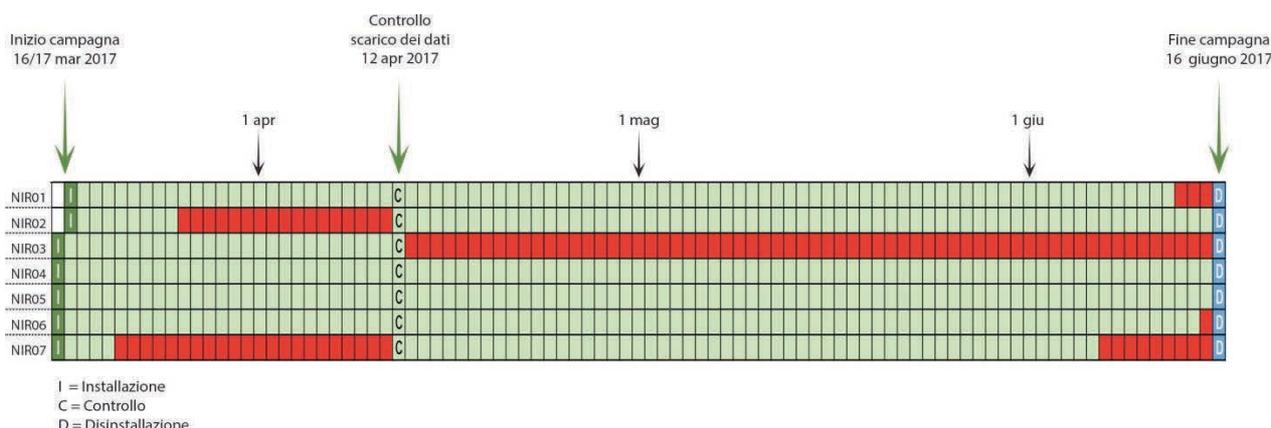
I due giorni in cui è avvenuta l'installazione della rete, sono stati interessati da cattive condizioni meteo; la pioggia e il materiale argilloso tipico dell'area hanno reso difficile le operazioni d'installazione. Inoltre, per rispettare i vincoli paesaggistici anche su raccomandazione dei referenti del Museo Naturalistico presente nell'area, le stazioni sono state mimetizzate il più possibile nella vegetazione, vincolo che ha comportato un forte limite nel posizionamento degli impianti fotovoltaici. Questo, unito alla crescita della vegetazione, ha in parte compromesso la continuità del funzionamento delle stazioni nelle successive settimane (vedi la foto in alto a destra di Figura 5).

A distanza di un mese dall'installazione, è stata pianificata un intervento *in situ* per il controllo della strumentazione e il recupero dei dati che vengono archiviati in locale in *Compact Flash* (CF) di cui la REF TEK 130-01S è dotata. Ogni CF consente di registrare dai 40 ai 50 giorni di dati in continuo a seconda della rumorosità del sito. La manutenzione della rete è avvenuta il 12 aprile (Figura 6). Durante il giro di controllo della strumentazione è stata rilevata la mancata acquisizione di 2 stazioni, la NIR02 e NIR07, che hanno compromesso la continuità di operatività degli acquisitori. Alla NIR02 è stato riscontrato un problema alla batteria mentre alla NIR07 si è verificato un malfunzionamento del regolatore di carica. Poiché era stato richiesto dai promotori dell'esperimento una acquisizione continua di almeno 1 mese, in accordo con la Co.Re.Mo., si è deciso di allungare l'esperimento fino a metà del mese di giugno.

La disinstallazione, compiuta il 16 giugno, ha purtroppo rilevato un ulteriore differente problema causato da un malfunzionamento della CF su cui avviene lo *storage* dei dati che ha totalmente compromesso l'acquisizione per tutto il periodo della stazione NIR03.

In Figura 6 viene mostrato lo stato di funzionamento della rete temporanea dal 16 marzo al 16 giugno 2016; sono evidenziati l'inizio ("I") e la fine ("D") dei dati disponibili, i periodi d'interruzione nell'acquisizione (in rosso) e il giorno del controllo della strumentazione ("C").

