



# IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "CASTELGIORGIO" *PRESCRIZIONI A1F E A1H DEL MATTM*

Progetto No. P23\_ITW\_044

Doc. No. P23044-X-RL-0

REV.	DATA	PREPARATO DA	CONTROLLATO DA	APPROVATO DA
0	29-Mar-2024	A. Fiordelisi V. Ciani	L. Favaro	P. Basile

Preparato per: ITW&LKW Geotermia Italia S.p.a.

**ITW LKW**  
ITW LKW GEOTERMIA ITALIA S.p.A.

STEAM srl  
Via Ponte a Piglieri 8  
Pisa 56121  
ITALY  
VAT no. IT01028420501

1	INTRODUZIONE .....	1
2	RISPOSTA ALLE PRESCRIZIONI.....	2
	2.1 A.1.F) REALIZZARE LA RETE DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA DESCRITTA NELLO SIA CHE DOVRÀ ENTRARE IN FUNZIONE 6 MESI PRIMA DELL'INIZIO DELLE ATTIVITÀ DI COLTIVAZIONE DEL CAMPO GEOTERMICO. PRIMA DELL'INIZIO DEI LAVORI IL PROPONENTE DOVRÀ PRESENTARE AD ARPA UMBRIA, ARPA LAZIO E AL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE UN DOCUMENTO IN CUI SONO DESCRITTI: - IL NUMERO E LA POSIZIONE DEGLI SCATTER PERMANENTI CHE SI POSIZIONERANNO NELL'AREA (UNO ALMENO SU OGNI POSTAZIONE DEI POZZI); - LA SOGLIA DI ALLARME PER LA SUBSIDENZA RAGGIUNTA PER LA QUALE SI DOVRANNO RIDURRE LE ATTIVITÀ E QUELLA PER CUI LE ATTIVITÀ DOVRANNO ESSERE SOSPESA FINO AL RITORNO DELLA SUBSIDENZA AL DI SOTTO DELLA SOGLIA DI ALLARME. A.1.H) DOVRÀ ESSERE PRESENTATO AD ARPA UMBRIA, ARPA LAZIO ED AL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE, UNA VOLTA ALL'ANNO ED OGNI VOLTA SI DOVESSERO RAGGIUNGERE I LIVELLI DI ALLARME LA MAPPA DELLE DEFORMAZIONI VERTICALE E ORIZZONTALE RILEVATE. ....	2
	2.1.1 MONITORAGGIO .....	4
	2.1.2 FASE 1 – BIANCO IMPERTURBATO.....	7
3	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	24

## INDICE FIGURE

Figura 2.1.1.a-	Esempio di corner reflector .....	5
Figura 2.1.1.b -	Copertura immagini satellitari per l'intera Umbria e per l'area del PR "Castel Giorgio" .	6
Figura 2.1.2.1.a -	Dati InSAR nel periodo 2018-2021 per l'Italia (dati da EGMS Ortho Vertical) .....	8
Figura 2.1.2.1.b –	Area di Studio e ubicazione dei permanent scatters (dati da EGMS).....	9
Figura 2.1.2.1.c –	Istogramma di frequenza delle velocità di deformazione verticale (mm/anno) nell'Area Vasta di Studio (elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical) .....	10
Figura 2.1.2.1.d –	Area di potenziale influenza dell'impianto e ubicazione dei permanent scatters (da EGMS).....	11
Figura 2.1.2.1.e –	Istogramma di frequenza delle velocità di deformazione verticale (mm/anno) nell'Area di potenziale influenza dell'impianto (elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical) .	12
Figura 2.1.2.1.f –	Permanent scatter scelto per l'analisi di dettaglio sull'abitato di Castel Giorgio (da EGMS).....	13
Figura 2.1.2.1.g –	Serie temporale che mostra i dati di spostamento (mm) del permanent scatter preso ad esempio (per l'ubicazione si veda Figura 2.1.2.1.f, elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical).....	14
Figura 2.1.2.1.h –	Rappresentazione grafica dei tassi di deformazione verticale (elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical) .....	15
Figura 2.1.2.2.a -	Dati InSAR nel periodo 2018-2021 per l'Italia (dati da EGMS Ortho East-West).....	17
Figura 2.1.2.2.b –	Istogramma di frequenza delle velocità di deformazione orizzontale (mm/anno) nell'Area Vasta di Studio (elaborazione su dati EGMS Ortho East-West).....	18
Figura 2.1.2.2.c –	Istogramma di frequenza delle velocità di deformazione orizzontale (mm/anno) nell'Area di potenziale influenza dell'impianto (elaborazione su dati EGMS Ortho East-West) .....	19
Figura 2.1.2.2.d –	Serie temporale che mostra i dati di spostamento orizzontale (mm) del permanent scatter preso ad esempio (per l'ubicazione si veda Figura 2.1.2.1.f, elaborazione su dati EGMS East-West).....	20
Figura 2.1.2.2.e –	Rappresentazione grafica dei tassi di deformazioni orizzontale (elaborazione su dati EGMS Ortho East-West) .....	21



## 1 INTRODUZIONE

Con Parere n. 980 del 12 febbraio 2024, la Commissione Tecnica di Verifica dell'Impatto Ambientale – VIA e VAS ha comunicato alla scrivente, che la documentazione atta alla verifica di ottemperanza delle condizioni ambientali A.1.f ed A.1.h del D.M. n. 59 del 3 aprile 2015, relativa al progetto "Impianto Pilota Geotermico denominato Castel Giorgio da realizzarsi in Provincia di Terni, nel Comune di Castel Giorgio (TR)", acquisita al prot. MASE/196800 dell'1/12/2023, non risultava completa.

Si presenta quindi il presente documento contenente il monitoraggio della Subsidenza (movimenti verticali del suolo) in fase ante-operam (Paragrafo 2.1.2) e il piano di monitoraggio post-operam che servirà per Ottemperare alle prescrizioni A.1.f e A.1.h presenti nel D.M. 59 del 03/04/2014, emesso nell'ambito del procedimento di VIA Ministeriale del progetto pilota geotermico "Castel Giorgio".

Il presente documento integra quanto già inviato in data 1/12/2023.

Infatti, l'ottemperanza a tali prescrizioni risulta propedeutica all'inizio delle attività.

Di seguito si riportano le menzionate prescrizioni relative al progetto geotermico "Castel Giorgio":

- A.1.f) Realizzare la rete di monitoraggio della subsidenza descritta nello sia che dovrà entrare in funzione 6 mesi prima dell'inizio delle attività di coltivazione del campo geotermico. prima dell'inizio dei lavori il proponente dovrà presentare ad ARPA Umbria, ARPA Lazio e al ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare un documento in cui sono descritti: - il numero e la posizione degli *scatter* permanenti che si posizioneranno nell'area (uno almeno su ogni postazione dei pozzi); - la soglia di allarme per la subsidenza raggiunta per la quale si dovranno ridurre le attività e quella per cui le attività dovranno essere sospese fino al ritorno della subsidenza al di sotto della soglia di allarme.
- A.1.h) Dovrà essere presentato ad ARPA Umbria, ARPA Lazio ed al ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, una volta all'anno ed ogni volta si dovessero raggiungere i livelli di allarme la mappa delle deformazioni verticale e orizzontale rilevate.

Il progetto in esame consiste nella realizzazione di un impianto geotermoelettrico pilota, con centrale di produzione elettrica a ciclo organico, capace di generare energia elettrica e calore, con assenza di emissioni in atmosfera, sfruttando come fonte di energia primaria fluidi geotermici altamente incrostanti. I fluidi geotermici, una volta utilizzati nell'impianto pilota, verranno reiniettati nelle formazioni di provenienza.

## 2 RISPOSTA ALLE PRESCRIZIONI

- 2.1 A.1.F) REALIZZARE LA RETE DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA DESCRITTA NELLO SIA CHE DOVRÀ ENTRARE IN FUNZIONE 6 MESI PRIMA DELL'INIZIO DELLE ATTIVITÀ DI COLTIVAZIONE DEL CAMPO GEOTERMICO. PRIMA DELL'INIZIO DEI LAVORI IL PROPONENTE DOVRÀ PRESENTARE AD ARPA UMBRIA, ARPA LAZIO E AL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE UN DOCUMENTO IN CUI SONO DESCRITTI: - IL NUMERO E LA POSIZIONE DEGLI SCATTER PERMANENTI CHE SI POSIZIONERANNO NELL'AREA (UNO ALMENO SU OGNI POSTAZIONE DEI POZZI); - LA SOGLIA DI ALLARME PER LA SUBSIDENZA RAGGIUNTA PER LA QUALE SI DOVRANNO RIDURRE LE ATTIVITÀ E QUELLA PER CUI LE ATTIVITÀ DOVRANNO ESSERE SOSPESSE FINO AL RITORNO DELLA SUBSIDENZA AL DI SOTTO DELLA SOGLIA DI ALLARME.**
- A.1.H) DOVRÀ ESSERE PRESENTATO AD ARPA UMBRIA, ARPA LAZIO ED AL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE, UNA VOLTA ALL'ANNO ED OGNI VOLTA SI DOVESSERO RAGGIUNGERE I LIVELLI DI ALLARME LA MAPPA DELLE DEFORMAZIONI VERTICALE E ORIZZONTALE RILEVATE.**

Il fenomeno della deformazione del suolo causato dalla coltivazione di risorse geotermiche è stato ampiamente studiato in diversi campi in Italia e nel mondo.

L'estrazione di fluidi endogeni dal sottosuolo, infatti, avendo ripercussioni sull'idrogeologia e sul regime locale degli stress sub-superficiali, può dar luogo a fenomeni di subsidenza la cui entità varia in funzione di vari parametri ed effetti causativi, i più importanti dei quali sono:

- il periodo temporale della coltivazione;
- la profondità di emungimento;
- le caratteristiche petrofisiche della formazione geologica costituente il potenziale serbatoio (litologia, proprietà meccaniche, porosità ecc.);
- le metodologie operative della coltivazione stessa.
- In particolare, è stato evidenziato che i fenomeni più significativi di subsidenza si manifestano nei primi periodi della coltivazione e, soprattutto, quando non è prevista la tecnica della reiniezione.

A titolo informativo, si riporta uno stralcio conclusivo di quanto scrive, in merito alla subsidenza nel campo geotermico toscano di Larderello-Travale, l'associazione ambientalista *Amici della Terra* (2008): *"In conclusione quindi anche se la subsidenza rappresenta un effetto per così dire fisiologico dell'attività di estrazione, manifestandosi soprattutto nei primi periodi di coltivazione dei campi geotermici, le moderne tecniche di reiniezione insieme con un responsabile sfruttamento del sistema rappresentano, a oggi, efficaci misure per minimizzarne gli effetti e contribuire alla soluzione dei problemi ambientali connessi all'utilizzo energetico della risorsa"*.

I fenomeni di subsidenza nei campi geotermici in Italia sono generalmente molto meno evidenti di quelli rilevati nella coltivazione di campi ad idrocarburi.

Questo è certamente dovuto anche al fatto che le rocce litoidi costituenti i serbatoi dei campi geotermici italiani (formazioni carbonatiche e/o rocce metamorfiche) hanno generalmente parametri meccanici (modulo di Young, e di compressibilità in particolare) caratterizzati da valori

sufficientemente elevati e tali da prevenire significativi effetti di subsidenza durante l'estrazione dei fluidi. Queste rocce sono quindi considerate dei buoni serbatoi geotermici dal punto di vista della stabilità meccanica.

