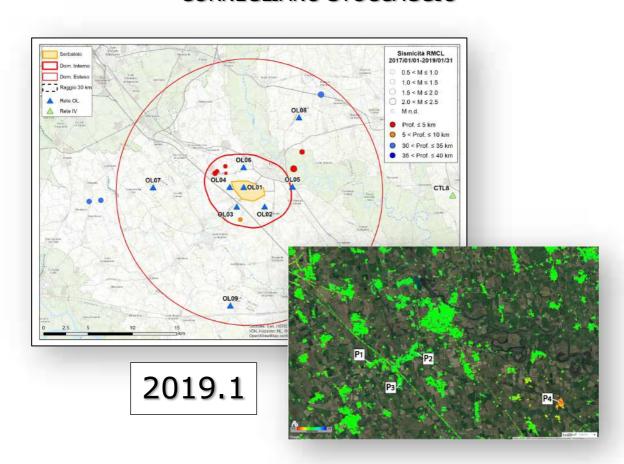




"CORNEGLIANO STOCCAGGIO"



MONITORAGGIO SISMICO E DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI

Anno di esercizio 2019 - Prima relazione annuale

Struttura Preposta al Monitoraggio:

OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale Sezione Scientifica Centro di Ricerche Sismologiche (CRS)

IREA-CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA) Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Rel. OGS 2019/38 Sez. CRS 16 SISMID Sgonico, 24 luglio 2019





A cura di:

Enrico Priolo¹, Riccardo Lanari², Paolo Bernardi¹, Manuela Bonano², Sabatino Buonanno², Claudio De Luca², Paolo Fabris¹, Marco Garbin¹, Mariangela Guidarelli¹, Mariarosaria Manzo², Laura Peruzza¹, Milton Plasencia Linares¹, Marco Romanelli¹, Maria Adelaide Romano¹, Denis Sandron¹, Giovanni Zeni², Ivana Zinno², David Zuliani¹

¹OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale Sezione Scientifica Centro di Ricerche Sismologiche (CRS)

²IREA-CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA) Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Coordinatore della Struttura Preposta al Monitoraggio e responsabile scientifico per l'OGS: *Dott. Enrico Priolo*

Responsabile scientifico per l'IREA-CNR: Dott. Ing. Riccardo Lanari

Visto e approvato: Per l'OGS

il Direttore della Sezione Scientifica CRS

Prof. Stefano Parolai

Per l'IREA-CNR il Direttore dell'IREA-CNR Dott. Ing. Riccardo Lanari

Recapiti

OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica

Sezione Scientifica Centro di Ricerche Sismologiche (CRS) Borgo Grotta Gigante 42/c, 34010 Sgonico (Trieste)

Dott. Enrico Priolo

Tel.: 040 2140351; Cell.: 320 4324734 e-mail: epriolo@inogs.it skype: epriolo

IREA-CNR - Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) Via Diocleziano 328 - 80124 Napoli

Dott. Ing. Riccardo Lanari

Tel. 081 7620612; cell. 320 4397901

e-mail: lanari.r@cnr.irea.it





Indice

	Pag.
Sommario	1
1. Monitoraggio sismico	3
1.1. La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)	4
1.2. Operatività della rete sismica	10
1.3. Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio	11
2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali	18
2.1. Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01	19
2.1.1. Dati elaborati	19
2.1.2. Risultati ottenuti	21
2.2. Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2019 (dati SENTINEL-1)	30
2.2.1. Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – maggio 2019)	32
2.2.2. Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – maggio 2019)	34
2.2.3. Analisi SBAS Sentinel-1: mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della deformazione superficiale	39
3. Conclusioni	44
Bibliografia	46
Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL	47
Appendice B – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08	50



Elenco delle abbreviazioni

AE Area Esterna di rilevazione della rete di monitoraggio

BSI Bollettino Sismico Italiano

CPTI15 Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (Rovida et al., 2016)

CSI1.1 Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006)

DBMI15 Database Macrosismico Italiano (Locati et al., 2016)

DE Dominio Interno di rilevazione della rete di monitoraggio (MiSE-UNMIG, 2014)

DI Dominio Esteso di rilevazione della rete di monitoraggio (MiSE-UNMIG, 2014)

DInSAR Differential SAR Interferometry

DISS Database delle Sorgenti Sismiche Italiane (Basili et al., 2018; DISS Working Group, 2018)

EMSC European-Mediterranean Seismological Centre

GAMIT/GLOBK suite di programmi sviluppato dal MIT per analizzare dati GPS, principalmente per studiare la deformazione della crosta terrestre

GNSS Global Navigation Satellite System

GPS Global Positioning System

LOS Line of sight

MiSE-UNMIG Ministero per lo sviluppo economico - Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi e le georisorse

ML Magnitudo locale

NHNM New High Noise Model (McNamara and Buland, 2004)

NLNM New Low Noise Model (McNamara and Buland, 2004)

PDF Probability Density Function

PSD Power Spectral Density

RMCL Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense

RSNC Rete Sismica Nazionale Centralizzata (gestita da INGV)

RSNI Regional Seismic network of Northwest Italy (gestita dall'Università di Genova)

SAR Synthetic Aperture Radar

SBAS Small BAseline Subset

SPIN Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia





Sommario

Il presente documento costituisce il secondo dei due rapporti previsti, secondo contratto, per il 2019 e descrive le attività effettuate nel periodo 1/1/2019-30/4/2019 per l'esercizio del monitoraggio integrato svolto dall'OGS e dall'IREA-CNR presso la concessione di stoccaggio gas naturale denominata "Cornegliano Stoccaggio". Detta attività è commissionata da Ital Gas Storage S.p.A. all'OGS e all'IREA-CNR con il Contratto dd. 14/2/2018 con cui viene disciplinato l'esercizio dell'infrastruttura di monitoraggio sismico e la gestione del sistema di monitoraggio integrato. L'infrastruttura di monitoraggio sismico di Cornegliano Laudense (di seguito denominata *Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense – RMCL*) e le procedure di acquisizione ed elaborazione dati sono quelle descritte nella relazione sulle attività iniziali datata 13/11/2018 (Priolo et al., 2018).

Come detto, <u>il presente rapporto riguarda le attività svolte nel periodo 1/1/2019-30/4/2019</u>. Questo documento rendiconta le attività di quattro mesi soltanto, a differenza dei sei mesi previsti, poiché gli ultimi due mesi del 2018 sono stati già rendicontati nel precedente rapporto n. OGS 2019/9 Sez. CRS 8, per comprendere anche l'analisi dei dati relativi al periodo di tempo corrispondente all'avvio delle attività di stoccaggio (12/12/2018).

In sintesi, il presente rapporto è organizzato nel modo seguente:

- il Capitolo 1 descrive il monitoraggio sismico:(1.1) cenni sulle caratteristiche della rete e sulle procedure di identificazione e localizzazione degli eventi sismici; (1.2) lo stato di funzionamento della rete e del sistema di acquisizione dati; (1.3) risultati del monitoraggio sismico ottenuti per l'intero periodo di osservazione 1/1/2017-30/4/2019 con una descrizione della sismicità rilevata.
- il Capitolo 2 descrive il monitoraggio delle deformazioni superficiali. La prima parte del capitolo (Cap. 2.1) descrive la gestione della stazione GNSS OL01 e le prime elaborazioni svolte sui dati acquisiti. La seconda parte (Cap. 2.2) descrive l'analisi interferometrica delle deformazioni del suolo completa fino alla data del 30/4/2019.
- il Capitolo 3 contiene le conclusioni.

Le Appendici, alla fine del documento, riportano i seguenti contenuti:

Appendice A: grafici dello stato di funzionamento della rete in formato





tabellare;

• Appendice B: serie temporali delle stazioni GNSS della RETE LODI secondo il sistema di riferimento ITRF08.

Come detto, il presente rapporto è stato redatto dai ricercatori e tecnologi dell'OGS e dell'IREA-CNR. I Capitoli 1 e 2.1 sono stati redatti dall'OGS; il Capitolo 2.2 è stato scritto dall'IREA-CNR. Le conclusioni, al Capitolo 3, sono state scritte congiuntamente.





1. Monitoraggio sismico





1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)

La RMCL è composta da nove stazioni sismometriche e da una stazione geodetica GNSS permanente. Le stazioni sono indicate con la sigla OL01-OL09, in accordo al codice OL che è il codice internazionale di registrazione della RMCL. La Tabella 1 ne riassume le principali informazioni, mentre la Figura 1 mostra la mappa con la posizione delle stazioni. La data ufficiale di inizio operatività della RMCL è il 1/1/2017.

La RMCL è integrata da alcune stazioni appartenenti alle reti regionali e alla rete nazionale, gestite dall'OGS, dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e da altri Enti, che completano il perimetro esterno della RMCL a distanza di alcune decine di chilometri nelle varie direzioni.

Tutte le stazioni della RMCL sono dotate di sismometro posto in pozzo, mediamente a profondità di 75 m, con lo scopo di ridurre i disturbi di carattere antropico e il rumore sismico che si propaga principalmente nello strato superficiale di suolo. La Tabella 2 illustra la strumentazione con cui è equipaggiata la RMCL. I dati sono acquisiti con un campionamento di 200 Hz per i sismometri e di 100 Hz per gli accelerometri.

CODICE	LAT	LON	QUOTA	NOME
			(m s.l.m.)	
OL01	45.291	9.464	72	Cornegliano Laudense (Cluster A)
OL02	45.266	9.485	71	Massalengo
OL03	45.266	9.453	70	Cascina Castagna
OL04	45.290	9.435	78	Cascina Taietta
OL05	45.293	9.526	75	Cascina Cavrigo
OL06	45.309	9.464	77	Cascina Bracca
OL07	45.291	9.325	77	Gugnano
OL08	45.362	9.539	75	Dovera
OL09	45.170	9.438	70	Miradolo

Tabella 1 – Sommario delle stazioni della RMCL. Informazioni dettagliate si trovano nelle singole schede di stazione riportate nella Appendice B della relazione di consegna della rete (Priolo et al., 2017).





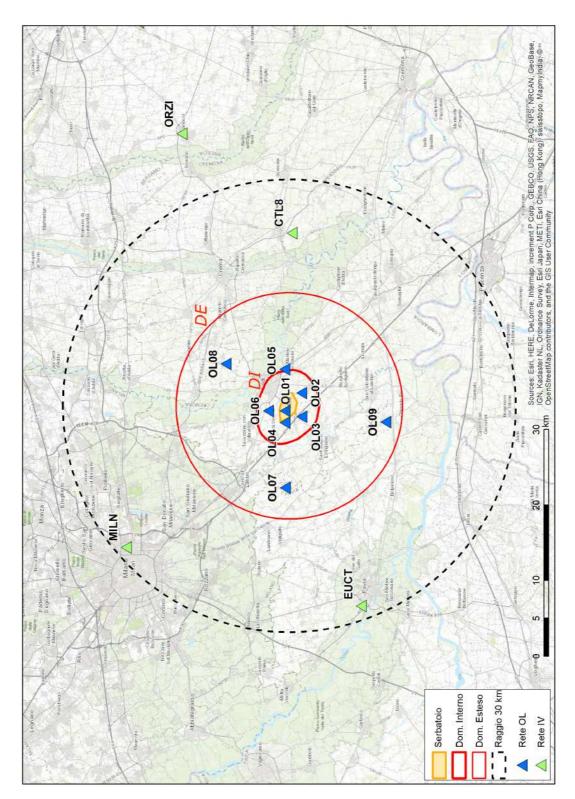


Figura 1 – Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee rosse indicano i perimetri del Dominio Interno (DI, linea spessa) e del Dominio Esteso (DE, linea sottile) di rilevazione. La linea tratteggiata indica la distanza di 30 km dal sito di stoccaggio e definisce l'Area Esterna.





Acquisitore: Guralp-Minimus

Caratteristiche: 6 canali, 24 bit



Accelerometro: Guralp-Fortis

Componenti: 3 Fondo scala: ±2.0 g

Banda: DC-200 Hz



Sismometro da pozzo: Guralp-Radian

Componenti: 3

Sensibilità: 2000 V/m/s

Banda: 0.00833-200 Hz (120-0.05 s)

Tabella 2 – Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL.