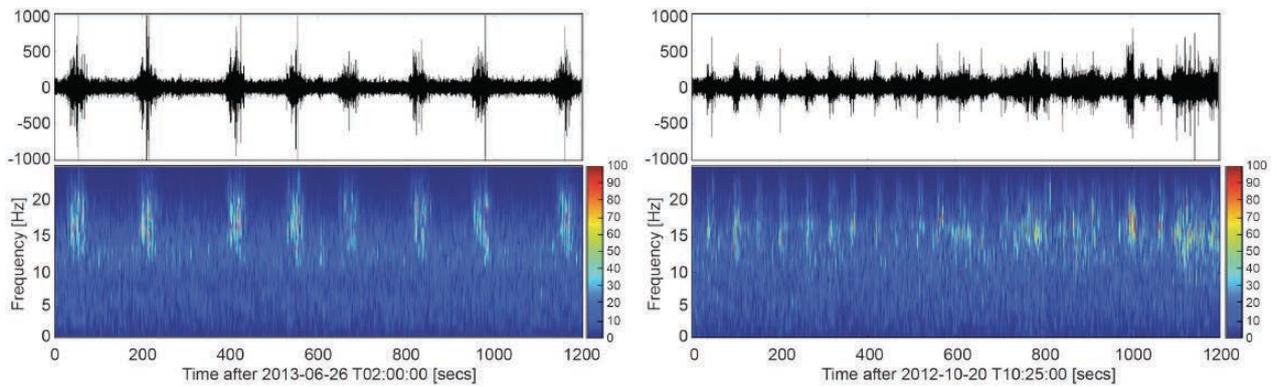
I dati acquisiti sono riservati ai promotori dell'esperimento per 3 anni dalla fine dell'acquisizione.



**Figura 6.** Stato di funzionamento della rete temporanea installata a Nirano e relativi dei dati disponibili.

## Conclusioni

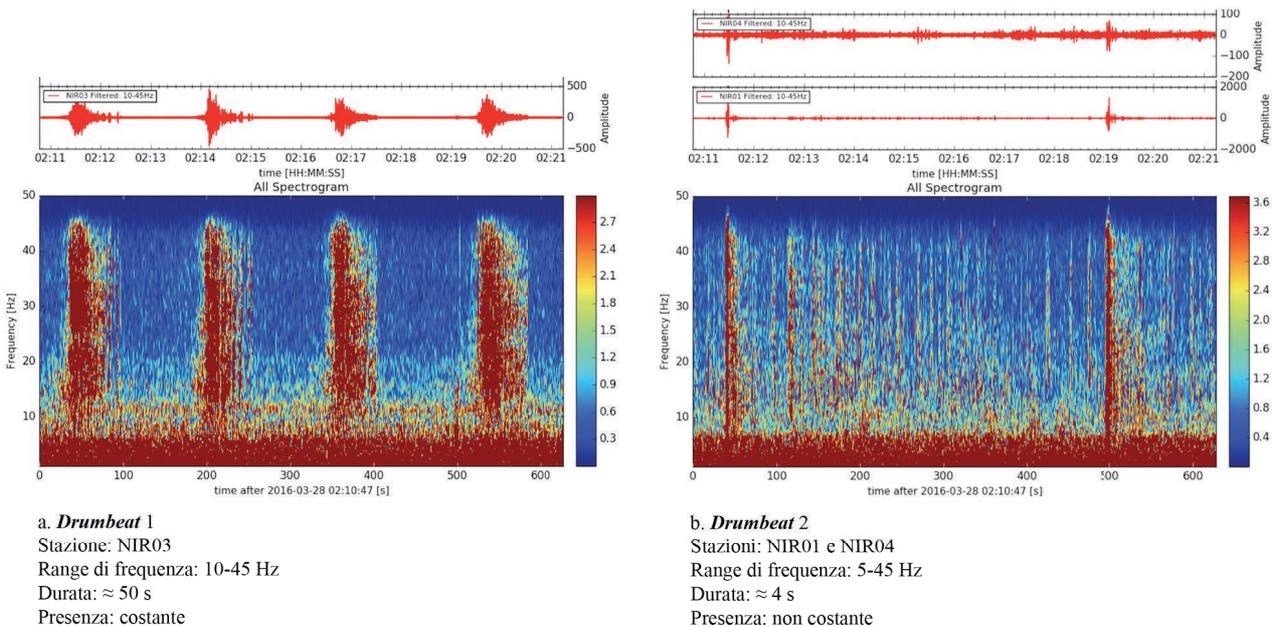
Nella primavera del 2016, un esperimento di sismica passiva è stato svolto all'interno della Riserva Naturale Salse di Nirano con l'obiettivo di caratterizzare da un punto di vista sismologico, l'interessante fenomeno geologico che caratterizza questa piccola area alle prime pendici dell'Appennino Modenese. Tale acquisizione è stata preceduta, tra il 2012 e il 2013, da un altro esperimento multidisciplinare durante il quale venne osservato, per la prima volta in un sistema simile, un segnale tipo *drumbeat*, ovvero a "rullo di tamburo", per il quale non fu possibile discriminare l'origine, ovvero se provenisse da una zona specifica del campo di fango oppure se fosse una caratteristica insita del sistema (Figura 7, maggiori dettagli in [Lupi *et al.*, 2016]).



