



## Campo di REGINA

Aggiornamento al 31/12/2018

Il campo di Regina è situato nell'offshore Adriatico a circa 16 km dalla costa e a una profondità d'acqua di circa 20 m, nella concessione A.C17.AG (Figura 1).

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C17.AG	26/05/17	Eni	Eni Edison	75% 25%	Emilia- Romagna

La struttura del giacimento Regina è costituita da un'anticlinale asimmetrica orientata NW-SE, delimitata verso Nord e verso Est da una variazione laterale di facies e a Sud-Ovest da una faglia con direzione NW-SE. La serie mineralizzata a gas è compresa tra i 980 e 1250 m slm e interessa 3 livelli principali della serie PL1 (livelli KLX, PX e R della formazione dell'alto di Canopo); l'estensione massima del giacimento è di circa 6 km<sup>2</sup> (Figura 2 e Figura 3). La revisione del modello geologico eseguita nel 2006 (rel. INPE-GEAU 40/06 del 27/10/06) ha evidenziato che tali livelli sono costituiti da banchi di sabbie grossolane amalgamate di diversi metri di spessore e con buone caratteristiche petrofisiche (permeabilità superiori ai 200 mD), che non trovano corrispondenza in nessuno dei giacimenti della serie pliocenica adriatica.

Il campo è stato scoperto nel 1995 con il pozzo Regina 1, rinvenuto mineralizzato a gas e completato per la produzione. Nel 1996 è stato perforato un secondo pozzo (Regina 2) per meglio definire la struttura. Tale pozzo è stato oggetto di un *side-track* per controllare il culmine della struttura dei livelli PL1 e PL. Nell'aprile 1996 è stata presentata da Eni una domanda di pronuncia di compatibilità ambientale concernente lo sviluppo del campo attraverso la perforazione di un massimo di 6 nuovi pozzi da una piattaforma tipo BEAF e la posa del relativo *sealine* di collegamento. Nel documento SIA è stato riportato un profilo di produzione derivante dallo studio di giacimento (modello monocella) dell'agosto 1995. Tale profilo stimava riserve a vita intera pari a 2503 MSm<sup>3</sup> producibili al 2006 con un picco di produzione giornaliera di 1200 kSm<sup>3</sup>/g.



La subsidenza massima, prevista in relazione a tale profilo e valutata con un modello del tipo Geertsma cilindrico, risultava pari a 7.2 cm (in corrispondenza del culmine del giacimento) dopo 10 anni dall'inizio produzione; sempre alla stessa data il cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) si estendeva per circa 2 km verso la costa.

Per tale previsione erano stati considerati i parametri geomeccanici che, con le informazioni disponibili a tale data, erano considerati come più rappresentativi del comportamento della formazione:

- compressibilità uniassiale  $C_m = 0.612 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$ ;
- coefficiente di Poisson  $\nu = 0.25$ .

In seguito al Decreto VIA n° 2734 del 4/04/97 che approvava il programma lavori presentato, nel 1997 si è sviluppato il campo con la perforazione di 3 pozzi (Regina 3D, 4D e 5D) da una piattaforma di tipo BEAF. Il pozzo Regina 3dir, inizialmente progettato come deviato, veniva modificato per essere equipaggiato nella parte più profonda (998÷1218 m) con *marker* per il monitoraggio in situ della compattazione profonda, come prescritto dallo stesso Decreto VIA. I marker inizialmente messi in opera sono stati 22; di questi solo 5 hanno interessato il livello principale PX, fortemente ridotto in questo pozzo. Le operazioni di tubaggio del pozzo hanno, purtroppo, portato alla perdita di uno di questi 5 *marker* riducendo così la zona di monitoraggio nel sopracitato livello PX a soli due intervalli (rel. *Eni-TERA 01/2006 dell'ottobre 2006*). Nella serie mineralizzata monitorata anche il livello R è stato interessato da un solo "*marker spacing*", mentre il livello KLX è stato trovato argillificato in questo pozzo. Il campo è entrato in produzione nell'agosto del 1997 con quattro pozzi produttivi (tre nuovi e Regina 1 già esistente) e con una portata iniziale di circa 1500 kSm<sup>3</sup>/g.

Nei primi 5 anni di produzione il comportamento produttivo del giacimento e in particolare quello del livello PX (il principale livello del campo) è risultato del tutto in linea con la previsione iniziale, dando così un'apparente conferma della bontà del modello geologico e dei parametri petrofisici assunti nello studio di giacimento dell'agosto 1995. Tale situazione ha indotto, altresì, a ritenere che fosse del tutto "normale" e in linea con la previsione iniziale anche la compattazione dei livelli produttivi.

Questo convincimento, unito anche a considerazioni generali sui rischi operativi connessi con la discesa di sonde in pozzi deviati come Regina 3dir, ha portato a differire nel tempo le



misure di compattazione su *marker* dopo i due rilievi iniziali eseguiti nel 1997 (rilievo base del luglio 1997 e successivo rilievo di ottobre 1997).

Nel settembre 2002 e ottobre 2003 si eseguivano nel pozzo i controlli dei *marker*, ben prima, quindi, della seconda fase di sviluppo del campo di cui si dirà nel seguito. Le misure ottenute, pur mostrando una certa compattazione della parte bassa del livello PLX e del livello R, non erano ritenute attendibili perché apparentemente non consistenti con la litologia dei livelli monitorati. Tale ipotesi era anche supportata dal fatto che il campione di misure a disposizione appariva limitato (solo due *marker spacing* nel livello PLX e un *marker spacing* nel livello R) per essere considerato ben rappresentativo.

Nel corso del 2003 veniva fatta una nuova interpretazione dei dati sismici dell'area con una successiva revisione dei modelli statico e dinamico del giacimento per tener conto di probabili compartimentazioni del livello PX emerse dall'analisi delle misure statiche di pressione eseguite alla fine del 2002, e per valutare di conseguenza le azioni necessarie a ottimizzare il recupero di gas. Queste ultime si sono tradotte nel completamento del programma lavori inizialmente approvato che è consistito nella perforazione di ulteriori 3 pozzi (Regina 6, 7 e 8) più un intervento di *work-over* sul pozzo Regina 4, il tutto realizzato nel periodo 2003÷2004. Un ulteriore *survey* dei *marker* eseguito nel luglio 2005 mostrava, però, risultati consistenti con quelli dei rilievi precedenti. Tale fatto, unito ai nuovi dati emersi dalla revisione del modello geologico del 2006, ha portato a riconsiderare tutte le misure dal 1997 e, quindi, utilizzarle poi nello studio di subsidenza completato nel 2006.

Nel settembre 2006 è stata fatta una nuova revisione degli studi statico e dinamico di giacimento (modello *Eclipse*) che ha portato a un aumento del GOIP dei livelli del campo (*GOIP studio statico dell'agosto 1995 pari a 3114 MSm<sup>3</sup>, GOIP revisione studio statico del settembre 2006 pari a 4709 MSm<sup>3</sup>*) e a una migliore definizione del meccanismo di produzione. Tali risultati si sono tradotti in un incremento delle riserve a vita intera producibili dal campo pari a circa il 59%, in quanto, il nuovo profilo di produzione prevede di recuperare in 18 anni 3986 MSm<sup>3</sup> di gas. In data 20/10/06 il campo di Regina è stato chiuso alla produzione da Eni in ottemperanza con quanto prescritto alla *lettera c.2 del decreto Ministero dell'Ambiente prot. DEC/VIA/2734 del 04/04/97* e come successivamente confermato dal Ministero dell'Ambiente con *nota prot. DSA-2006-0032267 del 12/12/06*. Il campo è stato riaperto in data 28/07/08 con provvedimento del Direttore dell'Ufficio UMNIG XXII sede di



Bologna nel rispetto delle condizioni riportate nella *nota n° 3075 del 14/07/08 dell'Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e la Geotermia – Ufficio XVIII della Direzione Generale per l'Energia e le Risorse Minerarie del Ministero dello Sviluppo Economico*. La durata complessiva di tale chiusura (circa 21 mesi) è stata considerata nel nuovo aggiornamento dello studio di agosto 2010. Nel corso del 2010 si è, infatti, proceduto a un nuovo aggiornamento del modello di giacimento (*rel. GISE n° 40/10 dell'agosto 2010*) per i livelli principali del campo PL1-PX e PL1-KLX, livelli che contribuiscono a più del 95% del totale della produzione. L'aggiornamento è proseguito, nel corso del 2011, considerando nel modello anche i livelli profondi che hanno contribuito a meno del 5% della produzione totale. La revisione dello studio di giacimento per i livelli principali del campo (modello *Eclipse* agosto 2010) ha portato a una migliore taratura del meccanismo di produzione, evidenziando sia un ridotto contributo degli acquiferi al sostegno di pressione dei livelli produttivi, sia l'esistenza di barriere a parziale trasmissibilità (faglie) che interessano il livello PL1-PX. Con la revisione del 2010 sono state, inoltre, ridotte (circa 10%), rispetto allo studio 2006, le riserve a vita intera producibili dai soli livelli principali. Il nuovo profilo di produzione prevede, infatti, il recupero al 2016 di 3596 MSm<sup>3</sup> di gas. Nel 2013 è stato fatto un ulteriore aggiornamento del modello dinamico di giacimento (*rel. GISE n.36/2013*) i cui risultati confermano sostanzialmente, per i livelli superficiali, quanto ottenuto con lo studio dell'agosto 2010, essendo state stimate riserve pari a 3661 MSm<sup>3</sup> producibili al 2013.

Nel 2013 è stata, inoltre, fatta una valutazione del potenziale residuo dei soli livelli profondi (*Appendice studio di giac. - Sviluppo livelli profondi, Rel. GISE-01/13 - luglio 2013*) della serie PL1 e PL drenati solo in minima parte dai pozzi esistenti nel campo. Il giacimento, infatti, a oggi è stato sviluppato quasi esclusivamente nei livelli principali PL1-KLX e PL1-PX. La revisione del campo ha portato a un aumento di circa il 10% delle riserve producibili a vita intera pari a 4142 MSm<sup>3</sup> recuperabili al 2023. Sulla base di questo studio si sono programmati interventi per ottimizzare il recupero di gas dal campo; tali interventi, realizzati nel 2014, sono consistiti nella perforazione di 3 *side-track* (Regina 6dirB, Regina 4dirB e Regina 5dirA) dalla piattaforma Regina. In Figura 4 sono riportati gli andamenti storici delle portate di gas (kSm<sup>3</sup>/g), d'acqua (m<sup>3</sup>/g) e del volume cumulativo di gas prodotto al 31/12/18 pari a 3844 MSm<sup>3</sup>.



Nel 2017, un nuovo aggiornamento del modello dinamico del campo ha rivisto sulla scorta dei nuovi dati di produzione (*Campo di Regina - Aggiornamento modello dinamico, Rel. GISE-EORG 07/17 ottobre 2017*) le riserve producibili a vita intera del campo a 3916 MSm<sup>3</sup> recuperabili al 2030 (Figura 5, Figura 6 e Figura 7).

Nella Figura 8 è presentato il confronto tra i profili di pressione calcolati con il modello *Eclipse* 2017 e le pressioni statiche più significative misurate per il livello PL1-PX caratterizzato da una evidente compartimentazione idraulica per faglia e ritenuto tra i più rappresentativi del campo. Come si può notare, esiste in generale un buon accordo tra i dati misurati e quelli calcolati con modello nonostante alcuni punti misurati e mostrati nei grafici non siano riferiti allo stesso compartimento. Sulla base dello studio di giacimento del 2017 (rel. Eni/GISE-EORG n.07/2017) è stato aggiornato il modello geomeccanico (rel. *Eni-EORG 08/2017 dicembre 2017*) per la previsione della subsidenza indotta dalla produzione del campo. Sono stati considerati due scenari utilizzando due diverse leggi costitutive per la descrizione del comportamento del materiale delle formazioni: scenario elasto-plastico con modello costitutivo "*Cam-Clay Modificato*" (MCCM) e scenario elasto-viscoplastico con modello "*Soft-Soil-Creep*" di Vermeer e Neher (VNM). I risultati dello studio per lo scenario MCCM danno una subsidenza massima di 150 cm a fine produzione (gennaio 2031) e di 157 cm a fine simulazione (gennaio 2061), mentre per lo scenario VNM tali valori si riducono rispettivamente a 126 cm (fine produzione a gennaio 2031) e di 130 cm (fine simulazione a gennaio 2061). Per lo scenario più conservativo (MCCM) il cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) si esaurisce a circa 11 km dalla costa stessa. Nelle Figura 9 e Figura 10 è mostrata l'evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm per entrambi gli scenari (MCCM e VNM).

È importante sottolineare come il particolare assetto geologico del sottosuolo limiti fortemente la possibilità che il disturbo di subsidenza possa estendersi sino a raggiungere la costa. Tale assetto geologico è ricostruito nella sezione stratigrafico-strutturale di Figura 11, che è stata interpretata su base sismica e controllata con dati di pozzo e nella quale sono evidenziati i rapporti verticali e laterali tra le formazioni (*reservoir* e copertura) e il substrato. Lungo la direttrice esaminata (WSW – ENE) in direzione della costa, i livelli mineralizzati si chiudono per limite deposizionale e per faglia contro i corpi marnoso-sabbiosi dell'Alto di Canopo che si è strutturato a partire dal Pliocene basale e che costituisce un'importante



barriera idraulica verso costa. Tutto ciò esclude la possibilità che un'eventuale depressurizzazione e, quindi, una compattazione dei sedimenti indotta dalla produzione di Regina possa interessare sia le fasce antistanti al litorale che la zona costiera.

I modelli di giacimento e geomeccanico tengono conto ovviamente della presenza di tale barriera idraulica di tipo sedimentologico-strutturale, e coerentemente, prevedono l'esaurimento del fenomeno subsidenziale a grande distanza (circa 11 Km) dalla costa.

Tra il 28 maggio e il 27 agosto 2007 (Figura 12) è stato acquisito nell'area del giacimento di Regina un rilievo batimetrico di precisione (tramite *eco-sounder multibeam* con un'accuratezza della misurazione pari a circa  $\pm 5$  cm), che ha interessato una superficie di circa 400 Km<sup>2</sup> dall'isobata -5 m fino a circa 24 Km di distanza dalla costa.

Per valutare il possibile impatto della produzione del periodo 1997 - 2007 sulla stabilità del fondale marino si è cercato di ricavare una mappa del cono di subsidenza per l'area di Regina come differenza tra il trend regionale prevedibile del fondale stesso e la batimetria misurata nel rilievo del 2007.

Ottenuta tale mappa, si è fatto un confronto tra il rilievo batimetrico del 2007 e i risultati dello studio geomeccanico del 2017 per entrambi gli scenari considerati (Figura 13) dal quale è emerso un buon accordo relativamente all'estensione del cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 5 cm) prevista da modello rispetto alle evidenze del rilievo batimetrico. In particolare, dal confronto effettuato lungo le sezioni (Figura 14) si può notare che il valore massimo di subsidenza previsto al 2007 dal modello geomeccanico per lo scenario MCCM (114 cm) è sovrastimato rispetto a quanto misurato alla stessa data dal rilievo batimetrico (80 cm), mentre il valore massimo previsto per lo scenario VNM (85 cm) è in buon accordo con le misure. Il confronto conferma, quindi, come le previsioni di subsidenza formulate con il modello geomeccanico del 2017 siano in buon accordo con le misure per quanto riguarda lo scenario VNM, mentre siano formulate su ipotesi cautelative per lo scenario MCCM.

Nel corso del 2014 sono stati nuovamente acquisiti rilievi batimetrici *multibeam* (transetti) nel campo di Regina (Figura 12) al fine d'investigare ulteriormente la subsidenza del fondale marino, sia in termini di estensione che di entità. Il nuovo survey batimetrico è stato oggetto di uno studio specifico eseguito presso il Dipartimento di Geologia dell'Università di Bologna dal prof. Gabbianelli (vedi allegato: "*Stima dell'impatto subsidenziale indotto nel fondale marino dalla coltivazione del giacimento di gas metano REGINA, così come rico-*



struibile in base ai rilievi batimetrici condotti nell'area da Eni nel 2007 e nel 2014" del marzo 2016), avente per obiettivo l'analisi di eventuali impatti subsidenziali prodotti dall'attività di coltivazione del campo a gas di Regina dal 2007 al 2014. I risultati dello studio di UniBO mostrano come dal confronto tra i due rilievi si possa evidenziare un differenziale batimetrico che si attesta intorno a valori dell'ordine dei -20 cm circa. Il tasso subsidenziale registrato è congruente con i circa -21 cm cumulativi indicati dalle misure CGPS disponibili per lo stesso intervallo temporale (2007-2014).

**Tabella 1 - Subsidenza prevista dal modello nell'intervallo temporale 2007-2014**

periodo	Scenario MCCM		Scenario VNM	
	punto Max sub (cm)	punto CGPS (cm)	punto Max sub (cm)	punto CGPS (cm)
2007-2014	16	14	21	20

Anche i risultati forniti dal modello geomeccanico per l'intervallo 2007-2014 sono in ottimo accordo con tali valori batimetrici (vedi Tabella 1).

In sintesi, le principali conclusioni del rapporto evidenziano quanto segue:

- manca di un rapporto causa-effetto esclusivo tra gli abbassamenti rilevati e la forzante subsidenziale. Non è stato rilevato cioè un abbassamento generalizzato del fondale; per contro, sono evidenti estesi settori areali con valori positivi (dell'ordine di +20/ +70 cm) riconducibili a effettivi innalzamenti/riequilibrio del fondale stesso;
- evidenza per l'intervallo di tempo 2007-2014 di modesti tassi subsidenziali (laddove presenti) di circa -20 cm compatibili con le indicazioni puntuali del CGPS (-21 cm).
- I risultati forniti dal modello geomeccanico per l'intervallo 2007-2014, riportati in Tabella 1, sono in ottimo accordo con tali valori batimetrici, specialmente per quanto riguarda lo scenario VNM.

Oltre all'acquisizione della batimetria sono stati eseguiti anche specifici rilievi ambientali al fine di verificare l'eventuale impatto sul fondale marino indotto dalla produzione del campo di Regina. Il complesso di tutte le indagini effettuate (es.: batimetria, analisi sedimentologiche e granulometriche dei sedimenti e delle associazioni bentoniche) hanno permesso di concludere che la subsidenza locale indotta dalla coltivazione del giacimento, produce effetti limitati che non alterano l'ambiente strettamente costiero e il fondale marino interessato



(rel. *Eni-Università di Urbino del novembre 2007 trasmessa a MATTM e MSE in data 23/01/2008 - prot. SAOP n. 092 e successivamente a MATTM in data 11/11/2008 - prot. UGIT ET/mv 1410*).

A partire dai primi anni '70, Eni ha progettato e realizzato lungo la costa adriatica una rete di livellazione geometrica che, su richiesta degli Enti di Controllo a livello regionale e nazionale (Regione Emilia-Romagna, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna e Ministero dell'Ambiente), è rilevata con cadenza periodica. A partire dalla campagna 2011, dopo un intervallo di un anno nel 2010 (anno in cui non sono state fatte livellazioni), tale periodicità ha una cadenza triennale come raccomandato nelle *"Linee Guida per lo Studio del Fenomeni di Subsidenza nell'Ambito dei Progetti di Sviluppo Sostenibile di Campi ad Olio e Gas"* emesse dal Dip. DMMMSA dell'Università di Padova nel 2007.

Le specifiche tecniche adottate sono quelle ora in uso per i rilievi della rete Eni e rispettano le indicazioni contenute nelle già citate linee guida emesse dall'Università di Padova.

Eni, inoltre, ha affidato la certificazione della documentazione e della metodologia utilizzata a un ente esterno, che attualmente è il Dipartimento DICAM dell'Università di Bologna.

- La rete di livellazione rilevata nel 2017 (ultimo rilievo eseguito), è stata ampliata con l'aggiunta di uno sbraccio esteso all'area del campo di Agosta.
- Tale rete è suddivisa nelle seguenti aree di attività:
- dorsale Adriatica, da Treviso fino a Pesaro, compreso lo sviluppo degli sbracci sul delta del Po, per un totale di circa 1200 km di sviluppo lineare;
- tratto da Pesaro a P.to San Giorgio, per un totale di circa 210 km di sviluppo lineare;
- tratto Marche-Abruzzo, da P.to San Giorgio a Pescara, per un totale di circa 220 km di sviluppo lineare.

Le operazioni di campagna si sono svolte nel periodo compreso tra agosto e ottobre 2017 sotto la diretta supervisione di tecnici Eni e degli esperti dell'ente certificatore.