Tutte le stazioni sono dotate di apparati di tele-trasmissione dei dati e antenne GPS per la sincronizzazione precisa del tempo. I dati acquisiti dalle stazioni vengono inviati al centro di acquisizione presso le sedi OGS di Trieste e Udine.

I dati acquisiti vengono archiviati in tempo reale in formato *mseed* su un sistema di archiviazione di rete (NAS di marca QNAP) con capacità complessiva di circa 20 TB che è montato direttamente come *file system* dai sistemi di acquisizione ed elaborazione. La rete RMCL accumula approssimativamente 1.2 GB di dati al giorno, quindi circa 0.5 TB all'anno. Tutte le informazioni relative ai siti e alla strumentazione installata sono anche caricate nel database che gestisce i dati sismologici strumentali dell'OGS, denominato OASIS (oasis.crs.inogs.it) e descritto in Priolo et al. (2012; 2015a).

Per migliorare la rilevazione e la localizzazione dei terremoti locali le stazioni della RMCL sono integrate da alcune stazioni della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC, codice IV) gestita da INGV (Tabella 3). Inoltre, per discriminare più efficacemente gli eventi lontani, anche se di scarso interesse per l'area della concessione di stoccaggio, vengono utilizzate numerose stazioni appartenenti ad altre reti che operano nel Nord Italia, quali la Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale (codice OX) gestita da OGS anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli-Venezia Giulia, e la Rete Sismica del Trentino (ST) della Provincia Autonoma di Trento. Le stazioni introdotte allargano di fatto l'area di rilevazione a una parte cospicua dell'Italia Settentrionale (Figura 2).

Per la rilevazione della sismicità di interesse per lo stoccaggio di Cornegliano Laudense sono state individuate due aree di riferimento che corrispondono ai domini di rilevazione indicati dagli ILG del MiSE (MiSE-UNMIG, 2014). Il Dominio Interno (DI) circonda il serbatoio fino a una distanza di 3 km, e il Domino Esteso (DE) si allarga fino a 15 km dal perimetro esterno del serbatoio. Le aree corrispondenti in superficie ai due domini sono mostrate con linee rosse in Figura 1.





Code	Name	Latitude	Logitude	Altitude (m)	Net Code
BALD	Monte Baldo (VR)	45.6830	10.8187	1911	OX
вов	Bobbio (PC)	44.7679	9.4478	910	IV
CTL8	Castelleone (CR)	45.2763	9.7622	60	IV
EUCT	Pavia	46.1516	12.3630	598	IV
MARN	Marana (VI)	45.6378	11.2099	785	OX
MDI	Monte di Nese (BG)	45.7697	9.716	954	IV
MILN	Milano	45.4803	9.2321	125	IV
ORZI	Orzinuovi (BS)	45.4056	9.9307	83	IV
PRMA	Parma	44.7637	10.3131	78	IV
QUIN	Quinzano D'Oglio (BS)	45.2982	10.0337	121	ОХ
SARZ	Sarezzano (AL)	44.8673	8.9136	266	IV
VARA	Monte Varagna (TN)	45.8260	10.8965	1735	ОХ

Tabella 3 - Stazioni sismometriche utilizzate a integrazione della RMCL per la localizzazione degli eventi. I codici di rete (NetCode) IV e OX corrispondono rispettivamente alla Rete Sismica Nazionale gestita dall'INGV e alla Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale gestita dall'OGS.

Le procedure di elaborazione dei dati di basso livello (intendendo con ciò le fasi di acquisizione dei dati dalle stazioni, di archiviazione dei files dei dati, e di elaborazione per il riconoscimento automatico in tempo quasi-reale (real-time) della sismicità sono state già descritte nel rapporto di consegna della rete (Priolo et al., 2017). Qui descriveremo brevemente come si svolge l'analisi dei dati. Il dettaglio completo delle procedure e operazioni è descritto in Garbin e Priolo (2013) e Priolo et al. (2015b).

Le procedure di acquisizione, elaborazione e analisi dei dati sono basate sul sistema software *Antelope*[®] sviluppato da BRTT e completate con procedure e funzioni sviluppate dai ricercatori e tecnologi dell'OGS.

Ricordiamo che il sistema di elaborazione si divide in due parti, rispettivamente:

- **real-time**, è la parte di elaborazione che comprende il riconoscimento e la localizzazione automatica dei terremoti con eventuale notifica di eventi locali al personale di reperibilità;
- **off-line**, è la parte che comprende la rielaborazione di tutti i dati con controllo manuale, e che viene effettuata con cadenza periodica o, in caso di evento locale, nelle ore successive al suo verificarsi.

La rilevazione di un evento sismico avviene, per entrambi i rami di elaborazione, attraverso alcune operazioni standard, che sono:

detezione, è l'operazione con cui la registrazione viene analizzata per





riconoscere e marcare la presenza di anomalie di ampiezza del segnale (detti, con terminologia tecnica, *trigger*) rispetto al rumore di fondo. Questa operazione viene effettuata in base a certi criteri predeterminati per tutte le tracce acquisite dal sistema.

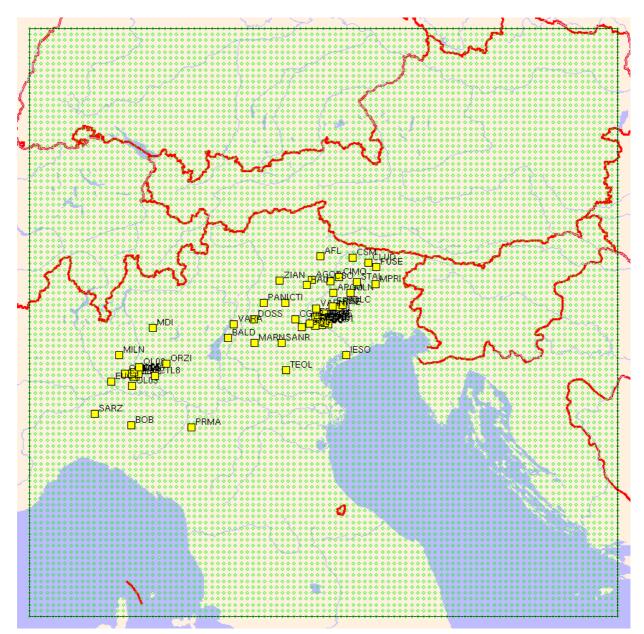


Figura 2 – Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana si riconoscono le stazioni di INGV più vicine alla RMCL. Nell'area Orientale si distinguono invece le stazioni appartenenti alle reti gestite dall'OGS nel periodo di tempo considerato, anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia, e dalla Provincia Autonoma di Trento. Il rettangolo punteggiato di verde rappresenta l'area di riconoscimento dei terremoti regionali, indispensabile per evitare false identificazioni di eventi locali.





 associazione, è l'operazione con cui un evento viene classificato come tale in base al fatto che numerose stazioni rilevano dei trigger con una certa sincronia. L'associatore valuta questa coincidenza temporale per una serie di localizzazioni di prova all'interno di un volume ben definito e delimitato in superficie dall'area di interesse; se una o più di queste superano dei test di attendibilità, ne conferma la migliore.

Le operazioni svolte dai due rami di elaborazione si differenziano in funzione di obiettivi diversi. Il sistema real-time, in caso di evento con magnitudo superiore ad una soglia prestabilita, esegue le procedure di notifica (es: invio del messaggio di allerta al personale reperibile, aggiornamento delle tabelle e delle pagine di notifica), il ramo off-line prosegue con operazioni mirate a qualificare in modo più accurato gli eventi rilevati. Per questo motivo i due rami di elaborazione utilizzano configurazioni alquanto diverse.

Per il ramo off-line l'obiettivo è quello di riconoscere la microsismicità, e quindi di rilevare tutti gli eventi sismici nell'area studio nei limiti di capacità di rilevazione della rete. Gli strumenti di elaborazione vengono configurati per consentire l'identificazione dei segnali più deboli sfruttando al limite la sensibilità della rete; ciò tuttavia aumenta fortemente il carico computazionale e la rilevazione di falsi eventi, a causa dei pochi trigger usati. Per questo motivo, a valle delle operazioni di detezione e associazione, è necessario l'intervento di un sismologo, che riconosce gli eventi veri e li discrimina da quelli falsi. Questa operazione è chiamata **tagging**. In pratica, in questa fase, gli eventi di interesse per il monitoraggio sismico di Cornegliano Laudense vengono marcati in modo permanente nel sistema. Per gli eventi marcati, vengono effettuate le seguenti operazioni specifiche:

- estrazione delle forme d'onda relative all'evento per tutte le stazioni;
- **picking** manuale, operazione con cui vengono rilevati dal sismologo i tempi di arrivo delle fasi P e, ove possibile, S;
- localizzazione, utilizzando le fasi rilevate manualmente;
- stima della magnitudo.

Le localizzazioni fornite in uscita del sistema di elaborazione e analisi sono ottenute con il metodo Hypoellipse (Lahr, 1984). Esso utilizza un modello 1D della crosta terrestre a strati piani paralleli, descritto in termini di velocità delle onde P (Vp), spessore degli strati, e rapporto Vp/Vs in ogni strato. Il modello adottato (Tabella 4) rappresenta la geologia a scala sub-regionale, che è caratterizzata da una spessa copertura di depositi alluvionali sopra la base rocciosa;





	Vp (km/s)	Profondità (km)	Vp/Vs [Hypoellipse]
1	2.35	0.0-1.4	2.38
2	3.5	1.4-3.0	1.85
3	5.0	3.0-6.0	1.78
4	6.0	6.0-12.0	1.78
5	6.7	12.0-35.0	1.78
6	7.5	> 35.0	1.78

Tabella 4 – Modello 1D definito in questo studio per le localizzazioni dei terremoti. Le colonne indicano da sinistra a destra in successione: il numero di strato, la velocita Vp, la profondità dello strato e il valore di Vp/Vs.

ciò si ripercuote in una variazione evidente nei primi due strati sia delle velocità Vp sia del rapporto Vp/Vs. Ricordiamo che il rapporto Vp/Vs influenza la profondità dell'ipocentro. Maggiori dettagli sono riportati nella relazione completa sulle attività iniziali (Priolo et al., 2018).

Per quanto riguarda la magnitudo, è calcolata la magnitudo locale (ML) con la formula di attenuazione di Bragato e Tento (2005).

1.2 Operatività della rete sismica

Durante il periodo in esame (1/1/2019-30/4/2019) la rete ha svolto completamente le funzioni di monitoraggio sismico previste. La strumentazione, il sistema di acquisizione, come pure quello di prima elaborazione e archiviazione dei dati hanno funzionato correttamente.

La disponibilità dei dati acquisiti mese per mese, nel periodo considerato, è riassunta dalle tabelle riportate in Appendice A. Per quanto riguarda l'esercizio delle stazioni, non è stato effettuato nessun intervento effettuato in loco nel periodo in esame (Tabella 5).

Data	Stazione	Intervento
1/1-30/4/2019		Non si segnala alcun intervento in loco.

Tabella 5 – Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica.





1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio

Nel periodo 1/1/2019-30/4/2019 la RMCL ha rilevato soltanto un evento nell'Area Esterna di rilevazione, corrispondente all'area contenuta entro un raggio di 30 km dal sito di stoccaggio. Ricordiamo che le attività di stoccaggio sono iniziate il 12/12/2018. La Tabella 6 riporta, per completezza, tutti gli eventi rilevati a partire dal 1/1/2017. La Figura 3 mostra, con due scale diverse, la mappa degli eventi registrati nel periodo in esame, evidenziando sia i domini di rilevazione sia le profondità degli eventi.

L'evento si è verificato il 25/4/2019 ed è localizzato ad una profondità di circa 32 km, appena fuori del volume rappresentato in superficie dall'Area Esterna. Esso rientra nel quadro di sismicità profonda già documentato per l'area.