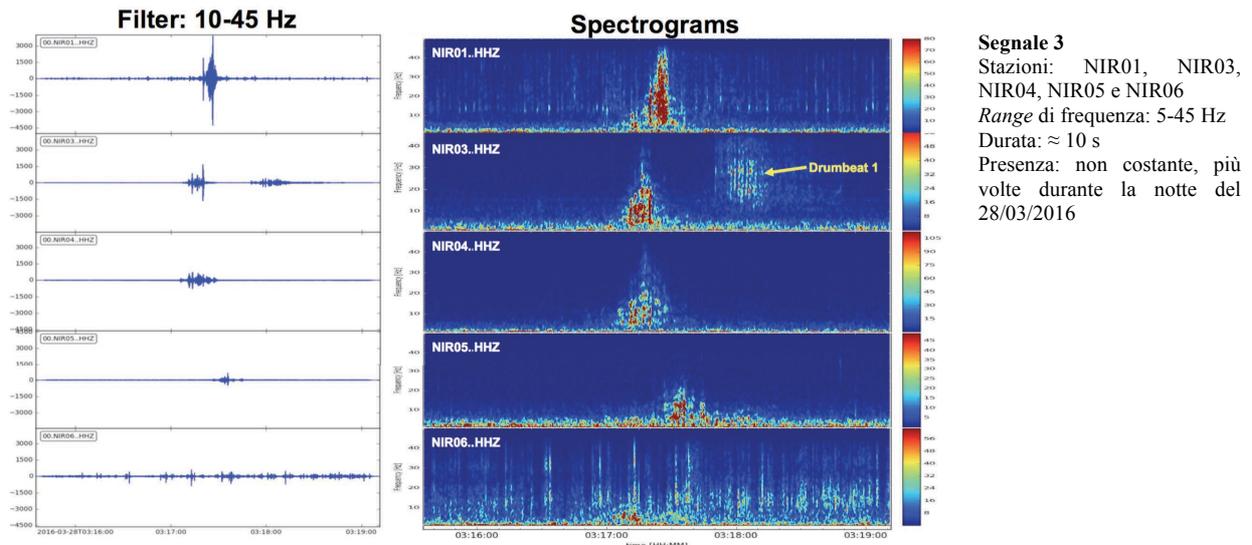
**Figura 7.** Forme d'onda e spettrogrammi del segnale registrato presso le salse di Nirano tra il 2012 e il 2013. Il segnale per le componenti verticali era stato filtrato tra 10 and 25 Hz e convertito in velocità. Lo stesso segnale appare anche nelle componenti orizzontali. È da notare che il segnale diventa visibile solo quando viene utilizzato il filtro *high-pass*. (i.e. sopra i 5 Hz). Modificato da Lupi *et al.* [2016].

Questo ha dato l'impulso al nuovo esperimento realizzato nella primavera del 2016 durante la quale una rete temporanea costituita da 7 stazioni ha registrato in continuo, a meno dei malfunzionamenti descritti nel precedente capitolo che non hanno comunque pregiudicato la qualità del *dataset* ai fini delle analisi previste [Antunes *et al.*, 2017]. Dalle prime analisi svolte su questo nuovo *dataset*, si è osservato che nei 3 mesi le stazioni hanno ripetutamente registrato dei segnali tipo *drumbeat* al di sotto dell'area delle Salse. In particolare, sono stati identificati due tipi di segnali *drumbeat* (Figura 8): uno di circa 50 secondi e frequenza di 10-45 Hz (Figura 8a, in sinistra); l'altro di circa 4 secondi e un intervallo di frequenza di 5-45 Hz (Figura 8b, a destra). Questi segnali *drumbeat* sono stati rilevati ad alcune delle 7 stazioni, a seconda della loro posizione e della distanza dai vulcani di fango, ovvero a quelle posizionate nella parte orientale della rete (vedi Figura 4).

Un terzo segnale, caratterizzato da una durata di circa 10 secondi e un intervallo di frequenza di 5-45 Hz, è stato invece osservato più volte in quasi tutte le stazioni della rete durante la notte del 28/03/2016 (Figura 9). Il segnale è stato registrato dopo un terremoto di magnitudo 2.6 avvenuto alle 01:30:39 UTC a poco meno di 60 km dalle Salse di Nirano (Figura 10, <http://cnt.rm.ingv.it/event/6540521>).