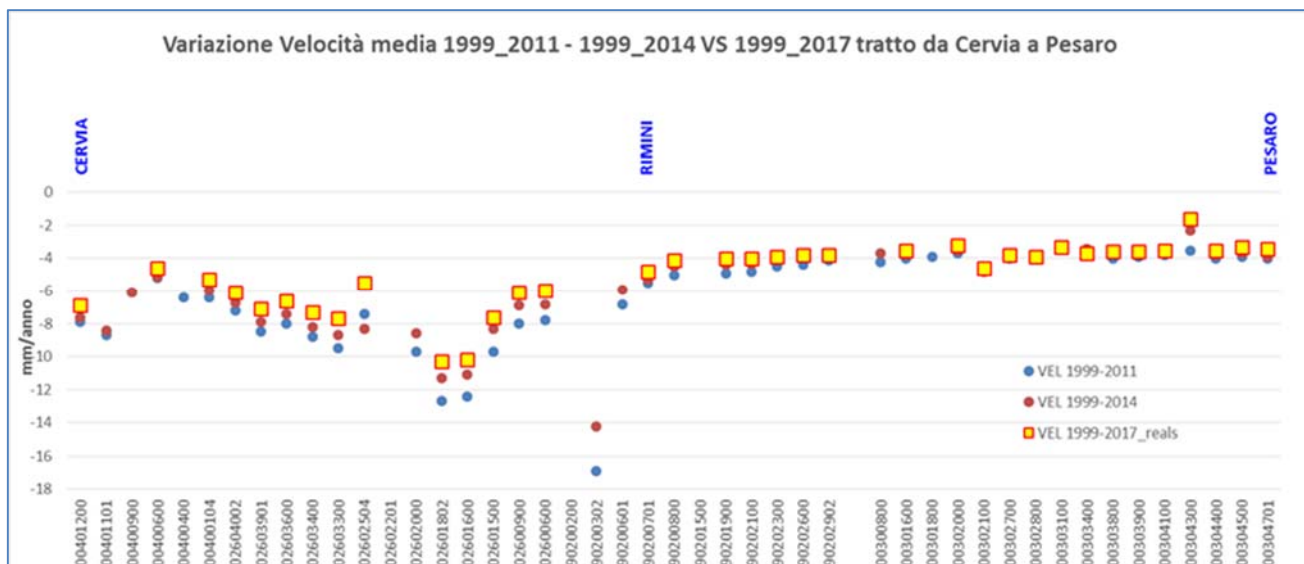
Si ritiene opportuno sottolineare, inoltre, che, sebbene vi siano punti di contatto tra i vari tratti di livellazione afferenti alla rete Eni, allo stato attuale non è possibile utilizzare in modo congiunto i valori di quota ottenuti sulle singole reti a causa della disomogeneità tra i capitali origine delle tre reti di livellazione. Per ovviare a tale situazione, determinata da fattori ambientali (grandi distanze), su suggerimento dell'ente certificatore è stata realizzata una



linea di stazioni permanenti CGPS disposte a distanze regolari tra Pineto e P.to Sant'Elpidio che, con il consolidamento dei dati CGPS, costituiranno una serie di capisaldi origine omogenei, tali da consentire d'ottenere misure di quota fra loro consistenti da Treviso a Pescara. Per il tratto di costa da Cervia a Pesaro, monitorato per controllare la stabilità del litorale emiliano-romagnolo, sono disponibili, includendo la campagna del 2017, 13 serie di misure. Queste ultime sono state eseguite con cadenza annuale dal 1999 al 2009 (10 serie) e, successivamente a partire dal 2011, con cadenza triennale. La campagna del 2001 non è utilizzabile essendo stata acquisita con un'origine diversa rispetto a tutte le altre.

Le velocità medie di subsidenza, stimate con regressione lineare e relative ai capisaldi di tale tratto di costa, sono riportate in Figura A per i seguenti periodi: 1999-2011, 1999-2014 e 1999-2017. Il confronto fra i valori rilevati dei tre periodi mostra come negli ultimi anni dette velocità siano generalmente in diminuzione. Il fenomeno, già osservato con le misure del 2014, è stato ulteriormente confermato dai dati acquisiti con la campagna di livellazione del 2017.

**Figura A –Tratto Cervia-Pesaro: velocità medie di subsidenza**



Le misurazioni di campagna si sono svolte nel pieno rispetto delle specifiche tecniche, con il controllo periodico dei supervisor e con la verifica di chiusura di tutti i tratti in andata e ritorno, nonché di tutti i poligoni realizzati. I parametri matematici della compensazione rientrano nei canoni previsti, sia per i valori di chiusura, sia per i valori legati alla propagazione dell'errore. Come programmato in precedenza, l'ente certificatore ha iniziato, da questa campagna, ad introdurre la compensazione sviluppata utilizzando i valori di velocità desunti



dalle stazioni CGPS permanenti della rete Eni. A questo proposito, però, è necessario anche segnalare che i valori delle quote dei capisaldi ottenuti con questo procedimento possono differire da quelli che si ottengono con la compensazione classica, che è invece vincolata a un solo caposaldo di riferimento. In effetti, ciò è stato osservato nel caso dei risultati del rilievo 2017, in cui le misure delle quote di alcuni capisaldi sono risultate maggiori dei corrispondenti valori rilevati con la livellazione del 2014. Valori questi ultimi che erano stati ottenuti con la compensazione classica vincolata al solo caposaldo di Treviso.

I risultati del rilievo 2017 sono, comunque, compatibili con il quadro generale di una diminuzione della velocità di subsidenza osservata anche con il monitoraggio SAR.

Si deve osservare, inoltre, che i dati di livellazione, misurati sul singolo caposaldo, non sono di solito sufficienti per caratterizzare la distribuzione areale della subsidenza. Tali misure, infatti, possono essere talvolta alterate da “disturbi” accidentali intervenuti nel tempo sui manufatti su cui i capisaldi stessi sono stati materializzati.

Al fine d’ottenere una rappresentazione areale della subsidenza o della velocità media di subsidenza  $V_a$ <sup>1</sup> di una certa area è necessario avere, quindi, misure di livellazione di più capisaldi, per la cui interpretazione può convenire poi una suddivisione nelle seguenti classi di valori:

- classe 4: include i capisaldi con  $V_a \geq 10$  mm/a;
- classe 3: include i capisaldi con  $5 \leq V_a < 10$  mm/a;
- classe 2, include i capisaldi con  $3 \leq V_a < 5$  mm/a;
- classe 1: include i capisaldi con  $0 \leq V_a < 3$  mm/a;
- classe 0: include i capisaldi con  $V_a < 0$  (sollevamento del suolo).

L’elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 1999-2014 mostra per l’area in esame un quadro di generale abbassamento, con valori in leggera diminuzione rispetto a quelli misurati nelle campagne fatte fino al 2011. Il 50% dei punti, infatti, ricade nella classe 2, il 45% dei punti in quella 3 e solo il 5% (due capisaldi) ha valori di  $V_a$  di poco superiori a 10 mm/a (11.3 mm/a come valore massimo).

Il confronto con i dati di livellazione del periodo 1999-2017 conferma, come già detto, tale rallentamento della velocità di subsidenza, che è diffuso per tutto il tratto analizzato. Ricade,

---

<sup>1</sup> Nel presente rapporto di norma le velocità di subsidenza (i.e di abbassamento della superficie) sono riportate con valori negativi. Per comodità d’interpretazione, però, nell’elenco che segue, come pure nei due paragrafi successivi, le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.



infatti, nella classe 2 il 60% dei punti analizzati, il 31% dei punti in quella 3, mentre è praticamente invariata la percentuale dei punti appartenenti alla classe 4 (6%, ovvero due soli punti); un solo caposaldo appartiene alla classe 1.

Le campagne future (il prossimo rilievo è previsto nel 2020), insieme al progressivo miglioramento della nuova metodologia di compensazione dei dati di campagna basata sulle velocità delle stazioni CGPS, potranno eventualmente meglio definire i trend di movimento del tratto analizzato, al netto di eventuali movimenti anomali localizzati sui singoli capisaldi, movimenti che saranno oggetto di verifica durante le prossime campagne di misura.

Per completare il monitoraggio altimetrico del tratto di costa antistante alle piattaforme si è proceduto, inoltre, ad aggiornare la copertura SAR (ottobre 2018) per un'analisi areale altimetrica integrata (Appendice A) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 15).

Le attività di monitoraggio sono state progressivamente potenziate mettendo in opera un numero crescente di stazioni CGPS sulle piattaforme offshore operate da Eni. Dal 2007, infatti, ne sono state installate sulle piattaforme di Regina e Calpurnia (giugno 2007), di Anemone B (agosto 2007), di Annalisa (ottobre 2007), di Calipso, Tea-Lavanda-Arnica, Clara Est e Clara Nord (novembre 2007), di Barbara NW (gennaio 2008), di Bonaccia (febbraio 2008), di Annamaria A e Annamaria B (gennaio 2010), di Clara W (ottobre 2010) e di Guendalina (agosto 2011). Le stazioni CGPS di Naide e PCC sono, invece, operative dal luglio 2005, mentre la postazione Naomi-Pandora è attiva dal giugno 2002. In tempi più recenti sono state installate anche le nuove stazioni CGPS di Elettra (luglio 2014), di Fauzia (settembre 2014), di Barbara E (novembre 2014), di Bonaccia NW (settembre 2015), e, infine di Clara NW (marzo 2016). Le serie storiche di misure CGPS acquisite nelle stazioni messe in opera nel periodo 2015-2016, sono, però, ancora troppo brevi per consentire valutazioni specifiche.

Il sistema di monitoraggio è stato poi ulteriormente potenziato con la costruzione lungo la costa, nel tratto prospiciente i campi sopracitati, di 3 nuove stazioni altimetriche *SSU* (*Satellite Survey Unit*) equipaggiate ciascuna con un CGPS, un caposaldo di livellazione geometrica e 2 bersagli radar solidalmente connessi tra loro tramite una trave di cemento armato. Le 3 stazioni *SSU* sono state realizzate nelle Centrali Eni di Rubicone, di Fano e di Falconara nel dicembre 2007 (Appendice B); negli stessi siti sono stati perforati tra ottobre e dicembre 2008 anche tre pozzi assestometrici per il monitoraggio della compattazione



superficiale del terreno. Tali stazioni si sono aggiunte a quelle preesistenti, installate più a Nord lungo la costa ravennate, nelle località di Fiumi Uniti, di Smarlacca e di Spinaroni.

Inoltre, come detto in precedenza, sono state monumentate altre 4 stazioni CGPS in Ortona, Pineto, Grottammare e P.to Sant'Elpidio, il cui completamento è avvenuto nel dicembre 2009, tutte equipaggiate con 2 bersagli *radar* e con un caposaldo di livellazione.

Allo stato attuale la stazione di Ortona non è più operativa dal 19 aprile 2013 per l'alienazione dell'area. Nel novembre 2016, infine, è stata messa in opera una nuova postazione CGPS a Miglianico (completata con i *corner reflector* nel mese di maggio 2017).

Nel corso del 2018, sono state installate due nuove postazioni CGPS, entrambe nella configurazione S.S.U. sulle postazioni di Pomposa (ACPO – installata a settembre 2018) e di Po di Tolle (POTO – installata nel mese di luglio 2018). Una volta acquisita e consolidata una serie storica sufficientemente lunga di misure, tutte le nuove stazioni entreranno a fare parte delle stazioni utilizzate per il monitoraggio della stabilità della costa.

Analogamente a quanto avviene per le livellazioni, anche i dati del monitoraggio CGPS sono validati da un ente esterno. Attualmente questa attività è svolta dall'Università degli Studi di Bologna, facoltà di Fisica – Dipartimento di Fisica e Astronomia DIFAS.

I dati CGPS acquisiti sulla piattaforma Regina, certificati fino al 2016 e in fase di certificazione per gli anni successivi, sono stati elaborati con il *software* scientifico Bernese dalla ditta e-GEOS. Per rappresentare in grafici plano-altimetrici la serie storica più completa di misure, ovvero quella estesa al 31/12/2018 (Figura 16), sono stati utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati, come mostrato nella seguente Tabella 2.

**Tabella 2 – Confronto dati CGPS certificati e non certificati aggiornati al 31/12/2016**

Stazione	Dati Non Certificati			Dati Certificati			Delta (Non Cert. - Cert.)		
	Vel-N mm/a	Vel-E mm/a	Vel-H mm/a	Vel-N mm/a	Vel-E mm/a	Vel-H mm/a	D-N mm/ a	D-E mm/a	D-H mm/a
Regina	17.28	28.46	-25.01	17.43	28.19	-25.43	-0.15	0.27	0.42

A questo proposito è opportuno precisare che l'analisi e l'interpretazione degli andamenti nel tempo delle misure altimetriche CGPS, da utilizzarsi per una verifica/taratura dei modelli previsionali di subsidenza, non possono essere considerate sufficientemente attendibili per



dataset relativi a periodi di osservazione inferiori ai 36 mesi, come indicato dall'Ente che certifica tali dati con cadenza biennale.

L'Ente certificatore, infatti, verifica e valida i dati registrati al fine d'avere un numero sufficiente d'osservazioni per il corretto inquadramento delle componenti periodiche, della loro incidenza sulle misure e poter filtrare il "rumore" che per piccole velocità di subsidenza è dello stesso ordine di grandezza del valore del fenomeno fisico osservato.

Serie storiche di durata inferiore ai 36 mesi possono, quindi, essere utilizzate solo per confrontare il trend degli andamenti temporali delle misure altimetriche con quello dei valori calcolati da modello previsionale, qualora si abbia una subsidenza caratterizzata da valori sufficientemente elevati. In questi casi sarà possibile monitorare solo eventuali anomalie di trend, ma non procedere a un confronto diretto dei valori attesi da modello vs. i valori misurati.

In generale:

- dataset < 12 mesi: solo *follow up* per monitoraggio dei dati acquisiti
- dataset di 12÷36 mesi e
  - piccoli valori di subsidenza attesi: analisi tendenziale del fenomeno e monitoraggio delle anomalie verso il *trend* previsionale;
  - grandi valori di subsidenza attesi: analisi tendenziale del fenomeno per calibrazione del modello previsionale;
- dataset > 36 mesi: analisi di *trend* e calibrazione dei modelli geomeccanici confrontando il dato di velocità di subsidenza misurato (depurato dalla velocità di subsidenza naturale) e i valori dei modelli previsionali.

Le elaborazioni sono state fatte con *software* scientifico Bernese, strategia OBS-MAX, utilizzando i prodotti finali (effemeridi precise e file del polo) messi a disposizione dall'IGS (International GNSS Service). Come anticipato nella precedente relazione, le elaborazioni dei dati CGPS, sono state effettuate utilizzando il sistema di riferimento ITRF2014 con il *software* BERNESE 5.2. Per le nostre elaborazioni il sistema di riferimento è materializzato dalle stazioni appartenenti alla rete EUREF disponibili tra: Bucarest, Genova, Graz, Matera, Medicina, Padova, Penc, Sofia, Torino, Zimmervald. L'eliminazione degli *outlier* delle serie storiche è effettuata mediante test a 3 SIGMA iterativo.



Per il campo di Regina, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale<sup>2</sup> pari a -24.1 mm/a (Figura 16 e Figura 17), sostanzialmente senza variazioni significative rispetto a quanto riportato nella precedente relazione d'aggiornamento (-23.7 mm/a al 2017).

Nell'andamento temporale di tale *dataset* di misure CGPS, inoltre, si possono osservare almeno due significative variazioni di velocità, che sono ben correlabili con corrispondenti periodi della storia produttiva del campo (Figura 18).

In particolare:

- la velocità media di subsidenza totale è di circa -38.74 mm/a nel periodo giugno 2007 (installazione del CGPS) - gennaio 2011;
- la velocità media, di subsidenza totale è di circa -19.47 mm/a nel periodo gennaio 2011 - dicembre 2018.

La diminuzione osservata nel secondo periodo, può essere messa in relazione con l'attuale fase di declino della produzione.

Si segnala altresì che eventuali piccole differenze nelle stime delle velocità, che si possono verificare rielaborando in epoche successive i dati CGPS, dipendono anche dal fatto che l'aggiornamento delle serie storiche comporta sia l'elaborazione di un modello periodico più attendibile, sia la ridefinizione degli *outliers*, che sono determinati mediante il *test* a tre sigma su tutta la serie storica esistente. Le elaborazioni delle nuove serie storiche sono state influenzate sia dal cambio del sistema di riferimento (da ITRF2008Igb08 a ITRF2014) sia dall'utilizzo della nuova release del software scientifico Bernese (da 5.0 a 5.2). Entrambe le condizioni hanno introdotto modeste variazioni nelle velocità medie pregresse, dovute anche al ricalcolo delle serie storiche delle stazioni di riferimento. In particolare, le verifiche effettuate hanno mostrato che tali condizioni possono determinare un aumento della velocità di subsidenza dell'ordine di 0.5 mm/anno, anche sulle serie storiche delle stazioni di riferimento. Nelle Figura 19 e Figura 20 è mostrato il confronto tra gli abbassamenti del fondale marino misurati dal CGPS in piattaforma e i valori di subsidenza calcolati dal modello geomeccanico del 2017. Come si può osservare, le misure CGPS sono ripro-

<sup>2</sup> La "subsidenza totale" rappresenta in questo caso l'abbassamento altimetrico che il fondale marino subisce in corrispondenza della piattaforma su cui è installato il CGPS. A determinare tale "subsidenza totale" concorrono vari fenomeni: la compattazione di strati profondi per estrazione di gas (subsidenza antropica), movimenti tettonici e costipazione naturale dei sedimenti (subsidenza naturale), compattazione dei sedimenti più superficiali a fondo mare per effetto del peso della piattaforma. Quest'ultimo fenomeno è evidente soprattutto nel periodo immediatamente successivo all'installazione della piattaforma stessa.



dotte in modo soddisfacente dal modello per entrambi gli scenari e, in particolare, lo scenario VNM è quello in grado di riprodurre con estrema accuratezza l'andamento della subsidenza.

Nel corso del 2014, durante una campagna di W.O. nel campo di Regina, sono stati installati nuovi marker nel pozzo Regina 6 dirB al fine di ripristinare il monitoraggio in situ della compattazione in giacimento, non più possibile sul pozzo Regina 3dir (Figura 21) per problemi meccanici (es. restrizioni del tubing in pozzo - come da "*comunicazione Eni-MATTM prot. num. 0001025/DICS del 24/10/2013*"). Dopo l'installazione in formazione dei nuovi marker, nel tratto di foro compreso tra 1015 m e 1225 m, si è eseguito nel settembre 2014 il rilievo base. Nell'ottobre 2015 e nel dicembre 2016, 2017, 2018 sono stati acquisiti *survey* di controllo, i cui risultati sono mostrati in Figura 22.

In sintesi, le indicazioni del modello previsionale di subsidenza e i monitoraggi fatti da Eni hanno confermato come eventuali fenomeni di subsidenza connessi con la produzione di gas dal campo di Regina non abbiano alcun impatto sull'andamento altimetrico del tratto di costa antistante.

Si segnala infine che:

- a) in Figura 23 - Scheda di sintesi dati campo è presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 24 - Particolare della rete di monitoraggio Eni è presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.