Area	Data	Ora (UTC)	LAT	LON	DEPTH (km)	M	Q	N. Fasi	NS	ErrH1 (km)	ErrH2 (km)	ErrZ (km)
AE ⁺	2017-05-23	04:16:32.54	45,448	9,245	37,98	1,9	Α	16	9	0,44		0,65
DI	2017-07-11	22:25:03.54	45,306	9,422	1,43			8		0,12		2,31
DI	2017-07-12	00:17:53.87	45,304	9,419	2,22	1,1	Α	15	6			0,14
DI	2017-07-12	00:18:30.96	45,304	9,435	1,24		Α	8	3	0,05	0,23	0,05
DE	2017-10-20	21:37:06.65	45,325	9,544	3,22	1,2	С	6	2	0,12	0,71	4,83
DI	2018-01-27	04:01:44.43	45,311	9,434	1,51	0,8	Α	11	5	0,06	0,09	1,25
DE	2018-05-27	20:01:35.35	45,257	9,455	5,68	0,7	Α	13	6	0,14	0,19	0,19
AE^{+}	2018-06-18	21:45:20.86	45,277	9,255	33,46	1,3	Α	17	8	0,40	0,66	0,46
AE ⁺	2018-06-20	00:49:07.48	45,276	9,238	34,02	1,3	Α	15	7	0,59	0,72	0,37
AE ⁺	2018-10-30	05:03:37.61	45,383	9,572	34,03	2,0	Α	22	11	0,39	0,79	0,71
DE	2018-11-21	03:26:44.47	45,308	9,532	3,14	2,1	Α	12	10	0,18	0,22	0,38
AE ⁺	2018-12-23	15:06:12.55	45,440	9,583	35,61	1,5	В	4	4	0,29	2,29	0,93
AE ⁺	2019-04-25	23:11:31.35	45,355	9,605	31,97	1,5	Α	21	12	0,36	0,59	0,49

Tabella 6 – Lista degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2019 a distanza epicentrale ≤30 km dal comune di Cornegliano Laudense. Le colonne contengono, nell'ordine: [Area] l'area in cui si trova l'evento; [YYYY-MM-DD] anno-mese-giorno; [HH:MM:SS.SS] ora:minuto:secondo.decimale; [LAT] e [LON] latitudine e longitudine in gradi decimali; [DEPTH] (km) profondità; [M] magnitudo ML; [Q] qualità della localizzazione (decrescente da A a D); [N. Fasi] numero totali di fasi usate; [NS] numero di fasi S usate; [ErrH1], [ErrH2] ed [ErrZ] l'errore statistico nella localizzazione in km, espresso come prima deviazione standard della stima. I colori con cui sono rappresentati i parametri degli eventi rappresentano diverse classi di profondità, analogamente a quanto rappresentato in Figura 20, e cioè: rosso 0-5 km, arancio 5-10 km, azzurro 30-35 km, blu 35-40 km. Si noti che per l'Area Estesa è utilizzata la sigla AE⁺ per indicare che vengono inclusi nella lista anche eventi che possono uscire di poco dal volume corrispondente ad AE, come ad esempio alcuni terremoti più profondi di 32 km.





La Figura 4 mostra, a titolo di esempio, le tracce registrate dalla rete per l'evento ML1.5 del 25/4/2019 ore 23:11:31 avvenuto nell'Area Esterna. La distanza epicentrale delle stazioni visualizzate è compresa tra 12 e 21 km. Si noti l'aumento del ritardo dell'arrivo della fase S rispetto alla P all'aumentare della distanza della stazione dalla sorgente. Il ritardo nel tempo di arrivo tra la fase S e la fase P alla stazione più vicina è di 5.26 s.

La Figura 5 mostra i valori delle pressioni registrate a fondo pozzo per i due cluster A e B e il volume totale di gas presente nel serbatoio (dati comunicati da Ital Gas Storage). Nel cluster A sono attivi 6 pozzi, nel cluster B sono attivi 4 pozzi. Dai grafici si può notare come nel periodo di avvio dello stoccaggio ci sia stata una sequenza alternata di fasi di iniezione e fasi di fermo delle attività che ha comportato la riduzione dell'accumulo locale di stress. Il volume di gas immagazzinato nel serbatoio è cresciuto gradualmente fino a circa 90,000,000 Smc alla data di fine aprile.

Valutando la lista degli eventi localizzati dalla RMCL nell'intero periodo di rilevazione si possono fare le seguenti considerazioni:

- la sismicità rilevata permane a livelli molto bassi;
- non si riscontrano cambiamenti nei tassi di sismicità o nella distribuzione degli eventi sismici successivamente all'avvio delle attività di stoccaggio;
- vengono confermati due livelli di profondità della sismicità ben distinti: uno profondo a circa 30-40 km di profondità, e uno superficiale a profondità comprese tra 2 e 5 km.

Dato il numero esiguo di eventi avvenuti non è possibile effettuare al momento nessuna analisi atta a migliorare il modello in funzione delle osservazioni. Dunque, le localizzazioni fornite in Tabella 7 e raffigurate in Figura 3, per quanto sicuramente indicative, non possono ancora essere considerate definitive.





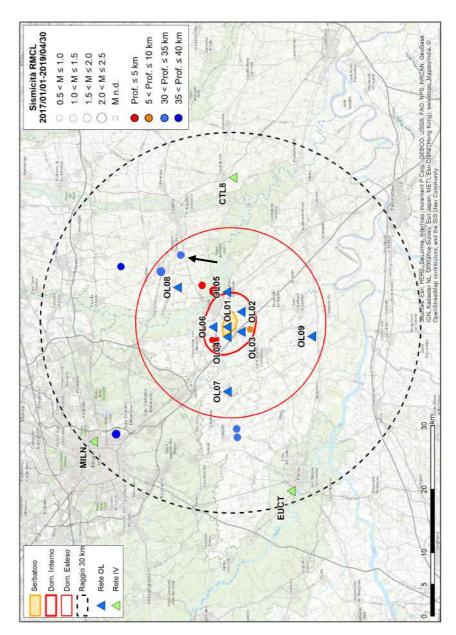


Figura 3 – Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2019, a distanza ≤ 30 km dal sito di stoccaggio (pannello a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione. La freccia nera indica l'evento del 25/4/2019. Altri dettagli nelle legende. Continua alla pagina seguente.





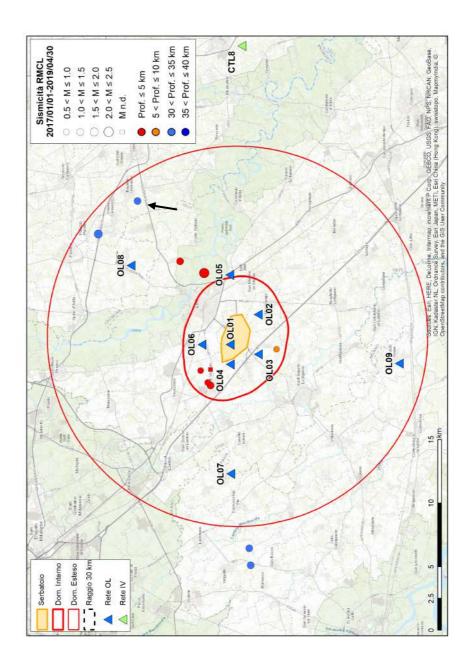


Figura 3, continua dalla pagina precedente.



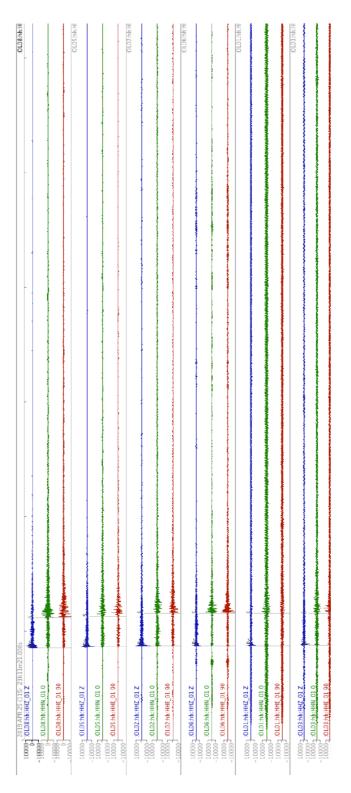
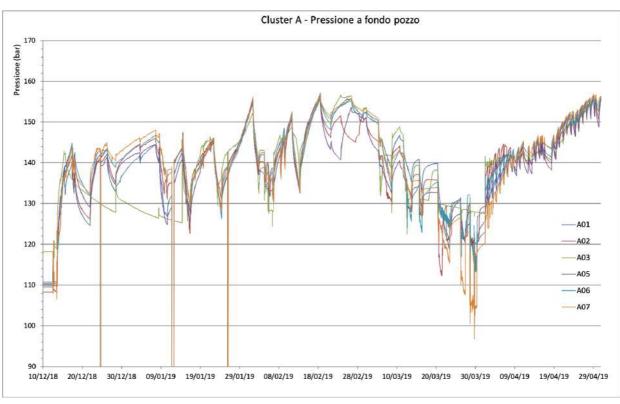


Figura 4 – Forme d'onda registrate per l'evento ML1.5 del 25/4/2019 ore 23:11:31 avvenuto nell'AE. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL08, OL05, OL02, OL06, OL01 e OL03. Le linee verticali indicano i tempi di arrivo delle fasi P ed S, rilevati manualmente.







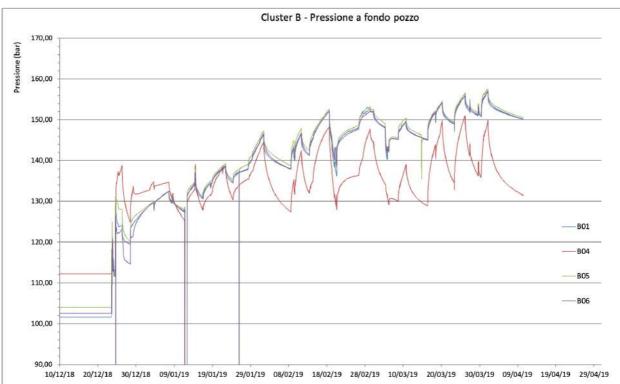


Figura 5 – Pressione a fondo pozzo (Bottom Hole Pressure – BHP) rilevate nei pozzi attivi dei due cluster (A e B rispettivamente nei pannelli a e b), e volume totale del gas presente nel serbatoio (c, pagina successiva).



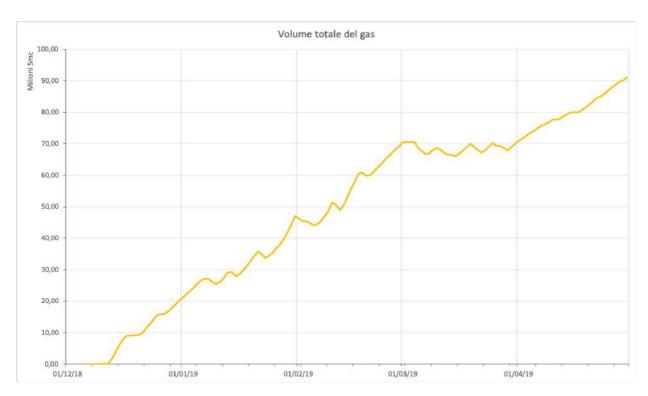


Figura 5, continua da pagina precedente.





2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali





2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01

La stazione OL01, ubicata vicino al 'Cluster A' dell'impianto di Cornegliano Laudense, ospita sia la stazione sismometrica sia la stazione GNSS (Global Navigation Satellite System). La stazione GNSS è operativa da fine ottobre 2016 ed è in grado di ricevere i segnali dei seguenti sistemi satellitari di navigazione: GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, SBAS e BeiDou.

I dati (file RINEX, Receiver Independent Exchange Format) della stazione GNSS OL01, sono stati elaborati al fine di ottenere delle stime giornaliere delle coordinate e conseguire le serie temporali secondo due sistemi di riferimento: il sistema internazionale ITRF08 (International Terrestrial Reference Frame 2008, http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/) e quello europeo EURA (Altamimi et al., 2012).

Le stazione OL01 è stata inquadrata rispetto:

- al sistema di riferimento globale ITRF08 riferito al centro di massa della Terra con asse Z passante per l'asse terrestre e assi X e Y giacenti sul piano equatoriale. L'epoca di riferimento per le soluzioni dell'ITRF08 è il 2008.
- al sistema di riferimento europeo EURA che evidenzia i movimenti della crosta terrestre rispetto alla placca euroasiatica, considerata come un blocco fisso; in questo modo la rappresentazione dello spostamento non risente del movimento delle grandi placche a livello globale, ma si riferisce alla sola placca europea, permettendo un'analisi dei movimenti tettonici a scala regionale e locale, di maggiore interesse in relazione all'attività di stoccaggio del gas.