Tutti i dati, ad oggi pubblicamente disponibili, sulla rilevazione della subsidenza nei campi geotermici italiani derivano da studi eseguiti da ENEL. Due recenti lavori, uno pubblicato da Enel (*Ciulli, Dini et al., 2005*) ed uno dall'*Università di Siena (2008)*, che ha utilizzato dati Enel nell'ambito di un accordo con la Regione Toscana, riportano i risultati di oltre 30 anni di rilevazioni eseguite nei campi geotermici di Travale-Radicondoli e del Monte Amiata.

Nel caso di Travale-Radicondoli, dove la coltivazione della risorsa geotermica è eseguita in sostanziale assenza di reiniezione, è stata rilevata una subsidenza massima di 50 cm che ha interessato solo una piccola area centrale di circa 1 km<sup>2</sup>, prossima ai pozzi di produzione.

In 30 anni di coltivazione il rateo di subsidenza, che mediamente è di circa 1,7 cm/anno, è in effetti diminuito dagli iniziali 2,3 cm/anno a meno di 1,0 cm/anno, mentre la produzione di fluido è aumentata da 60 a 240 kg/s.

Nel caso del Monte Amiata, dove la coltivazione della risorsa geotermica è eseguita con la reiniezione parziale dei fluidi estratti, lo studio geo-strutturale, idrogeologico e ambientale condotto dall'*Università di Siena (2008)* ha messo a confronto i risultati delle livellazioni ottico-geometriche di elevato dettaglio eseguite dall'ENEL con le analisi interferometriche di immagini satellitari. Ovviamente sono stati utilizzati gli interferogrammi aventi la migliore sovrapposizione temporale con i rilievi ENEL.

Da tale studio è emerso che sulle aree amiatine particolarmente interessate dalla coltivazione della risorsa geotermica sussiste un sostanziale accordo tra i dati acquisiti con le due metodologie suddette e, in particolare:

- nella zona di Abbadia S.S., nel periodo 1994-2001, è stata rilevata una subsidenza massima di circa 2,0 cm, pari ad un rateo di deformazione di 0,29 cm/anno;
- nella zona di Bagnore, nel periodo 1992-2006, la subsidenza massima rilevata è stata di circa 4,0 cm con analogo rateo di 0,29 cm/anno;
- nella zona di Piancastagnaio, per la quale sono disponibili dati ricoprenti un maggiore periodo d'osservazione (1988-2006), si ha la maggiore subsidenza rilevata nell'area Amiatina che ha raggiunto valori massimi di circa 7,0 cm, pari ad un rateo di deformazione di 0,36 cm/anno.

Sono comunque valori decisamente inferiori a quanto rilevato nell'area di Travale-Radicondoli che confermano come l'impiego della tecnica della reiniezione, anche se parziale come quella eseguita nelle suddette aree amiatine, rappresenti un effettivo ed efficace strumento di mitigazione delle deformazioni del suolo provocate dalla coltivazione dei campi geotermici.

Come noto, il progetto di coltivazione geotermica oggetto della presente relazione prevede la reiniezione integrale dei fluidi estratti. Tuttavia, al fine di monitorare eventuali effetti locali è stato comunque previsto un sistema di monitoraggio dei movimenti del suolo, per separare il contributo deformativo dovuto a processi naturali in corso, da quelli eventualmente causati dall'attività di estrazione e iniezione dei fluidi.

## 2.1.1 MONITORAGGIO

Sulla base di quanto precedentemente esposto, non si può escludere la probabilità che possano verificarsi fenomeni di deformazione del suolo associati all'attività di coltivazione della risorsa geotermica nell'area del PR "Castel Giorgio". Si può comunque ritenere che l'entità di tali fenomeni sia decisamente mitigata dalla reiniezione totale dei fluidi estratti, come previsto e programmato nel piano di coltivazione stesso.

Si conferma quindi, anche in ottemperanza alle "Linee Guida" per l'utilizzazione della Risorsa Geotermica a media e alta entalpia" emanate dal MISE-MATTM nell'Ottobre 2016, l'impegno a monitorare ed analizzare tali fenomeni, assegnando a enti/compagnie specializzate il compito di elaborare mappe inerenti la deformazione del suolo dell'area in oggetto anche prima dell'implementazione delle attività di produzione e reiniezione.

A tale fine, benché le indicazioni delle linee guida non siano vincolanti, sarà programmato un adeguato controllo delle deformazioni del suolo nell'area del PR "Castel Giorgio" e, nello specifico, nell'area interessata dai pozzi di progetto.

Tale monitoraggio sarà eseguito con metodologia interferometrica DINSAR (interferometria differenziale Radar ad apertura sintetica), utilizzata ampiamente e con successo per il monitoraggio dei movimenti del terreno in molte aree vulcaniche e geotermiche.

La metodologia interferometrica si basa sull'analisi di immagini radar della superficie terrestre acquisite da satelliti, nel tempo e su una stessa area, e consente di misurare spostamenti millimetrici in corrispondenza di vari punti del terreno, noti come "*permanent scatter*" (PS), che costituiscono i riflettori naturali al suolo dell'onda radar emessa dai satelliti.

Le più recenti tecniche interferometriche possono utilizzare come PS affidabili i vari elementi antropici presenti sul territorio (edifici, manufatti, infrastrutture), ma anche altri elementi naturali quali rocce esposte e porzioni omogenee di terreno che consentono di restituire serie temporali di spostamento molto accurate. Dalla comparazione delle varie immagini tridimensionali della superficie terrestre acquisite su una stessa area nel tempo è possibile misurare la quota topografica in corrispondenza dei vari PS e calcolarne eventuali variazioni, evidenziando così l'entità della deformazione del suolo.

Sono disponibili archivi storici delle immagini che, a partire dal 1992, sono state acquisite da varie missioni satellitari, pregresse e/o tuttora in corso, programmate dalle diverse Agenzie Spaziali nazionali ed Internazionali.

L'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha recentemente sviluppato la famiglia di missioni "Sentinel" per far fronte alle esigenze operative del programma "Copernicus". Ogni missione è dotata di una diversa gamma di tecnologie e si concentra su aspetti diversi dell'Osservazione della Terra: il monitoraggio atmosferico, quello oceanico e quello terrestre; i dati raccolti vengono utilizzati per un'ampia gamma di applicazioni.

La missione SENTINEL-1, specificamente finalizzata anche al monitoraggio dei movimenti della superficie terrestre, è iniziata nell'aprile del 2014 con il lancio del satellite Sentinel-1A sul quale è installato un Radar ad apertura sintetica in banda C, che fornisce immagini in continuo, giorno e notte, e in tutte le condizioni atmosferiche. Infatti i più evoluti sistemi di trasmissione di cui è dotato il satellite consentono al sistema di telerilevamento di ricevere immagini anche in caso di estesa e spessa copertura nuvolosa.

Grazie a tali dati, il monitoraggio sarà articolato in due distinte fasi:

- Fase 1 – Sarà finalizzata all’analisi storica delle immagini da satellite per determinare il cosiddetto “bianco imperturbato”, fornendo un’analisi di riferimento dello stato deformativo del suolo nell’area di interesse, prima dell’inizio delle attività di coltivazione. L’impiego dei dati provenienti dalla sola missione Sentinel-1 garantirà una buona omogeneità dei dati da analizzare ed è prevedibile che saranno utilizzate le immagini satellitari acquisite almeno negli ultimi 3 anni. In questo modo potranno essere evidenziate eventuali deformazioni del suolo, di origine naturale o antropica, già in corso nell’area e non imputabili alle attività programmate nel PR Castel Giorgio;
- Fase 2 – Coprirà l’intera durata della fase di coltivazione e consisterà nell’analisi ed elaborazione continua di tutte le immagini satellitari acquisite sull’area di interesse ad intervalli temporali scelti dall’operatore, al fine di ottenere mappe della deformazione superficiale con elevato grado di accuratezza che, come detto, è dell’ordine dei millimetri.
- Per entrambe le fasi ci si avvarrà di operatori altamente qualificati e selezionati nell’ambito di Enti o Compagnie di Servizio specializzate.

Tale monitoraggio come prescritto, entrerà in funzione 6 mesi prima dell’inizio delle attività di coltivazione. I risultati di tale monitoraggio saranno quindi forniti, prima dell’inizio dei lavori ad ARPA Umbria, ARPA Lazio e al MASE. In tale documento saranno inoltre definiti: il numero, il posizionamento degli scatter permanenti, mostrate le carte di deformazione verticale ed orizzontale del suolo e definite le soglie di allarme.

Nel corso della Fase 2 potrà essere impiegata una metodologia integrata, basata sia sull’analisi di immagini da satellite che sul sistema GPS per la sua valenza di rilevazione di movimenti laterali e non solo verticali.

Durante la Fase 1, l’analisi delle immagini storiche consentirà anche di valutare il grado di copertura dei PS naturali presenti nell’area che, se necessario, potranno essere integrati con punti riflettenti artificiali noti come “corner reflector” (Figura 2.1.1.a) i quali, tramite il particolare orientamento dato alle pareti metalliche, riescono a riflettere con eccezionale efficacia le onde radar.

Almeno tre punti artificiali saranno comunque allestiti ed equipaggiati certamente anche con sistema GPS, come suggerito dalle Linee Guida.

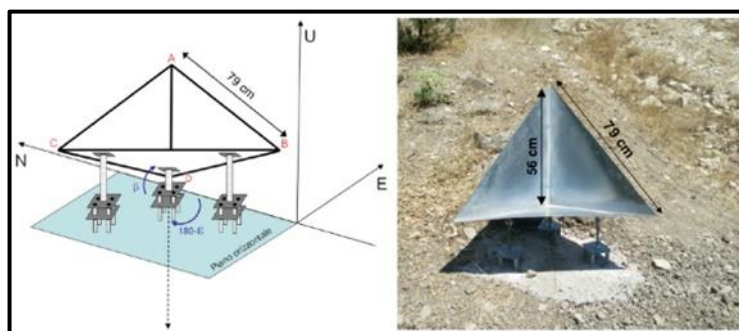
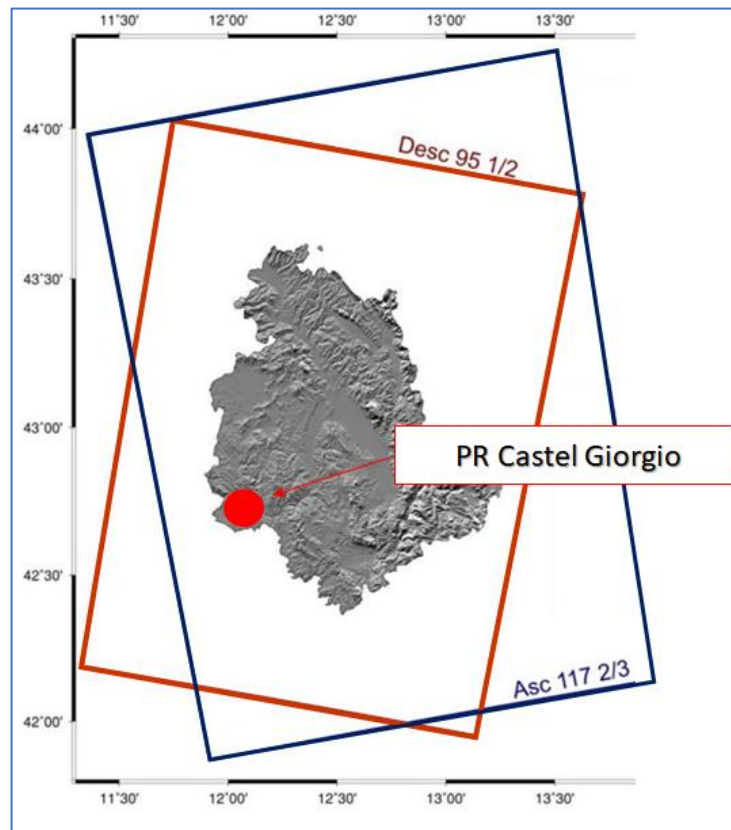


Figura 2.1.1.a- Esempio di corner reflector

La copertura satellitare di Sentinel-1 è garantita da passaggi satellitari che, con cadenza di 12 giorni, forniscono immagini rilevate con orbite “ascendenti e discendenti”.