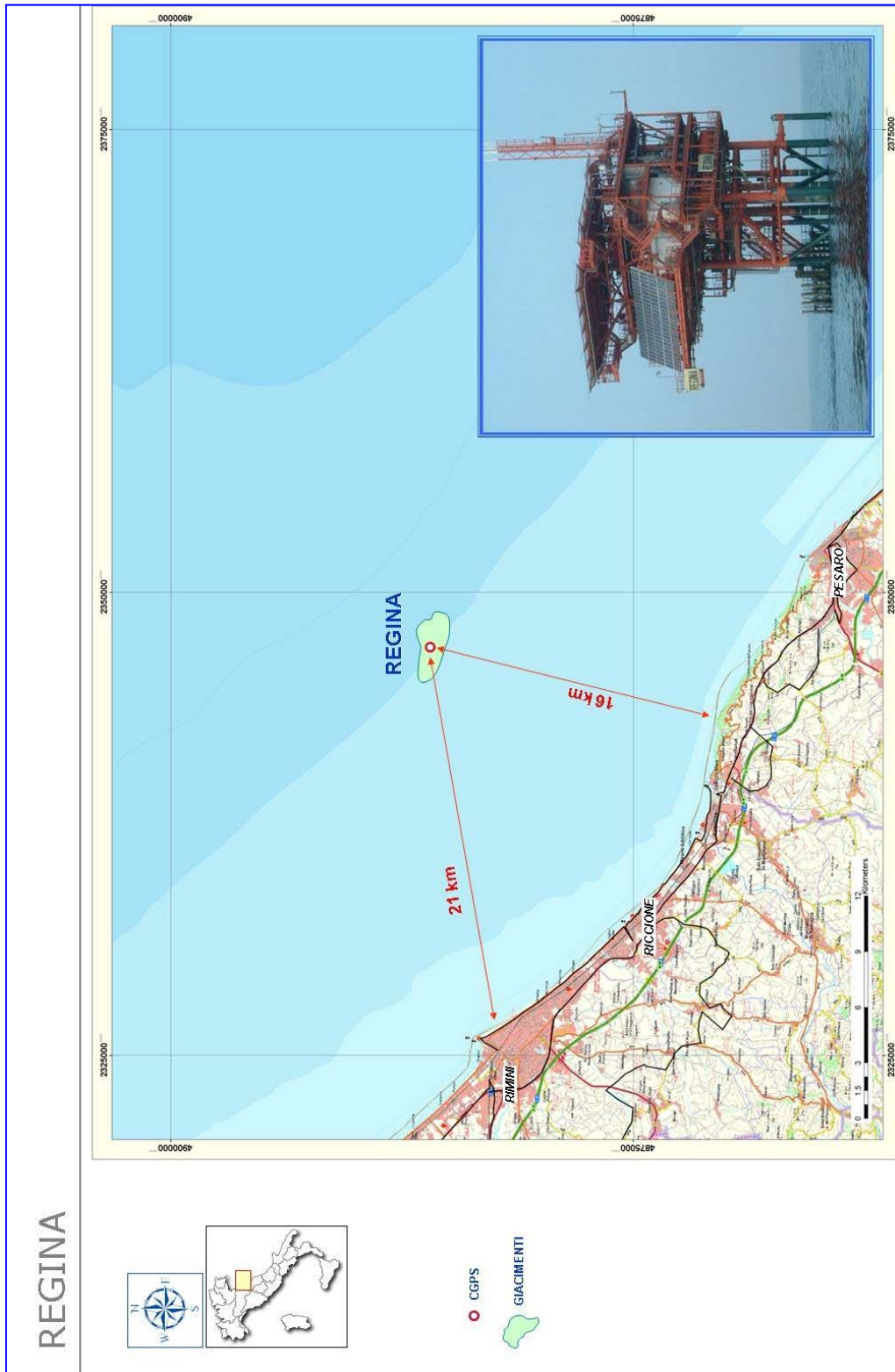


Figura 1 - Ubicazione del campo di Regina



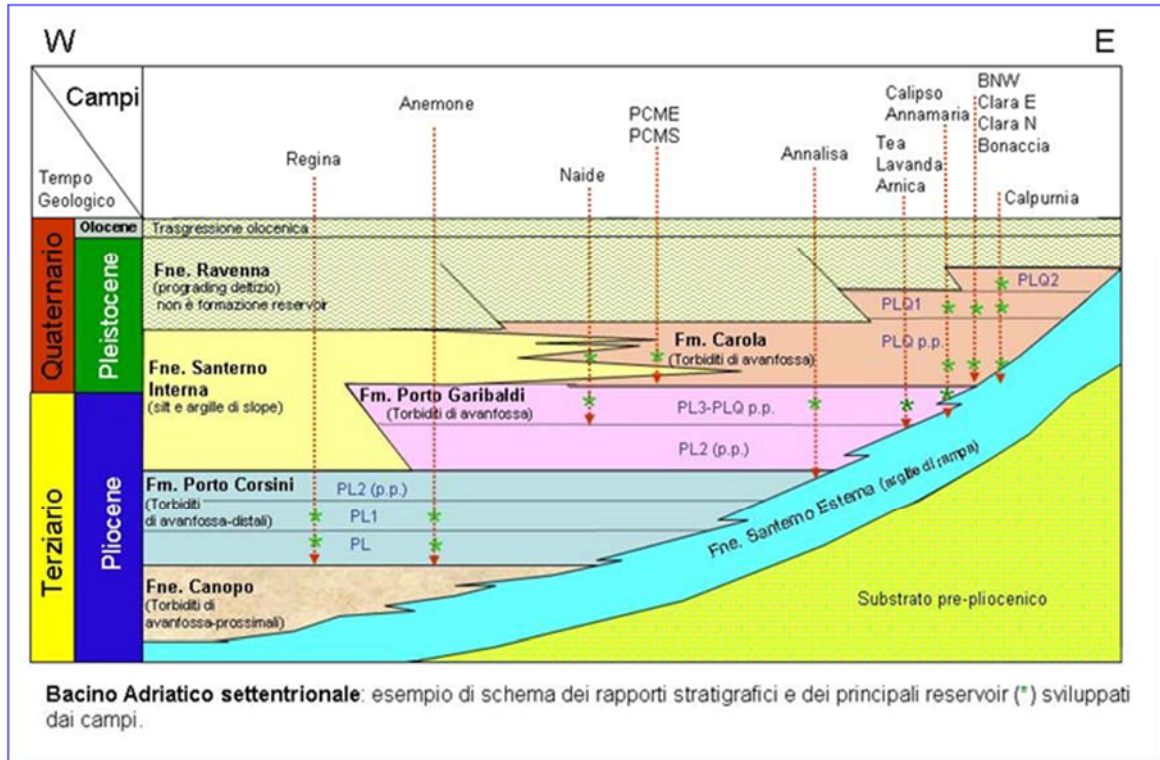


Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici

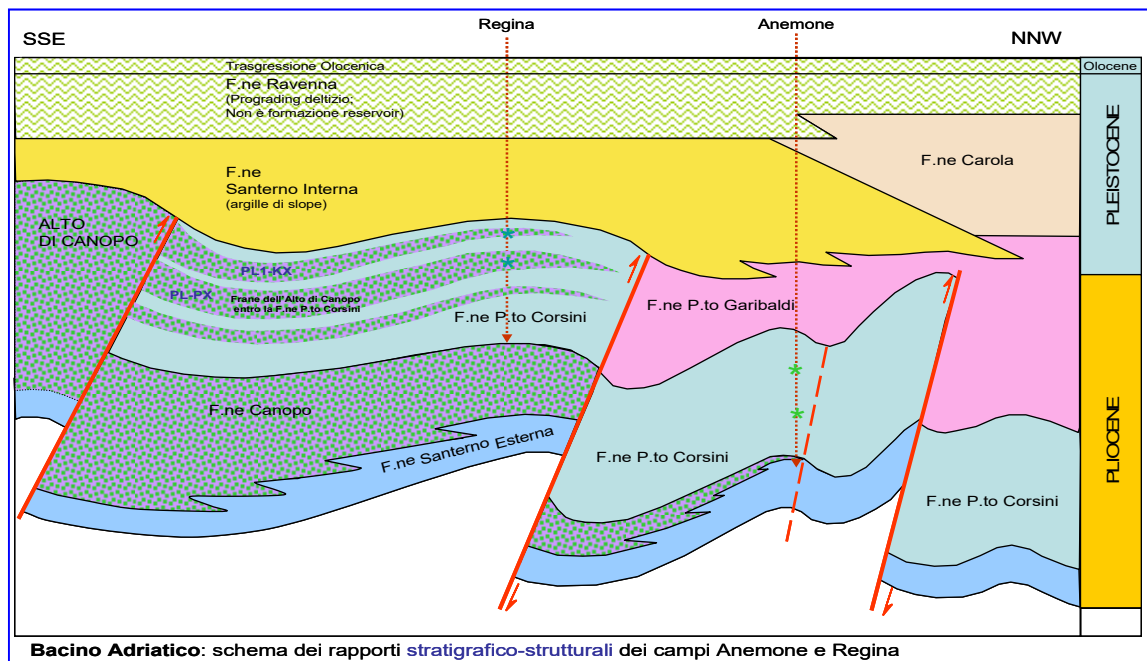


Figura 3 - Schema dei rapporti stratigrafico strutturali dei campi di Anemone e Regina

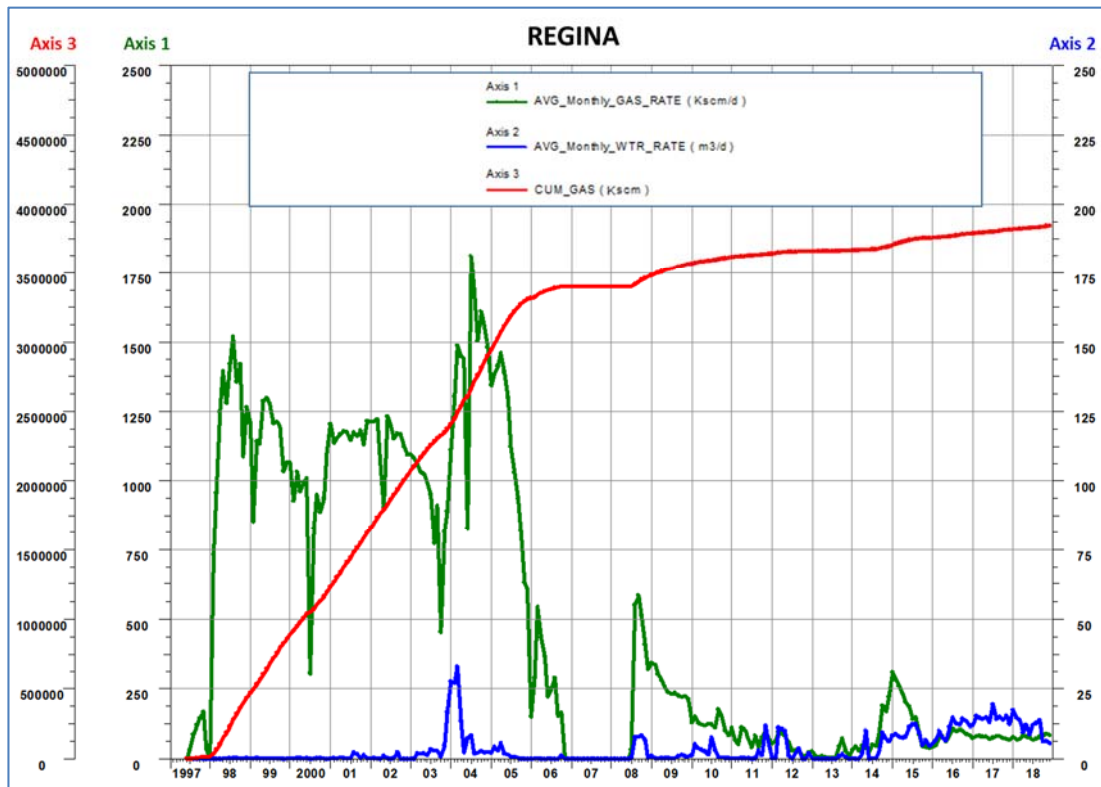


Figura 4 - Campo di Regina: produzione storica



CAMPO DI REGINA					
ANNO	Produzione annuale (MSm <sup>3</sup> )		Produzione cumulativa (MSm <sup>3</sup> )		Rapporto Produzione reale vs Riserve modello 3D ECLIPSE
	Reale	Modello 3D ECLIPSE	Reale	Modello 3D ECLIPSE	
1997	18	18	18	18	0%
1998	417	417	435	435	11%
1999	424	424	859	859	22%
2000	335	335	1194	1194	30%
2001	427	427	1621	1621	41%
2002	419	419	2040	2040	52%
2003	337	337	2377	2377	61%
2004	528	528	2904	2904	74%
2005	408	408	3312	3312	85%
2006	87	87	3399	3399	87%
2007	0	0	3399	3399	87%
2008	74	74	3473	3473	89%
2009	94	94	3567	3567	91%
2010	46	46	3614	3614	92%
2011	29	29	3642	3642	93%
2012	18	18	3660	3660	93%
2013	7	7	3667	3667	94%
2014	30	30	3697	3697	94%
2015	60	60	3757	3757	96%
2016	30	30	3787	3787	97%
2017	28	18	3815	3805	97%
2018	29	15	3844	3820	98%
2019		14		3834	
2020		12		3846	
2021		11		3857	
2022		10		3867	
2023		9		3876	
2024		8		3884	
2025		7		3892	
2026		6		3898	
2027		6		3904	
2028		5		3909	
2029		4		3913	
2030		3		3916	

Figura 5 - Campo di Regina: produzione reale e da modello Eclipse 2017

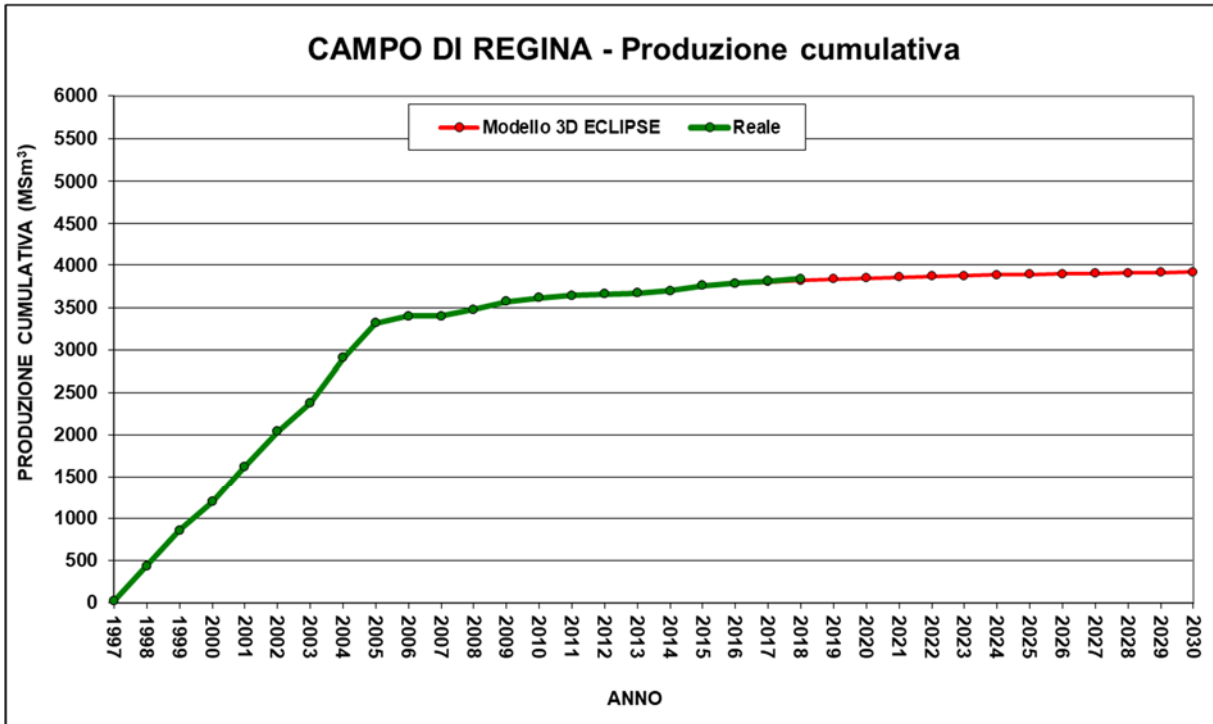


Figura 6 - Campo di Regina: grafico di produzione reale e da modello Eclipse 2017

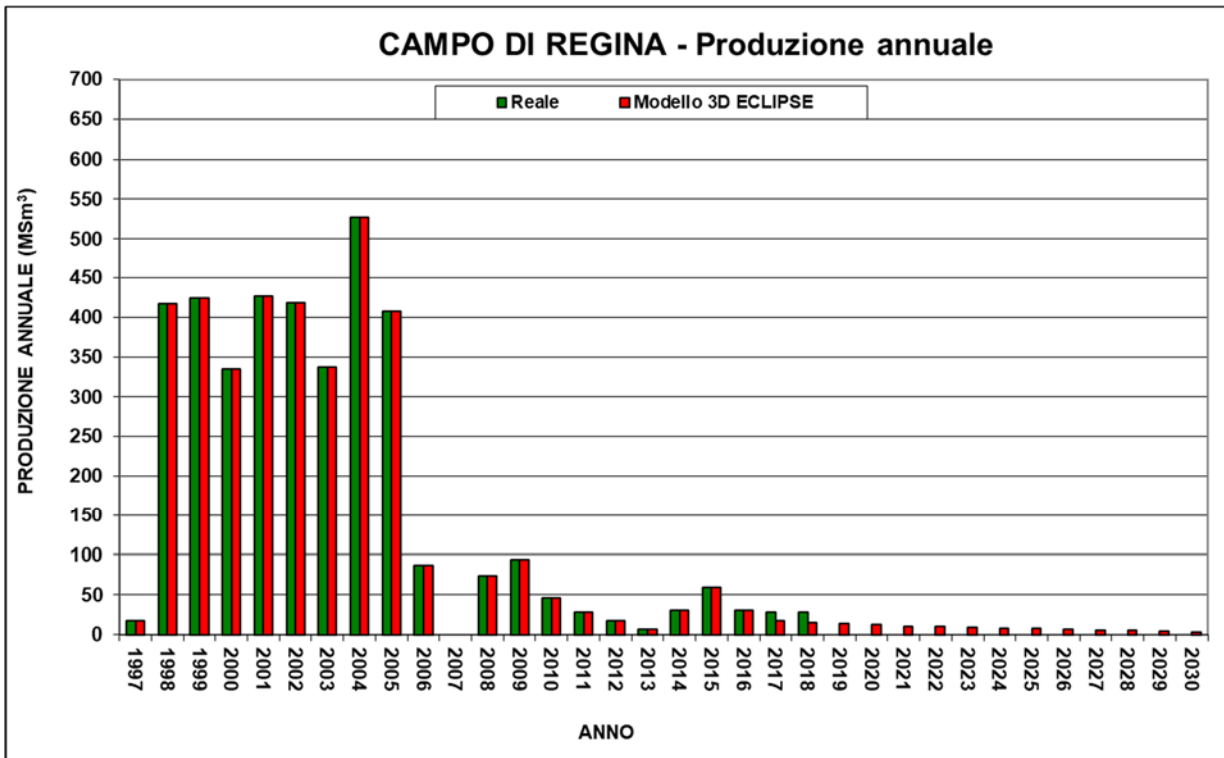


Figura 7 - Campo di Regina: produzione reale (annuale) e da modello Eclipse 2017



CAMPO DI REGINA												
Data	Livello PL1-PX upper			Livello PL1-PX upper + lower 1			Livello PL1-PX lower 1 + lower 2			Livello PL1-PX upper + lower 1 + lower 2		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
01/05/1995	119	1 Dir		119	1 Dir		119	1 Dir		119	1 Dir	
01/07/1996	119	2 Dir		119	2 Dir		119	2 Dir		119	2 Dir	
01/08/1996	119	2 Dir A		119	2 Dir A		119	2 Dir A		119	2 Dir A	
01/07/1997	119	4 Dir		119	4 Dir		119	4 Dir		119	4 Dir	
01/07/1997	119	3 Dir		119	3 Dir		119	3 Dir		119	3 Dir	
01/08/1997	119	5 Dir		119	5 Dir		119	5 Dir		119	5 Dir	
24/03/1999				93		5 C	98		3 L			
06/12/2000										91		1 L
04/09/2002	71		4 C	55		5 C	59		3 L			
02/10/2002										73		1 L
01/12/2003	80	7 Dir		80	7 Dir		81	7 Dir		81	7 Dir	
01/01/2004	61	6 Dir		61	6 Dir		62	6 Dir		61	6 Dir	
01/03/2004	57	8 Dir		56	8 Dir		56	8 Dir		56	8 Dir	
02/07/2005	41		3 C							50		7 L
03/07/2005										38		8 C
11/02/2006				51		5 C						
16/11/2006	44		3 C				38		3 L	57		6 L
17/11/2006										49		7 L
13/09/2007	52		3 C				46		3 L			
07/07/2008	53		3 C	55		5 C	48		3 L	64		6 L
08/07/2008										72		7 L
25/08/2008										58		1 L
27/10/2009	23		3 C				16		3 L	32		7 L
08/12/2010	26		3 C	36		5 C				45		7 L
27/11/2011				35		5 C				22		8 C
31/08/2012										72		6 L
01/09/2014	72	6 dir B		67	6 dir B		61	6 dir B		65	6 dir B	
16/10/2015				42		5 C						
22/12/2016				43		5 C						
04/01/2018				53		5 C						
08/08/2018				37		5 C						

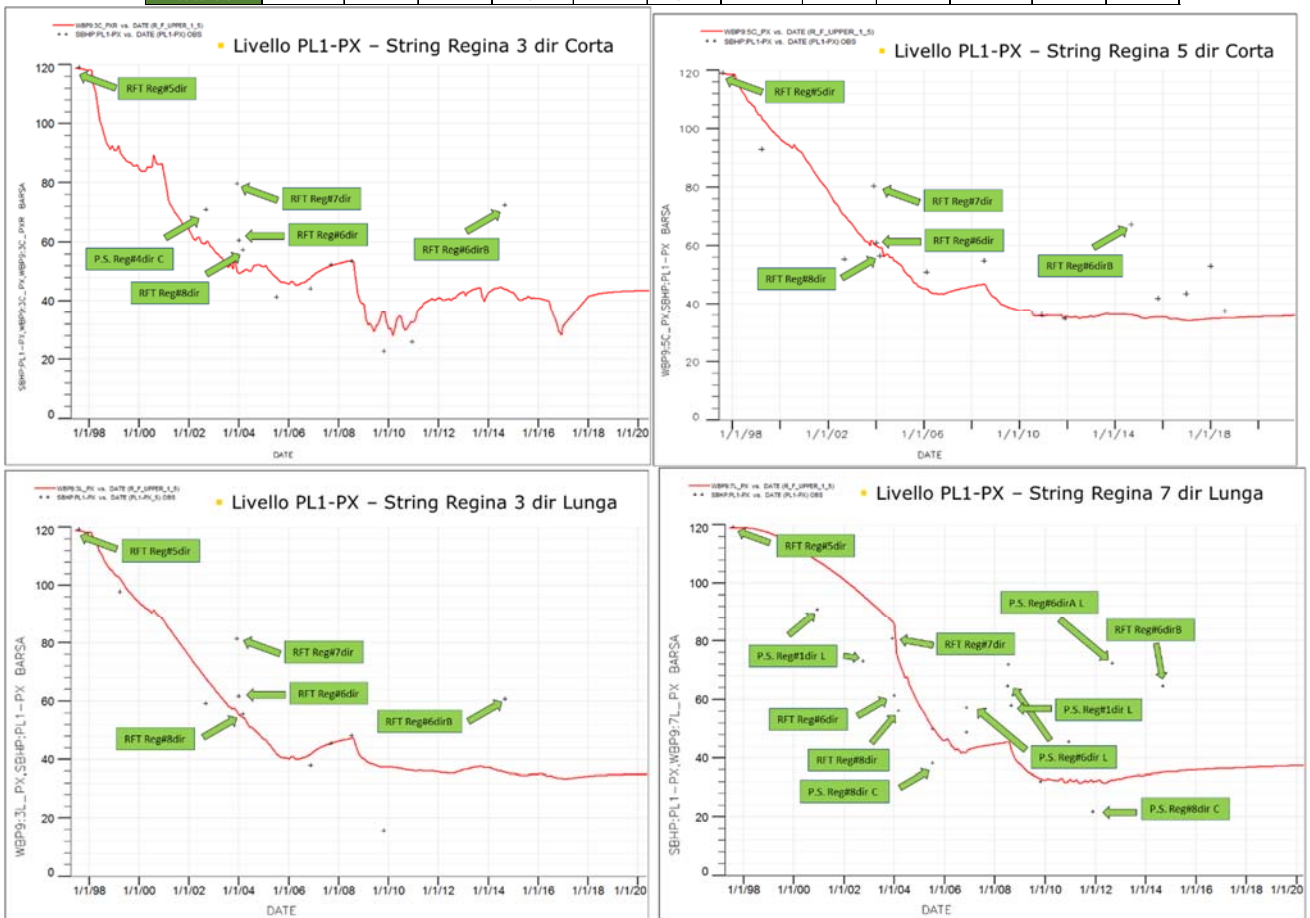


Figura 8 – Campo di Regina: pressioni statiche misurate vs. modello Eclipse (2017) (livello PL1-PX)

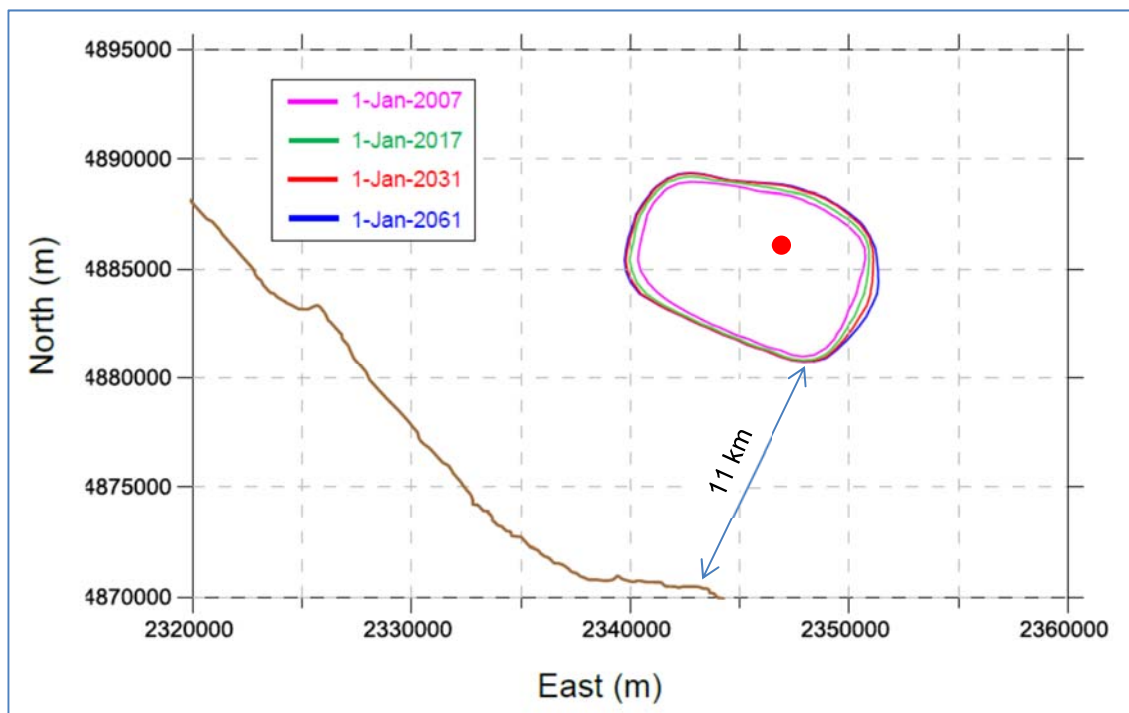


Figura 9 - Evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm per lo scenario MCM.  
Il simbolo rosso indica la posizione della stazione CGPS