Ai segnali della stazione OL01 è stata applicata l'elaborazione standard del software GAMIT/GLOBK; di seguito sono ripotate le configurazioni principali di GAMIT/GLOBK utilizzate per la stima delle serie temporali come già evidenziato al paragrafo 2.1.1 della relazione sulle attività iniziali (Priolo et al., 2018).

2.1.1 Dati elaborati

Il dataset della stazione OL01, registrato in file di formato RINEX, è disponibile in sessioni giornaliere e con campionamento a 30 secondi (2880 osservazioni quotidiane). L'elaborazione è stata compiuta fino alla data del 31/05/2019 in quanto, per consentire una riduzione dell'errore sulla componente verticale, è necessario





inserire nel calcolo modelli atmosferici (Tregoning et al., 2005) prodotti dal MIT (Massachusetts Institute of Technology) e disponibili con un ritardo di oltre un mese (ftp://everest.mit.edu). I file RINEX registrati fino al 31/05/2019 sono 743, così come le giornate elaborate. Dalle serie temporali si nota la mancanza di dati all'inizio dell'anno 2017 dovuto a problemi riconducibili all'alimentazione del ricevitore GNSS, ma successivamente risolti. L'elaborazione dei dati ha prodotto 683 soluzioni pari al 91,9% dei dati iniziali. Ciò indica la disponibilità di un *dataset* formalmente corretto e adatto all'elaborazione con il pacchetto GAMIT/GLOBK.

La stazione GNSS OL01 è stata inquadrata all'interno di una rete di stazioni permanenti denominata Rete GNSS LODI (Figura 6) utilizzando le seguenti 4 stazioni appartenenti alla Rete SPIN:

- CREA (Crema), baseline pari a 18.6km;
- CREM (Cremona), baseline pari a 45.1km;
- MILA (Milano), baseline pari a 27.9km;
- PAVI (Pavia), baseline pari a 27.6km.



Figura 5 – La rete utilizzata per l'inquadramento della stazione GNSS OL01. Essa comprende le stazioni GNSS MILA (Milano), PAVI (Pavia), CREM (Cremona) e CREA (Crema).

Queste stazioni sono a loro volta inquadrate nel sistema ETRF2000(2008.0) con le coordinate fornite da SPIN GNSS secondo l'inquadramento della Rete Dinamica Nazionale gestita dall'Istituto Geografico Militare. Il risultato dell'inquadramento della stazione OL01 è mostrato in Tabella 7.

Per il calcolo delle serie temporali, oltre alle stazioni IGS sono state utilizzate le stazioni GNSS appartenenti alla Rete SPIN.





SITE CODE	LOCALITA'	RICEVITORE	ANTENNA	LAT	QUOTA [m]
PAVI	Pavia	TPS NET-G5 (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45°12'10,73212"N 9°08'10,10393"E	143,636
MILA	Milano	TPS NET-G3 (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45°28'47,94818"N 9°13'45,62699"E	187,275
CREM	Cremona	TPS ODYSSEY_E (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45°08'47,92729"N 10°00'07,02572"E	102,736
CREA	Crema	TPS ODYSSEY_E (GPS+GLO)	TPSCR3_GG D CONE	45°21'15,59235"N 9°41'07,09675"E	129,818
OL01	Cornegliano Laudense	TPS NET-G5 (GPS+GLO)	CR-G5 (TPSH)	45°17'28,17435"N 9°27'53,47318"E	121,254

Tabella 7 - Coordinate ETRF2000(2008.0) delle stazioni PAVI, MILA, CREM e CREA utilizzate per la georeferenziazione del sito OL01.

2.1.2 Risultati ottenuti

Riportiamo qui di seguito le serie temporali stimate per ciascun sito della Rete GNSS LODI. Come detto i risultati delle elaborazioni coprono il periodo temporale 1/1/2017 - 31/05/2019.

Le serie sono disponibili in due sistemi di riferimento diversi: quello internazionale (ITRF08, le cui serie sono mostrate in Appendice B) e quello europeo (EURA, le cui serie sono mostrate nelle Figure 6-10). Nel sistema internazionale gli spostamenti e le velocità sono stimati rispetto a un sistema inerziale geocentrico che rende evidente i moti legati alla deriva dei continenti; i tassi sono abbastanza importanti e, ad esempio per la componente orizzontale, si attestano su alcune decine di mm/anno per tutti i siti GPS. Nel sistema EURA (Altamimi et al., 2012) gli spostamenti sono stimati rispetto al blocco europeo (o Eurasia), in cui a ciascun sito della rete è sottratto il moto medio della placca europea. Nel sistema EURA quindi gli spostamenti sono nettamente ridotti rispetto a quello ITRF e, ad esempio la velocità sul piano orizzontale si riduce ad alcuni mm/anno. I grafici delle serie temporali consentono un'analisi più dettagliata del comportamento di ciascuna stazione GPS; in tal modo si ha una stima del movimento della stazione prima dell'attività di stoccaggio.

Per facilitare il confronto fra la stazione OL01 e gli altri siti elaborati, sono state costruite delle serie temporali contenenti solo i giorni che presentano dati della stazione OL01. Confrontando le serie delle stazioni della Rete GNSS LODI, si nota un andamento congruente tra i sistemi ITRF ed EURA. In particolare la stazione OL01 si comporta, in special modo sulla direzione UP, come le stazioni CREA, CREM, MILA e PAVI; questo fattore evidenzia come i dati e le relative misure dalla stazione OL01





siano rappresentative per una larga parte del territorio su cui la stazione è installata.

La Tabella 8 mostra le stime di velocità della deformazione per le 5 stazioni del frame di riferimento. Nel sistema di riferimento ITRF, dove ci attendiamo spostamenti molto più marcati, i valori sono simili per tutte le stazioni GNSS (dai 16.25 mm/anno ai 17.26 mm/anno sulla coordinata Nord e dai 18.95 mm/anno ai 20.84 mm/anno sulla coordinata Est) e si scostano di pochissimo rispetto a quelli stimati nel precedente rapporto.

Per il riferimento Euroasiatico (EURA) le stime di velocità della stazione OL01 devono essere considerate ancora preliminari per due principali motivi. Il primo è che i dati disponibili non sono ancora sufficienti per una stima affidabile di velocità di deformazione così ridotte. Quindi è necessario disporre di un periodo di osservazione più lungo. La seconda è che il sito è di nuova fattura e l'intervallo di tempo per cui sono disponibili i dati rientra nel periodo di stabilizzazione della monumentazione. Si può notare che la velocità nella direzione UP non subisce variazioni nei due sistemi di riferimento ITRF ed EURA, e oscilla fra valori pari a -1.43 mm/anno (MILA) e -4.28 mm/anno (OL01).

I risultati ottenuti fino a qui relative alle stazioni analizzate (Rete GNSS LODI) permetteranno, tramite il confronto con le stazioni CREA, CREM, MILA e PAVI, di valutare le variazioni di carattere strettamente locale nei movimenti della stazione OL01.

		ITRF08		EURA			
	Vel. Nord	Vel. Est	Vel. Up	Vel. Nord	Vel. Est	Vel. Up	
	[mm/anno]	[mm/anno]	[mm/anno]	[mm/anno]	[mm/anno]	[mm/anno]	
OL01	17.26	18.95	-3.40	1.25	-1.96	-4.28	
CREA	16.25	20.61	-2.53	-0.03	-0.24	-3.35	
CREM	16.61	20.84	-2.31	0.29	-0.12	-3.07	
MILA	16.49	20.10	-1.43	0.10	-0.61	-2.18	
PAVI	16.38	20.53	-2.46	-0.07	-0.20	-3.30	

Tabella 8 - Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nel sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. In grassetto e colore rosso le stime ottenute per la stazione OL01.

Un ultimo confronto (Figura 11) è stato fatto comparando le cinque stazioni OL01, CREA, CREM, MILA e PAVI; in particolare sono state confrontate le serie temporali di velocità nelle diverse componenti togliendo da ciascuna il proprio trend precedentemente calcolato (rispetto al sistema di riferimento EURA). La Figura 11 mostra, al netto di ciascuna velocità, le variazioni e gli spostamenti marcatamente locali.

Osservando il grafico si nota come per quanto riguarda gli spostamenti sia sul piano che in quota, tutti e cinque i siti si comportino allo stesso modo: l'andamento delle





serie temporali risulta quasi sovrapponibile e non si evincono spostamenti locali significativi. Al momento, l'elaborazione copre solo la primissima parte dell'attività di stoccaggio iniziata il 12/12/2018 — l'elaborazione dei dati GNSS della stazione OL01 termina il 31/05/2019 — e, in prima battuta, non si osservano innalzamenti anomali del terreno.



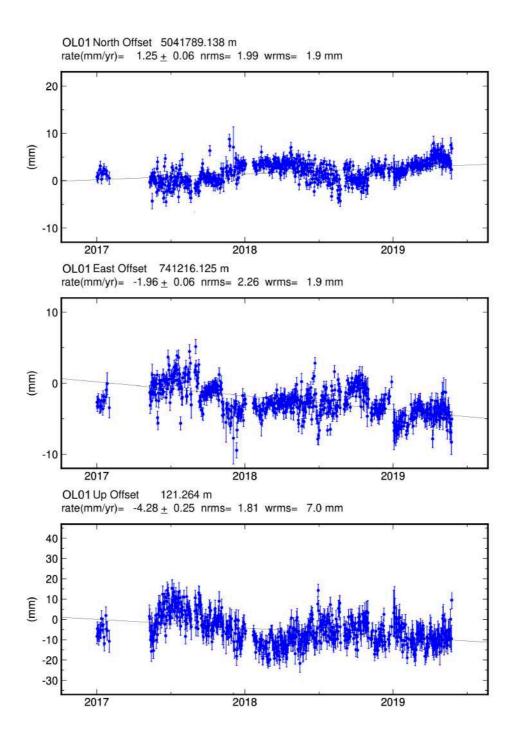


Figura 6 – Serie temporale di OL01 secondo il sistema di riferimento EURA. Nel primo grafico in alto è presente lo spostamento nella direzione NORD della stazione OL01 durante il periodo di misura. Ogni punto sul grafico è lo spostamento stimato giornaliero in mm. Ad ogni punto è sovrapposta la barra di errore che rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere. Sul grafico è presente la retta interpolante la cui inclinazione fornisce una stima di velocità, con il relativo errore, che è visibile sullo stesso grafico in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti inoltre il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato). Nei due grafici successivi sono riportate le stesse informazioni per gli spostamenti in direzione EST e in verticale.





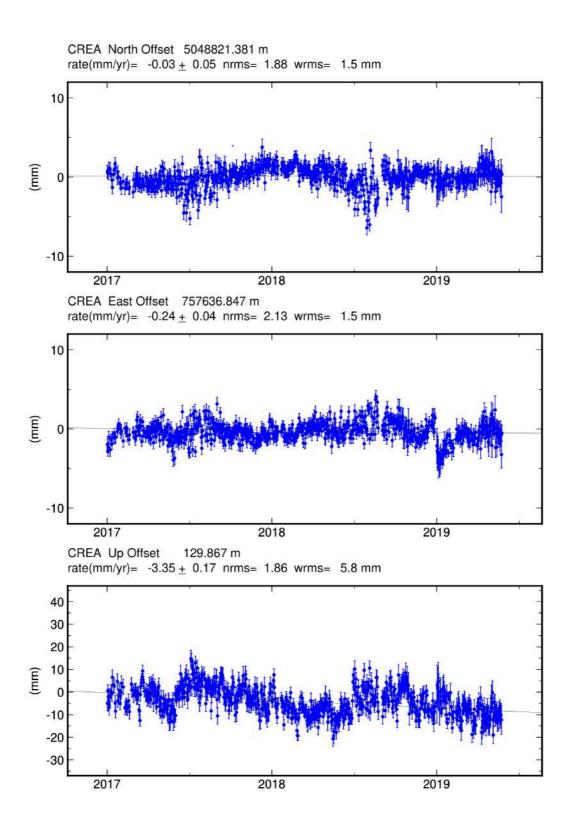


Figura 7 – Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 6.