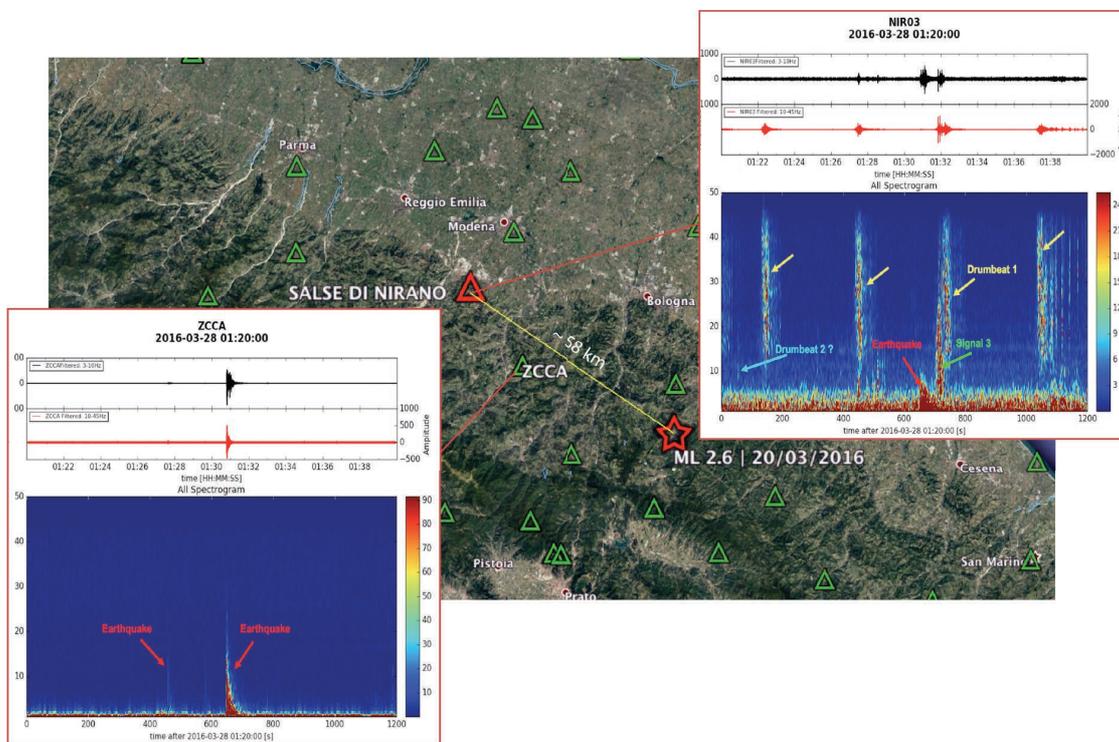
**Figura 8.** I due segnali *Drumbeat*, a diverso contenuto di frequenza, registrati alle stazioni della rete sismica temporanea durante l'esperimento del 2016 (modificato da Antunes *et al.* [2017]).



**Segnale 3**  
 Stazioni: NIR01, NIR03, NIR04, NIR05 e NIR06  
 Range di frequenza: 5-45 Hz  
 Durata:  $\approx 10$  s  
 Presenza: non costante, più volte durante la notte del 28/03/2016

**Figura 9.** Il terzo segnale registrato a quasi tutte le stazioni della rete temporanea di Nirano, osservato dopo il terremoto avvenuto il 28 marzo 2016 alle 01:30:39 UTC. Dagli spettrogrammi notiamo l'effetto di attenuazione nel sistema dei vulcani di fango (modificato da Antunes *et al.* [2017]).

Confrontando i segnali registrati dalle stazioni temporanee (in particolare NIR03 in Figura 10) con quello registrato da una stazione della Rete Sismica Nazionale (RSN, [Michelini *et al.*, 2016]) ubicata a Montalbano di Zocca, in provincia di Modena (ZCCA in Figura 10), si osserva un effetto di attenuazione al di sotto del sistema dei vulcani di fango: mentre alla stazione ZCCA il terremoto viene registrato fino alla frequenza di 30 Hz, alla stazione NIR03 si arriva solo fino a 10 Hz. (Figura 10).



**Figura 10.** Confronto della registrazione del terremoto avvenuto alle 01.30:39 UTC del 28/03/2016 e dello spettrogramma della stazione temporanea NIR03 e della permanente della RSN ZCCA [Antunes *et al.*, 2017]. I risultati di queste prime analisi svolte sul questo nuovo *dataset*, sono stati presentati in occasione dell'European Geosciences Union General Assembly 2017 (EGU – Vienna [Antunes *et al.*, 2017]).

Come prossimo obiettivo di studio, vi è una migliore caratterizzazione dei segnali osservati. Per tale analisi verrà utilizzato il *Matched Field Processing* (MFC [Baggeroer *et al.*, 1988]), tecnica di analisi già adoperata nello studio del sistema idrotermale del vulcano Lusi in Indonesia [Lupi *et al.*, 2012]. MFC è uno strumento per la localizzazione della sorgente del rumore sismico che, nel caso specifico delle Salse di Nirano, è prodotto dalla risalita dei fluidi all'interno dei condotti del sistema di alimentazione.

## Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare la Co.Re.Mo. e la Rete Sismica Mobile del CNT per l'accessibilità agli strumenti e per il supporto tecnico fornito.