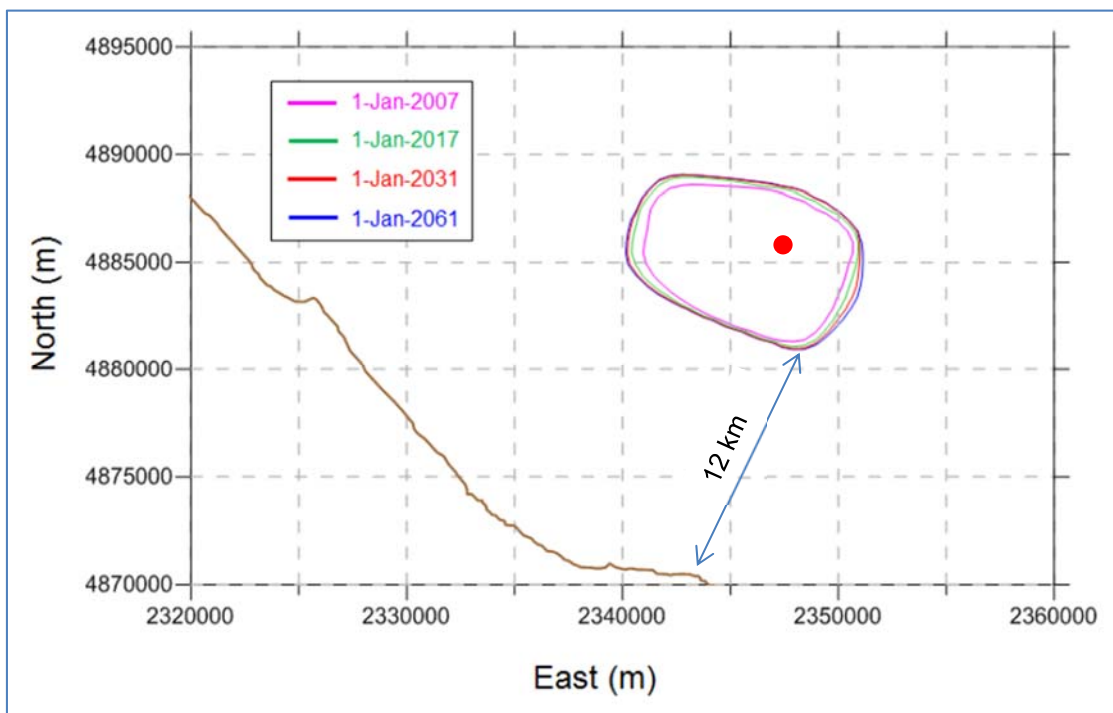


Figura 10 - Evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm per lo scenario VNM.  
Il simbolo rosso indica la posizione della stazione CGPS

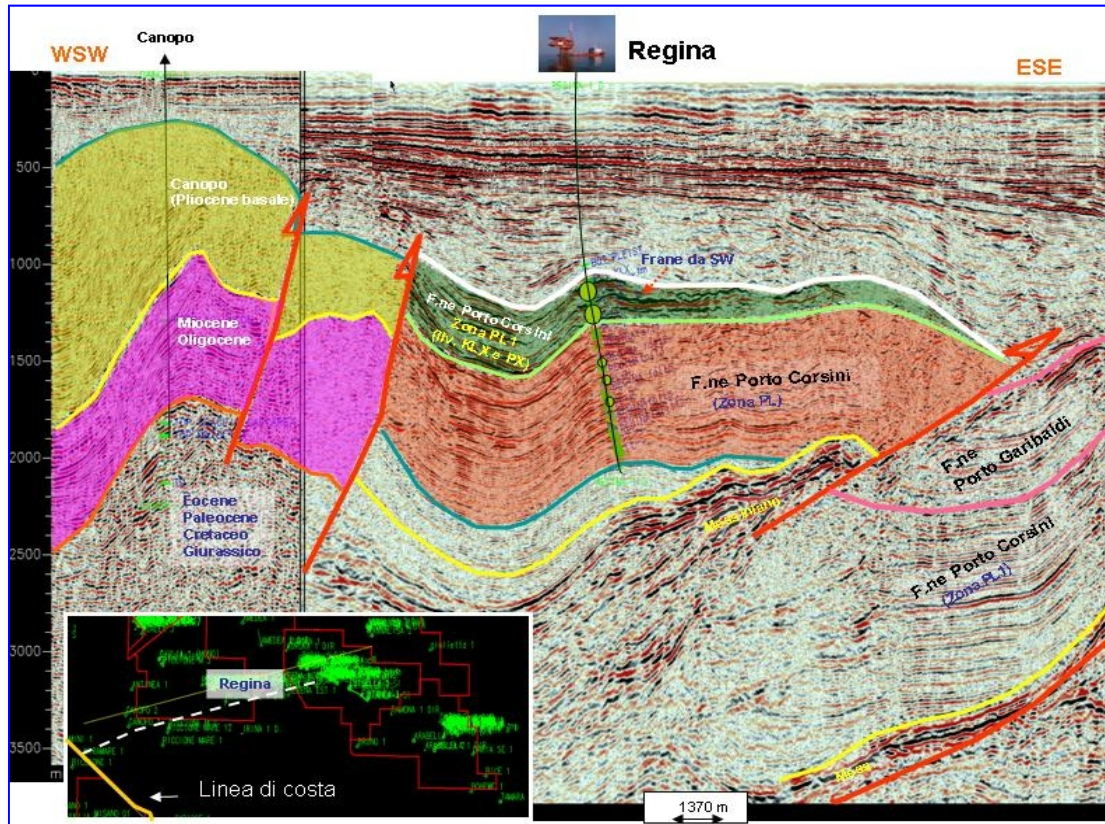


Figura 11 - sezione sismica interpretata

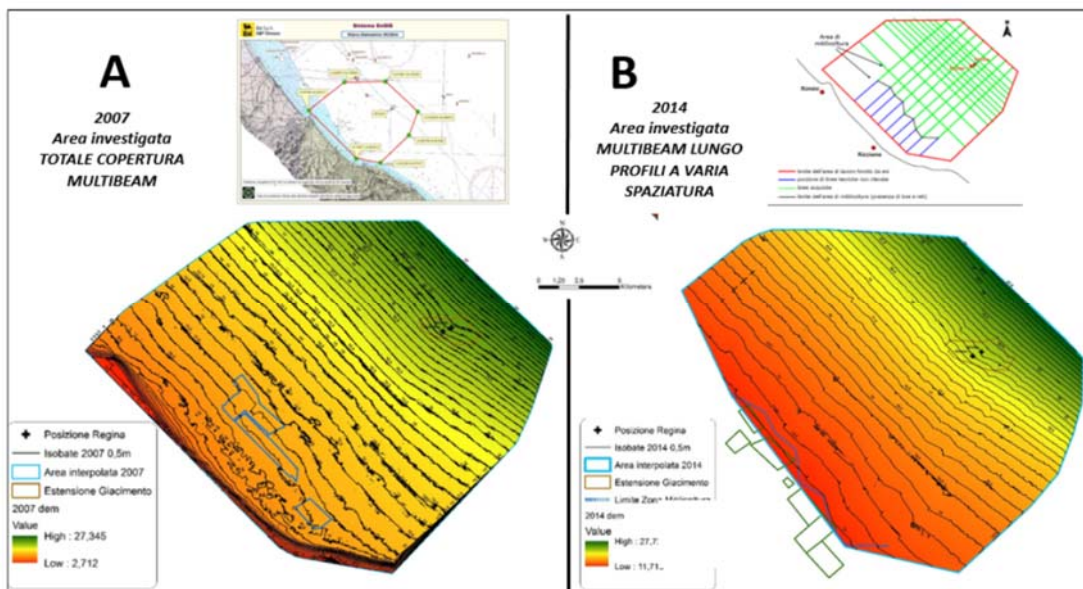
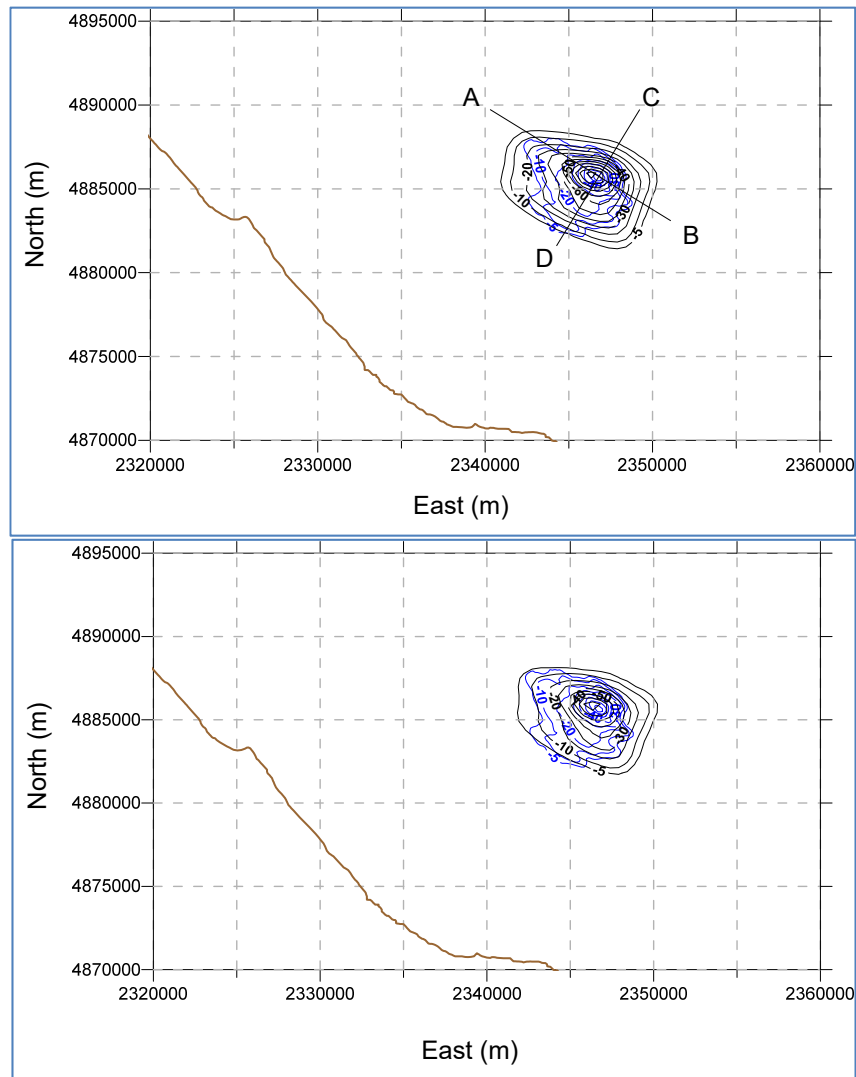
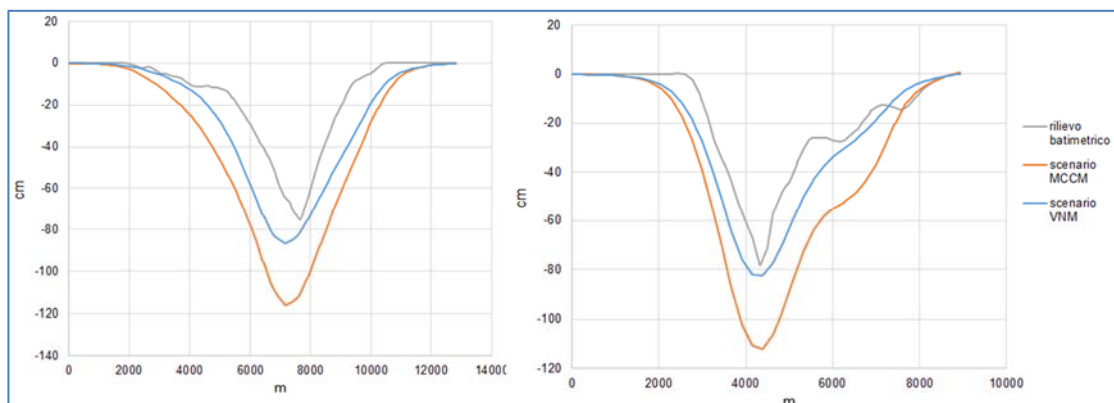


Figura 12 - Campo di Regina rappresentazione schematica e risultati dei rilievi batimetrici effettuati nel 2007 (a sinistra) e nel 2014 (a destra)



**Figura 13 - Confronto tra i risultati del modello Abaqus, rispettivamente, per lo scenario MCCM (curve nere – figura in alto), per lo scenario VNM (curve nere – figura in basso) e il rilievo batimetrico del 2007 (curve blu).**



**Figura 14 - Confronto tra la subsidenza misurata dal rilievo batimetrico del 2007 e calcolata dal modello geomeccanico nei due scenari (MCCM e VNM) lungo le sezioni AB e CD (rif. Figura 13).**



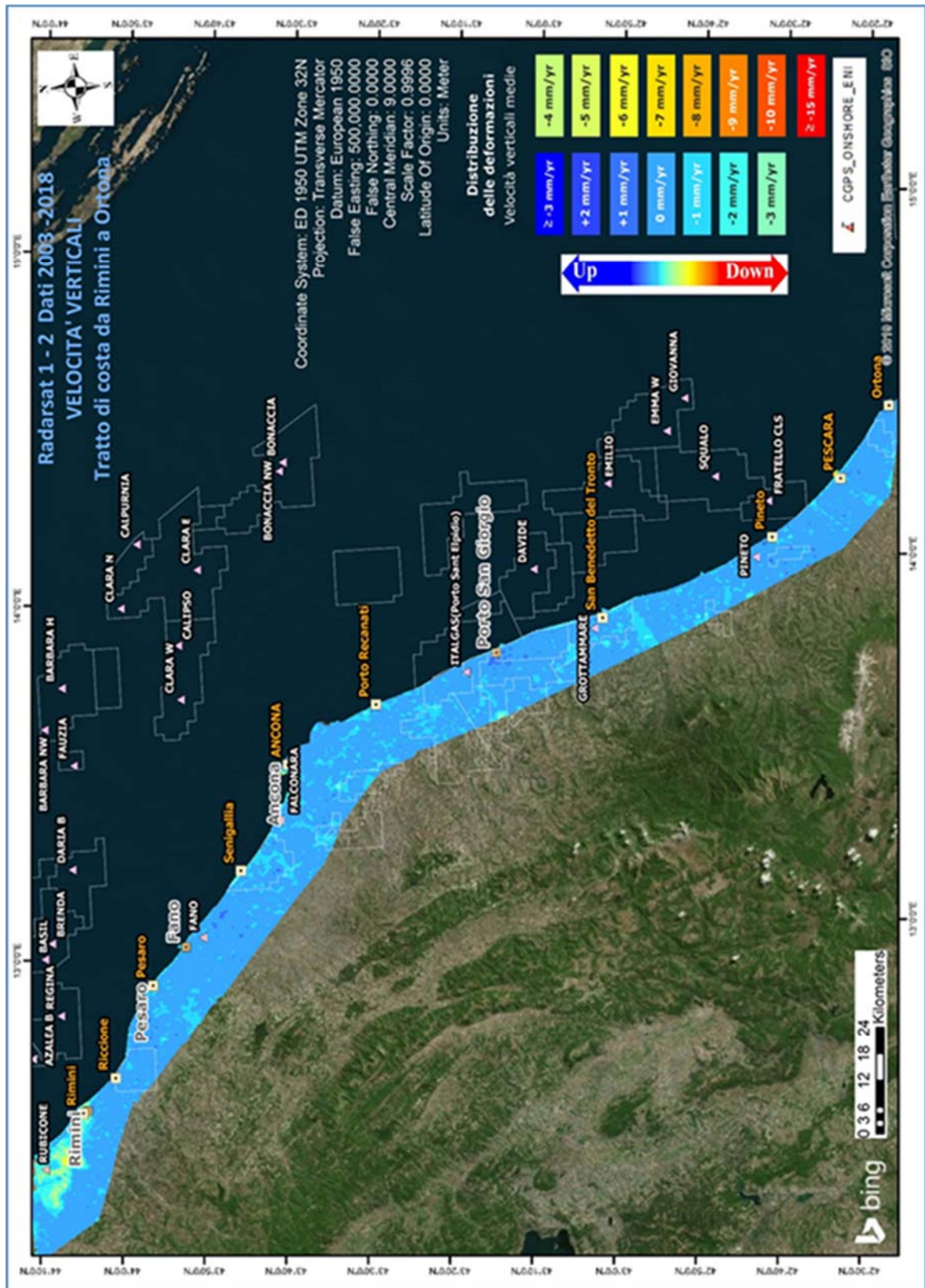


Figura 15 - Campo di Regina: analisi dati SAR dal 2003 al 2018

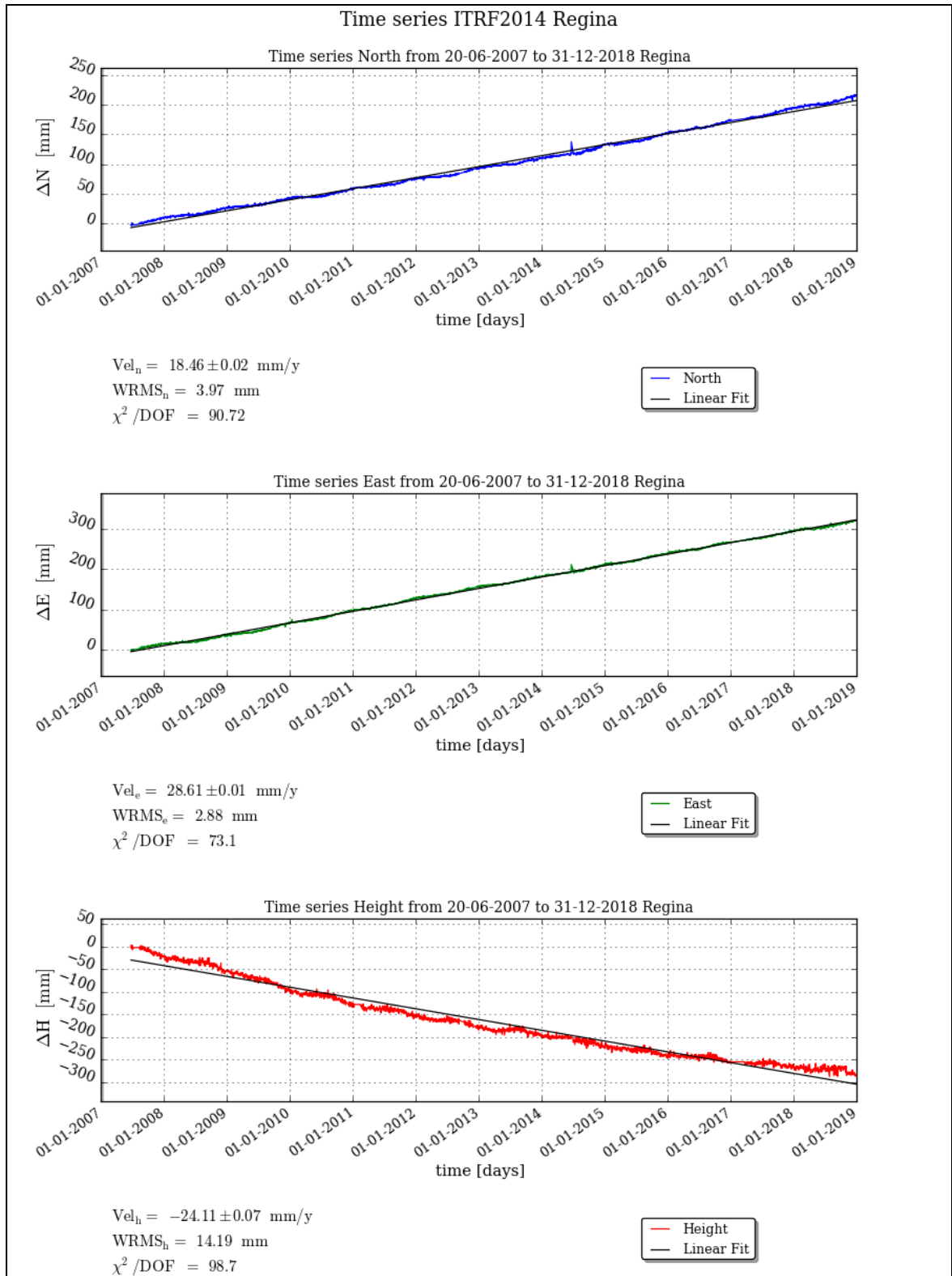
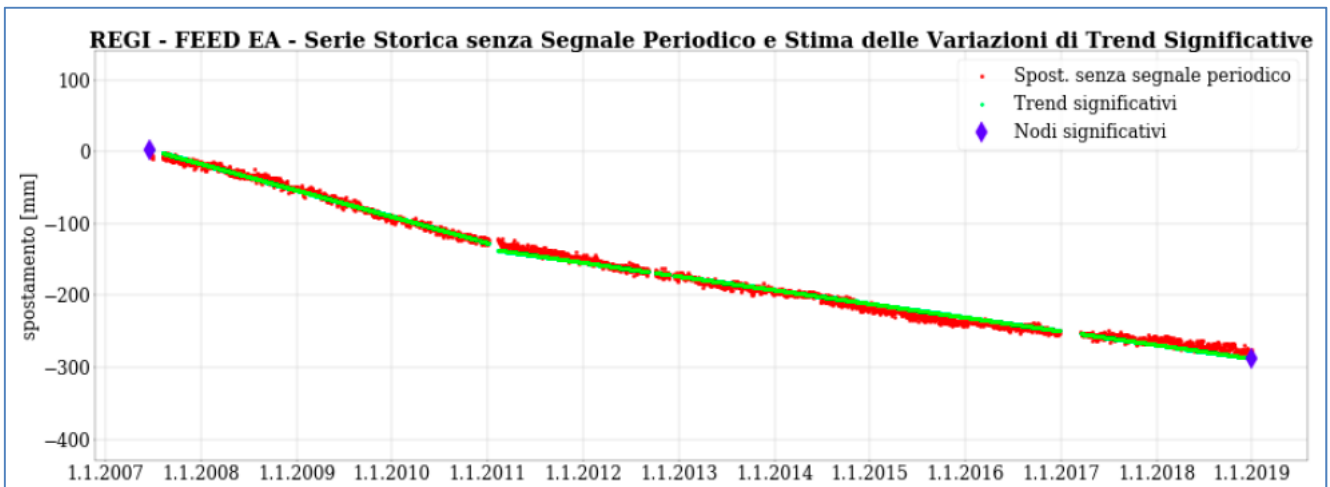