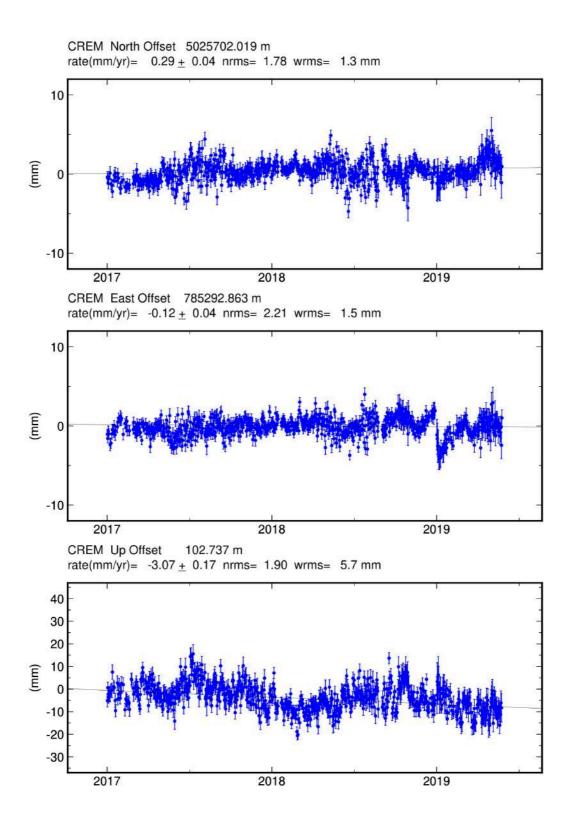


Figura 8 – Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 6.





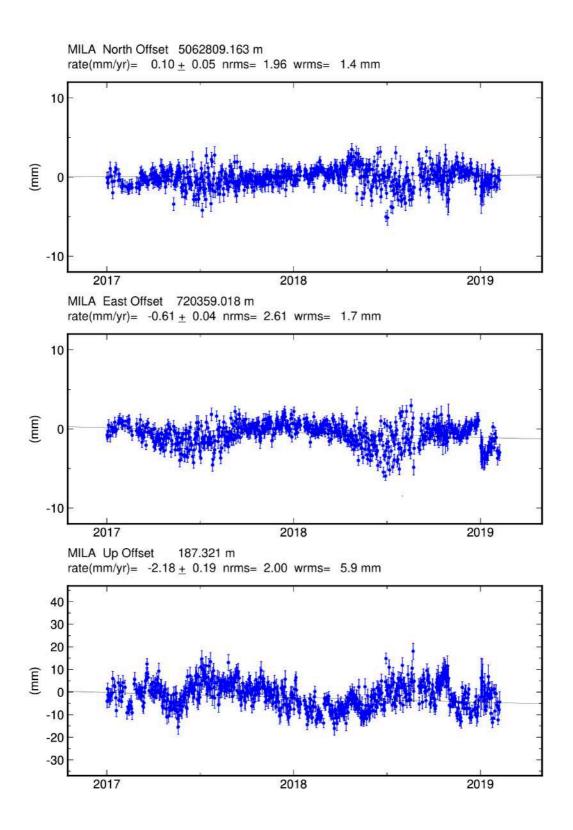


Figura 9 – Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 6.





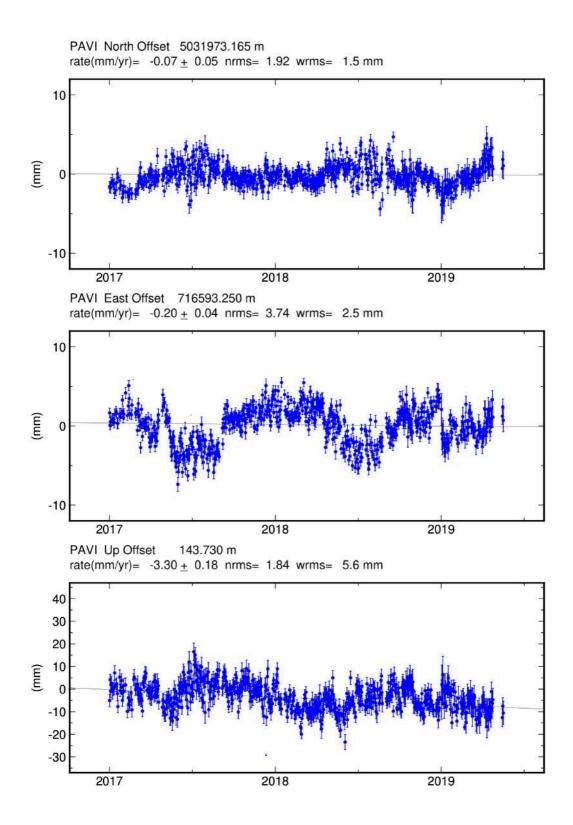


Figura 10 – Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 6.





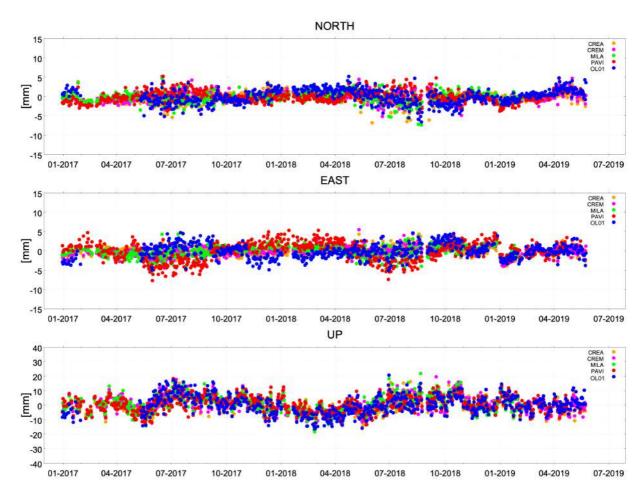


Figura 11 - Serie temporali NORTH, EAST, UP delle cinque stazioni considerate OL01 (punti blu), CREA (punti arancioni), CREM (punti magenta), MILA (punti verdi) e PAVI (punti rossi) al netto dei trend di velocità calcolati secondo il sistema di riferimento europeo EURA; le serie temporali sono state sovrapposte al file di identificare eventuali spostamenti locali.





2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2019 (dati SENTINEL-1)

L'analisi interferometrica mediante la tecnica SBAS-DInSAR è stata effettuata utilizzando i dati Sentinel-1 (S-1) relativi all'area di interesse e corrispondenti a 200 immagini acquisite lungo orbite ascendenti e 191 lungo orbite discendenti, relative al periodo marzo 2015 – maggio 2019; in Figura 12 è mostrata la distribuzione dei dati S-1 nel piano tempo/baseline perpendicolare. Con tali dati sono stati generati, rispettivamente, 553 e 528 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato il DEM SRTM dell'area con uno spacing di circa 30 m (1 arcsec). Sia gli interferogrammi differenziali, sia le successive mappe e serie temporali di deformazione hanno una risoluzione spaziale di circa 30 m x 30 m, ottenuta a valle di un'operazione di multilooking, e sono stati

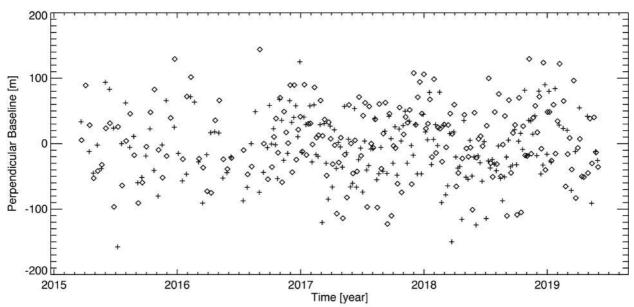


Figura 12 - Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti.





campionati sulla stessa griglia del DEM utilizzato per l'elaborazione. L'estensione spaziale dell'area analizzata è di circa 190 km x 70 km. Poiché, diversamente dalle mappe e serie temporali di deformazione ottenute dai dati ERS-1/2 e ENVISAT, non esiste ancora una validazione estesa dei prodotti DInSAR generati a partire dai dati S-1 (anche a causa della ancora ridotta estensione temporale delle serie acquisite) è stata effettuata una validazione dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GPS ricavate dal database MAGNET (http://geodesy.unr.edu/magnet.php). Si sottolinea, però, che nelle analisi dei prossimi anni si provvederà ad utilizzare i risultati GPS ottenuti da OGS, non appena le serie temporali prodotte risulteranno essere sufficientemente estese.

Sia per l'elaborazione ascendente, sia per quella discendente è stato scelto come punto di riferimento (anche detto punto d'aggancio) un pixel nell'area urbana di Pavia nei pressi della corrispondente stazione GPS che, come testimoniato dalle relative misure GPS, risulta non essere affetto da deformazione. Si segnala inoltre che, combinando opportunamente i risultati ottenuti dai dati S-1 acquisiti dalle orbite ascendenti e discendenti, sono state generate sia le mappe, sia le serie temporali di deformazione delle componenti verticale ed Est-Ovest degli spostamenti rilevati.

Nei paragrafi seguenti si descrivono nel dettaglio i risultati delle analisi interferometriche effettuate utilizzando i dati discendenti e ascendenti (paragrafi 2.2.1 e 2.2.2 rispettivamente), e quelli relativi alla loro combinazione (2.2.3).

Si sottolinea che tutti i risultati mostrati fanno riferimento all'area comune ed ai pixel comuni alle analisi effettuate sui dati acquisiti dalle orbite discendenti ed ascendenti da parte dei satelliti Sentinel-1A (S-1A) e Sentinel-1B (S-1B) che compongono la costellazione. In Tabella 9 sono indicate le principali caratteristiche comuni ai due dataset S-1 utilizzati, mentre in Tabella 10 sono riportati i dettagli di ciascun dataset (numero di acquisizioni e interferogrammi considerati, e il corrispondente intervallo temporale).

Lunghezza d'onda	5.56 cm		
Risoluzione spaziale nominale	~ 15 m x 4 m		
Risoluzione spaziale dei risultati interferometrici	~ 30 m x 30 m		
Estensione spaziale	~190 km x 70 km		
Periodo di osservazione	marzo 2015 – maggio 2019		

Tabella 9 - Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati.

	Periodo di osservazione	Numero di acquisizioni utilizzate	Numero di interferogrammi
Discendente	22/03/2015-30/05/2019	191	528
Ascendente	23/03/2015-31/05/2019	200	553

Tabella 10 - Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati.





2.2.1 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – maggio 2019)

L'analisi interferometrica sull'area di interesse è stata effettuata utilizzando dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 lungo orbite discendenti (track 168). In particolare, sono stati utilizzati 191 dati satellitari acquisiti nel periodo marzo 2015 – maggio 2019 la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in Figura 13; grazie ad essi sono stati generati 528 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in Figura 14, dove viene mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione, proiettata lungo la linea di vista del sensore, di seguito indicata come Line of Sight (LOS), e sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata; i punti affetti da rumore di decorrelazione, per i quali la misura di deformazione non può essere considerata affidabile, non sono mostrati.

Le serie temporali SBAS-DInSAR generate sono state confrontate con le corrispondenti serie GPS di deformazione ottenute dal database MAGNET. In particolare, in Figura 14 sono evidenziate le posizioni delle sei stazioni GPS

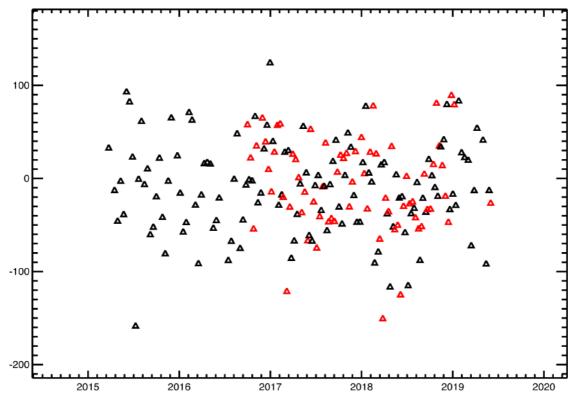


Figura 13 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.