Inoltre si desidera ringraziare la Dott.ssa Marzia Conventi, Direttrice della Riserva Naturale Salse di Nirano, e il Comune di Fiorano per l'ospitalità data.

Infine, un sentito ringraziamento a Luciano Zuccarello per l'attenta revisione del manoscritto.

## Bibliografia

- Accaino F., Bratus A., Conti S., Fontana D., Tinivella U. (2007). *Fluid seepage in mud volcanoes of the northern Apennines: An integrated geophysical and geological study*. J. Appl. Geoph., 36, 90-101.
- Antunes V., Lupi M., Carrier A., Planès T., Obermann A., Mazzini A., Ricci T., Sciarra A., Moretti M. (2017). *Seismic signals at the Nirano Mud Volcanic Field, Italy*. Session GMPV1.4/BG9.68/SSP3.15 From hydrothermal systems to mud volcanoes: structure, evolution and monitoring of active and fossile piercements (co-organized). *European Geosciences Union General Assembly 2017*, Vienna 23-28 April 2017.
- Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Schmidt H. (1988). *Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem*. The Journal of the Acoustical Society of America 83, 571 (1988); doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.396151>.
- Barbieri G. (1947). *Nuove osservazioni sulle salse emiliane*. Riv. Geogr. It., 54, 172-185.
- Bertacchini M. (2009). *GeoBenessere. La geologia tra salute e wellness*. Artestampa Ed., Modena, p. 131.
- Bertacchini M., Giusti C., Marchetti M., Panizza M., Pellegrini M. (eds.) (1999). *I beni geologici della Provincia di Modena*. Artioli Ed., Modena, 104 pp.
- Bertolani M. (1980). *Fiorano e il suo territorio*. Doc. e Ric. Comune di Fiorano Modenese, 1-24.
- Biasutti R. (1907). *Le salse dell'Appennino settentrionale*. Mem. Geogr. II, pp. 101-255.
- Bonini M. (2008). *Elliptical mud volcano caldera as stress indicator in an active compressional setting (Nirano, Pede-Apennine margin, northern Italy)*. Geology, 36, 131-134.
- Bonini M. (2009). *Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy*. Tectonophysics, 474, 723-735.
- Bonini M. (2012). *Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls*. Earth-Science Reviews 115, 121-152.
- Bonini M., Rudolph M.R., Manga M. (2016). *Long- and short-term triggering and modulation of mud volcano eruptions by earthquakes*. Tectonophysics, 672-673, 190-211.
- Capozzi R. and Picotti V. (2002). *Fluid migration and origin of a mud volcano in the Northern Apennines (Italy): the role of deeply rooted normal faults*. Terra Nova 14 (5), 363-370.
- Carobene L. and Gasperi G. (2008). *Vulcanetti di fango a Nirano (Modena)*. GeolItalia, 25, 42-43.
- Castaldini D., Chiriack C., Ilies D.C., Barozzini E. (2003). *Documenti digitali per la conoscenza integrata dei Geositi: l'esempio della Riserva Naturale delle Salse di Nirano*. In: S. Piacente & G. Poli (eds.), *La Memoria della Terra. Regione Emilia Romagna*. Ed. L'inchostro blu. Bologna, 121-127.
- Castaldini D., Conti S., Conventi M., Dallai D., Del Prete C., Fazzini M., Fontana D., Gorgoni C., Ghinoi A., Russo A., Sala L., Serventi P., Verri D., Barbieri M. (2007). *Le Salse di Nirano*. CD ROM. Enciclopedia Multimediale. Comune di Fiorano Modenese.
- Castaldini D., Conventi M., Coratza P., Liberatoscioli E. (2011). *La "Nuova" Carta Turistico - Ambientale della Riserva Naturale Regionale delle Salse di Nirano (Appennino Modenese, Italia Settentrionale)*. Bollettino A.I.C. nr.143/2011, 1275-289.
- Coppi F. (1875). *Brevi note sulle Salse Modenesi*. Bollettino del R. Comitato Geologico, 7-8, 1-7.