Figura 16 - Campo di Regina: serie storiche di misure CGPS



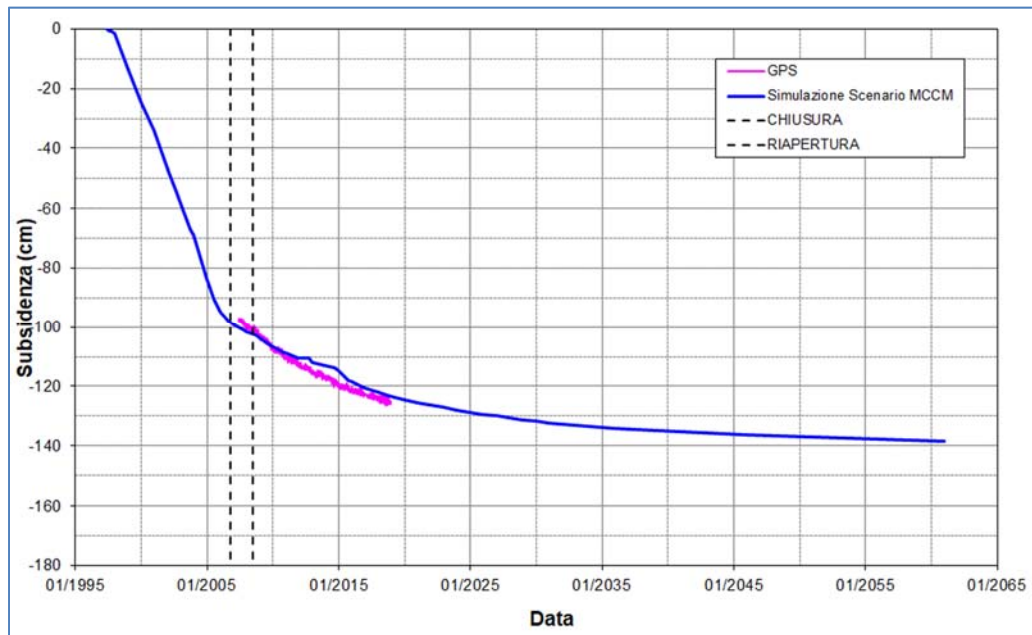
CAMPO	Inizio produzione	Fine produzione (rif. ultimo profilo di produzione - Mod. Eclipse)	Riserve prodotte @ dic.2018	Max subsidenza prevista (Scenario di riferimento)	Ultimo aggiornamento studio	CGPS		
						inizio registrazione	vel.media (mm/a) @ dic.2018	mesi di registrazione
ANEMONE	1978	2018	100%	36 cm al 2018	2015	giu-07	-4.8	122
ANNAUSA	2000	2021	98%	9 cm al 2027	2018	ott-07	-3.8	105
ANNAMARIA B	2009	2030	76%	163 cm al 2031	2017	gen-10	-107.0	105
BARBARA NW	1999	2035	77%	44 cm al 2029	2017	gen-08	-27.9	118
BONACCIA	1999	2026	93%	233 cm al 2073	2018	dic-07	-71.2	131
BONACCIA NW	2015					set-15	-50.1	39
CALIPSO	2002	2025	87%	84 cm al 2026	2017	nov-07	-14.1	128
CALPURNIA	2000	2022	99%	14 cm al 2015	2017	giu-07	-1.0	122
CLARA EST	2000	2038	67%	69 cm al 2061	2017	nov-07	-14.3	134
CLARA NW	2016			81 cm al 2038		mar-16	-25.5	33.5
CLARA NORD	2000	2021	99%	34 cm al 2016	2017	nov-07	-19.8	134
ELETTRA	2014	2029	64%	11 cm al 2061	2017	lug-14	-21.0	53
FAUZIA	2014	2020	98%	5 cm al 2068	2017	set-14	-5.0	51
GUENDALINA	2011	2022	84%	8.5 cm al 2055	2018	ago-11	-6.3	88
NAIDE	2005	2020	98%	8 cm al 2020	2017	giu-05	-3.7	162
NAOMI - PANDORA	2001	2037	52%	2.6 cm al 2049	2017	giu-02	-2.0	198
PCME (PMS)	2001	2014	100%	6,8 cm al 2026	2016	lug-05	-4.1	161
REGINA	1997	2030	98%	130 cm al 2061	2017	giu-07	-24.1	138
TEA - LAVANDA - ARNICA	2007	2018	104%	5 cm al 2018	2015	nov-07	-4.2	134

Figura 17– Velocità medie di “subsidenza totale” calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli

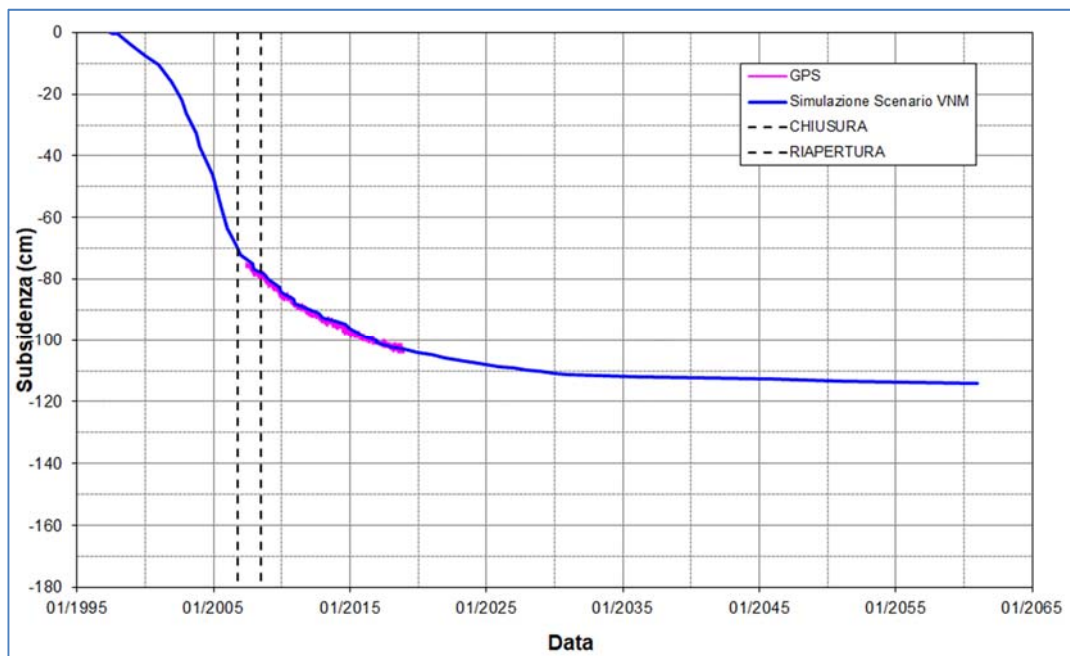


FEED PP - MODELLO EMPIRICO			
Periodo		velocità [mm/y]	sigma [mm/y]
-			
20/06/2007	- 30/01/2011	-38.74	0.11
30/01/2011	- 31/12/2018	-19.47	0.04

Figura 18 - Campo di Regina: analisi della serie storica di misure CGPS



**Figura 19 – Confronto tra spostamento verticale misurato e spostamento simulato (scenario MCCM), in corrispondenza della stazione CGPS sulla piattaforma Regina. Le linee tratteggiate indicano le date di chiusura e riapertura del campo.**



**Figura 20 - Confronto tra spostamento verticale misurato e spostamento simulato (scenario VNM), in corrispondenza della stazione CGPS sulla piattaforma Regina. Le linee tratteggiate indicano le date di chiusura e riapertura del campo.**



Compattazione REGINA 3 dir										
spacing	ref depth	Oct 1997	Sept 2002	Oct 2003	Jul 2005	Sept 2006	Dec 2007	Aug 2008	Oct 2009	Dec 2010
	MD	Jul 1997	Oct 1997	Sept 2002	Oct 2003	Jul 2005	Sept 2006	Dec 2007	Aug 2008	Oct 2009
#	(m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
19	998.00	-2	1	5	0	-1	2	0	1	-1
18	1008.50	-2	-1	-3	-1	10	-8	2	-1	2
17	1017.50	-4	2	-2	2	5	-5	2	4	-3
16	1030.00	16	1	-1	9	10	-8	6	-1	1
15	1040.00	-24	-4	3	-11	8	-6	-7	2	3
14	1050.50	-1	-2	1	4	-1	-3	2	4	-1
13	1060.50	-124	-8	1	-3	7	-14	**	**	-5
12	1071.00	128	-2	7	6	3	1	**	**	***
11	1083.50	-2	17	-12	1	19	-19	-2	*	***
10	1092.50	2	-2	4	-1	*	*	*	*	***
9	1102.00	-1	11	-5	5	*	*	*	*	***
8	1113.50	-8	3	7	-2	*	*	*	*	***
7	1124.00	-2	2	1	1	*	*	*	*	***
6	1134.50	-2	-8	-1	-13	*	*	*	*	***
5	1145.00	3	-74	-27	-24	*	*	*	*	***
4	1176.50	9	-42	-20	-53	*	*	*	*	***
3	1187.00	-16	-25	0	-4	*	*	*	*	***
2	1197.50	5	-1	-2	-3	*	*	*	*	***
1	1208.00	3	2	-5	0	*	*	*	*	***

\* Lo strumento di misura non riesce a superare la quota di 1090 m nei survey di settembre 2006 e agosto 2008

\*\* Deviazione standard troppo elevata: misure non rappresentative nel survey di agosto 2008

\*\*\* Lo strumento di misura non riesce a superare la quota di 1070 m nei survey di ottobre 2009 e dicembre 2010

Figura 21 - Pozzo Regina 3dir: misure di compattazione in-situ (da log FSMT)

Compattazione REGINA 6 dirB foro2					
spacing	ref depth	Sep 2014	Oct 2015	Dec 2016	Dec 2017
	MD	Oct 2015	Dec 2016	Dec 2017	Dec 2018
#	(m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	1215.08	-3	2	-2	3
2	1205.09	-4	1	-4	2
3	1195.11	-3	0	-4	2
4	1185.14	-4	1	-2	-1
5	1175.15	-7	1	-3	0
6	1165.12	-5	1	-3	1
7	1155.18	-5	1	-3	3
8	1145.13	-4	1	-1	2
9	1135.12	-3	3	-2	2
10	1125.17	-4	6	-2	-1
11	1115.14	-4	0	3	-2
12	1105.14	-4	9	-2	-3
13	1095.25	-6	2	-2	0
14	1085.16	5	6	0	3
15	1075.22	-13	2	1	7
16	1065.3	-9	0	2	1
17	1055.21	2	4	-2	5
18	1045.23	-6	4	-2	7
19	1035.22	3	0	4	2
20	1025.27	-15	9	-2	0
21	1015.19	-8	11	-6	8
TOTALE	#	-98	65	-33	40

Figura 22 - Pozzo Regina 6dirB: misure di compattazione in-situ (da log FSMT)



campo REGINA (J.V. Eni 75% operatore - Edison Gas 25%)			DECRETO VIA n. 2734 del 4 aprile 1997	
DATI DI CAMPO			AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (REGINA)	
UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE	offshore - 21 km a Est di Rimini 20 m		SIA	
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR	sabbie grossolane alto Canopo PL1 - PL		STUDIO DI GIACIMENTO	MOD.STATICO E DINAMICO MONOCELLA "AGO 95"
ZONA MINERARIA	980-1250 (TVDS)		RISERVE (MSm <sup>3</sup> )	2503
PROFONDITA' RESERVOIR	BEAF		MOD. GEOMECCANICO	CILINDRICO
TIPO DI PIATTAFORMA	campo compartimentato da faglie		MAX SUBS AL CENTRO (cm)	7,2 (dopo 10 anni)
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE			MAX DIST. DAL CULMINE (km)	2 (dopo 10 anni)
			ULTIMO AGGIORNAMENTO	
			3916	
			ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ DICEMBRE 2017	
			130@2061 (fine simulazione - scenario VNM)	
			4 @ 2017 (il fenomeno si esaurisce a 11 km dalla costa)	
CONCESSIONE			STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI	
AC17.AG	D.M @ apr'97	@ 31 dic 2018	LIVELLAZIONI	
DATA SCADENZA CONCESSIONE	26/05/2017		ACQUISITI I DATI DI LIVELLAZIONE SUL TRATTO DI COSTA (DORSALE ADRIATICA - PESARO-PORTO S. GIORGIO) ANTISTANTE IL CAMPO NEL PERIODO 1998-2009, 2011, 2014 e 2017.	
N. POZZI	3+1 (MonoT)	6+1 (MonoT)	I DATI FINO AL 2017 SONO STATI CERTIFICATI DALL'UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM	
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm <sup>3</sup> )	2503	3916	IL PROSSIMO RILEVO DI ENTRAMBE LE RETI DI LIVELLAZIONE ( DORSALE ADRIATICA e PESARO-PORTO S. GIORGIO) SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2020 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO	
START UP PRODUZIONE	ago-97		MARKERS	
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2006	2030	REGINA 3D: ULTIMO SURVEY @ dicembre 2011	
GAS PRODOTTO (MSm <sup>3</sup> )			survey eseguiti: lug.1997 (rilevo base), ott.1997, sett. 2002, ott. 2003, luglio 2005, sett.2006, dic. 2007, ago 2008, ott. 2009, dic. 2010	
% RISERVE PRODOTTE (rif. liv. principali PL1-PX e PL1-KLX)	98%		REGINA 6DirB: ULTIMO SURVEY @ dic. 2018	
			survey eseguiti: sett.2014 (rilevo base), ottobre 2015, dic. 2016 e dic.2017	
			CGPS	
			NEL CORSO DEL 2007 -2008 SONO STATI INSTALLATI, RISPETTIVAMENTE, UN CGPS SULLA PIATTAFORMA E UN CGPS NELLA CENTRALE ENI DI RUBICONE (ONSHORE) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA	
			SAR	
			ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ OTT.2018 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI PER L'INSERIMENTO DELLA P.MA ANEMONE B NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA. ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	
			BATIMETRIE	
			ESEGUITO UN PRIMO RILEVO BATMETRICO IN DATA GIUGNO-AGOSTO 2007	
			ESEGUITO UN SECONDO RILEVO BATMETRICO IN DATA AGOSTO 2014	

Figura 23 - Scheda di sintesi dati campo

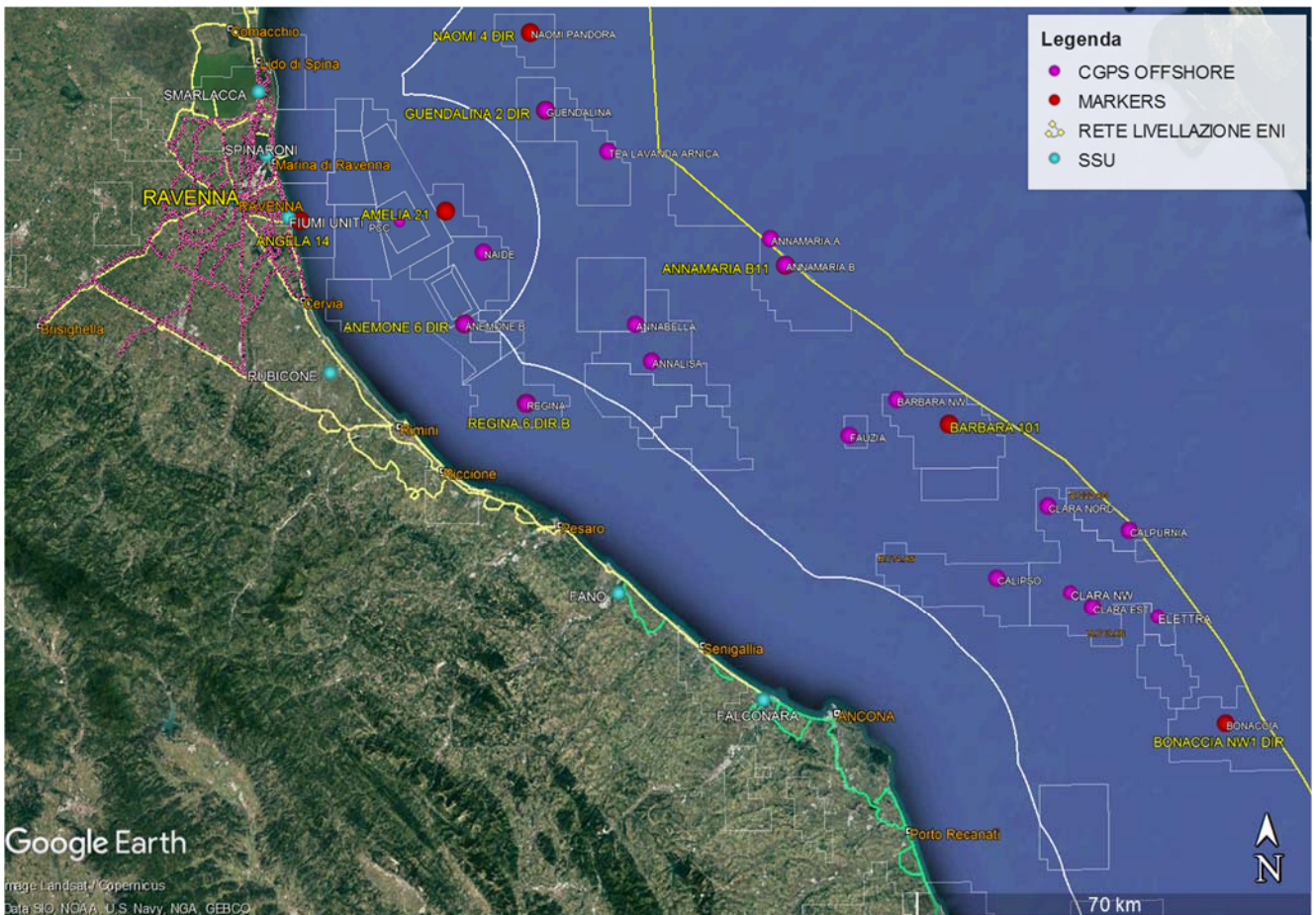


Figura 24 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

## Appendice A: aggiornamento dati SAR 2003-2018

Le elaborazioni dei dati InSAR per il periodo 2003 - 2018 sono state effettuate con lo stesso algoritmo rispetto all'elaborazione dell'anno precedente.

In seguito verrà descritto con maggior dettaglio l'algoritmo utilizzato (vedi nota a fondo paragrafo "Tecnica PSP-DIFSAR"), cercando di mettere in luce le differenze dei principali algoritmi utilizzati in interferometria radar.

### Analisi dati InSAR 2003 – 2018

L'analisi dei dati SAR ha interessato una serie di data-set, elaborati in fase di processamento in modo tale da garantire continuità spaziale dei dati.

Da un'analisi delle differenze tra le velocità medie annuali misurate dai CGPS presenti nell'area di interesse e quelle dei PS (Permanent Scatterer) presenti in un intorno di circa 300 m centrato nel corrispondente CGPS (Tab. 1), si è scelto di accorpate i data-set in due macro-aree, in modo tale che la taratura del dato InSAR minimizzi le differenze tra quest'ultimo e le misure CGPS.

In Tab. 1 vengono presentate: le velocità verticali dei CGPS,  $V_{vert\_CGPS}$ , e il corrispondente scarto quadratico medio  $sqm\_CGPS$  (colonna 3 e 4); la media delle velocità verticali dei Permanent Scatterer nell'intorno avente come centro il CGPS corrispondente  $Media\_V\_SAR$ , e il corrispondente scarto quadratico medio  $sqm\_SAR$  (colonna 5 e 6); la differenza tra le velocità CGPS e SAR e il relativo scarto quadratico medio (colonne 7 e 8). Tutte le misure sono in millimetri/anno.