L'intera Regione Umbria e l'area del PR Castel Giorgio risultano interamente e largamente coperte da un'immagine in orbita ascendente e da una in orbita discendente (Figura 2.1.1.b)



**Figura 2.1.1.b - Copertura immagini satellitari per l'intera Umbria e per l'area del PR "Castel Giorgio".**

Grazie alla disponibilità di immagini acquisite da passaggi successivi del satellite sulla stessa area con cicli di ripetizione molto corti (12 giorni), il metodo interferometrico ha la capacità di determinare efficacemente le variazioni di movimenti del terreno in tempi brevi.

In merito alle tecniche di elaborazione dati, rivolgendosi ad Enti o Compagnie altamente specializzate nel settore, ci si avvarrà sicuramente di tecnologie all'avanguardia nell'analisi di dati con metodologia differenziale interferometrica, così come indicate dall'operatore incaricato.

Per ulteriori approfondimenti si indicano alcune pubblicazioni disponibili e riportate in vari siti web alla voce "interferometria SAR"

## 2.1.2 FASE 1 – BIANCO IMPERTURBATO

Come riportato al precedente paragrafo, la Fase 1 "è finalizzata all'analisi storica delle immagini da satellite per determinare il cosiddetto "bianco imperturbato", fornendo un'analisi di riferimento dello stato deformativo del suolo nell'area di interesse, prima dell'inizio delle attività di coltivazione. L'impiego dei dati provenienti dalla sola missione Sentinel-1 garantirà una buona omogeneità dei dati da analizzare ed è prevedibile che saranno utilizzate le immagini satellitari acquisite almeno negli ultimi 3 anni. In questo modo potranno essere evidenziate eventuali deformazioni del suolo, di origine naturale o antropica, già in corso nell'area e non imputabili alle attività programmate nel PR Castel Giorgio".

A tale scopo, sono stati analizzati i dati della missione Sentinel-1 elaborati nell'ambito del programma dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) "Copernicus Land Monitoring Service" (CLMS)<sup>1</sup>. Tra i vari prodotti del CLMS è presente l'applicativo "European Ground Motion Service" (EGMS)<sup>2</sup>, ovvero l'elaborazione di dati InSAR della missione Sentinel-1, per determinare e misurare le deformazioni del suolo nell'Unione Europea, con precisione al millimetro. Il prodotto è aggiornato annualmente, ed attualmente sono disponibili i dati relativi al quinquennio 2018-2022. Un prossimo aggiornamento coprirà l'arco temporale 2019-2023.

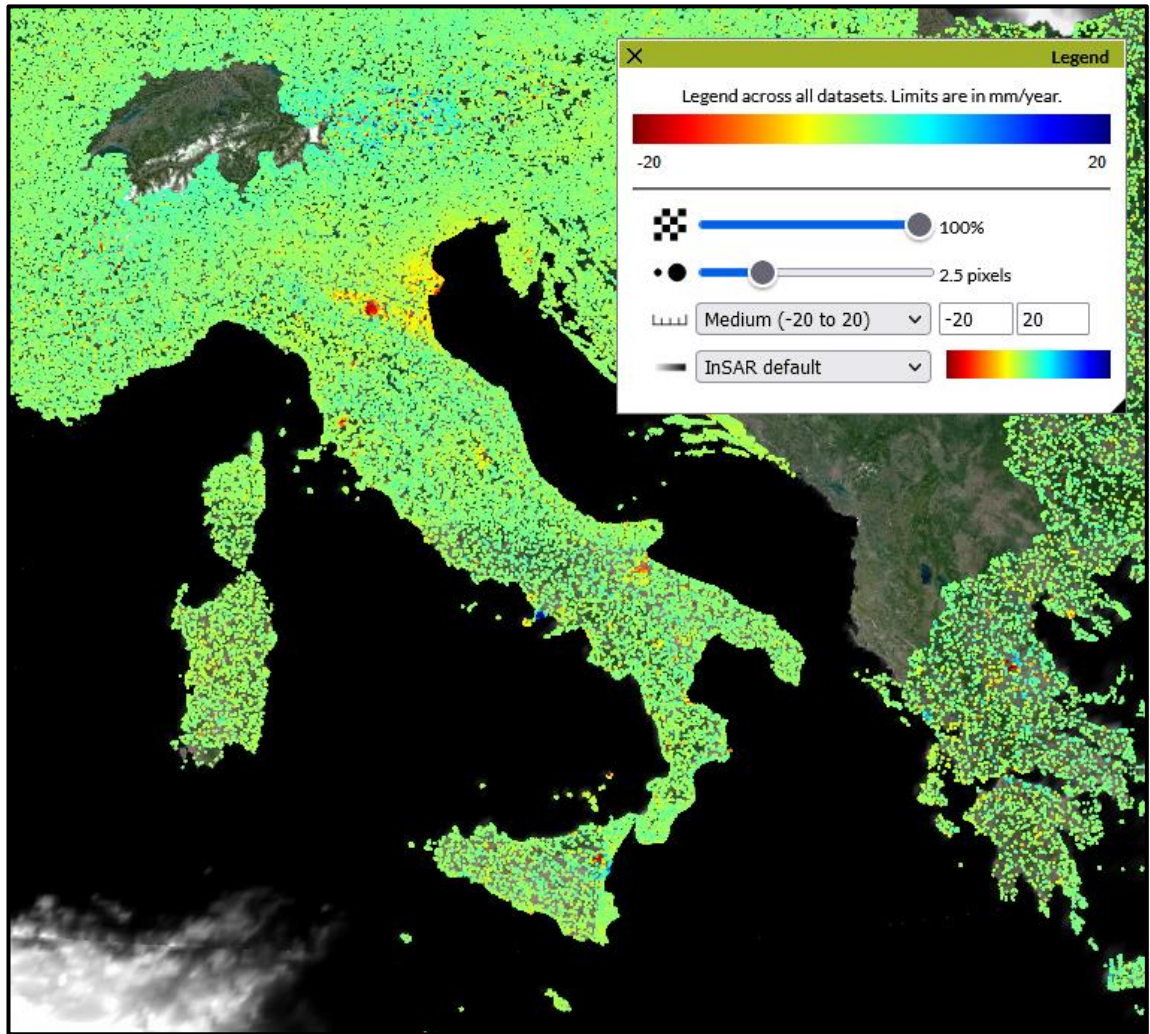
I dati scelti per l'analisi storica delle immagini da satellite per determinare il cosiddetto "bianco imperturbato", fanno quindi riferimento al quinquennio 2018-2022. Tra i vari prodotti disponibili, è stato scelto lo "European Ground Motion Service: Ortho", ovvero, come descritto nel sito ufficiale: "l'EGMS Ortho sfrutta le informazioni fornite dalle orbite ascendenti e discendenti dell'EGMS Calibrated per ricavare due ulteriori strati; uno di spostamenti puramente verticali (EGMS Ortho Vertical), l'altro di spostamenti puramente Est-Ovest (EGMS Ortho East/West). Entrambi gli strati vengono ricampionati su una griglia di 100 m, in modo che la risoluzione finale sia 100 x 100 m. EGMS Ortho viene visualizzato come una mappa vettoriale di punti di misurazione codificati a colori in base alla velocità media (componenti verticali o Est-Ovest). Ad ogni punto è associata una serie temporale di spostamento, ovvero un grafico con valori di spostamento per acquisizione del satellite".

### 2.1.2.1 DEFORMAZIONE VERTICALE

In Figura 2.1.2.1.a è riportato un estratto dalla banca dati EGMS, in cui sono visibili i dati di deformazione verticale del suolo (espressi in mm/anno) per il territorio italiano. Deformazioni negative sono associate al colore rosso (ad esempio Pianura Padana, Val d'Agri, Etna), deformazioni positive al colore blu (ad esempio Alpi e Campi Flegrei).

<sup>1</sup> <https://land.copernicus.eu/en>

<sup>2</sup> <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service>

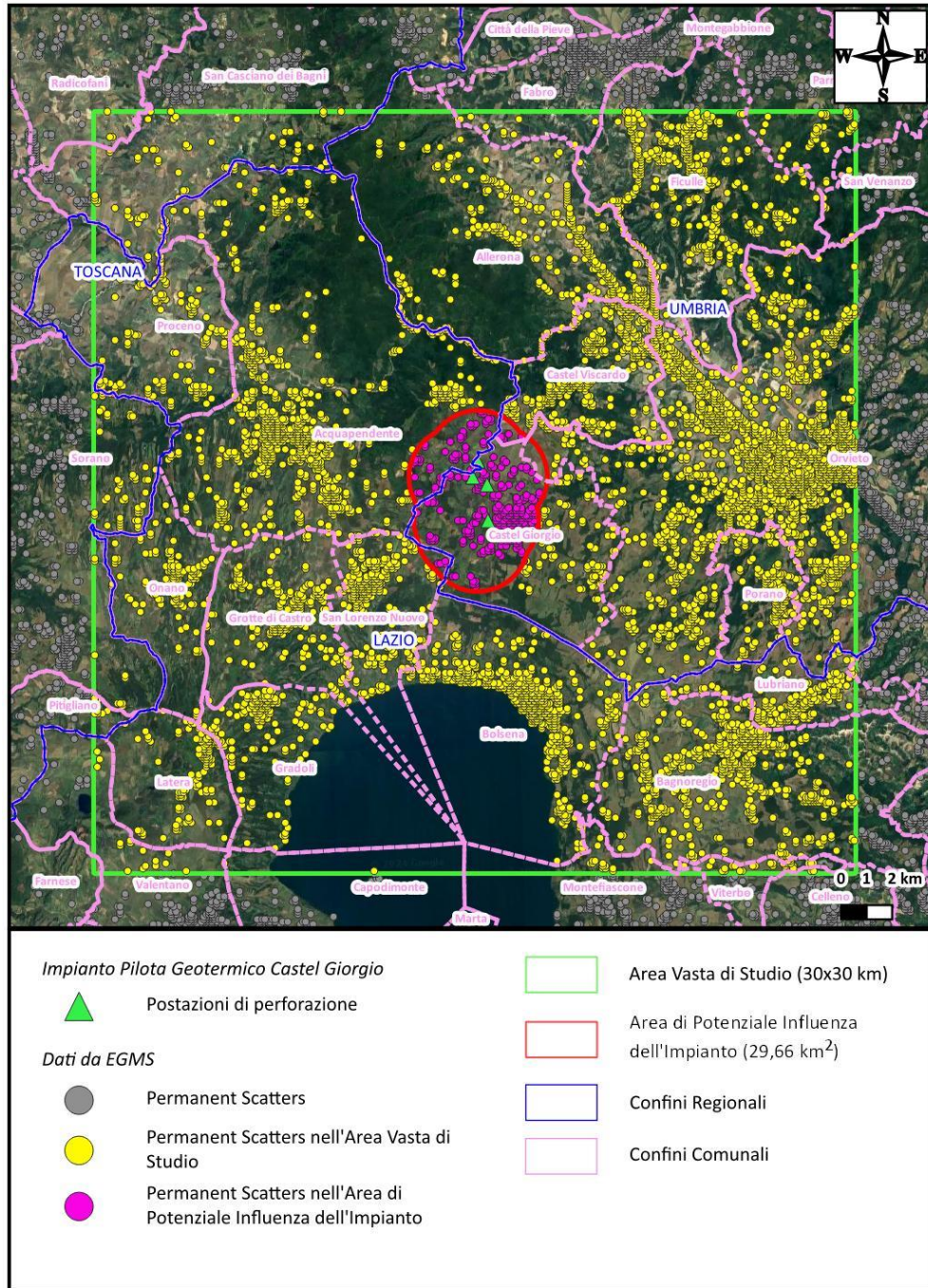


**Figura 2.1.2.1.a - Dati InSAR nel periodo 2018-2021 per l'Italia (dati da EGMS Ortho Vertical)**

Si è quindi proceduto ad un'analisi di dettaglio sull'area dell'Impianto Pilota Geotermico "Castel Giorgio", suddividendola in tre step:

- una prima analisi relativa all'Area Vasta di Studio, identificata da un'area rettangolare di 30 km di lato, per un totale di 900 km<sup>2</sup>, incentrata sulle opere da realizzare;
- una seconda analisi all'interno dell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico;
- un'analisi di dettaglio su un *permanent scatter* individuato all'interno dell'abitato di Castel Giorgio.