- EMERGEO (2016). *Emergeo (2016) Sequenza sismica in Italia centrale: i vulcanelli di fango in provincia di Fermo*. <https://ingvterremoti.wordpress.com/2016/11/11/sequenza-sismica-in-italia-centrale-i-vulcanelli-di-fango-in-provincia-di-fermo/>
- Ferrari C. e Vianello G. (1985). *Le Salse dell'Emilia-Romagna*. Regione Emilia-Romagna, Collana Assessorato Ambiente, 116-118.
- Gorgoni C. (2003). *Le salse di Nirano e le altre salse emiliane - I segreti di un fenomeno tra mito e realtà - Comune di Fiorano Modenese*. Tip. ABC, Sesto Fiorentino (Firenze), 128 pp.
- Gorgoni C., Bonori O., Lombardi S., Martinelli G., Sighinolfi G.P. (1988). *Radon and helium anomalies in mud volcanoes from northern Apennines (Italy) – a tool for earthquake prediction*. *Geochemical Journal*, 22, 265-273.
- Lupi M., Suski Ricci B., Kenkel J., Ricci T., Fuchs F., Miller S.A., Kemna A. (2016). *Subsurface fluid distribution and possible seismic precursory signal at the Salse di Nirano mud volcanic field, Italy*. *Geophys. J. Int.* 204, 907–917. <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggv454>.
- Lupi M., Saenger E.H., Fuchsand F., Miller S.A. (2013). *Lusi mud eruption triggered by geometric focusing of seismic waves*. *Nature Geoscience* 6, 642–646 (2013) doi:10.1038/geo1884.
- Manga M. and Bonini M. (2012). *Large historical eruptions at subaerial mud volcanoes, Italy*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 3377–3386. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-12-3377-2012>.
- Michellini A., Margheriti L., Cattaneo M., Cecere G., D'Anna G., Delladio A., Moretti M., Pintore S., Amato A., Basili A., Bono A., Casale P., Danecek P., Demartin M., Faenza L., Lauciani V., Mandiello A.G., Marchetti A., Marcocci C., Mazza S., Mele F.M., Nardi A., Nostro C., Pignone M., Quintiliani M., Rao S., Scognamiglio L. and Selvaggi G. (2016). *The Italian National Seismic Network and the earthquake and tsunami monitoring and surveillance systems*. *Adv. Geosci.*, 43, 31–38, 2016 [www.adv-geosci.net/43/31/2016/](http://www.adv-geosci.net/43/31/2016/) doi:10.5194/adgeo-43-31-2016.
- Moretti M., Govoni A., Colasanti G., Silvestri M., Giandomenico E., Silvestri S., Criscuoli F., Giovani L., Basili A., Chiarabba C. e Delladio A. (2010). *La Rete Sismica Mobile del Centro Nazionale Terremoti*. Rapporti Tecnici INGV N°137.
- Mucchi A. M. (1966). *Il fenomeno delle salse e le manifestazioni del Modenese*. *Atti Soc. Nat. Mat. Modena*, 97, 1-31.
- Mucchi A.M. (1968). *Le salse del Modenese e del Reggiano*. *L'Universo*, 48 (3), 421-436.
- Nanni T. e Zuppi, G.M. (1986). *Acque salate e circolazione profonda in relazione all'assetto strutturale del fronte adriatico e padano dell'appennino*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 35, 979–986.
- Pantanelli D. e Santi V. (1896). *L'Appennino Modenese*. Ed. Cappelli, Rocca San Casciano, Ristampa 1996, Ed. Iaccheri, Pavullo nel Frignano.
- Sciarra A., Cantucci B., Castaldini D., Procesi M., Coventi M. (2015). *Between history, work and passion: medieval castle, mud volcanoes and Ferrarì*. *Geol. F. Trips*, 7 (1.1), 42 pp. Doi 10.3301/GFT.2015.01.
- Sciarra A., Cantucci B., Ricci T., Coventi M. (2016). *Geochemical characterization of the Nirano Mud Volcano Field*. *Geophysical Research Abstract*, 18, EGU2016-9234.
- Stoppani A. (1873). *Il Bel Paese*. Milano, 651 pp.

# Allegato

Schede stazioni



# NIR1

## Salse di Nirano (NE)

### Info - Position (WGS84)

<b>IN</b>	17/03/2016   GG 077 10.03 UTC
<b>OUT</b>	13/06/2016   GG 165 10.00 UTC
<b>Lat</b>	N 44.514550
<b>Lon</b>	E 10.824747
<b>Elev</b>	204 m

### Strumenti

<b>Acquisitore</b>	REF TEK 130S -01 S/N A828
<b>Sensore</b>	Le 3D/5s S/N O290
<b>Alimentazione</b>	Impianto fotovoltaico con batteria da 42Ah

### Configuration

<b>Acquisizione</b>	In locale
<b>Passo camp.</b>	100 sps
<b>Gain</b>	1



La stazione NIR01 è stata installata la mattina del secondo giorno della campagna di *deployment* nei pressi dei due vulcanelli di fango nella parte orientale dell'area indicata con il cerchio bianco nella mappa in alto e poi evidenziata nella figura in basso. NIR01 ha registrato in continuità fino al 13 giugno, ovvero 3 giorni prima della disinstallazione della rete, per saturazione della capacità di registrazione della CF montata.