	CGPS	$V_{vert\_CGPS}$ [mm/yr]	$sqm\_CGPS$ [mm/yr]	$Media\_V\_SAR$ [mm/yr]	$sqm\_SAR$ [mm/yr]	$Diff\_VEL$ $CGPS-SAR$ [mm/yr]	$sqm\_diff$ [mm/yr]
RAVENNA	MANARA	-3.00	0.01	-0.43	0.60	-2.57	0.61
	<b>SMARLACCA</b>	<b>-6.33</b>	<b>0.01</b>	<b>-3.41</b>	<b>1.09</b>	<b>-2.92</b>	<b>1.10</b>
	SPINARONI	-7.50	0.01	-4.34	0.97	-3.16	0.98
	FIUMI UNITI	-14.13	0.02	-11.51	2.47	-2.62	2.49
FANO-ANCONA	RUBICONE	-2.54	0.04	-3.13	2.01	0.59	2.05
	FANO	0.13	0.02	0.17	0.69	-0.04	0.71
	FALCONARA	-0.28	0.03	-0.23	1.43	-0.05	1.46
	ITALGAS	-0.06	0.03	0.41	1.35	-0.47	1.38

Tab. 1. Taratura dato InSAR con misure CGPS

Come si può vedere in Tab. 1 le differenze di velocità tra dati CGPS e le velocità medie di dati InSAR rappresentati nella penultima colonna hanno andamenti diversi nell'intera area, con differenze che si aggirano intorno 3 mm/anno di media per i primi 4 CGPS, mentre per gli ultimi 4 CGPS si notano differenze massime intorno al mezzo millimetro. Di conseguenza si è scelto di mosaicare i diversi data-set in due macro-aree (Fig.1):

- Area di Ravenna
- Area di Fano-Ancona

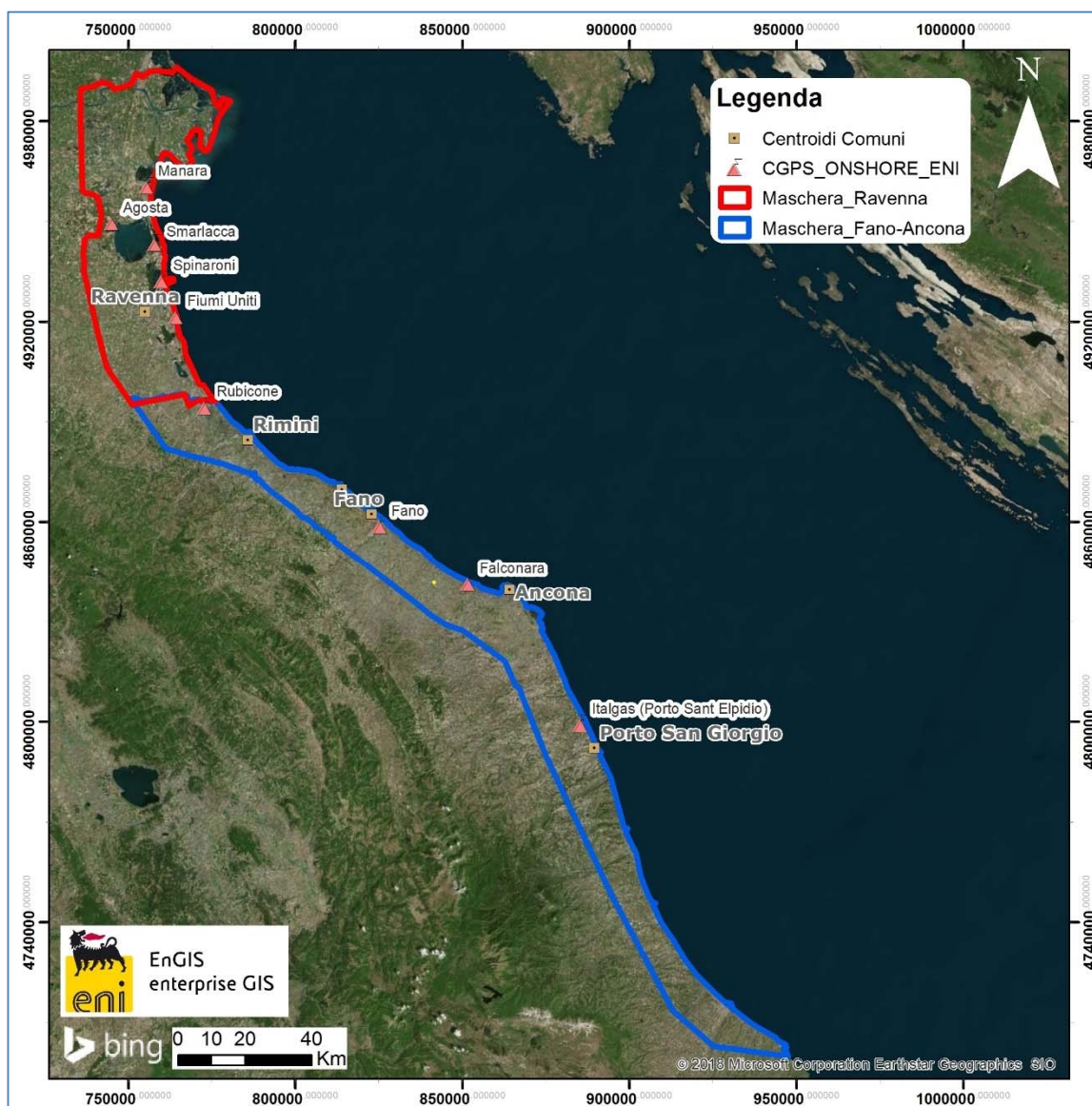


Fig. 1 – Mappa mosaicatura dati InSAR





Complessivamente risultano presenti le seguenti stazioni CGPS afferenti alla rete eni:

1. Area Ravenna: Manara, Smarlacca, Spinaroni, Fiumi Uniti
2. Area Fano-Ancona: Rubicone, Fano, Falconara, Italgas

Il processo di calibrazione è stato realizzato utilizzando le informazioni derivanti dalle stazioni di monitoraggio CGPS esistenti all'interno delle aree analizzate, partendo dalle stazioni che presentano una serie storica più consistente (Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti). Si è realizzata quindi la calibrazione dei dati SAR partendo dall'area più a nord (area Ravennate), utilizzando i dati di velocità della stazione di Smarlacca; i dati delle stazioni di Fiumi Uniti e di Spinaroni e di tutte le altre stazioni, sono stati utilizzati esclusivamente come valore di verifica dei risultati ottenuti con la calibrazione.

La determinazione delle velocità verticali con dati CGPS è stata calcolata sulla serie storica totale del dato, che per quanto riguarda le postazioni di Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti ha un inizio di acquisizione leggermente anteriore rispetto a quello dei dati SAR.

Queste velocità così calcolate hanno una differenza sotto il decimo di millimetro, rispetto a quelle calcolate sullo stesso periodo di acquisizione, da considerarsi pertanto trascurabile ai fini di questo studio. L'analisi dei dati SAR non calibrati, relativi all'area ravennate nell'intorno della stazione CGPS di Smarlacca per un raggio di 300 metri, ha evidenziato una velocità media pari a  $-3.41 \pm 1.09$  mm/anno. Considerando la velocità determinata con il CGPS di  $-6.33 \pm 0.01$  mm/anno, si rileva una differenza di  $-2.92 \pm 1.10$  mm/anno.

Per questo motivo ai valori di velocità media della componente verticale determinata con il monitoraggio SAR, è stato aggiunto il valore di  $-2.92 \pm 1.10$  mm/anno. Successivamente sono stati confrontati i punti SAR, che ricadevano in un intorno di raggio pari a 300 m, rispetto ai CGPS di Manara, Fiumi Uniti e Spinaroni. Il confronto mostra delle differenze, tra i singoli CGPS e i dati SAR calibrati, sotto il mezzo millimetro: ciò conferma la validità della calibrazione effettuata. In Fig. 2 si possono visualizzare i dati InSAR ottenuti a valle del processo di calibrazione, interpolati con un algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) con Tool ArcGis Spatial Analyst® per l'area di Ravenna nel tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

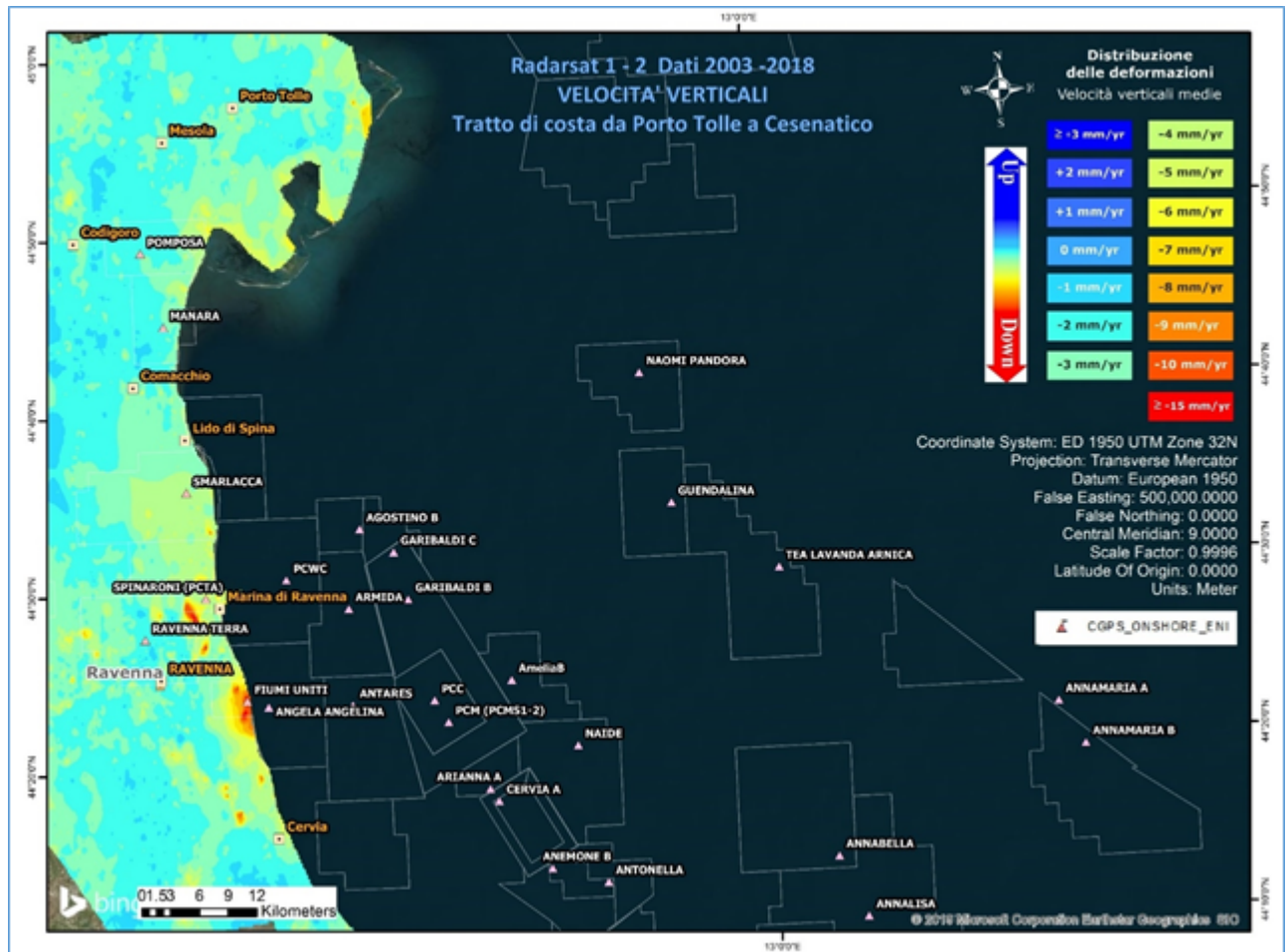
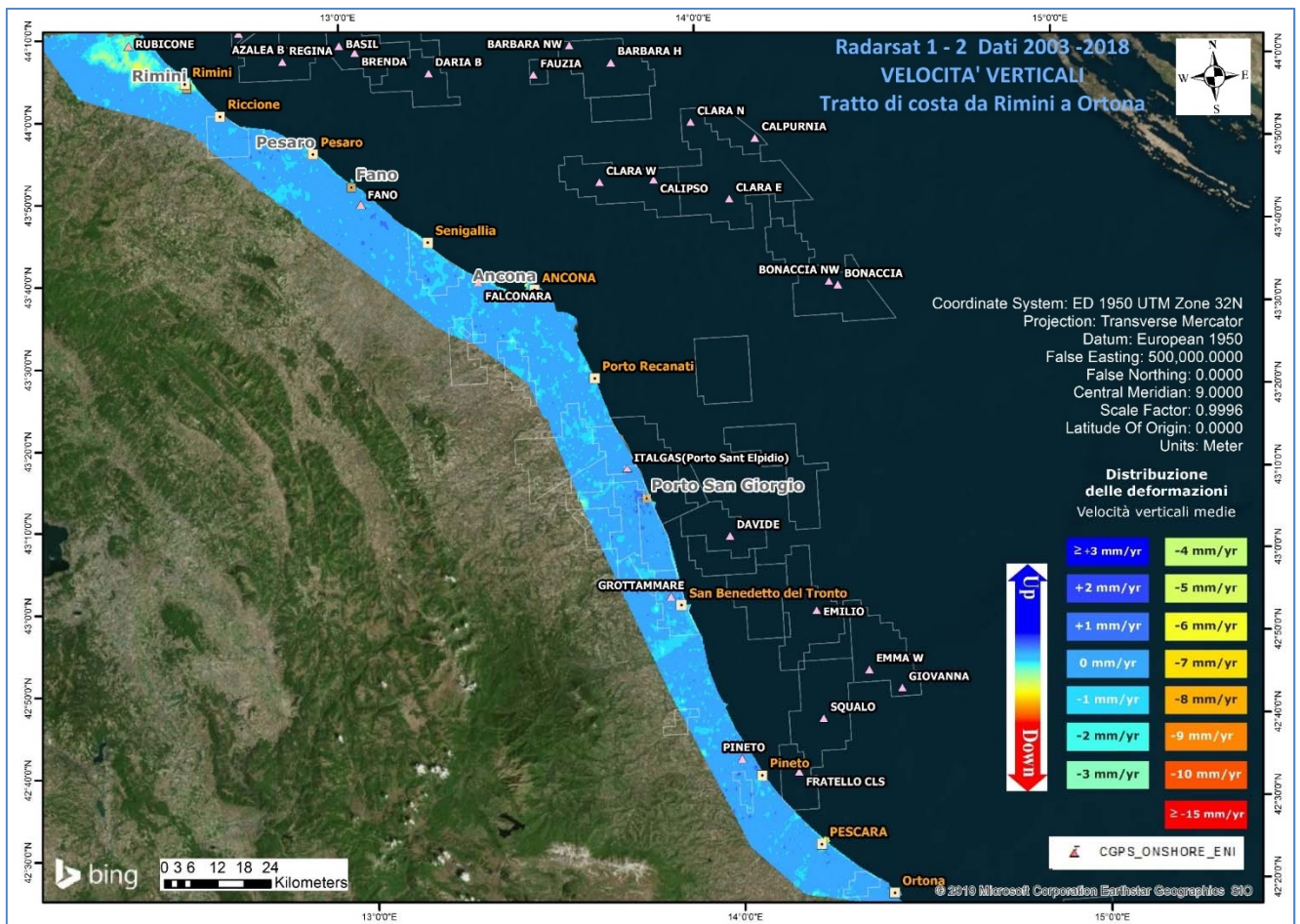


Fig. 2 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

Come già effettuato nel 2018, l'altro data set (Area di Fano-Ancona, vedi Fig.1), verrà analizzato separatamente dall'area ravennate in quanto è stata rilevata una coerenza delle misure SAR con le misure delle stazioni CGPS interne a ciascun area.

Analizzando l'area SAR di Fano-Ancona, si evidenzia come le velocità dei CGPS di Rubicone, Fano, Falconara e Italgas siano allineate con le velocità misurate dal SAR, con uno scarto inferiore al millimetro (Tab. 1). Si fa presente che per il confronto viene considerato un intorno di circa 300 m, e la velocità dei dati SAR è una media delle velocità verticali dei Permanent Scatterer (PS) che ricadono all'interno di questo intorno. Considerata l'esiguità della differenza tra il valore misurato dal CGPS di FANO e quella del dato SAR ( $-0.04 \pm 0.71$  mm/anno), non si è ritenuto necessario eseguire una calibrazione. Come è possibile notare in Tab.1 per i vari CGPS presenti nell'area il confronto mostra delle

differenze rispetto ai dati SAR puri di circa mezzo millimetro in media. In Fig.3 è visualizzata l'interpolazione dei dati mosaicati, per l'area Fano-Ancona nel tratto di costa da Rimini ad Ortona. L'interpolatore utilizzato è l'algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) con Tool ArcGis Spatial Analyst®.



**Fig. 3 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini ad Ortona.**

## Confronto dati SAR 2003 – 2017 vs 2003 – 2018

Il processo di sottrazione tra IDW 2018 e IDW 2017 permette di evidenziare graficamente eventuali differenze nell'andamento medio delle velocità verticali.

Come mostrato in Fig. 4 e Fig. 5 la sottrazione tra i due IDW non mostra differenze importanti, ed in ogni caso rientranti all'interno della deviazione standard dichiarata. Per quanto riguarda punti spot che mostrano differenze più marcate (come ad esempio un'area a ovest di Comacchio o una ad est di Porto Tolle), da un'attenta analisi del dato si è riscontrato come si tratti di aree in cui i dati SAR sono assenti o molto esigui, per cui l'interpolazione IDW ha generato un dato non attendibile per un anno o il successivo, da cui differenze non realistiche.

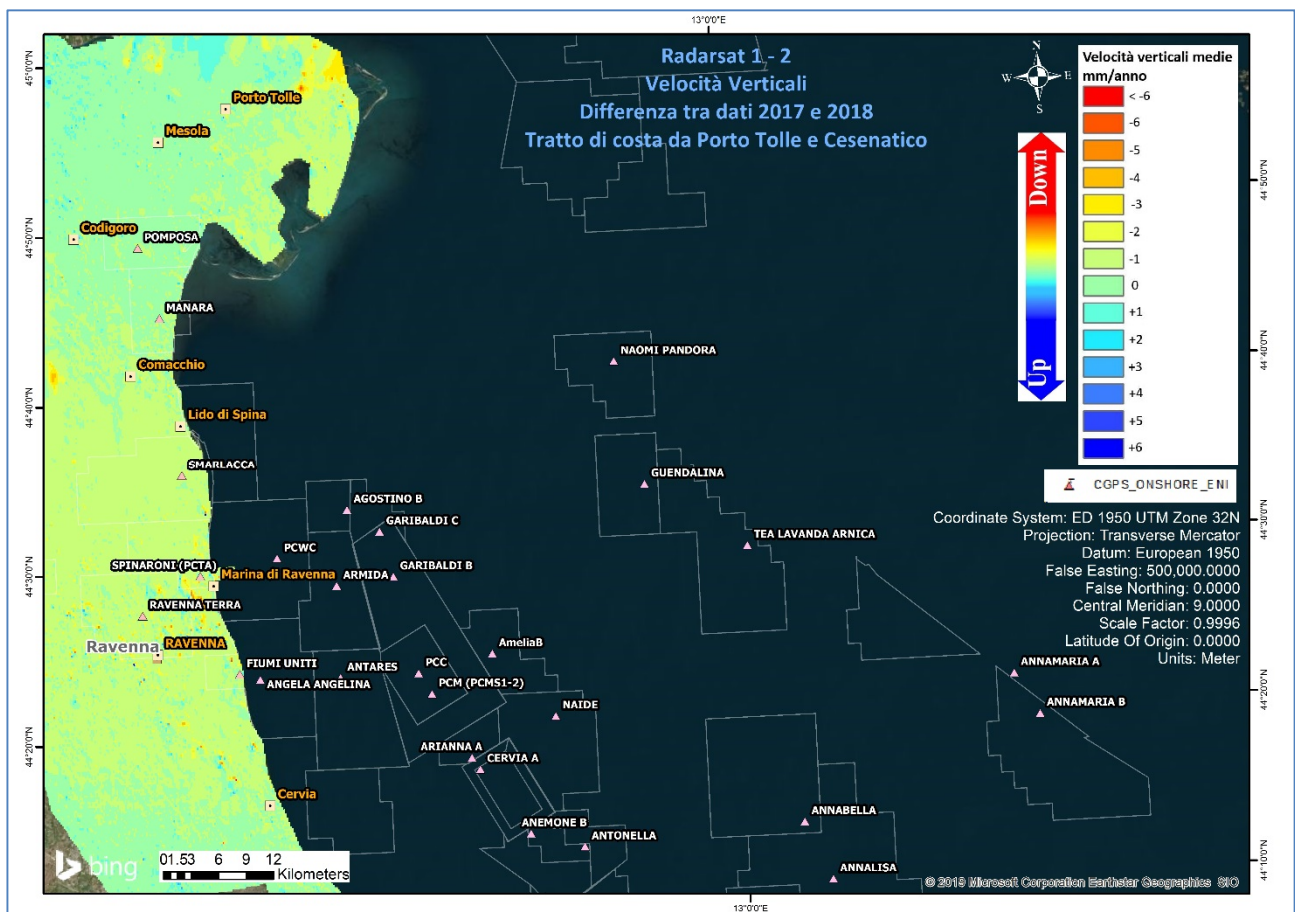


Fig. 4 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

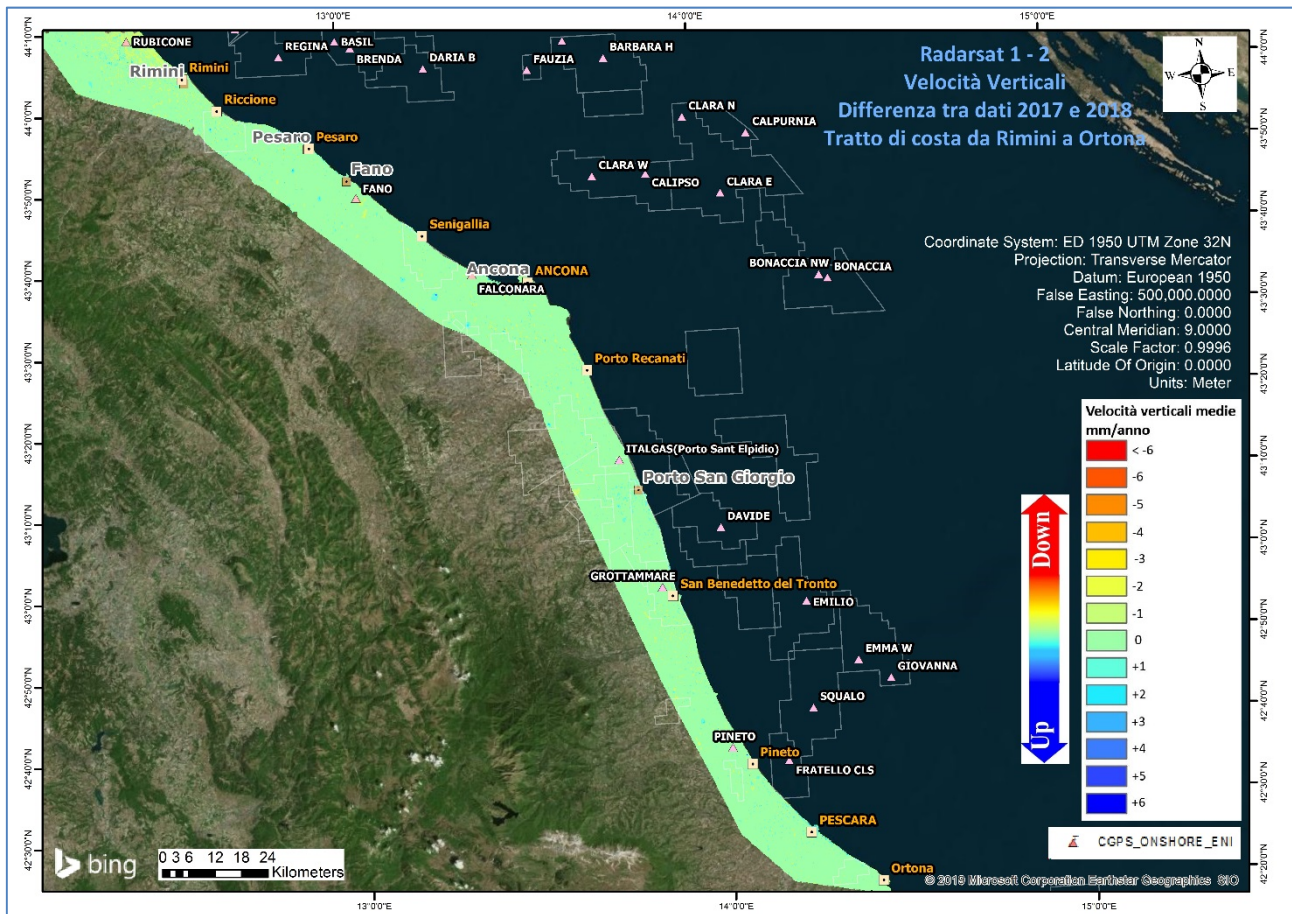


Fig. 5 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Rimini a Ortona.