L'Area Vasta di Studio (Figura 2.1.2.1.b) si estende a Nord fino ad 1,7 km di distanza da San Casciano dei Bagni (SI), ad Ovest fino alla località Ponte a Rigo (SI), a Sud fino all'Isola Bisentina nel Comune di Capo di Monte (VT) ed infine ad Est fino ad Orvieto (TR).



**Figura 2.1.2.1.b – Area di Studio e ubicazione dei permanent scatters (dati da EGMS)**

All'interno dell'Area Vasta di Studio sono presenti 7.616 *permanent scatters*, monitorati nell'arco temporale 2018-2022. Il dato che verrà preso in considerazione nella presente analisi è quello relativo alla deformazione verticale del suolo, espressa in funzione del tempo (mm/annui).

Si è quindi proceduto a calcolare i dati statistici relativi al rateo di deformazione per l'Area Vasta di Studio, riportati nella tabella seguente:

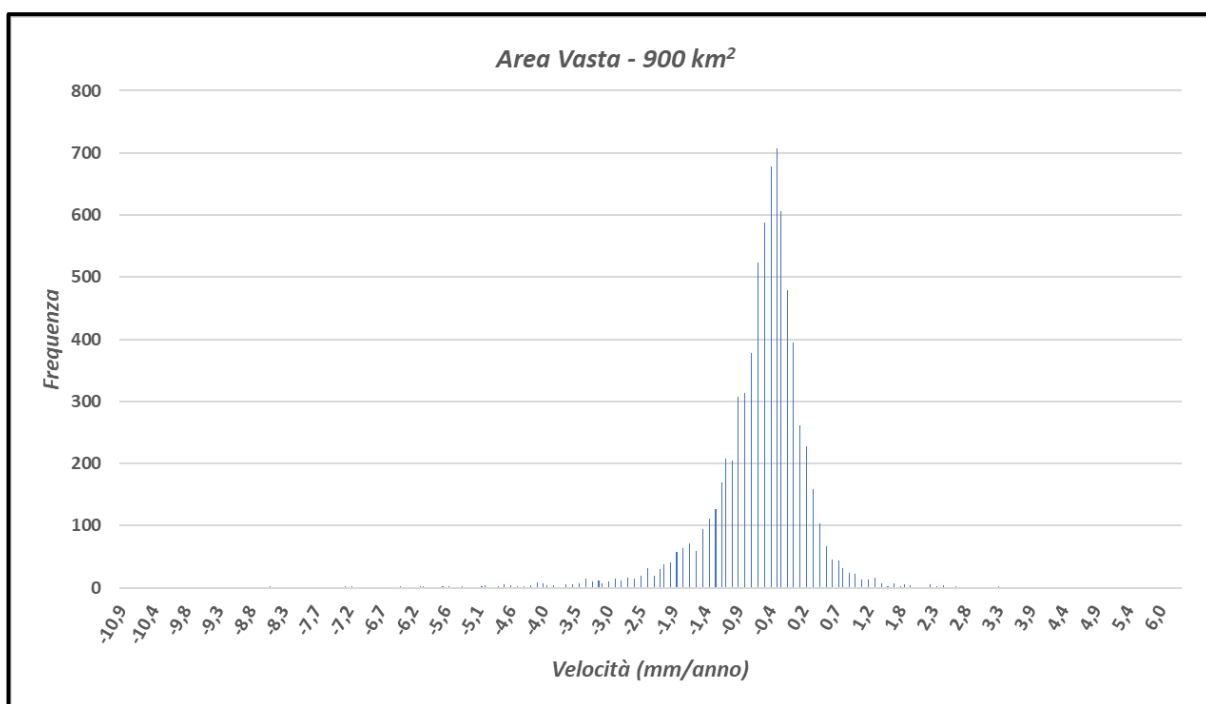
Tasso di deformazione verticale (mm/anno) – Area Vasta di Studio (900 km<sup>2</sup>)

N. punti di misura	7.616
Media	-0,57
Minimo	-10,9
Massimo	6,3
Mediana	-0,4
Moda	-0,3

**Tabella 2.1.2.1.a- Dati statistici relativi al tasso di deformazione verticale al suolo nell'Area Vasta di Studio (elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical)**

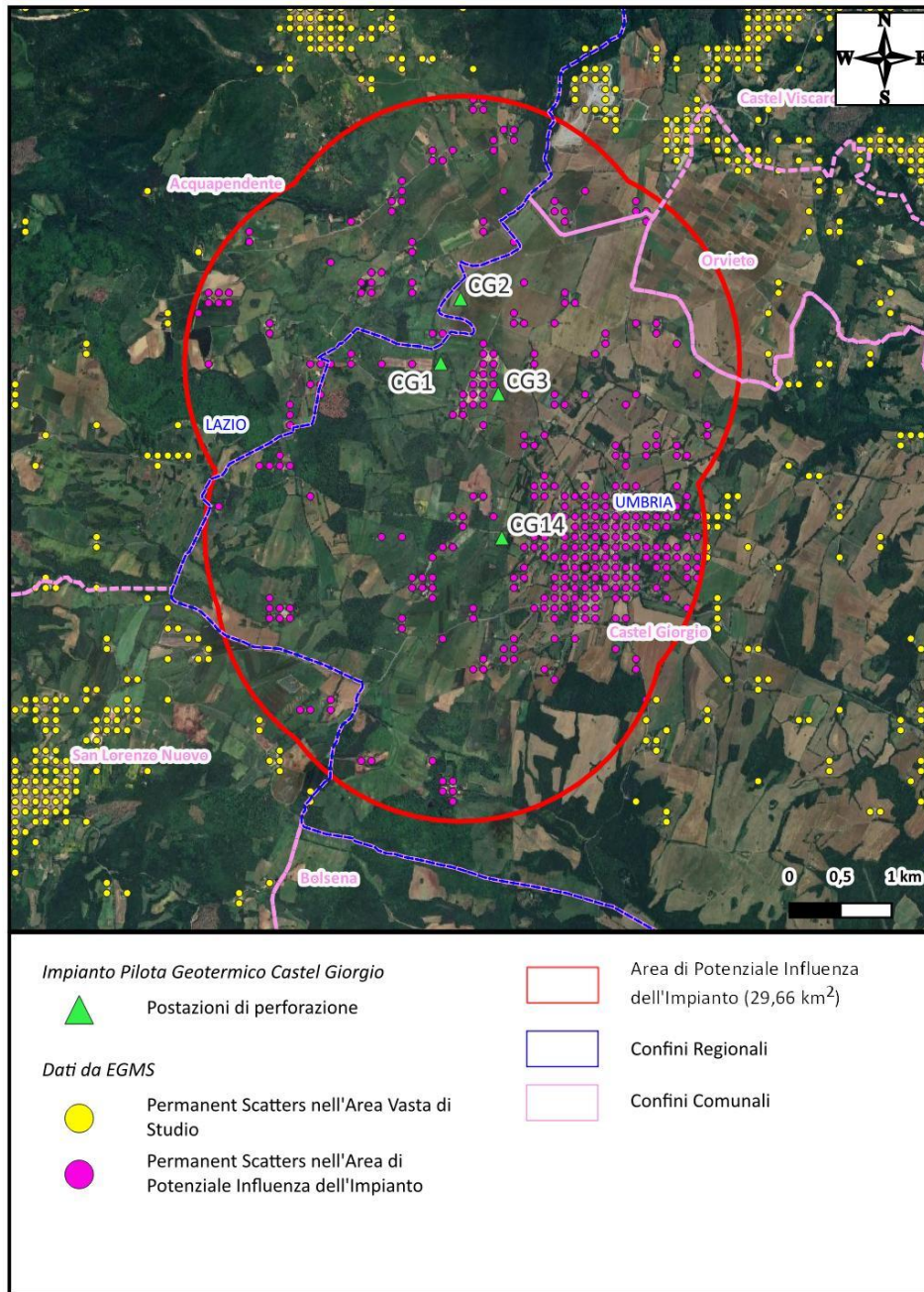
Come si evince dalla Tabella 2.1.2.1.a il tasso di deformazione verticale medio nell'Area Vasta di Studio è pari a -0,57 mm/anno, che nel periodo di riferimento risulta in una deformazione verticale media di -2,28 mm.

La distribuzione statistica dei valori di deformazione (Figura 2.1.2.1.c), è asimmetrica verso sinistra, dovuta alla presenza di alcuni *outliers* (valori estremi come ad es. -10,9 Tabella 2.1.2.1.a) che rappresentano singoli punti di misura, e non aree che hanno subito deformazione verticale. Come visibile dal grafico, i valori di deformazione più frequenti si attestano tra -0,57 e -0,1 mm/anno, mentre -0,3 mm/anno è il valore più rappresentato (si confronti anche Tabella 2.1.2.1.a).



**Figura 2.1.2.1.c – Istogramma di frequenza delle velocità di deformazione verticale (mm/anno) nell'Area Vasta di Studio (elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical)**

Il secondo step ha riguardato un'analisi più di dettaglio all'interno dell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico, calcolata come buffer di 2 km a partire dai fondo pozzo sia dei pozzi di produzione che di reiniezione previsti dal progetto (Figura 2.1.2.1.b e Figura 2.1.2.1.d). L'area così definita è pari a 29,66 km<sup>2</sup>.



**Figura 2.1.2.1.d – Area di potenziale influenza dell’impianto e ubicazione dei permanent scatters (da EGMS)**

Nella seguente tabella sono riportate le informazioni statistiche relative al rateo di deformazione nell’area di potenziale influenza dell’impianto geotermico.