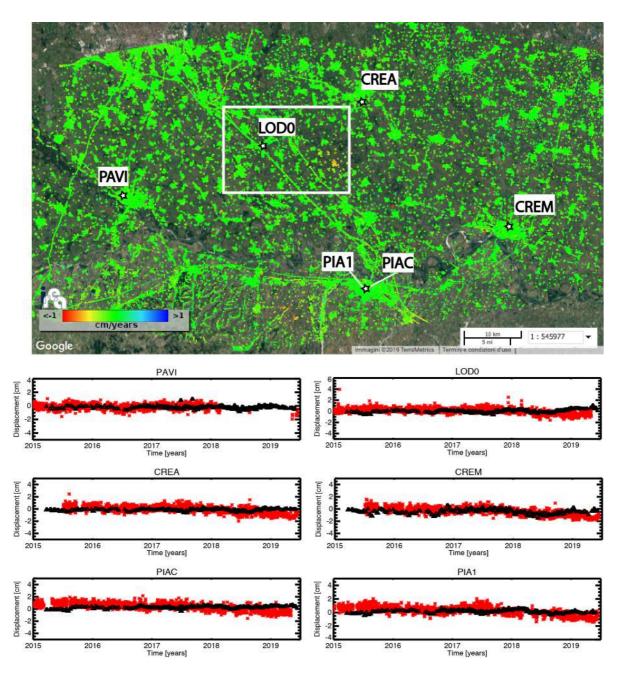


Figura 14 - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - maggio 2019. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 6 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 15.





prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline bianche) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri).

Come si evince dai grafici, i confronti tra le misure radar DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo. Ciò è anche confermato dai valori delle differenze rms calcolati tra le serie storiche delle due misure di deformazione. In particolare, il valor medio delle suddette deviazioni standard relative alle stazioni GPS considerate è inferiore a 0.5 cm, il che è consistente con la stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In Figura 15 viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di Figura 14 sull'area di interesse. Si riportano inoltre alcuni grafici che mostrano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati a Ovest di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3 in Figura 15) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 in Figura 15).

Dall'analisi effettuata non si rilevano deformazioni significative (superiori a 2–3 mm/anno) nell'area di Cornegliano Laudense; le uniche deformazioni rilevanti riscontrate, sono strettamente localizzate nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio. Tale area mostra, anche nelle analisi S-1, un trend di deformazione sostanzialmente lineare con un tasso che varia da 0.5 a 1 cm/anno.

2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 - maggio 2019)

Come detto, l'analisi interferometrica sull'area di interesse è stata effettuata utilizzando dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 nel periodo marzo 2015 – maggio 2019 lungo orbite ascendenti (track 15). In particolare, sono stati utilizzati 200 dati satellitari, la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in Figura 16, con i quali sono stati generati 553 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in Figura 17, dove viene mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione in LOS sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata; i punti affetti da rumore di decorrelazione, per i quali la misura di deformazione non può essere considerata affidabile, non sono mostrati.





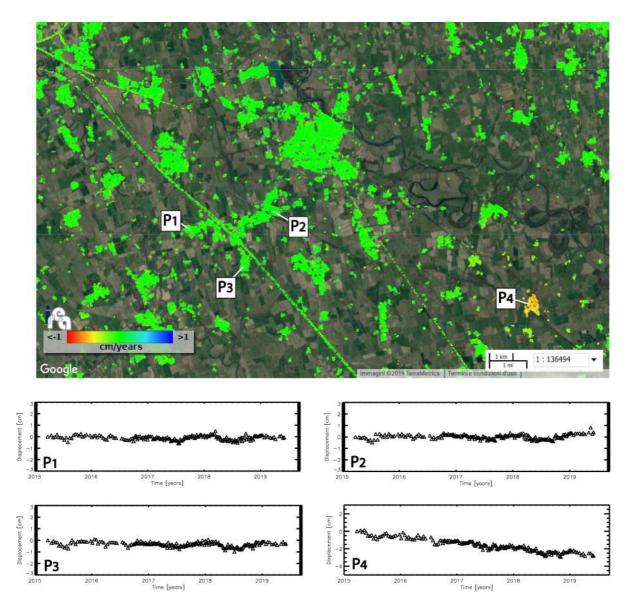


Figura 15 - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 14 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - maggio 2019.

Analogamente a quanto fatto nel paragrafo precedente, anche le serie temporali DInSAR generate dal dataset relativo alle orbite ascendenti sono state confrontate con le corrispondenti serie GPS di deformazione ottenute dal database MAGNET. In particolare, in Figura 17 sono rappresentate le sei stazioni GPS prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline bianche) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi





rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Come si evince dai grafici, i confronti tra le misure DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo, come anche testimoniato dai valori di residuo rms delle differenze tra le due misure di spostamento, il cui valor medio è inferiore a 0.5 cm. Tale valore è consistente con la stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura. In Figura 18 viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di Figura 17 sull'area di interesse.

Si riportano, inoltre, alcuni grafici che mostrano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3 di Figura 18) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 di Figura 18).

Dall'analisi effettuata non si rilevano deformazioni significative (superiori a 2–3 mm/anno) nell'area di Cornegliano Laudense; le uniche deformazioni rilevanti riscontrate, sono strettamente localizzate nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio. Tale area mostra, anche nelle analisi S-1, un trend di deformazione sostanzialmente lineare con un tasso che varia da 0.5 a 1 cm/anno.

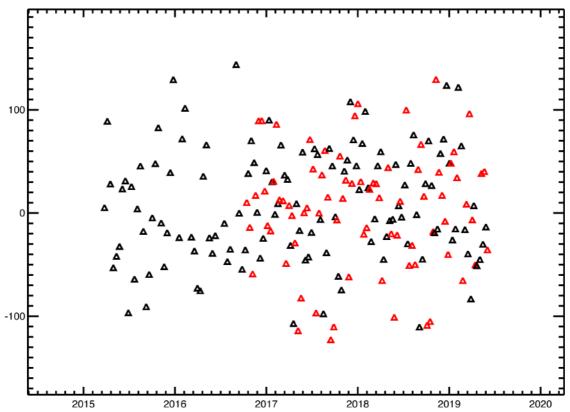


Figura 16 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B.





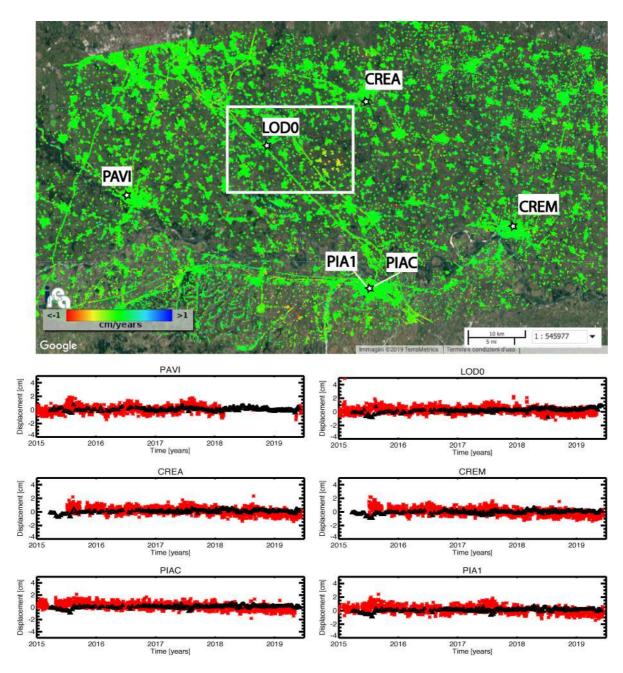


Figura 17 - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - maggio 2019. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 6 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 18.





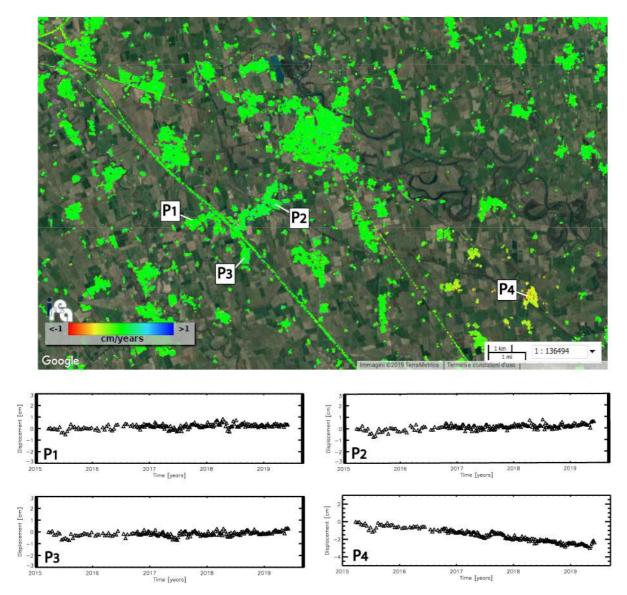


Figura 18 - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 17 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 - maggio 2019.





2.2.3 Analisi SBAS Sentinel-1: mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della deformazione superficiale

Le mappe di velocità media relative alle componenti verticale ed Est-Ovest delle deformazioni rilevate, ottenute combinando opportunamente le informazioni ricavate dalle analisi effettuate dalle orbite ascendenti e discendenti, sono riportate nelle Figure 19 e 20, rispettivamente. Anche in questo caso, utilizzando le misure delle sei stazioni GPS del database MAGNET indicate sulle mappe, sono stati effettuati i confronti tra le serie di deformazione GPS e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (asterischi rossi e triangoli neri, rispettivamente). In particolare in Figura 19 si mostrano i grafici dei confronti effettuati per la componente verticale della deformazione; le deviazioni standard delle differenze tra le due misure di spostamento presentano un valor medio pari a circa 0.4 cm. In Figura 20, analogamente, si mostrano i grafici dei confronti effettuati per la componente Est-Ovest della deformazione; in questo caso le deviazioni standard delle differenze tra le due misure di spostamento presentano un valor medio inferiore a 0.3 cm.

Da tale analisi si evince che in entrambi i casi i confronti tra le misure DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo e i valori di deviazione standard sono consistenti con le accuratezze della tecnica SBAS riportate in letteratura.

Le Figure 21 e 22 mostrano le mappe delle velocità medie di deformazione relative, rispettivamente, alla componente verticale ed Est-Ovest dello spostamento e rappresentano un ingrandimento della zona identificata dal rettangolo bianco nelle Figure 19 e 20. Sono inoltre rappresentati i grafici relativi all'andamento temporale della deformazioni di quattro punti selezionati. L'analisi dei risultati mostrati nelle Figure 21 e 22 evidenzia che anche nel periodo 2015-2019 non si rilevano deformazioni significative (superiori a 2–3 mm/anno) nell'area di Cornegliano Laudense (punti P1, P2, P3); le uniche deformazioni rilevanti riscontrate, sono strettamente localizzate nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio. Tale area mostra, anche nelle analisi S-1, una significativa componente verticale (punto P4) con un tasso il cui valore massimo è di circa 1 cm/anno.





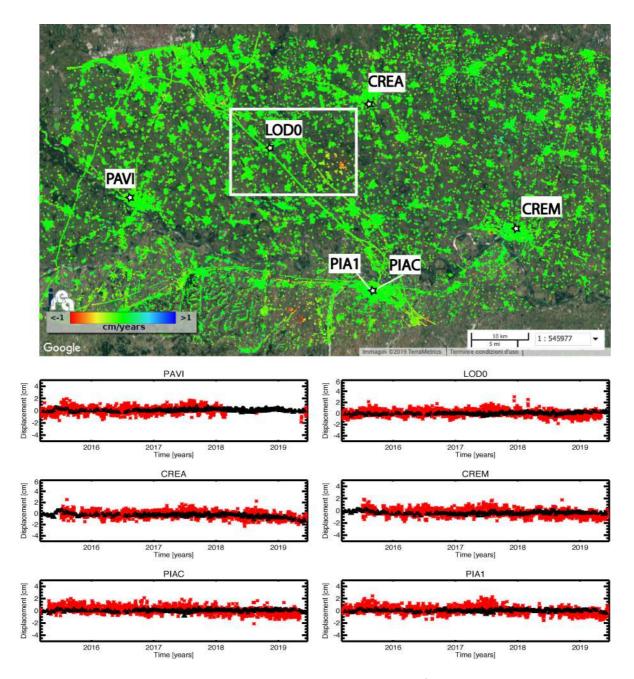


Figura 19 - Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 6 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GPS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri).