### Tecnica PSP-DIFSAR (Estratto dalle Linee guida MATTM 2009)

La tecnologia interferometrica PSP-DIFSAR sviluppata da Telespazio/e-GEOS (<http://www.telespazio.it> / <http://www.e-geos.it>) è una tecnica d'interferometria differenziale SAR di tipo Persistent Scatterer Interferometry (PSI) che utilizza una procedura algoritmica proprietaria per l'individuazione e l'analisi dei Persistent Scatterer (PS) su lunghe serie di immagini SAR (radar ad apertura sintetica), allo scopo di misurare movimenti lenti del terreno dovuti a frane, subsidenza, fenomeni vulcanici e sismici (Costantini et al., 2005). I PS corrispondono generalmente ad elementi al suolo, come manufatti (ad esempio, parti di edifici, antenne, tralicci, elementi metallici in genere) oppure corpi naturali (ad esempio, rocce esposte) che si distinguono dagli altri, presenti nell'area esaminata, per il fatto di possedere un'elevata stabilità nel tempo della cosiddetta "firma radar". Questi punti presentano caratteristiche tali da permettere misure estremamente accurate della distanza



sensores-bersaglio così da poter evidenziare spostamenti relativi dei PS nel tempo anche solo di pochi millimetri. L'interferometria differenziale si basa su un sensore SAR a bordo di un satellite che invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre e riceve il segnale retrodiffuso. Misurando il ritardo di fase tra il segnale inviato e quello retrodiffuso si può determinare con estrema precisione la distanza tra il sensore ed il bersaglio. Se l'oggetto si trova in un'area soggetta a fenomeni di deformazione superficiale, il sensore, passando in istanti successivi sulla stessa area di interesse, rileva tra un'acquisizione e l'altra una variazione di distanza. Questo dato, dopo una complessa elaborazione per l'identificazione dei punti di misura e la rimozione dei contributi spuri (ritardi atmosferici, imprecisione nella conoscenza delle orbite, ecc.), rende possibili misure estremamente accurate di eventuali spostamenti superficiali lenti dell'area di interesse. Una delle peculiarità del metodo PSP è quella di sfruttare solo le proprietà del segnale relative a coppie di punti vicini, sia per identificare sia per analizzare i Persistent Scatterer. Infatti, due punti vicini sono affetti allo stesso modo da artefatti atmosferici ed orbitali, ed in generale da tutti i contributi correlati spazialmente (anche i movimenti non lineari nel tempo). Il metodo PSP presenta le seguenti differenze rispetto alle tecniche PSI standard: non richiede calibrazione dei dati o interpolazioni basate su modelli (in particolare per la rimozione degli artefatti atmosferici ed orbitali) è meno sensibile alla densità dei PS e permette una migliore identificazione dei PS in terreni naturali e dei PS caratterizzati da movimenti non lineari nel tempo; in aggiunta è computazionalmente efficiente ed altamente parallelizzabile. La densità dei PS individuati è solitamente molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e di aree rocciose mentre è praticamente nulla nelle zone vegetate o perennemente innevate. L'insieme dei PS sul territorio costituisce una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una rete di stazioni GPS (Global Positioning System) permanente. La loro densità su scala regionale è però ordini di grandezza superiore a quanto ottenibile con reti geodetiche convenzionali, fornendo un quadro d'insieme a costi decisamente più bassi rispetto a queste, dato che il sensore rileva punti di misura che non richiedono alcun intervento di installazione e manutenzione trovandosi già sul terreno.

## Appendice B: Stazioni *EPSU* lungo la fascia costiera compresa tra Cervia e Ancona - aggiornamento a dicembre 2018

Il monitoraggio della compattazione superficiale lungo la fascia costiera adriatica compresa tra Cervia e Ancona, è effettuato tramite 3 stazioni *EPSU* (Extensometric Piezometric Survey Unit) denominate: Rubicone, Fano e Falconara. L'ubicazione di tali stazioni, installate tra il 2008 e il 2009, è riportata in Figura 1B.

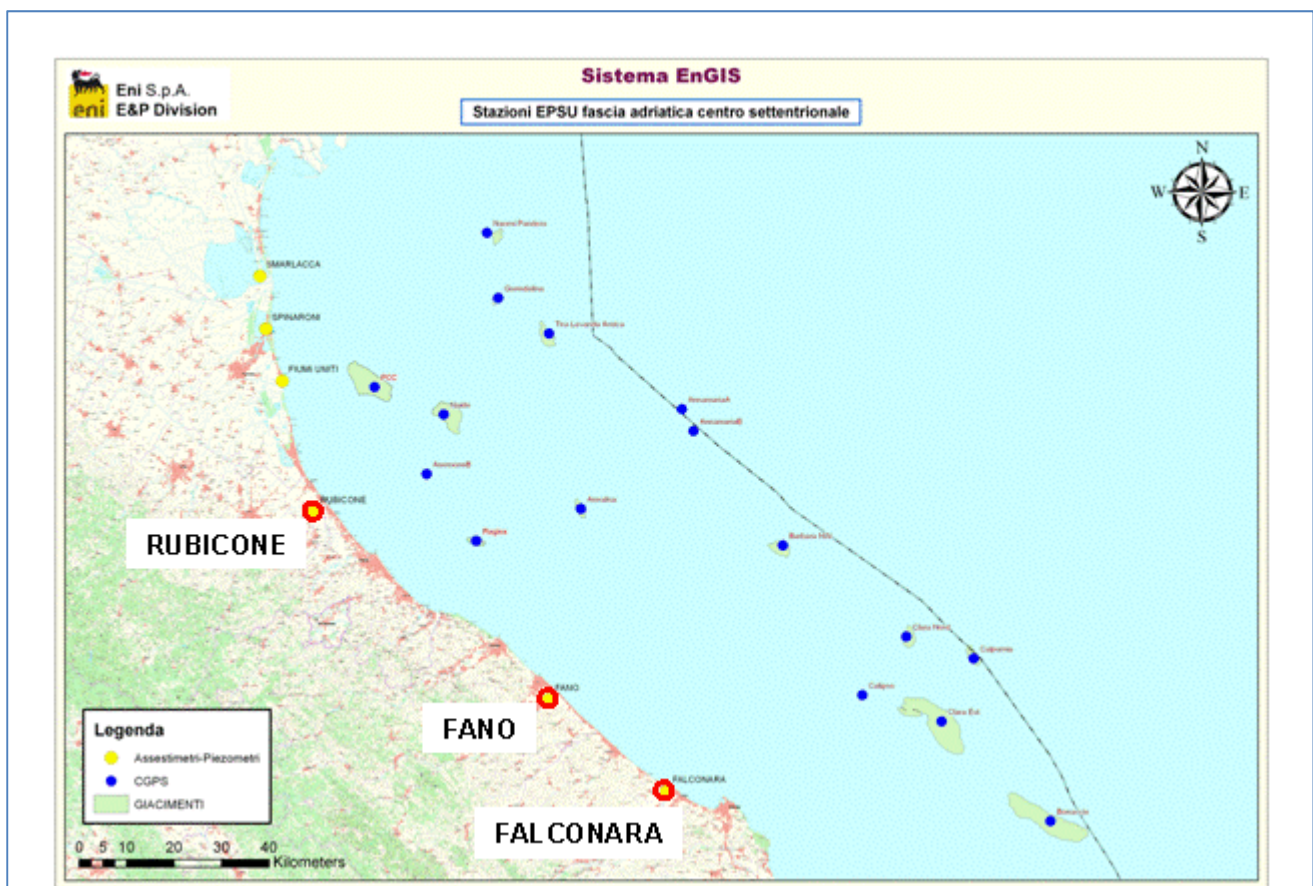


Figura 1B - Ubicazione delle stazioni *EPSU*

In generale una stazione *EPSU* è costituita da un assestometro, associato a uno o più piezometri, con il corredo di strumentazione meteorologica per la misura della temperatura e della pressione atmosferica (termometri sia in foro che in superficie, e un barometro in modo da compensare le misure assestometriche per le variazioni della temperatura e pressione atmosferica) come schematicamente rappresentato in Figura 2B.

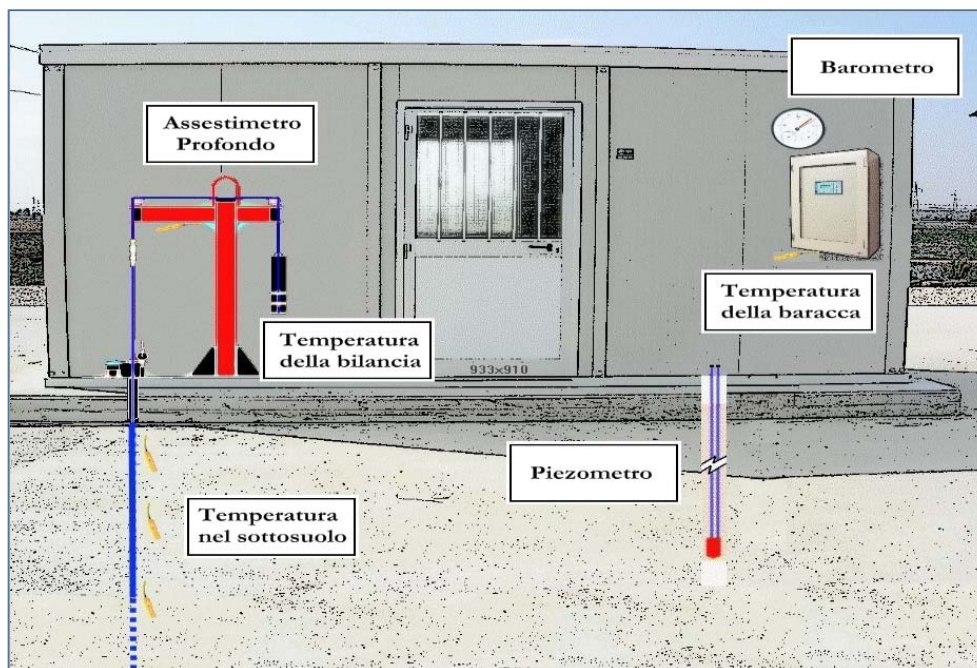


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

Più in dettaglio, nelle 3 stazioni *EPSU* sono stati installati i seguenti dispositivi di misura:

Località	Pozzo	Strumentazione	Profondità (da P.C.)	Data d'installazione
Rubicone	CGRA-1	Assestimetro profondo	320 m	Gen. 2009
	CGRP-1	Piezometro cella singola	178 m	Gen. 2009
	CGRP-2	Piezometro cella doppia	146 m e 70 m	Gen. 2009
Fano	CGFNA-1	Assestimetro superficiale	40,8 m	Lug. 2008
	CGFNP-1	Piezometro superficiale	6,1 m	Lug. 2008
Falconara	CGFLA-1	Assestimetro superficiale	40,3 m	Lug. 2008
	CGFLP-1	Piezometro cella singola	22 m	Lug. 2008

Per ciascuna stazione *EPSU* vengono di seguito presentati:

1. le principali caratteristiche;
2. grafici con tutti i dati registrati.

**N.B.:** Nella lettura dei dati riportati sui grafici relativi agli assestimetri, i valori positivi costituiscono la componente della compattazione (riduzione dello spessore dello strato di sottosuolo attraversato dall'assestimetro); al contrario i valori negativi costituiscono la componente dell'espansione (aumento dello spessore dello strato di sottosuolo attraversato dall'assestimetro).





## **Stazione *EPSU* di RUBICONE (installata dicembre 2009)**

### **Strumentazione:**

- assestimetro - quota bottom: 320 m da p.c.
- piezometro singolo - quota cella: 178 m da p.c.
- piezometro doppio - quota celle: 146 e 70 m da p.c.

La strumentazione messa in opera nella stazione è illustrata schematicamente nella Figura 3B e Figura 4B, mentre la Figura 5B presenta in dettaglio la litologia dei terreni attraversati dal pozzetto assestimetrico. Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°09' 6.76"N e 12° 24' 36.37"E. La raccolta dati è iniziata l'8 aprile 2009. A tale data (in occasione del collaudo) è stato fatto "lo zero" dei sensori di misura.

I dati sono stati acquisiti con regolarità secondo la seguente frequenza:

- 08 aprile 2009 - 22 maggio 2009: una misura ogni ora;
- 22 maggio 2009 - 2 novembre 2009: una misura ogni 2 ore;
- dal 02 novembre 2009: una misura ogni 6 ore.

Le misure sono state fatte con alimentazione a batteria fino al 22 maggio 2009. Da tale data fino al 14 luglio 2009 non si hanno registrazioni a causa dei lavori di messa a norma della baracca secondo la normativa ATEX. Dal 14 luglio è ripreso il normale ciclo di funzionamento della stazione. Nel 2011 c'è da segnalare un blackout di dati per mancanza di alimentazione dell'apparecchiatura tra il 29 settembre e il 14 ottobre.

A dicembre 2017 è stata fatta manutenzione straordinaria dei tre piezometri con spurgo e lavaggio dei piezometri della stazione. Per i due piezometri ubicati sulla stessa verticale - quello superficiale e l'intermedio (70 e 146 m da p.c.) - il lavaggio con acqua in pressione ha consentito di escludere che vi era comunicazione idraulica fra gli stessi. Le celle e i tubi di tutti e tre i piezometri (tipo Casagrande) sono risultati perfettamente integri: le letture manuali, effettuate subito dopo lo spurgo e durante la fase di ricarica della falda, sono risultate attendibili presentando per tutti i piezometri un dislivello massimo tra i due tubi compreso tra 0 e 1 cm. Tutti i piezometri revisionati sono risultati integri e affidabili per restituzione dei dati. L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta in giugno, luglio e ottobre 2018.



## Analisi dei dati assestimetrici

L'assestimetro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra il piano campagna (p.c.) e il punto più profondo d'ancoraggio dello strumento (320 m da p.c.).

Nei grafici allegati (Figura 6B) sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici, sia quelli assestimetrici. I dati relativi all'assestimetro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero").

Tale misura è quella dell'8 aprile 2009, data di collaudo del sistema. I valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano una compattazione, quelli negativi, viceversa, un incremento dello spessore (cioè espansione) degli strati di terreno monitorati. Nel caso della stazione di Rubicone, l'andamento nel tempo della curva di compattazione/espansione registrata dall'assestimetro si correla molto bene con le variazioni di livello dell'acqua nelle tre falde monitorate dai piezometri rispettivamente a 70 m, 146 m e 178 m di profondità.

Per tutto il periodo osservato si nota, infatti, un ritardo medio di circa 1.5÷2 mesi nella espansione/compattazione del terreno rispetto all'escursione massima (marzo/aprile) e minima (agosto/settembre) dei livelli di tali falde, Figura 7B confronto delle misure piezometrica profonda e assestimetrica dell'ultimo anno.

Nella stessa area della stazione assestimetrica è installata anche una postazione CGPS. Ciò ha permesso un confronto fra la velocità media d'abbassamento del suolo rilevata dai dati CGPS con quella di compattazione del terreno ottenuta dalle misure assestimetriche (Figura 8B). Tali velocità, che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, sono risultate in sostanziale accordo, soprattutto a partire dal 2012. La velocità media annua, calcolata con regressione lineare, della serie storica di misure CGPS è di -2.54 mm/a, abbastanza prossima a quella ottenuta, in modo analogo, dalle misure assestimetriche, che è pari a -2.81 mm/a.

Ciò potrebbe indicare che la causa principale d'abbassamento del suolo dipenda principalmente dalla compattazione dei primi 320 m di terreno e sia indotta dalle oscillazioni stagionali del livello delle falde acquifere e/o dal loro emungimento.



Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico:

- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

### **Analisi dei dati piezometrici**

Nei grafici dei piezometri (Figura 6B) l'ordinata è la quota piezometrica (m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico (come seconda ordinata) è riportato il valore della pressione barometrica.

Nel caso di Rubicone si notano delle effervescenze gassose nei tubi piezometrici causate dalla presenza di piccole quantità di gas nell'acqua; il fenomeno del resto era già osservato durante le operazioni di messa in opera dell'attrezzatura. Queste piccole effervescenze causano differenze di misura dei livelli d'acqua nei due tubi del piezometro profondo (pozzo CGRP-1). Nel mese di ottobre 2012 si sono puliti e controllati i 3 piezometri verificando il loro buon funzionamento. Un nuovo spurgo è stato fatto a fine settembre 2014 e si può osservare dai grafici dei piezometri, soprattutto per la curva relativa a quello superficiale, che a partire da tale data si è modificata la dinamica dell'escursione del livello dell'acqua.

A dicembre 2017, come già detto, è stata fatta una manutenzione straordinaria con spurgo e lavaggio dei tre piezometri. Sono stati controllati anche tutti i trasduttori di pressione. L'affidabilità di questi ultimi, in particolare, è stata accertata facendo diverse misure manuali con freatometro. Queste sono risultate del tutto in linea con le misure automatiche, consentendo di concludere che tutti i trasduttori erano perfettamente funzionanti e affidabili. Nella stessa occasione sono state fatte misure di fondo foro.

Nel corso del 2018, controlli sulla strumentazione piezometrica sono stati effettuati nei mesi di giugno, luglio ed ottobre, nel controllo di giugno è stato sostituito un trasduttore di pressione del piezometro a 178m. Ad oggi (dicembre 2018) tutti i piezometri e relativi trasduttori, risultano integri ed in grado di fornire dati attendibili.