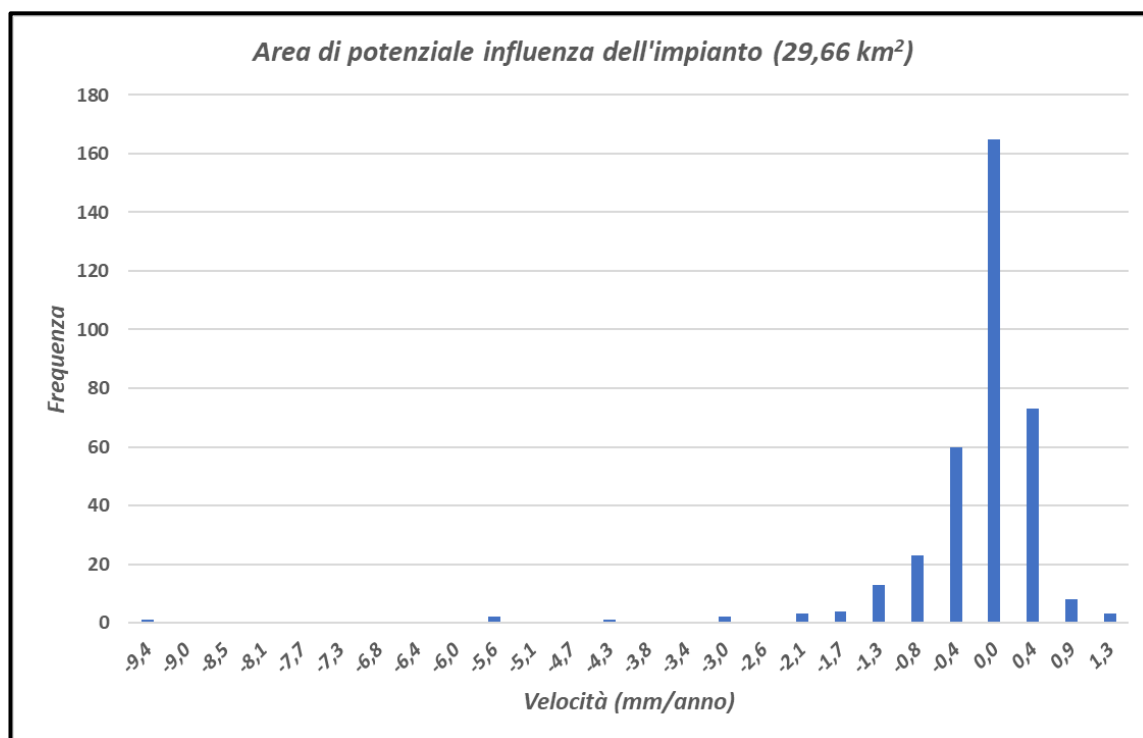
Deformazione verticale (mm/anno) – Potenziale influenza impianto geotermico (29,66 km <sup>2</sup> )	
N. punti di misura	359
Media	-0,36
Minimo	-9,4
Massimo	1,3
Mediana	-0,2

Deformazione verticale (mm/anno) – Potenziale influenza impianto geotermico (29,66 km <sup>2</sup> )	
Moda	0

**Tabella 2.1.2.1.b- Dati statistici relativi al tasso di deformazione verticale al suolo nell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico (elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical)**

Dalla Tabella 2.1.2.1.b è possibile evincere che nell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico, il valore medio del tasso di deformazione verticale è pari a -0,36 mm/anno, inferiore alla media calcolata sull'Area Vasta (-0,57 mm/anno, Tabella 2.1.2.1.a). Nel periodo di riferimento si ottiene una deformazione verticale media di -1,44 mm sull'area di riferimento.

La distribuzione statistica dei valori di deformazione (Figura 2.1.2.1.e), è asimmetrica verso sinistra, dovuta alla presenza di alcuni *outliers* (valori estremi come ad es. -9,4 e -5,6 mm/anno Tabella 2.1.2.1.a) che rappresentano singoli punti di misura, e non aree che hanno subito deformazione verticale. Come visibile dal grafico, i valori di deformazione più frequenti si attestano attorno a 0,0 mm/anno, (si confronti anche Tabella 2.1.2.1.b).



**Figura 2.1.2.1.e – Istogramma di frequenza delle velocità di deformazione verticale (mm/anno) nell'Area di potenziale influenza dell'impianto (elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical)**

Si è infine proceduto all'analisi di dettaglio sull'area interessata dal progetto geotermico Castel Giorgio. In Figura 2.1.2.1.f è riportata l'ubicazione del *permanent scatter* scelto per l'analisi temporale dettagliata della deformazione verticale del suolo, ubicato nell'abitato di Castel Giorgio, mentre in Figura 2.1.2.1.g si riporta la serie temporale analizzata. La deformazione verticale media registrata è di 0,1 mm/anno, lo spostamento medio è di 0,05 mm con un RMSE di 0,7 mm.

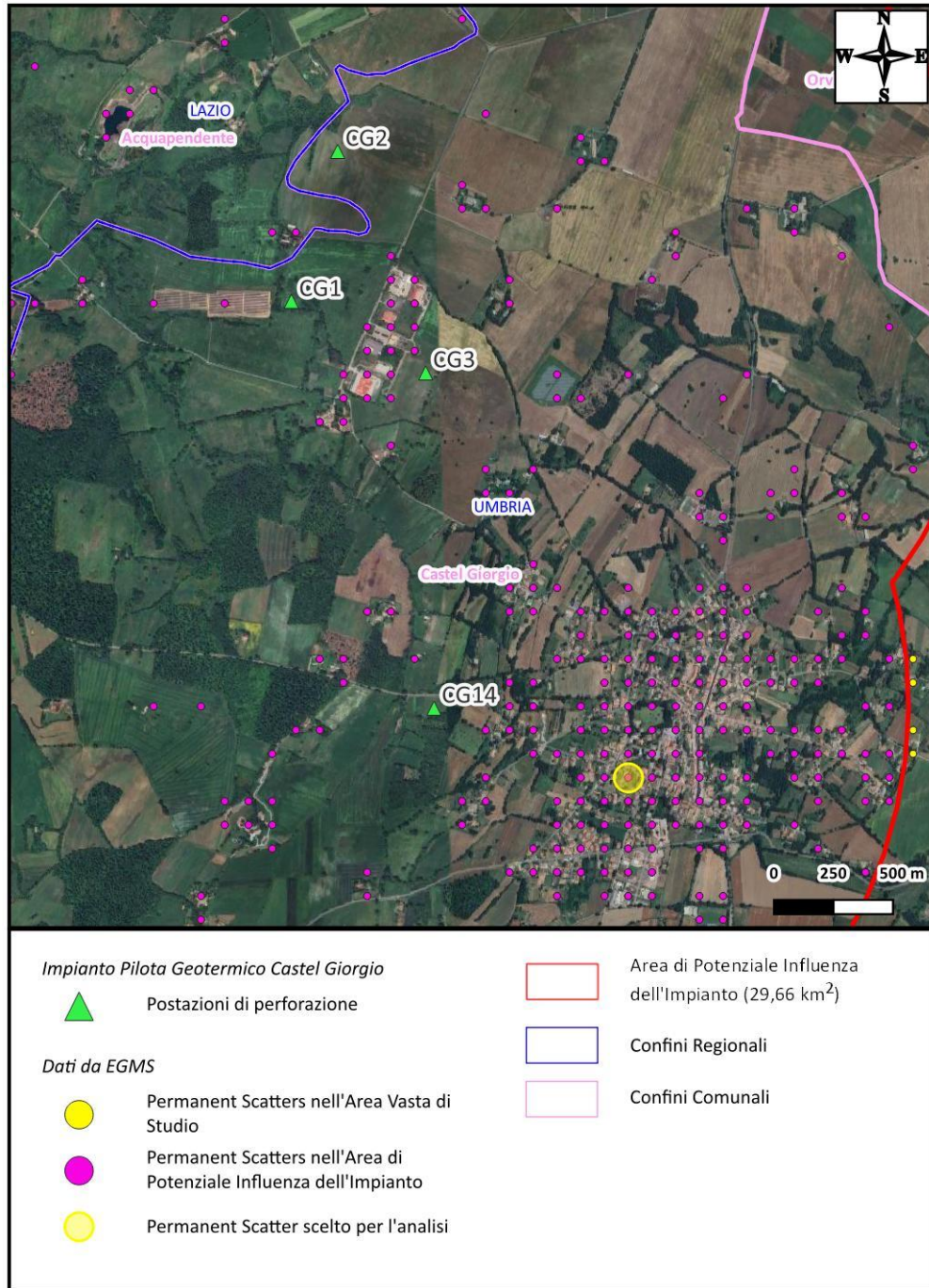
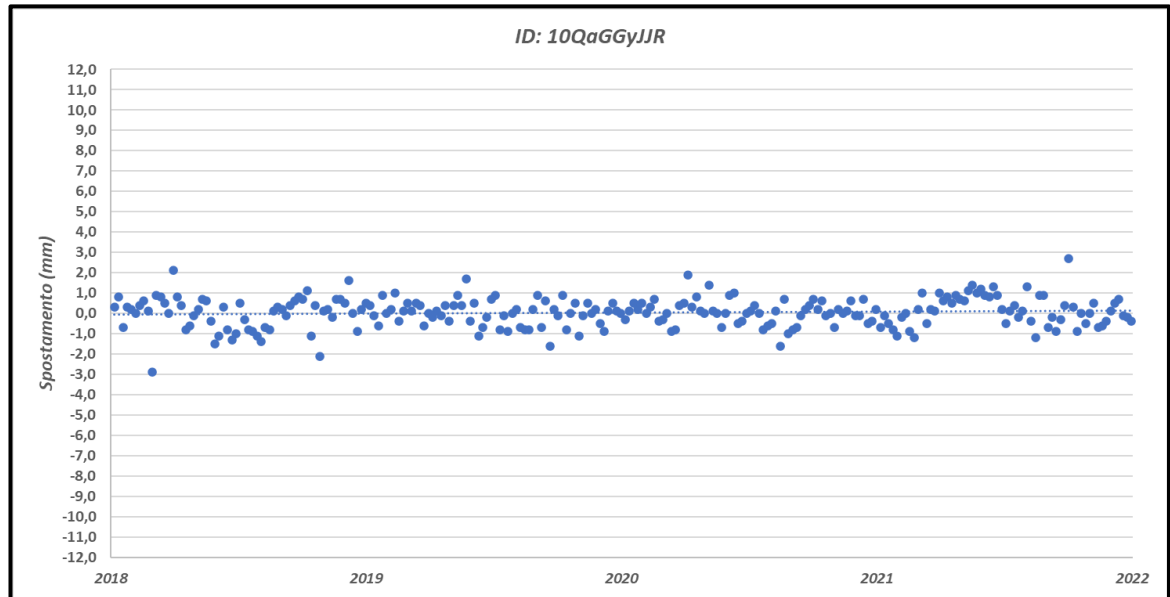


Figura 2.1.2.1.f – Permanent scatter scelto per l'analisi di dettaglio sull'abitato di Castel Giorgio (da EGMS)





**Figura 2.1.2.1.g – Serie temporale che mostra i dati di spostamento (mm) del permanent scatter preso ad esempio (per l’ubicazione si veda Figura 2.1.2.1.f, elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical)**

L’analisi dei dati interferometrici InSAR (fonte: EGMS), evidenzia come sia nell’Area Vasta di Studio (900 km<sup>2</sup>) che all’interno dell’area di potenziale interferenza dell’Impianto Pilota Geotermico Castel Giorgio, le deformazioni verticali siano molto limitate. I risultati presentati rappresentano il bianco indisturbato.

Nella figura successiva (Figura 2.1.2.1.h), si riporta una rappresentazione grafica dei tassi di deformazione verticali annui, nella quale a ciascun *permanent scatter*, è associato un colore in base al valore sulla scala di colore presente in legenda (in rosso le deformazioni negative, in blu le deformazioni positive). La rappresentazione grafica proposta permette di individuare chiaramente la stabilità dell’area di studio, salvo alcuni punti sparsi non correlabili, già trattati come outliers nell’analisi statistica vista in precedenza.