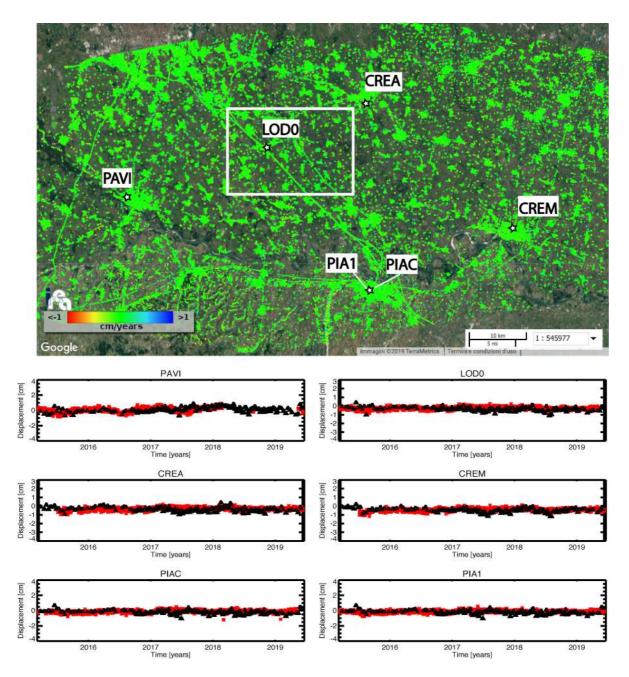


Figura 20 - Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 6 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline bianche, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS in direzione Est-Ovest (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri).





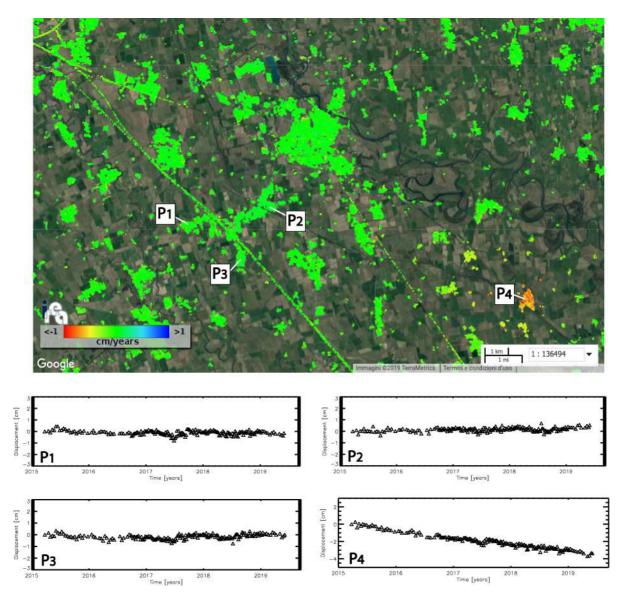


Figura 21 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 19 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. I grafici riportano l'andamento temporale della componente verticale dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).





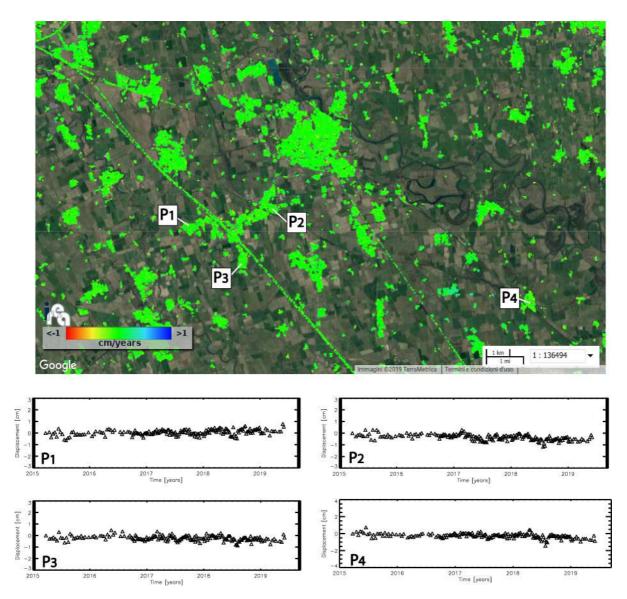


Figura 22 - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 20 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. I grafici riportano l'andamento temporale della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).





3. Conclusioni

Monitoraggio sismico

L'infrastruttura di monitoraggio denominata RMCL, costituita da 9 stazioni sismometriche strumentate in pozzo e superficie e da una stazione di posizionamento satellitare, è operativa dal 1 gennaio 2017. Il presente rapporto riguarda il periodo di quattro mesi 1/1/2019-30/4/2019 che comprende la data di avvio delle attività di stoccaggio, che sono iniziate il 12/12/2018. Ricordiamo che le attività di monitoraggio che hanno preceduto l'avvio dello stoccaggio (le cosiddette "attività iniziali") sono state rendicontate nel precedente rapporto n. OGS 2019/9 Sez. CRS 8, per comprendere anche l'analisi dei dati relativi al periodo di tempo corrispondente all'avvio delle attività di stoccaggio (12/12/2018).

Nei quattro mesi rendicontati l'infrastruttura di monitoraggio ha operato correttamente senza interruzioni di rilievo. Sono stati rilevati solo due eventi sismici avvenuti nelle aree di rilevazione della RMCL. La scarsa sismicità rilevata rientra totalmente nella statistica di quella rilevata nei quasi due anni antecedenti l'avvio delle attività di stoccaggio. Non vi sono elementi che indichino nelle aree di rilevazione l'insorgenza di sismicità legata ai primi mesi di stoccaggio del gas nel deposito naturale.

Monitoraggio delle deformazioni superficiali

Per ciascun sito della Rete GNSS Lodi sono state calcolate le serie temporali fino alla data del 31/5/2019 nei due sistemi di riferimento ITRF08, riferito al centro di massa della Terra, ed EURA, solidale con la placca continentale europea. Ricordiamo che l'elaborazione è stata compiuta fino alla data del 31/5/2019 in quanto, per consentire una riduzione dell'errore sulla componente verticale, è necessario inserire nel calcolo modelli atmosferici che sono disponibili con un ritardo di oltre un mese.

La stazione OL01 si comporta, in special modo sulla coordinata UP, come le stazioni CREA, CREM, MILA e PAVI evidenziando un comportamento preminentemente influenzato dal territorio su cui sono installate. Durante i primi 4 mesi del 2019 i dati GNSS della stazione non evidenziano innalzamenti anomali del terreno.

È stata inoltre effettuata l'analisi relativa alla distribuzione spaziale delle deformazioni superficiali ed alla loro evoluzione temporale nell'area di interesse, mediante l'utilizzo





di dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR), elaborati tramite la tecnica avanzata di Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) nota con l'acronimo SBAS (Small BAseline Subset) e sviluppata presso l'IREA-CNR. In particolare sono state generate mappe e serie temporali della deformazione superficiale relative all'area di interesse utilizzando sia dati di archivio, sia di recente acquisizione fino al 31/5/2019.

Per quanto riguarda i dati di archivio, l'analisi interferometrica condotta utilizzando congiuntamente dati SAR acquisiti dai sensori ERS-1/2 ed ENVISAT dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) lungo orbite discendenti ed ascendenti, relativi al periodo maggio 1993 – ottobre 2010, non rileva spostamenti significativi (superiori a 2–3 mm/anno) nell'area di Cornegliano Laudense. Tali risultati sono confermati anche dall'analisi delle mappe di velocità media di deformazione relative alle componenti verticale ed Est-Ovest dello spostamento superficiale. Nell'area complessivamente rilevata dai dati satellitari si riconosce un significativo effetto deformativo nell'area di Turano Lodigiano, con un trend di deformazione sostanzialmente lineare, con un tasso di circa 1 e 0.5 cm/anno rispettivamente sulla componente verticale ed Est-Ovest. Tuttavia, dato che il sito di Turano Lodigiano dista circa 15 km dal sito di stoccaggio, le deformazioni misurate in quell'area non possono essere correlate con le attività di stoccaggio.

Per quanto riguarda invece il periodo marzo 2015-maggio 2019, l'analisi interferometrica effettuata utilizzando i dati acquisiti dalla costellazione Sentinel-1 (S-1) del Programma Europeo Copernicus lungo orbite discendenti ed ascendenti mostra risultati in tutto consistenti con quelli ottenuti per gli anni precedenti.

Si evidenzia inoltre che, non esistendo ancora una validazione estesa dei prodotti DInSAR generati a partire dai dati S-1 (anche a causa della ridotta estensione temporale delle serie acquisite) è stata effettuata una dettagliata analisi dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GPS/GNSS ricavate dal database MAGNET (http://geodesy.unr.edu/magnet.php). Tali confronti hanno prodotto valori di residuo rms tra le misure di spostamento DInSAR e quelle geodetiche non superiori a 0.5 cm, risultando quindi assolutamente in linea con l'accuratezza della tecnica SBAS riportate in letteratura. Si sottolinea altresì che nei futuri report si provvederà ad utilizzare i risultati GPS/GNSS ottenuti da OGS appena le serie temporali prodotte risulteranno essere sufficientemente estese temporalmente.

Infine, riguardo all'ultimo breve periodo in cui sono state avviate le operazioni di stoccaggio, neanche i dati DInSAR evidenziano deformazioni del terreno che si discostano da quanto visto nel periodo antecedente. Si segnala che nei futuri report, oltre alle mappe di velocità media e alle serie temporali di deformazione, si introdurrà un'ulteriore analisi volta ad evidenziare l'eventuale presenza di pattern di deformazione annuali periodici, al fine di analizzare ancora più nel dettaglio possibili fenomeni di spostamento del suolo.





Bibliografia

- Altamimi, Z., Me'tivier, L., e Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117(B7):n/a-n/a. B07402.
- Bragato, P. L. e Tento, A. (2005). Local Magnitude in Northeastern Italy. Bull. Seismol. Soc. Am., 95(2):579–591.
- Garbin, M., and E. Priolo (2013). Seismic event recognition in the Trentino area (Italy): Performance analysis of a new semi-automatic system, Seismol. Res. Lett. 84, 65–74, doi: 10.1785/0220120025.
- Lahr, J. C. (1984). HYPOELLIPSE/VAX: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude and First-Motion Pattern, US Geological Survey Open-File Report, 84-519, 76 pp.
- MiSE-UNMIG (2014). Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche, 38 pp.; http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/upload/85_238.pdf
- Priolo E. et al. (2017). Progetto per la realizzazione dell'infrastruttura di monitoraggio sismico per la concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio" presso Cornegliano Laudense (LO). Relazione conclusiva sulla realizzazione dell'infrastruttura. OGS, Sgonico, 6 febbraio 2017. Rel. OGS 2017/13 Sez. CRS 3.
- Priolo E. et al. (2018). Progetto per la realizzazione dell'infrastruttura di monitoraggio sismico per la concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio" presso Cornegliano Laudense (LO). Relazione completa sulle attività iniziali. OGS, Sgonico, 13 novembre 2018. Rel. OGS 2018/77 Sez. CRS 23.
- Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2012). OASIS The OGS Archive System of Instrumental Seismology. In: M. Mucciarelli (Ed.), Tecniche Speditive per la Stima dell'Amplificazione Sismica, Studi teorici ed applicazioni professionali, Aracne Ed., 431-445.
- Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2015a). OASIS

 The OGS Archive System of Instrumental Seismology. Seismological Research Letters,
 86, 978-984, doi: 10.1785/0220140175. Available at
 http://srl.geoscienceworld.org/content/early/2015/02/18/0220140175.full.pdf.
- Priolo E., Romanelli M., Plasencia-Linares M. P., Garbin M., Peruzza L., Romano M. A., Marotta P., Bernardi P., Moratto L., Zuliani D. and Fabris P. (2015b). Seismic Monitoring of an Underground Natural Gas Storage Facility The Collalto Seismic Network. *Seismological Research Letters*, 86, 1, 109-123 + Electronic Supplement.