# NIR2

## Salse di Nirano (SW)

### Info - Position (WGS84)

<b>IN</b>	17/03/2016   GG 077 12.26 UTC
<b>OUT</b>	16/06/2016   GG 168 17.00 UTC
<b>Lat</b>	N 44.512785
<b>Lon</b>	E 10.820155
<b>Elev</b>	221 m

### Strumenti

<b>Acquisitore</b>	REF TEK 130S -01 S/N 9193
<b>Sensore</b>	Le 3D/5s S/N Z629
<b>Alimentazione</b>	Impianto fotovoltaico con batteria da 42Ah

### Configurazione

<b>Acquisizione</b>	In locale
<b>Passo camp.</b>	100 sps
<b>Gain</b>	1



La stazione NIR02 è stata installata la mattina del secondo giorno della campagna di *deployment*, nei pressi del vulcano di fango a ovest dell'area indicata con il cerchio bianco nella mappa in alto e poi evidenziata nella figura in basso.

In occasione del giro di controllo svolto il 12 aprile, a circa un mese dall'inizio della campagna, ci si è accorti che la stazione aveva smesso di acquisire dalle ore 6.00 UTC del 25 marzo per un problema al regolatore che ha compromesso il funzionamento dell'impianto fotovoltaico. Una volta ripristinata, la NIR02 ha acquisito fino alla fine dell'esperimento senza alcun altra interruzione.

# NIR3

## Salse di Nirano (E)

### Info - Position (WGS84)

<b>IN</b>	16/03/2016   GG 076 17.22 UTC
<b>OUT</b>	13/04/2016   GG 104 19.00 UTC
<b>Lat</b>	N 44.514208
<b>Lon</b>	E 10.826357
<b>Elev</b>	199 m

### Instruments

<b>Acquisitore</b>	REF TEK 130S -01 S/N 9195
<b>Sensore</b>	Le 3D/5s S/N W496
<b>Alimentazione</b>	Impianto fotovoltaico con batteria da 42Ah

### Configuration

<b>Acquisizione</b>	In locale
<b>Passo camp.</b>	100 sps
<b>Gain</b>	1



La stazione NIR03, installata il pomeriggio del primo giorno della campagna di *deployment*, chiude la geometria di rete nella parte orientale, nei pressi dello stabile che accoglie il Museo Naturalistico, nell'area indicata con il cerchio bianco nella mappa in alto e poi evidenziata nella figura in basso.

La stazione era risultata in buone condizioni al giro di controllo controllo svolto il 12 aprile, ma è stata trovata spenta il giorno della disinstallazione della rete. In fase di scarico dei dati, dalla CF montana nella slot, ci si è resi purtroppo conto che la stazione ha archiviato poco più di 24 ore di dati e poi si è fermata. Dai test effettuati in laboratorio, si è riscontrato un malfunzionamento della CF installata che ha compromesso l'archiviazione dei dati.

# NIR4

## Salse di Nirano (SE)

### Info - Position (WGS84)

<b>IN</b>	16/03/2016   GG 077 16.08 UTC
<b>OUT</b>	16/06/2016   GG 167 00.00 UTC
<b>Lat</b>	N 44.513860
<b>Lon</b>	E 10.825297
<b>Elev</b>	197 m

### Instruments

<b>Acquisitore</b>	REF TEK 130S -01 S/N 9328
<b>Sensore</b>	Le 3D/5s S/N W496
<b>Alimentazione</b>	Impianto fotovoltaico con batteria da 42Ah

### Configuration

<b>Acquisizione</b>	In locale
<b>Passo camp.</b>	100 sps
<b>Gain</b>	1



La stazione NIR04 è stata installata il pomeriggio del primo giorno della campagna di *deployment* a SW dei due vulcanelli di fango nella parte orientale dell'area indicata con il cerchio bianco nella mappa in alto e poi evidenziata nella figura in basso. NIR04 ha registrato in continuità fino alla mezzanotte del 15 giugno, ovvero qualche ora prima della disinstallazione, per saturazione della capacità di registrazione della CF montata.

# NIR5

## Salse di Nirano (NW)

### Info - Position (WGS84)

<b>IN</b>	16/03/2016   GG 076 15.30 UTC
<b>OUT</b>	16/06/2016   GG 168 12.00 UTC
<b>Lat</b>	N 44.514145
<b>Lon</b>	E 10.823178
<b>Elev</b>	202 m

### Instruments

<b>Acquisitore</b>	REF TEK 130S -01 S/N 9190
<b>Sensore</b>	Le 3D/5s S/N U467
<b>Alimentazione</b>	Impianto fotovoltaico con batteria da 42Ah

### Configuration

<b>Acquisizione</b>	In locale
<b>Passo camp.</b>	100 sps
<b>Gain</b>	1



La stazione NIR05 è stata installata il pomeriggio del primo giorno della campagna di *deployment*, a NW del vulcano di fango al centro dell'area monitorata e indicata con il cerchio bianco nella mappa in alto e poi evidenziata nella figura in basso.