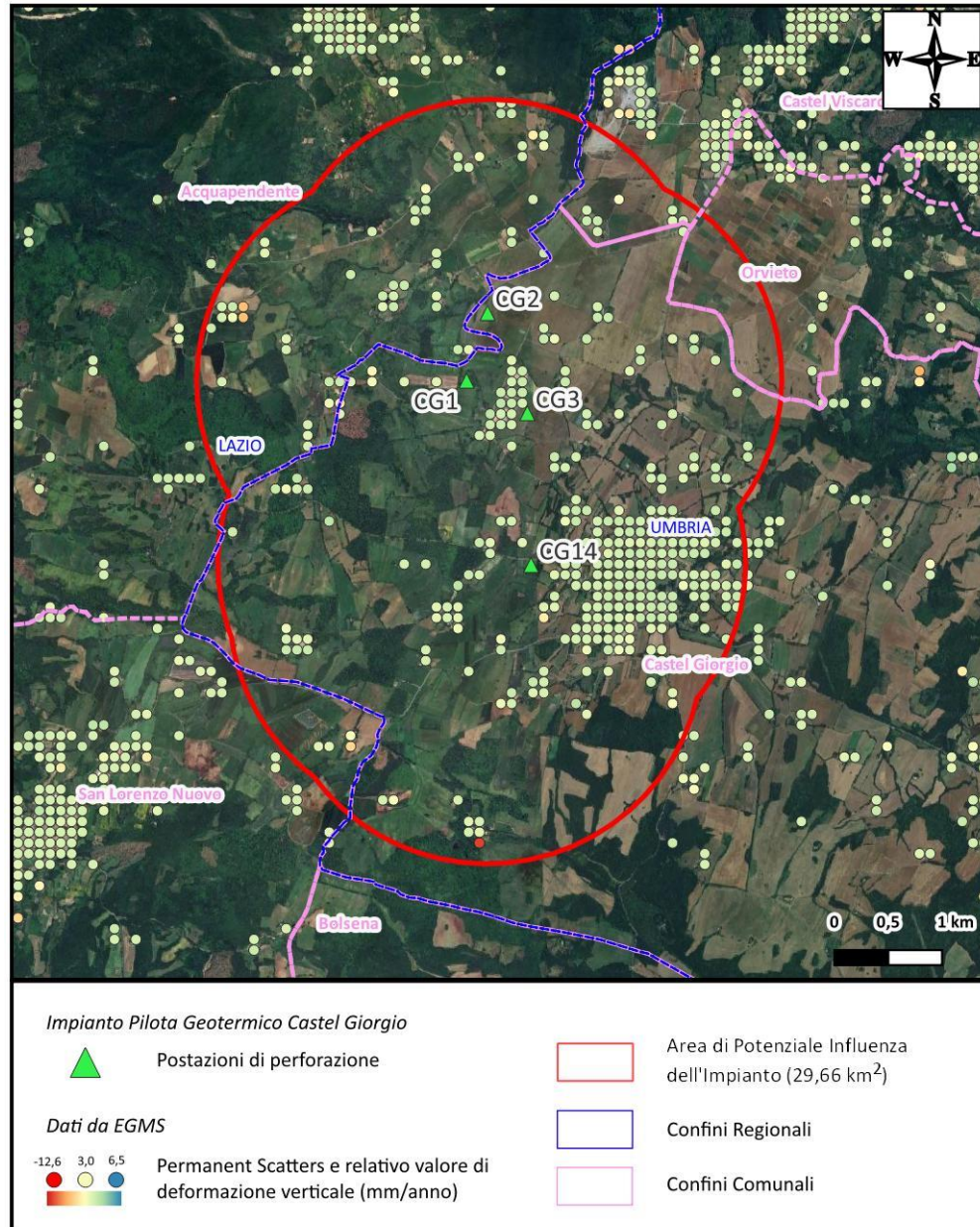


Figura 2.1.2.1.h –Rappresentazione grafica dei tassi di deformazione verticale (elaborazione su dati EGMS Ortho Vertical)

La Tabella 2.1.2.1.c riassume e confronta i valori di subsidenza e tassi di deformazione tra l'area di Castel Giorgio (i cui valori sono stati determinati in questo documento), e le aree geotermiche italiane in coltivazione di cui sono disponibili dati interferometrici di letteratura elaborati in periodi temporali compresi tra 30 anni (Travale-Radicondoli) e 7 anni (area di Abbadia San Salvatore, campo geotermico del Monte Amiata).

Zona	Subsidenza (mm)	Deformazione verticale (mm/anno)	Arco temporale di monitoraggio (anni)	Origine Dati
Castel Giorgio (bianco indisturbato)	-1,44	-0,36	4	Questo documento,

Zona	Subsidenza (mm)	Deformazione verticale (mm/anno)	Arco temporale di monitoraggio (anni)	Origine Dati
				elaborazione su dati EGMS
Travale-Radicondoli (campo geotermico in coltivazione)	-500	-17	30	Ciulli, Dini et al., 2005
Abbadia San Salvatore (area geotermica del Monte Amiata, in coltivazione)	-20	-2,9	7	Università di Siena (2008)
Bagnore (area geotermica del Monte Amiata, in coltivazione)	-40	-2,9	14	Università di Siena (2008)
Piancastagnaio (area geotermica del Monte Amiata, in coltivazione)	-70	-3,6	18	Università di Siena (2008)

**Tabella 2.1.2.1.c- Dati statistici relativi al tasso di deformazione verticale al suolo nell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico e nelle aree geotermiche di Travale-Radicondoli e Monte Amiata.**

## 2.1.2.2 DEFORMAZIONE ORIZZONTALE

In Figura 2.1.2.2.a è riportato un estratto dalla banca dati EGMS, in cui sono visibili i dati di deformazione orizzontale del suolo (espressi in mm/anno) per il territorio italiano. Deformazioni negative sono associati al colore rosso, deformazioni positive al colore blu.

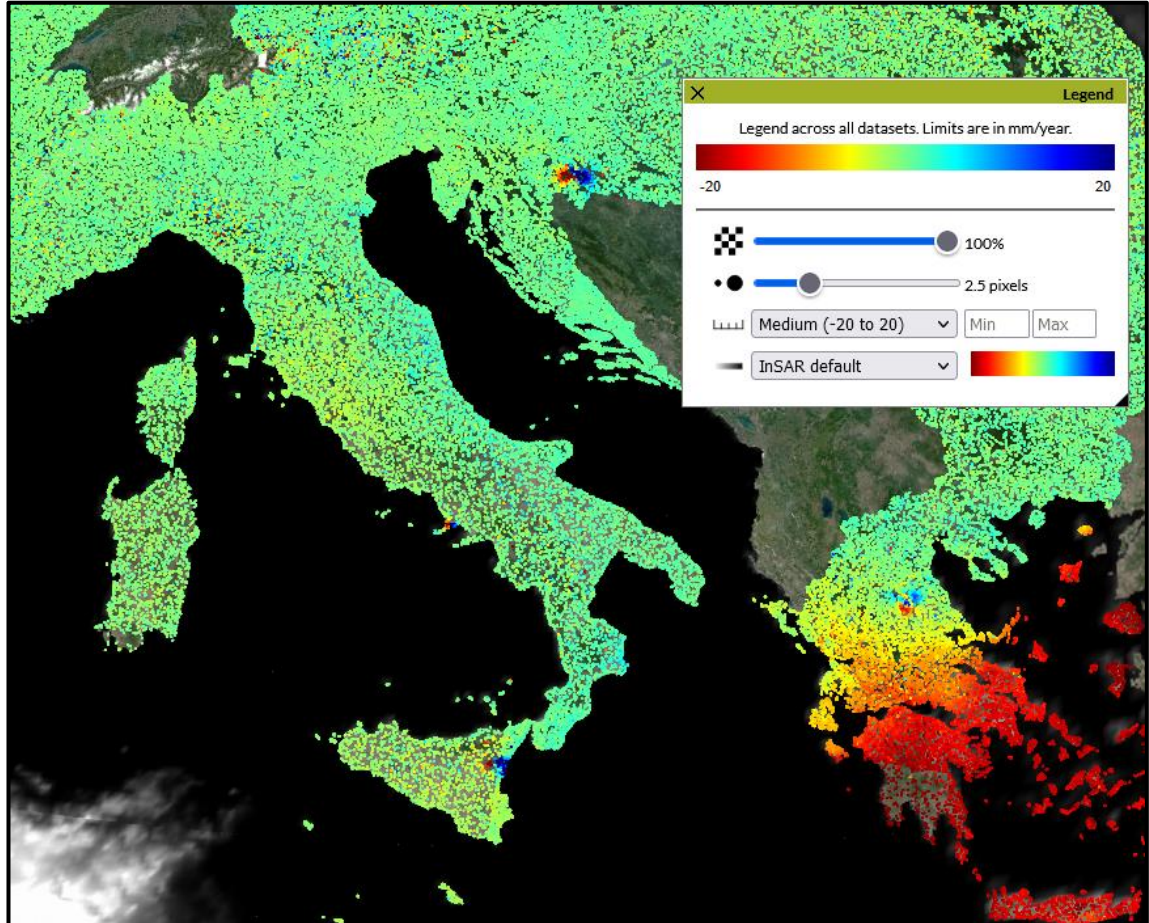


Figura 2.1.2.2.a - Dati InSAR nel periodo 2018-2021 per l'Italia (dati da EGMS Ortho East-West)

Si è quindi proceduto ad un'analisi di dettaglio sull'area dell'Impianto Pilota Geotermico "Castel Giorgio", con la stessa procedura effettuata per l'analisi delle deformazioni verticali. L'Area Vasta di Studio e l'Area di potenziale influenza dell'impianto sono riportate in Figura 2.1.2.1.b e Figura 2.1.2.1.d.

All'interno dell'Area Vasta di Studio sono presenti 7.616 *permanent scatters*, monitorati nell'arco temporale 2018-2022. Il dato che verrà preso in considerazione nella presente analisi è quello relativo alla deformazione orizzontale del suolo (East-West), espressa in funzione del tempo (mm/annui).