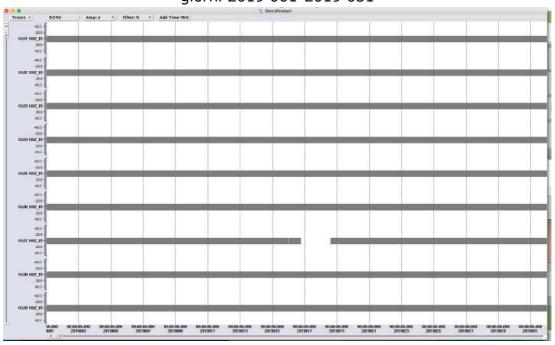
Appendice A - Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL

I grafici raffigurano la disponibilità dei dati registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL) nel periodo 1/1/2019-30/4/2019, considerato in questa relazione. Ogni tabella si riferisce a un mese. Le barre orizzontali grigie indicano la disponibilità dei dati per le stazioni corrispondenti (codice OL##). L'ascissa indica il tempo nel formato anno-giorno (aaaaggg), dove il giorno è il giorno progressivo dell'anno (es: 2017121 corrisponde al 1º Maggio 2017). Per ogni stazione è mostrato solo il canale verticale (HHZ) del sismometro posto in pozzo.

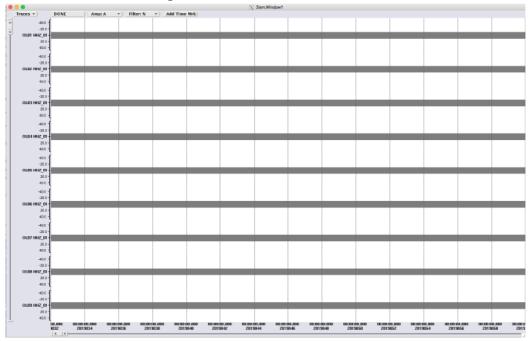




Gennaio 2019 giorni 2019 001-2019 031



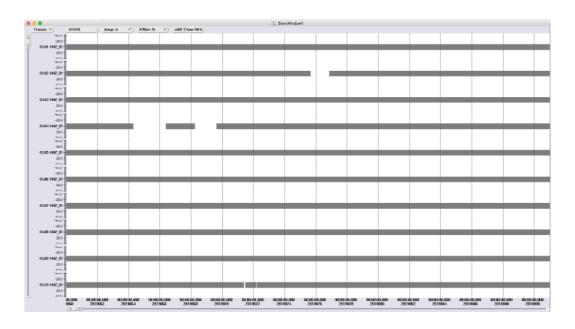
Febbraio 2019 giorni 2019 32 – 2019 059



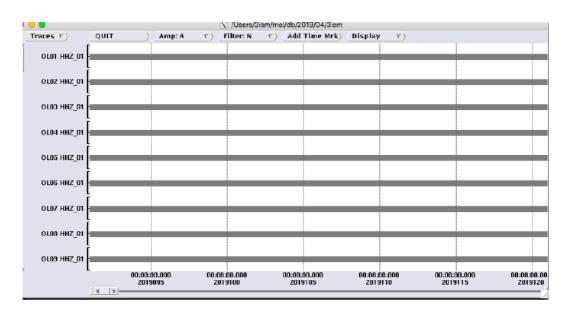




Marzo 2019 Giorni 2019 060 – 2019 090



Aprile 2019 Giorni 2019 091 - 2019 120







Appendice B – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08

In questo capitolo sono riportate le serie temporali delle stazioni GNSS della RETE LODI secondo il sistema di riferimento ITRF08. Ogni figura mostra le serie relative alle tre componenti (dall'alto verso il basso, Nord, Est e verticale verso l'alto) dello spostamento per una stazione. Ogni punto sul grafico è lo spostamento stimato giornaliero in mm. Ad ogni punto è sovrapposta la barra di errore che rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere.

Sul grafico è anche presente la retta interpolante la cui inclinazione fornisce una stima di velocità, con il relativo errore, che è visibile sullo stesso grafico in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti inoltre il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).





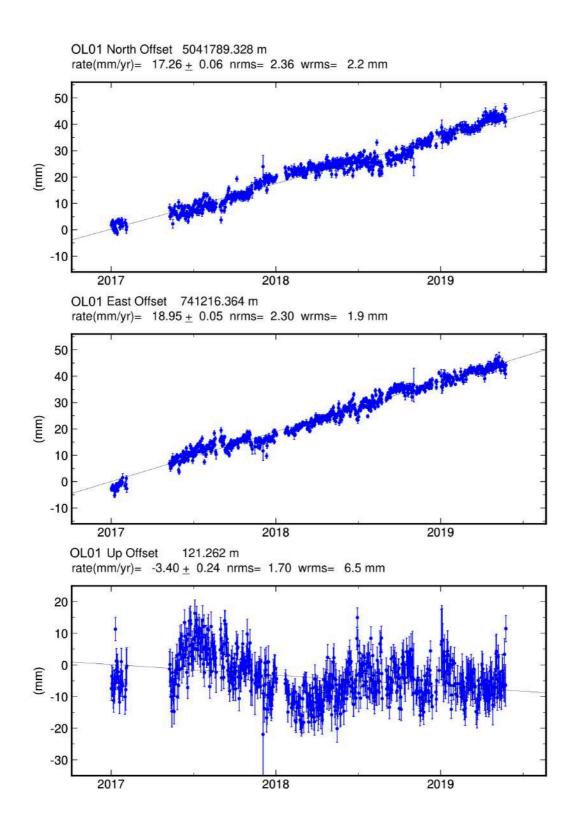


Figura B.1 - Serie temporale della stazione OL01 secondo il sistema di riferimento ITRF08.





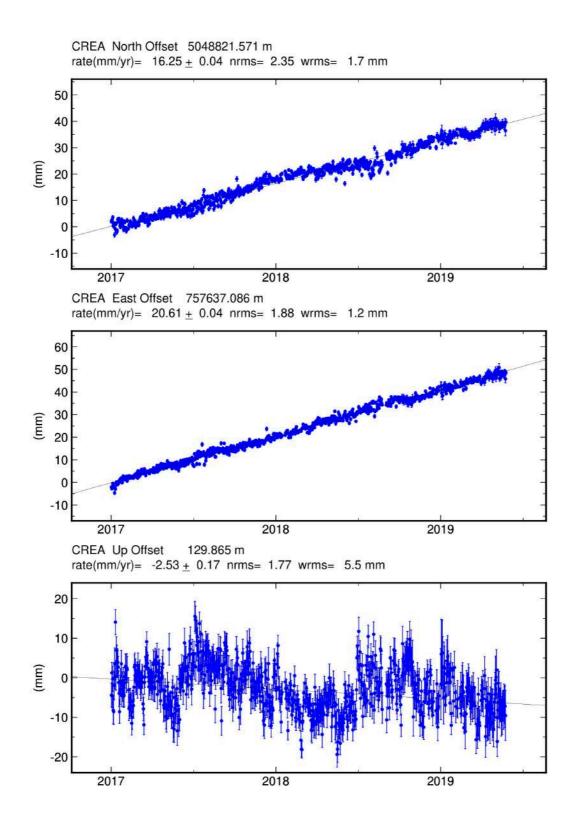


Figura B.2 - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ITRF08.





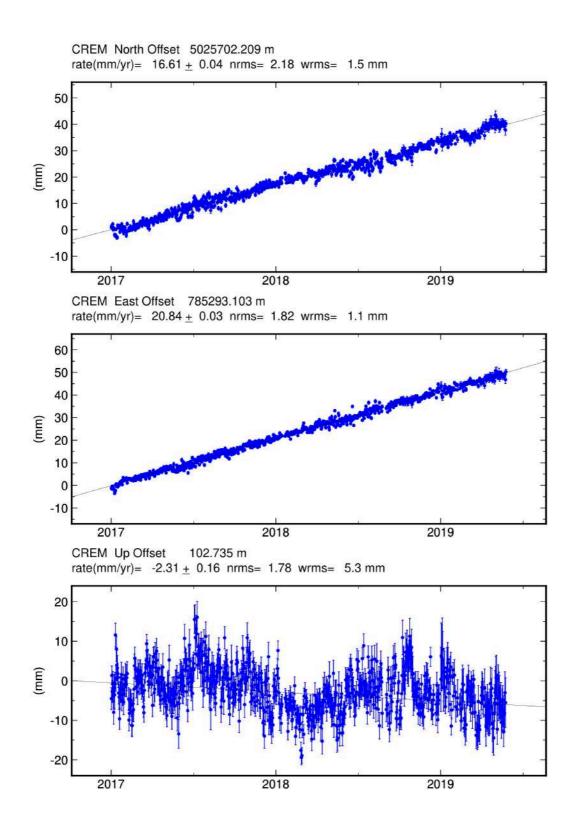


Figura B.3 – Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ITRF08.





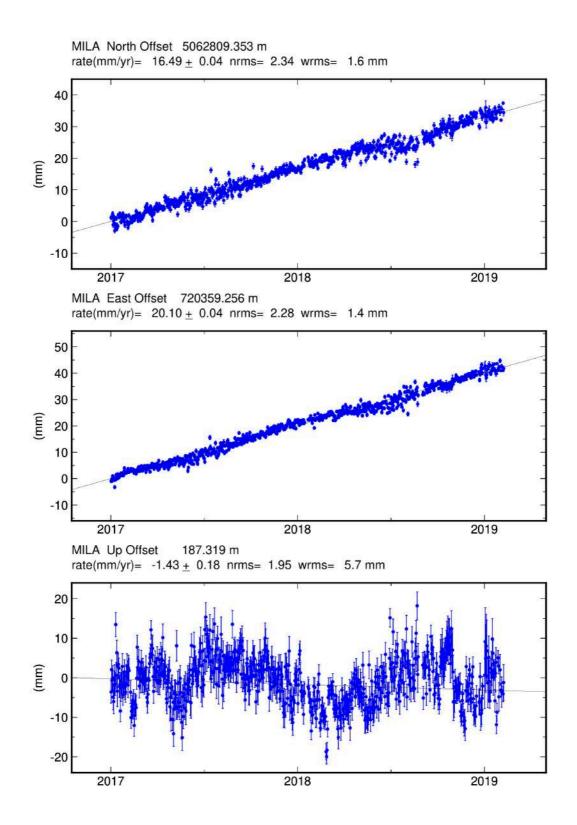


Figura B.4 - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ITRF08.





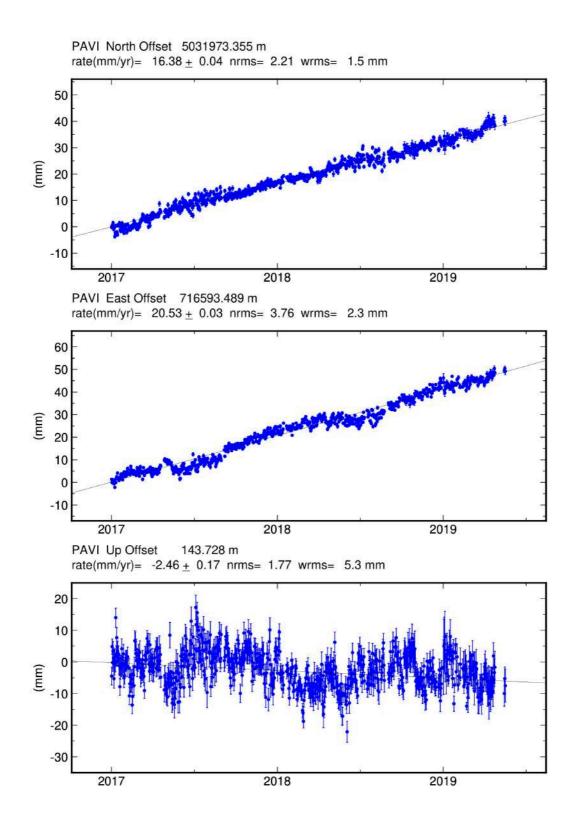


Figura B.5 - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ITRF08.