NIR05 ha registrato in continuità fino alla fine dell'esperimento.

# NIR6

## Salse di Nirano (S)

### Info - Position (WGS84)

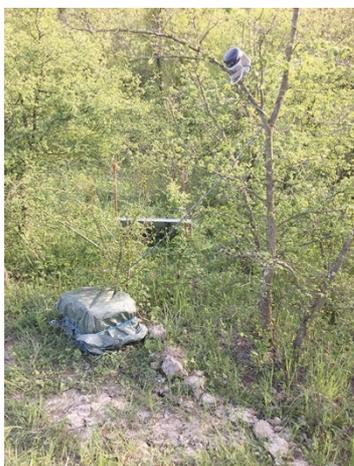
<b>IN</b>	16/03/2016   GG 076 14.09 UTC
<b>OUT</b>	15/06/2016   GG 167 22.00 UTC
<b>Lat</b>	N 44.513082
<b>Lon</b>	E 10.823585
<b>Elev</b>	187 m

### Instruments

<b>Acquisitore</b>	REF TEK 130S -01 S/N 9196
<b>Sensore</b>	Le 3D/5s S/N W465
<b>Alimentazione</b>	Impianto fotovoltaico con batteria da 42Ah

### Configuration

<b>Acquisizione</b>	In locale
<b>Passo camp.</b>	100 sps
<b>Gain</b>	1



La stazione NIR06 è stata installata il pomeriggio del primo giorno della campagna di *deployment* a SW del vulcano di fango al centro dell'area monitorata e indicata con il cerchio bianco nella mappa in alto e poi evidenziata nella figura in basso. NIR06 ha registrato in continuità fino alle 22.00UTC del 15 giugno, ovvero qualche ora prima della disinstallazione, per saturazione della capacità di registrazione della CF montata.

# NIR7

## Salse di Nirano (SE)

### Info - Position (WGS84)

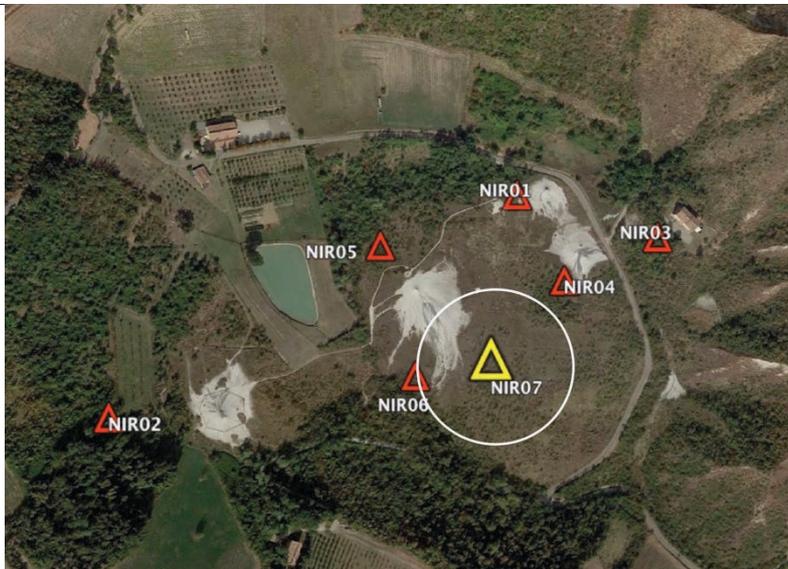
<b>IN</b>	16/03/2016   GG 076 13.21 UTC
<b>OUT</b>	07/06/2016   GG 159 18.00 UTC
<b>Lat</b>	N 44.513228
<b>Lon</b>	E 10.824463
<b>Elev</b>	195 m

### Instruments

<b>Acquisitore</b>	REF TEK 130s -01 S/N 920F
<b>Sensore</b>	Trillium 120C S/N 0196
<b>Alimentazione</b>	Impianto fotovoltaico con batteria da 42Ah

### Configuration

<b>Acquisizione</b>	In locale
<b>Passo camp.</b>	100 sps
<b>Gain</b>	1



La stazione NIR07, unica con sensore BB, è stata installata nel pomeriggio del primo giorno della campagna di *deployment*, a SE del vulcano di fango al centro dell'area monitorata e indicata con il cerchio bianco nella mappa in alto e poi evidenziata nella figura in basso.

In occasione del giro di controllo svolto il 12 aprile, a circa un mese dall'inizio della campagna, ci si è accorti che la stazione aveva smesso di acquisire dalle ore 11.00 UTC del 21 marzo per un problema al regolatore che ha compromesso il funzionamento dell'impianto fotovoltaico. Una volta ripristinata, la NIR07 ha acquisito fino alle 18.00 UTC del 7 giugno, per saturazione della capacità di registrazione della CF montata.

# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2017 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**