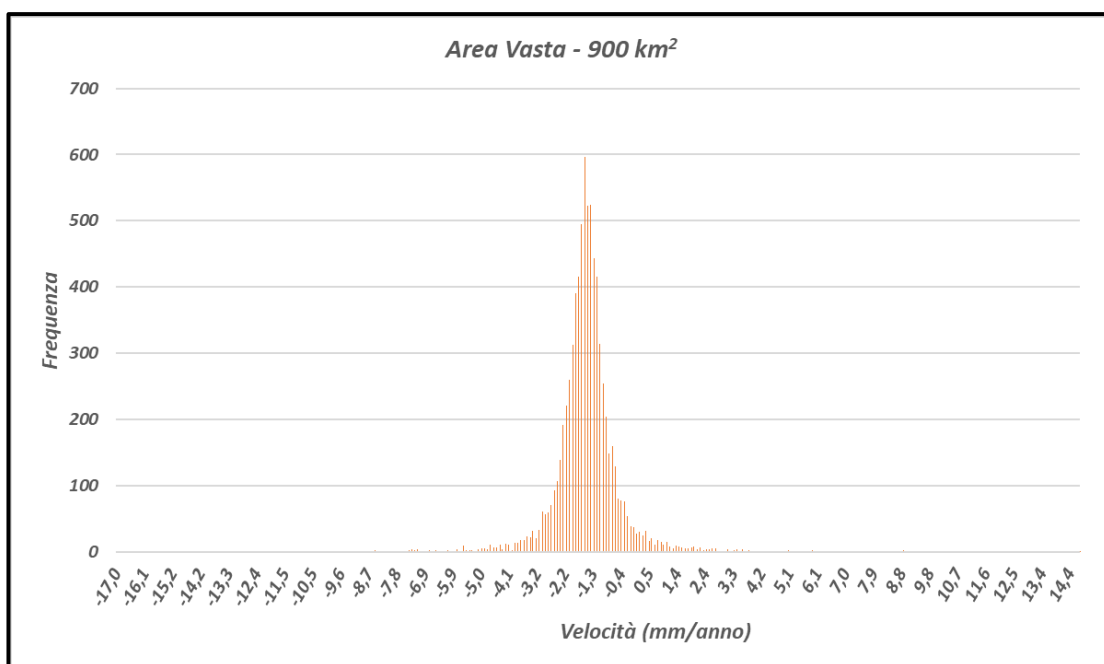
Si è quindi proceduto a calcolare i dati statistici relativi al rateo di deformazione orizzontale per l'Area Vasta di Studio, riportati nella tabella seguente:

Tasso di deformazione orizzontale (mm/anno) – Area Vasta di Studio (900 km <sup>2</sup> )	
N. punti di misura	7.616
Media	-1,54
Minimo	-17
Massimo	14,7
Mediana	-1,5
Moda	-1,6
Direzione di movimento principale	Ovest (95% dei dati)

**Tabella 2.1.2.2.a- Dati statistici relativi al tasso di deformazione orizzontale al suolo nell'Area Vasta di Studio (elaborazione su dati EGMS Ortho East-West)**

Come si evince dalla Tabella 2.1.2.2.a il tasso di deformazione orizzontale medio nell'Area Vasta di Studio è pari a -1,54 mm/anno, che nel periodo di riferimento risulta in una deformazione orizzontale media di -6,16 millimetri. La direzione di movimento principale è verso Ovest.

La distribuzione statistica dei valori di deformazione (Figura 2.1.2.2.b), è simmetrica, come evidenziato anche dai valori di media, moda e mediana in Tabella 2.1.2.2.a.



**Figura 2.1.2.2.b – Istogramma di frequenza delle velocità di deformazione orizzontale (mm/anno) nell'Area Vasta di Studio (elaborazione su dati EGMS Ortho East-West)**

Il successivo step ha riguardato un'analisi più di dettaglio, all'interno dell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico, calcolata come buffer di 2 km a partire dai fondo pozzo sia dei pozzi di produzione che di reinerzione previsti dal progetto, si vedano Figura 2.1.2.1.b e Figura 2.1.2.1.d).

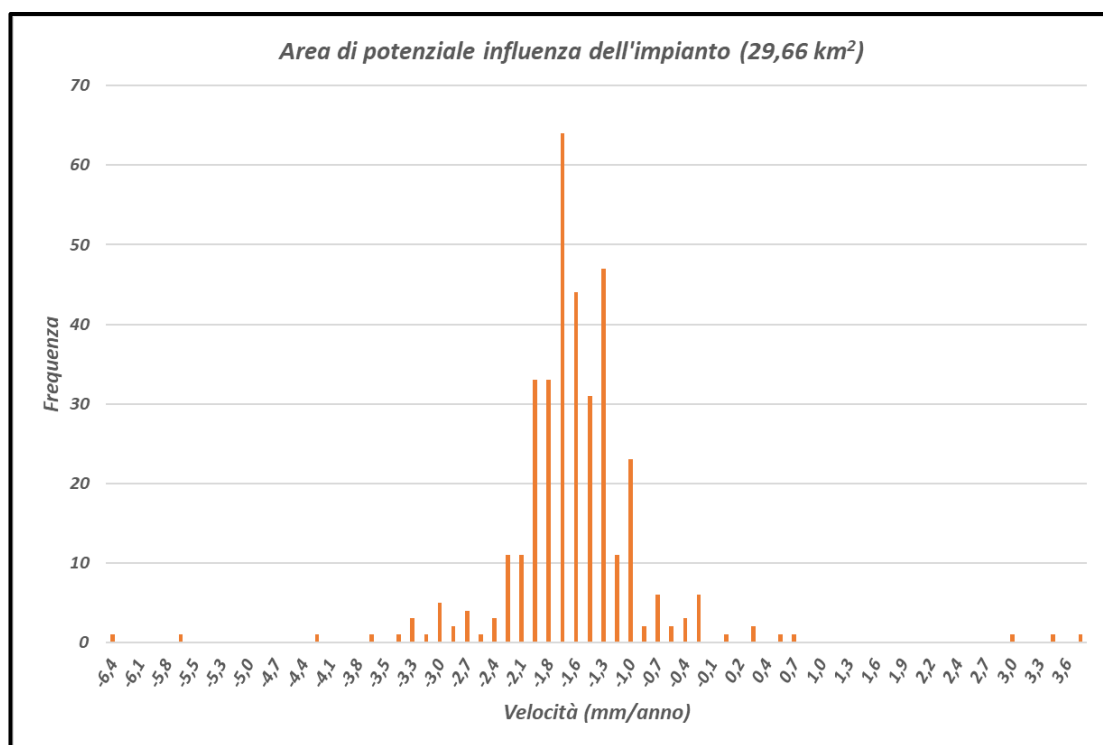
Nella seguente tabella sono inoltre riportate le informazioni statistiche relative al rateo di deformazione orizzontale nell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico.

Deformazione orizzontale (mm/anno) – Potenziale influenza impianto geotermico (29,66 km <sup>2</sup> )	
N. punti di misura	359
Media	-1,64
Minimo	-6,4
Massimo	3,7
Mediana	-1,6
Moda	-1,6
Direzione di movimento principale	Ovest (98% dei dati)

**Tabella 2.1.2.2.b- Dati statistici relativi al tasso di deformazione orizzontale al suolo nell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico (elaborazione su dati EGMS Ortho East-West)**

Dalla Tabella 2.1.2.2.b è possibile evincere che nell'area di potenziale influenza dell'impianto geotermico, il valore medio del tasso di deformazione orizzontale è pari a -1,64 mm/anno, di poco superiore alla media calcolata sull'Area Vasta (-1,54 mm/anno, Tabella 2.1.2.2.b). Nel periodo di riferimento si ottiene una deformazione orizzontale media di -6,56 mm sull'area di riferimento.

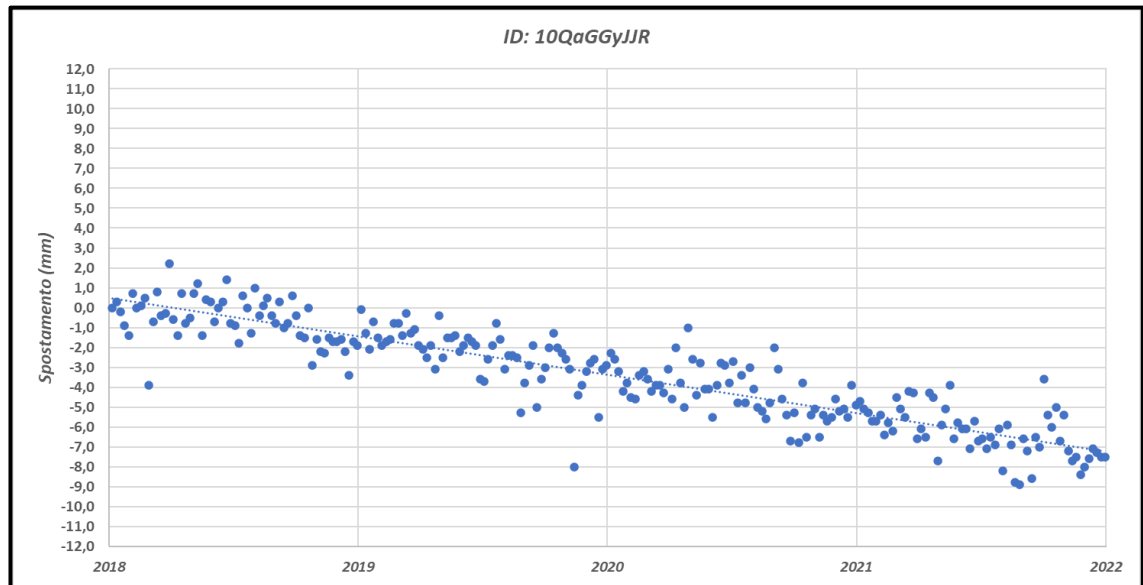
La distribuzione statistica dei valori di deformazione (Figura 2.1.2.2.c), è asimmetrica verso destra. Come visibile dal grafico, i valori di deformazione più frequenti si attestano attorno a -1,6 e -1,7 mm/anno, (si confronti anche Tabella 2.1.2.2.b).



**Figura 2.1.2.2.c – Istogramma di frequenza delle velocità di deformazione orizzontale (mm/anno) nell'Area di potenziale influenza dell'impianto (elaborazione su dati EGMS Ortho East-West)**

Si è infine proceduto all'analisi di dettaglio sull'area interessata dal progetto geotermico Castel Giorgio. In Figura 2.1.2.1.f è riportata l'ubicazione del *permanent scatter* scelto per l'analisi temporale dettagliata della deformazione orizzontale del suolo (lo stesso utilizzato per l'analisi della deformazione verticale), ubicato nell'abitato di Castel Giorgio, mentre in Figura 2.1.2.2.d si

riporta la serie temporale analizzata. La deformazione orizzontale media registrata è di -2 mm/anno, lo spostamento medio è di -3,38 mm con un RMSE di 1 mm.



**Figura 2.1.2.2.d – Serie temporale che mostra i dati di spostamento orizzontale (mm) del permanent scatter preso ad esempio (per l’ubicazione si veda Figura 2.1.2.1.f, elaborazione su dati EGMS East-West)**

L’analisi dei dati interferometrici InSAR (fonte: EGMS), evidenzia come sia nell’Area Vasta di Studio (900 km<sup>2</sup>) che all’interno dell’area di potenziale interferenza dell’Impianto Pilota Geotermico Castel Giorgio, le deformazioni orizzontali siano molto limitate. I risultati presentati rappresentano il bianco indisturbato.

Nella figura successiva (Figura 2.1.2.2.e), si riporta una rappresentazione grafica dei tassi di deformazione orizzontale annui, nella quale a ciascun *permanent scatter*, è associato un colore in base al valore sulla scala di colore presente in legenda (in rosso i movimenti verso Ovest, in blu i movimenti verso Est).

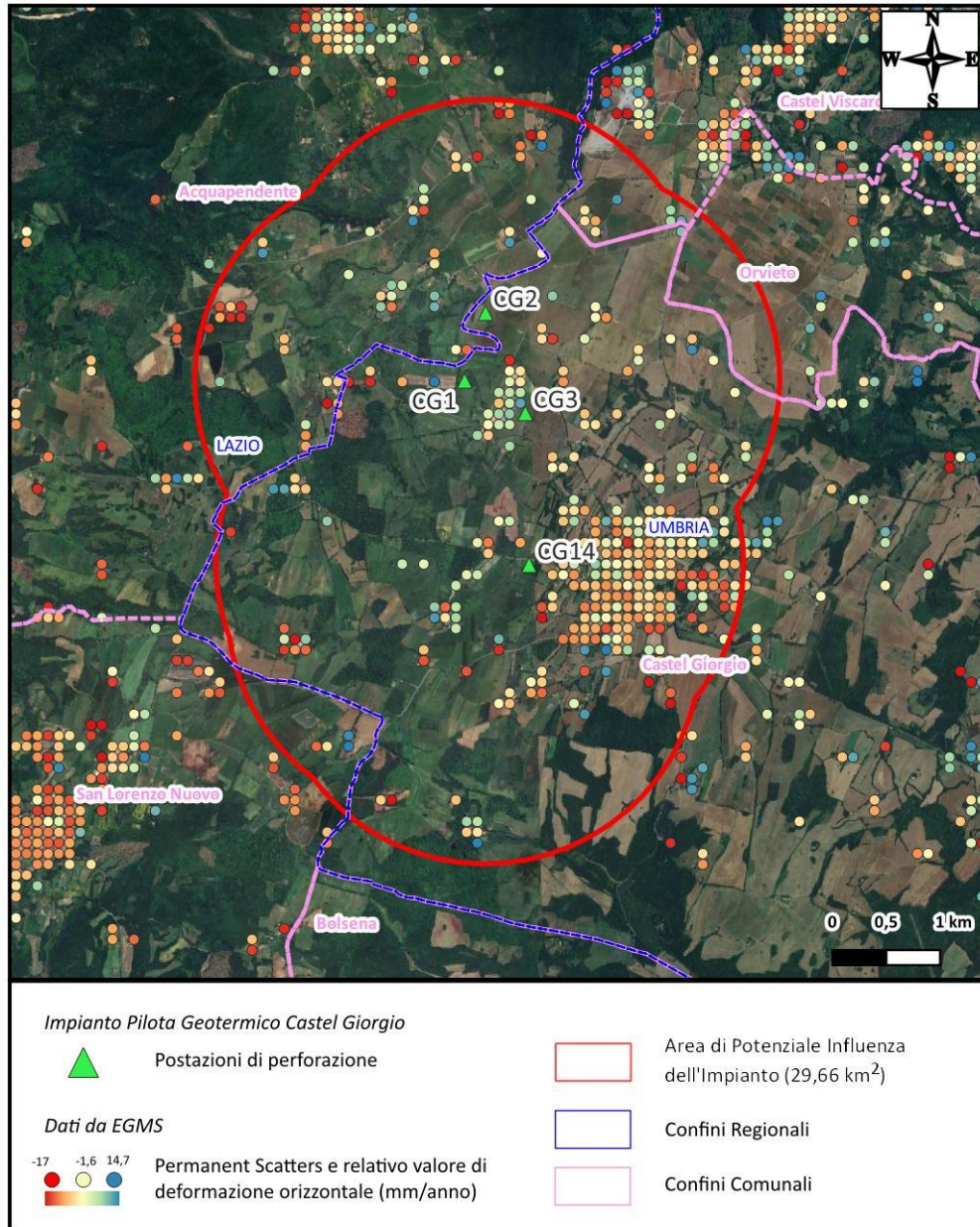


Figura 2.1.2.2.e –Rappresentazione grafica dei tassi di deformazioni orizzontale (elaborazione su dati EGMS Ortho East-West)



### 2.1.2.3 DETERMINAZIONE DELLE ZONE DI ALLARME (SUBSIDENZA)

In prima applicazione, si propone di sperimentare l'adozione di un sistema a semaforo, all'interno dell'area della potenziale area di influenza dell'Impianto Pilota Geotermico, che racchiude, come visibile in Figura 2.1.2.1.d, anche l'abitato di Castel Giorgio. All'interno di quest'area sono compresi sia i pozzi di produzione che di reiniezione.

La variabilità dei contesti geologici, delle profondità e delle modalità con cui le attività sono svolte, non consentono di stabilire in modo univoco dei valori di soglia per le variazioni delle deformazioni e dei relativi ratei, che devono essere valutate caso per caso in funzione della loro distribuzione spaziale e in riferimento al quadro deformativo di fondo.

La Tabella 2.1.2.3.a riporta intervalli o valori di riferimento indicativi che possono essere adottati per la definizione delle relative soglie, in funzione del quadro deformativo di fondo e dei valori misurati per i campi geotermici toscani.

Livello di Attenzione	Semaforo	Deformazione verticale (Dv)(mm/anno)
0	Verde	$Dv \geq -20$
1	Giallo	$-20 > Dv \geq -90$
2	Arancio	$-90 > Dv \geq -200$
3	Rosso	$Dv < -200$

**Tabella 2.1.2.3.a-Intervalli o valori indicativi dei parametri di monitoraggio rilevati da utilizzare come riferimento per la definizione delle soglie di deformazione verticale.**

In particolare:

- per il livello di attenzione 0 è stata considerata la deformazione verticale media del campo geotermico di Travale-Radicondoli (valore arrotondato), ovvero la deformazione reale misurata su un omologo geologico;
- per il livello di attenzione 3 è stata considerata una deformazione verticale annua pari a 10 volte la soglia del livello 0;
- i livelli di attenzione (2 e 3) sono definiti per valori intermedi tra i due estremi.

I criteri di definizione delle soglie di deformazione verticale anomala saranno comunque concordati con il settore competente delle Regioni/Ministero di Competenza durante le fasi operative dell'impianto.

Per i livelli di attenzione riportati in Tabella 2.1.2.3.a, si definiscono le seguenti azioni:

- livello di attenzione 0: nessuna azione prevista;
- livello di attenzione 1: comunicazione agli enti competenti del superamento della soglia di attenzione;

- livello di attenzione 2: comunicazione agli enti competenti del superamento della soglia di attenzione, verifiche dirette sul territorio, comunicazione agli enti competenti dei risultati delle verifiche; monitoraggio degli eventuali effetti negativi individuati per correlazione/non correlazione con l'attività di coltivazione;
- livello di attenzione 3: comunicazione agli enti competenti del superamento della soglia di attenzione; verifiche dirette sul territorio, comunicazione agli enti competenti dei risultati delle verifiche; monitoraggio degli eventuali effetti negativi individuati per diretta correlazione con l'attività di coltivazione; ed eventuale stop dell'impianto.

### 3

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

*Bell J. W., Amelung F., Ferretti A., Bianchi M., Novali F. (2008) - Permanent Scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer system response to groundwater pumping and artificial recharge - Water Resources Research, Vol. 44, February 2008, pp 1-18;*

*Bozzano F., Esposito C., Franchi S., Mazzanti P., Perissin D., Rocca A. & Romano E. (2015) - Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modeling with satellite InSAR data: the acque albule plain case study - Remote Sensing of Environment, 168C, 219-238, DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.010;*

*Bozzano F., Esposito C., Franchi S., Mazzanti P., Perissin D., Rocca A., Romano E., (2015) - Analysis of a Subsidence Process by Integrating Geological and Hydrogeological Modelling with Satellite InSAR Data. - Engineering Geology for Society and Territory, Volume 5, Springer International Publishing, Switzerland, pp. 155-159.*

*Burgmann R., Hilley G., Ferretti A., Novali F. (2006) - Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis - Geology, March 2006, Volume 34, N. 3, pp. 221-224;*

*Ciulli B., et al. WGC 2005 - Interpreting Ground Deformation and Microgravity Changes in the Travale-Radicondoli Geothermal Field (Italy) - Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005;*

*De Agostini Anna. (2012) - L'utilizzo dell'Interferometria Radar Satellitare nella caratterizzazione dei fenomeni franosi a differenti scale d'indagine - Tesi PHD, Scuola di Dottorato di ricerca in Scienze della Terra, Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova;*

*Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000) - Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. IEEE - Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, NO. 5, September 2000, pp 2202 – 2212;*

*Ferretti A., Colesanti C., Prati C., Rocca F. (2001) - Comparing GPS, Optical Levelling and Permanent Scatterers. Proceedings of the IEEE - International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGAARS 2001, Sydney (Australia), 9-13 July 2001, Vol. 6, pp 2622-2624, 2001;*

*Klemm H., Quseimi I., Novali F., Ferretti A., Tamburini A. (2010) - Monitoring Horizontal and Vertical Surface Deformation over a Hydrocarbon Reservoir by PSInSAR™ - First Break, Vol. 28, 2010;*

*Luzi G. (2010) - Ground based SAR interferometry: a novel tool for Ge-oscience. - Geoscience and Remote Sensing New Achievements, pp. 1-26;*

*Massonet D. & Fiegl K.L. (1998) - Radar Interferometry and its application to changes in the earth's surface. Reviews of Geophysics, 36(4), pp. 441-500;*

Mazzanti P. (2011) - *Displacement Monitoring by Terrestrial SAR Interferometry for Geotechnical Purposes*. - *Geotechnical instrumentation news (Giugno 2011)*, pp. 25-28;

Peltier A., Bianchi M., Kaminski E., Komorowski J. C., Rucci A., Staudacher T. (2010) *PSInSAR™ as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise*. - *Geophysics Research Letters*, Vol. 37, L12301, doi: 10.1029/2010GL043846, 2010;

Pigorini A., Ricci M., Sciotti A., Giannico C., Tamburini A. (2010) - *La tecnica PSInSAR™ di telerilevamento satellitare applicata al progetto ed alla realizzazione delle infrastrutture ferroviarie* - *Ingegneria Ferroviaria anno LXV Ottobre 2010 numero 10 pag 729*;

Rocca A., Perissin D., Mazzanti P., Bozzano F., 2013. *Monitoring ground instability in wide areas and single-building cases by means of satellite A-DInSAR* - *GEOTECHNICAL DIVISION 33RD ANNUAL SEMINAR "Geotechnical Aspects of Housing Supply and Development"*, Hong Kong, 31 May 2013, pp. 181-186;

UniSi, (2008) - *Studio Geostrutturale, idogeologico e geochimico ambientale dell'area Amiatina*.

- "Linee guida per l'analisi di dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici", redatte nell'ambito del progetto di copertura interferometrica nazionale "Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A)". Autori vari, dicembre 2009. Link: <http://www.pcn.minambiente.it/GN/images/documenti/leggi/LINEE%20GUIDA%20PER%20ANALISI%20DI%20DATI.pdf>
- "Nota sintetica per la comprensione del dato satellitare PSInSAR e Squeesar", progetto RiskNat-Alcotra. Autori vari. Link: [http://www.cartografiarl.regione.liguria.it/RiskNat/doc/NOTA%20SINTETICA\\_PSInSAR.pdf](http://www.cartografiarl.regione.liguria.it/RiskNat/doc/NOTA%20SINTETICA_PSInSAR.pdf)
- "Analisi dei fenomeni di subsidenza nel bacino del fiume Arno mediante interferometria radar". Canuti et al., 2006. Link: <https://www.aigaa.org/AIGA/public/GGA.2006-04.0-17.0145.pdf>
- "Nuove tecnologie radar per il monitoraggio delle deformazioni superficiali del terreno: casi di studio in Sicilia". Casagli et al., 2009. Link: [https://www.researchgate.net/publication/233859531\\_Nuove\\_tecnologie\\_radar\\_per\\_il\\_monitoraggio\\_delle\\_deformazioni\\_superficiali\\_del\\_terreno\\_casi\\_di\\_studio\\_in\\_Sicilia](https://www.researchgate.net/publication/233859531_Nuove_tecnologie_radar_per_il_monitoraggio_delle_deformazioni_superficiali_del_terreno_casi_di_studio_in_Sicilia)
- "Persistent scatterer interferometry". Crosetto et al., 2016, link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615002415>
- "Permanent scatterers in SAR interferometry". Ferretti et al., 2001, link: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/898661/>
- "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR". Ferretti et al., 2011, link: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5765671/>

- "Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research". Zhou et al., 2009, link:  
<https://www.mdpi.com/1424-8220/9/3/1876/htm>
- "Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique". Colesantiet al., 2003, link:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795202001953>
- "Landslide Types and Processes". Cruden & Varnes, 1996, pdf disponibile su researchgate.net