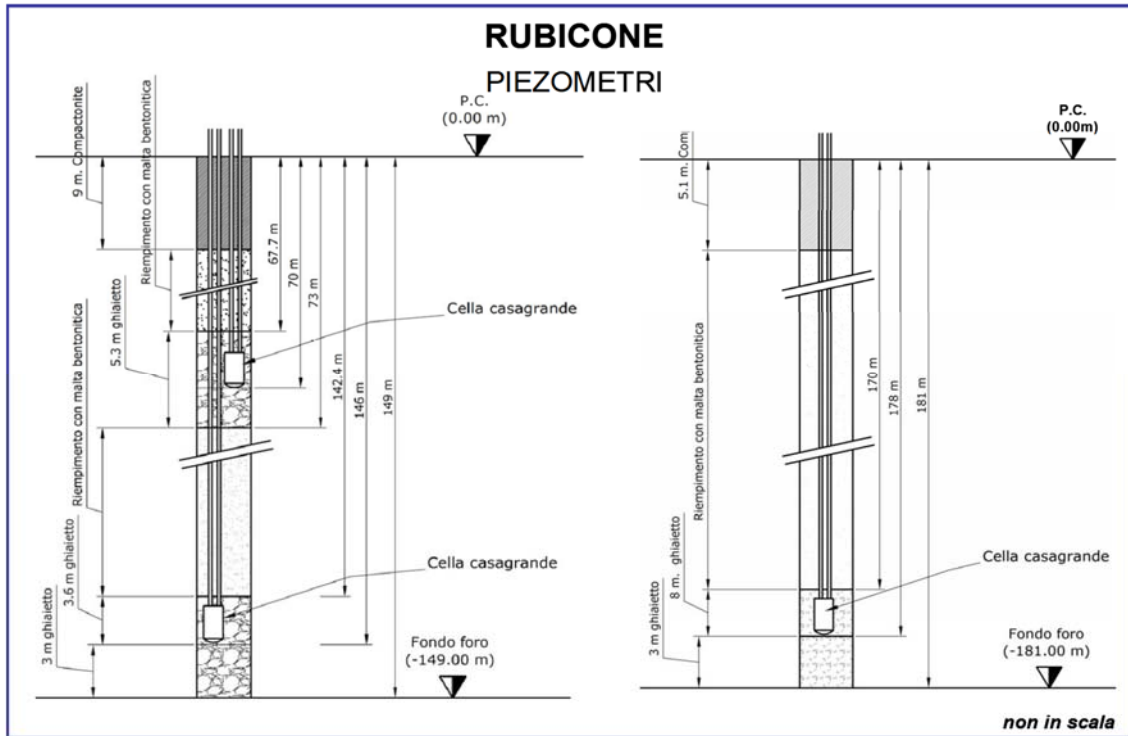


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Rubicone

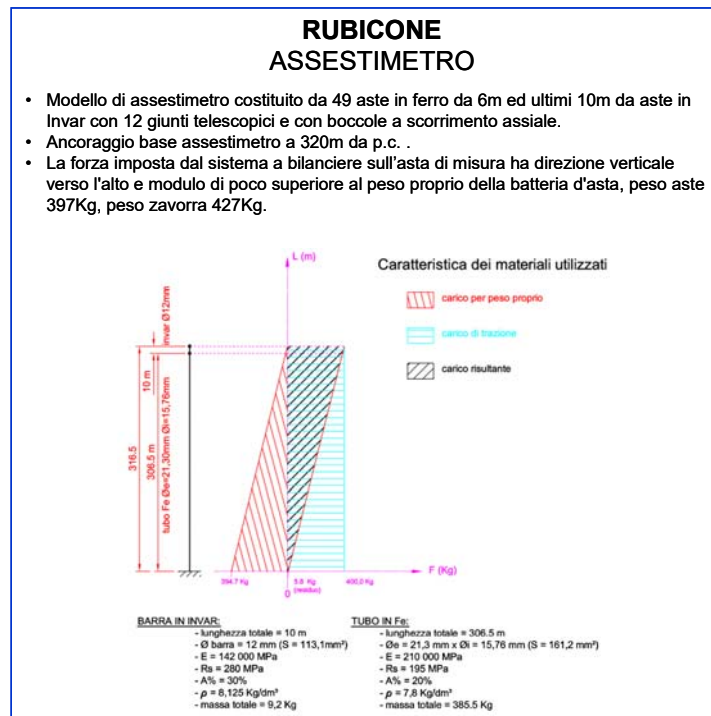


Figura 4B - Particolare di un assestimetro

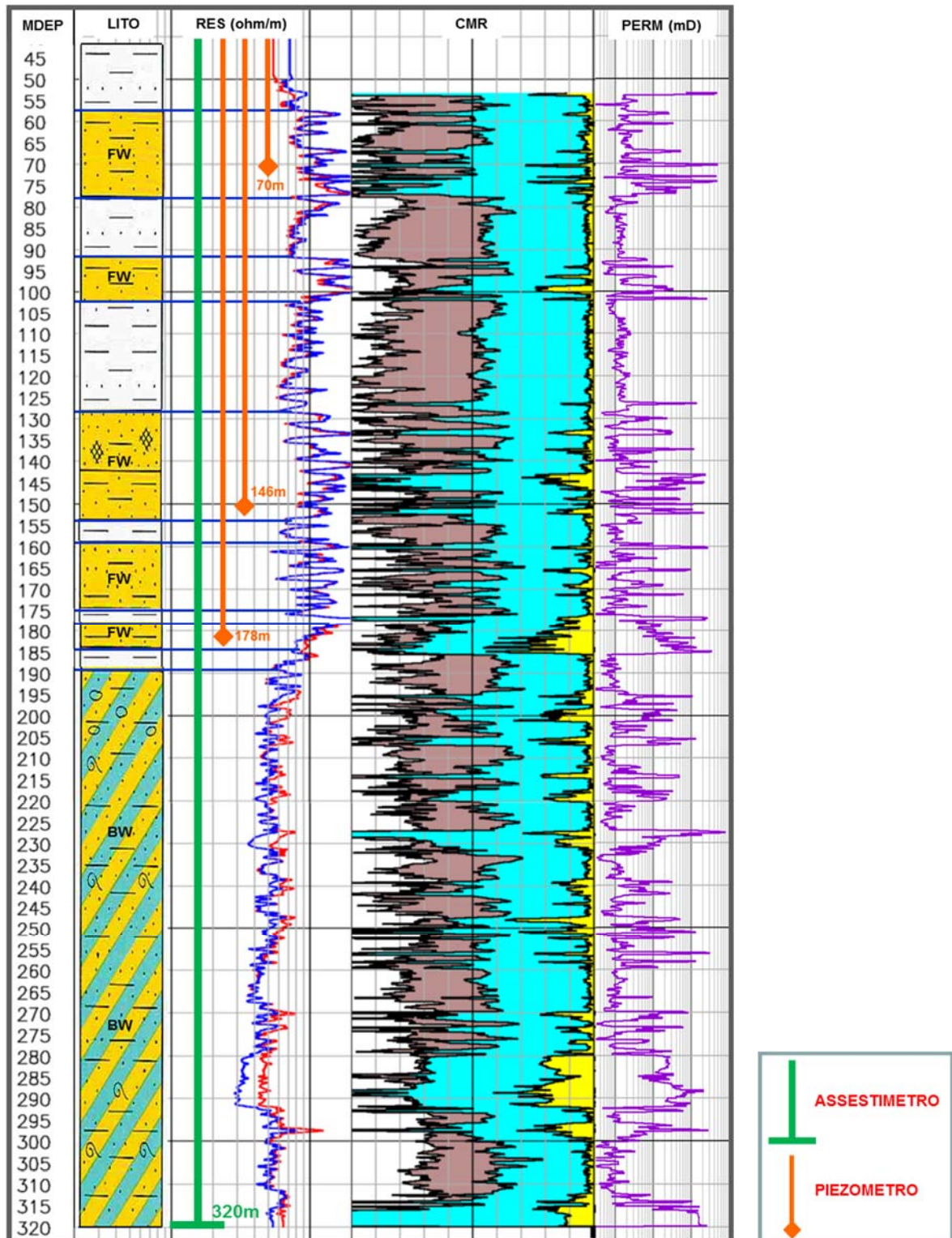


Figura 5B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Rubicone

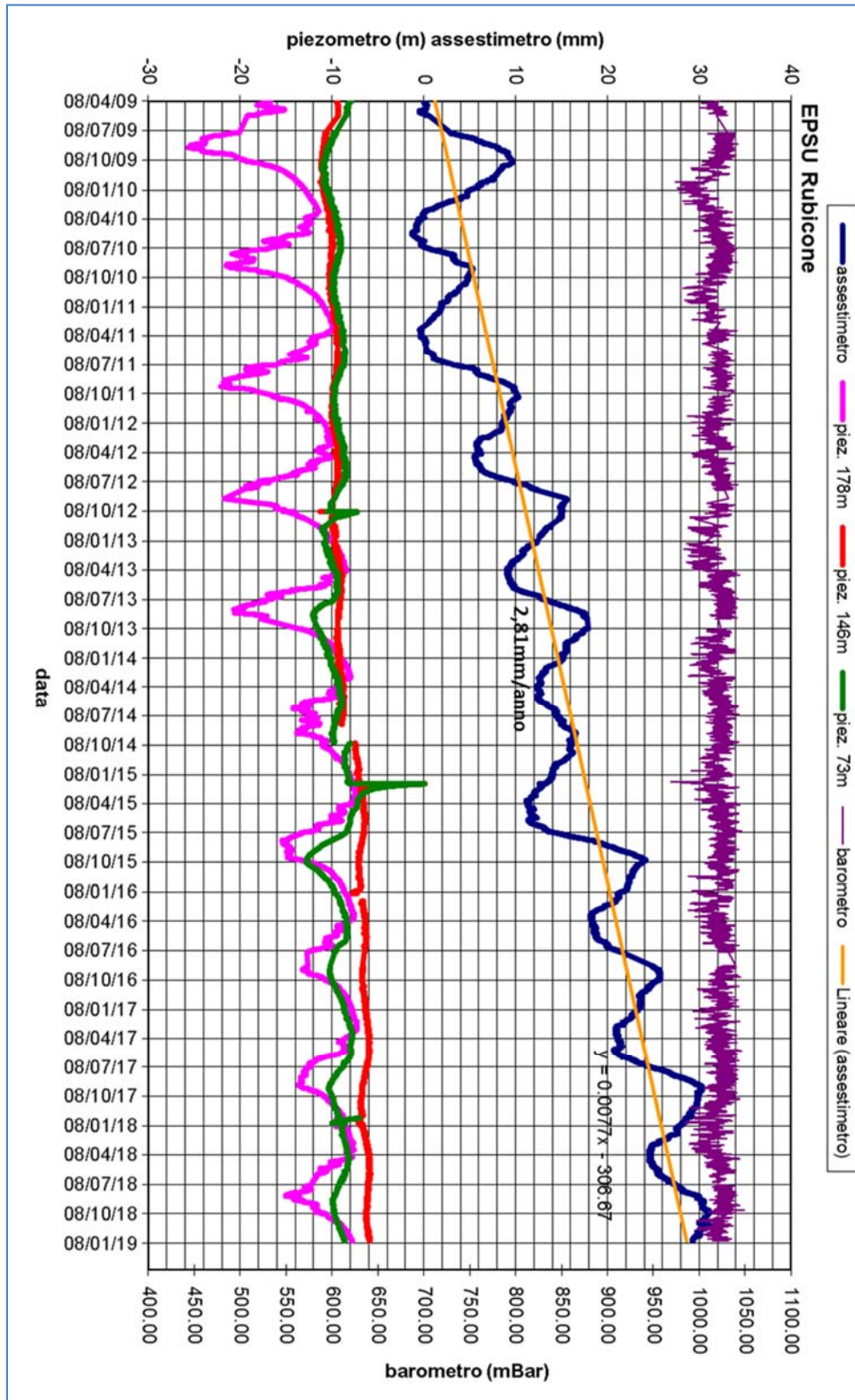


Figura 6B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestimetriche

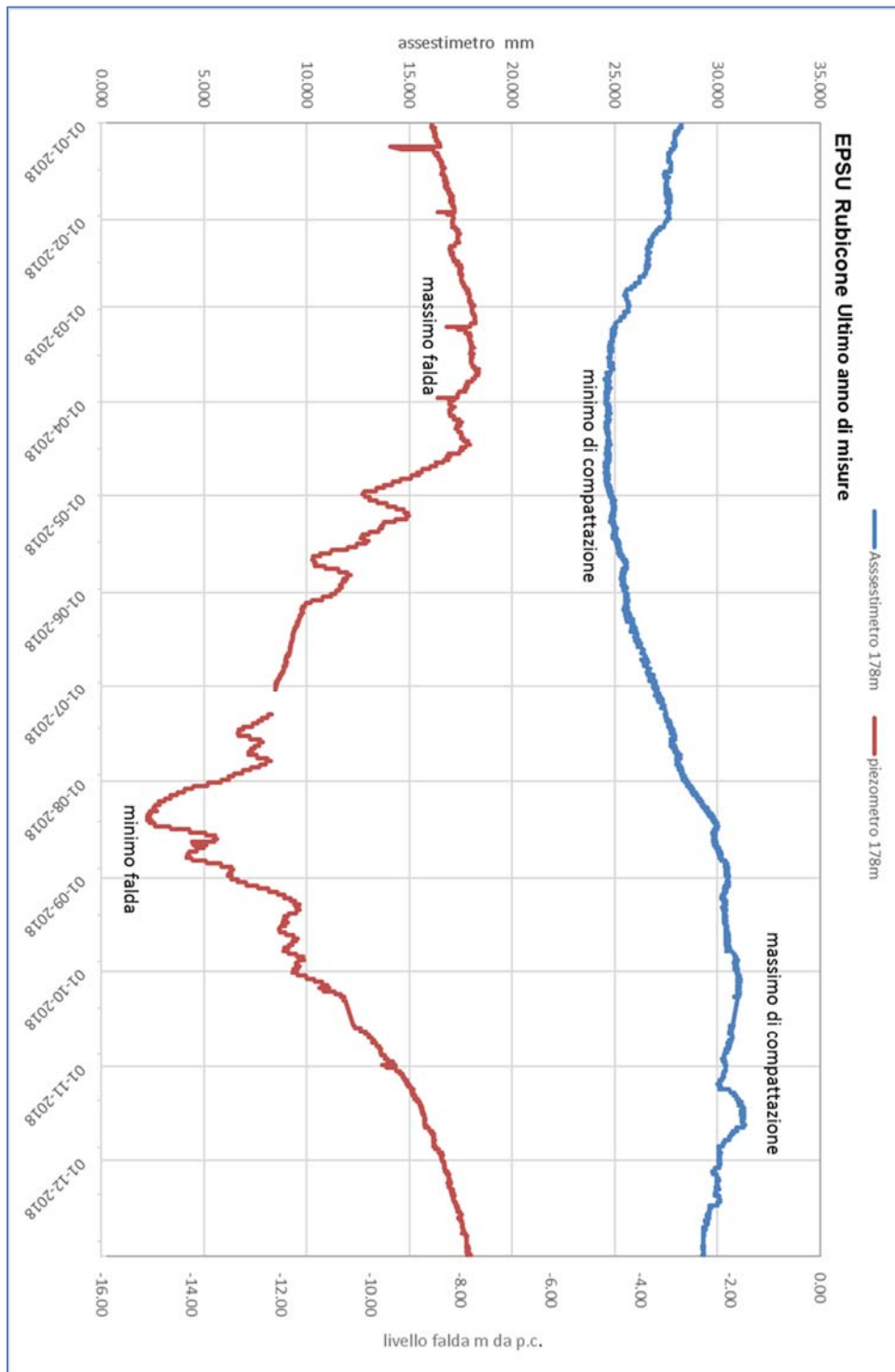
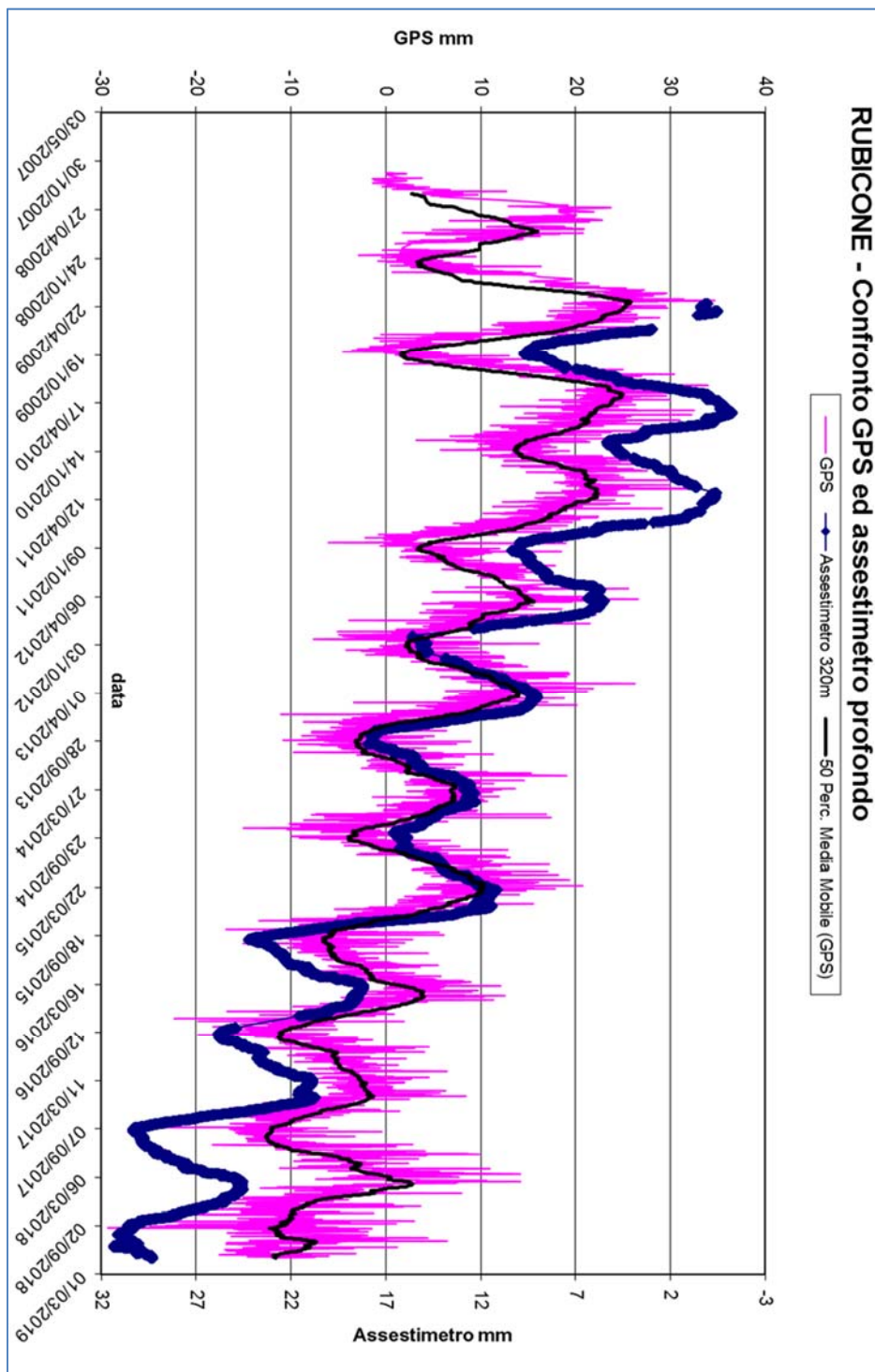


Figura 7B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestimetriche



**Figura 8B - Stazione EPSU di Rubicone: confronto misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimetriche**

*N.B.: nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assestimetrica è stata graficata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coerente con le modulazioni del CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).*





## **Stazione *EPSU* di FANO (installata ottobre 2008)**

### **Strumentazione:**

- assestimetro - quota bottom: 40.8 m da p.c.
- piezometro a cella singola: quota cella 6.1 m da p.c.

Lo schema della strumentazione messa in opera nella stazione è illustrato nella Figura 9B mentre la Figura 10B riporta la litologia dei terreni attraversati dal pozzetto assestimetrico.

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 43° 48' 28.37"N e 13° 02' 25.78"E.

La raccolta dati di questa stazione è iniziata il 16 ottobre 2008. In tale data (in occasione del collaudo) è stato fatto "lo zero" per tutti i sensori di misura.

L'acquisizione dati è stata fatta con regolarità secondo la seguente frequenza:

- 16 ottobre 2008 - 18 maggio 2009 una misura ogni ora;
- 19 maggio 2009 - 31 dicembre 2016 una misura ogni 6 ore.

Nel periodo monitorato (10/2008 - 12/2017) non si sono notate anomalie né a livello sensoristico, né a livello di apparecchiatura d'acquisizione dati.

L'ultimo controllo generale della strumentazione, con misure manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori, è stato fatto nel corso del 2018.

### **Analisi dei dati assestimetrici**

L'assestimetro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra la superficie (p.c.) e il punto più profondo d'ancoraggio dello strumento (40.8 m da p.c.).

Nei grafici allegati (Figura 11B) sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici, sia quelli assestimetrici. I dati relativi all'assestimetro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero"). Tale misura è quella del 16 ottobre 2008, data di collaudo del sistema. I valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

Sin dall'inizio della sua installazione, lo strumento non ha mai fatto registrare significative variazioni di spessore (compattazioni o espansioni) della porzione di terreno monitorato. Le escursioni cicliche stagionali, infatti, sono dell'ordine di  $\pm 1$  mm, con una punta massima



di compattazione di circa 1.5 mm registrata all'inizio del 2012.

La curva assestimetrica, inoltre, si correla bene con l'andamento del livello della falda acquifera monitorata dal piezometro posto a circa 6 m dal piano campagna, anche se con uno sfasamento temporale (ritardo dell'assestimetro rispetto ai minimi piezometrici) di qualche mese. Si osservano, infatti, quasi regolarmente i massimi di compattazione all'incirca a metà gennaio di ogni anno, mentre invece i minimi livelli della falda acquifera si verificano, quasi sempre, circa quattro mesi prima, ovvero intorno a metà settembre.

Nel corso del 2018 si è assistito a un ciclo simile agli anni precedenti, senza significative variazioni; una compattazione di circa 1 mm a inizio anno (metà gennaio) è stata quasi del tutto recuperata da una successiva espansione estiva (metà luglio/inizio agosto), per ritornare poi a un valore di circa 1 mm (compattazione) nel periodo autunno-invernale.

Alla fine del 2018 l'assestimetro registra, quindi di nuovo, una compattazione di ca. 1 mm con, una compattazione complessiva totale nell'anno quasi nulla (Figura 12B).

Se si prendono in esame tutte le misure assestimetriche registrate nei 10 anni e poco più di osservazioni in questa stazione, queste ultime mostrano, analogamente a quelle della stazione più a sud di Falconara, una situazione del terreno sostanzialmente stabile, con una compattazione complessiva pressoché nulla (-0.007mm/anno), a parte le variazioni cicliche stagionali.

Un comportamento del terreno pressoché identico è registrato dal CGPS ubicato in prossimità della stazione *EPSU*. Le misure CGPS danno, infatti, la superficie del suolo in leggero innalzamento con velocità media di ca. 0.1 mm/a. A sua volta la velocità media di compattazione stimata con regressione lineare dei dati della serie assestimetrica è praticamente nulla (0,007 mm/a). L'esame comparato delle due serie di misure assestimetriche e da CGPS (Figura 13B) mostra come queste abbiano gli stessi andamenti oscillatori ma sfasati nel tempo. In particolare, la curva assestimetrica sembra essere ritardata di ca. 4-5 mesi rispetto a quella del CGPS. È bene osservare, però, che si tratta di movimenti del suolo di bassissima entità, per cui si è al limite del potere risolutivo delle due tecniche di misura.

Passando al confronto con la piezometria, si nota che entrambe le curve assestimetrica e CGPS mostrano una buona correlazione con gli andamenti stagionali della falda. La curva assestimetrica si presenta, però, sfasata anche rispetto a quella piezometrica, raggiungendo il minimo (massima espansione) circa quattro mesi dopo il massimo del livello piezome-



trico (Figura 11B e Figura 12B). Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal ritardo con cui si contrae o rigonfia un grosso strato d'argilla di circa 32 m (Figura 10B) quando varia la sua saturazione in acqua. La presenza di tale strato d'argilla è stata rilevata durante la perforazione del foro assestimetrico. La curva dei dati CGPS sembra invece più in fase nel registrare in superficie i movimenti d'espansione o contrazione degli strati di terreno causati dalle variazioni del livello d'acqua nella falda (sollevamento del terreno in coincidenza dei massimi della falda). Va però notato che l'ubicazione dell'antenna CGPS (stazione SSU) dista circa 150-200 m dalla stazione *EPSU*, e probabilmente il terreno su cui è stata installata ha una stratigrafia caratterizzata da una minore presenza di livelli argillosi.

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico (Figura 13B):

- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

### **Analisi dei dati piezometrici**

Nello stesso grafico (Figura 11B) dei dati assestimetrici si è riportata la piezometria.

Nel grafico del piezometro l'ordinata è la quota piezometrica (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico (come seconda ordinata) è riportato il valore della pressione barometrica.

L'installazione di due trasduttori di pressione, uno per ogni canna del piezometro Casagrande, rende possibile controllare il grado di affidabilità del piezometro stesso. In questo caso la differenza di misura tra i due sensori è stata di circa  $\pm 7$  cm, il che rientra nella normale tolleranza dello strumento.

L'ultimo controllo generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori, è stato per il 2018 nei mesi di febbraio, luglio e ottobre.

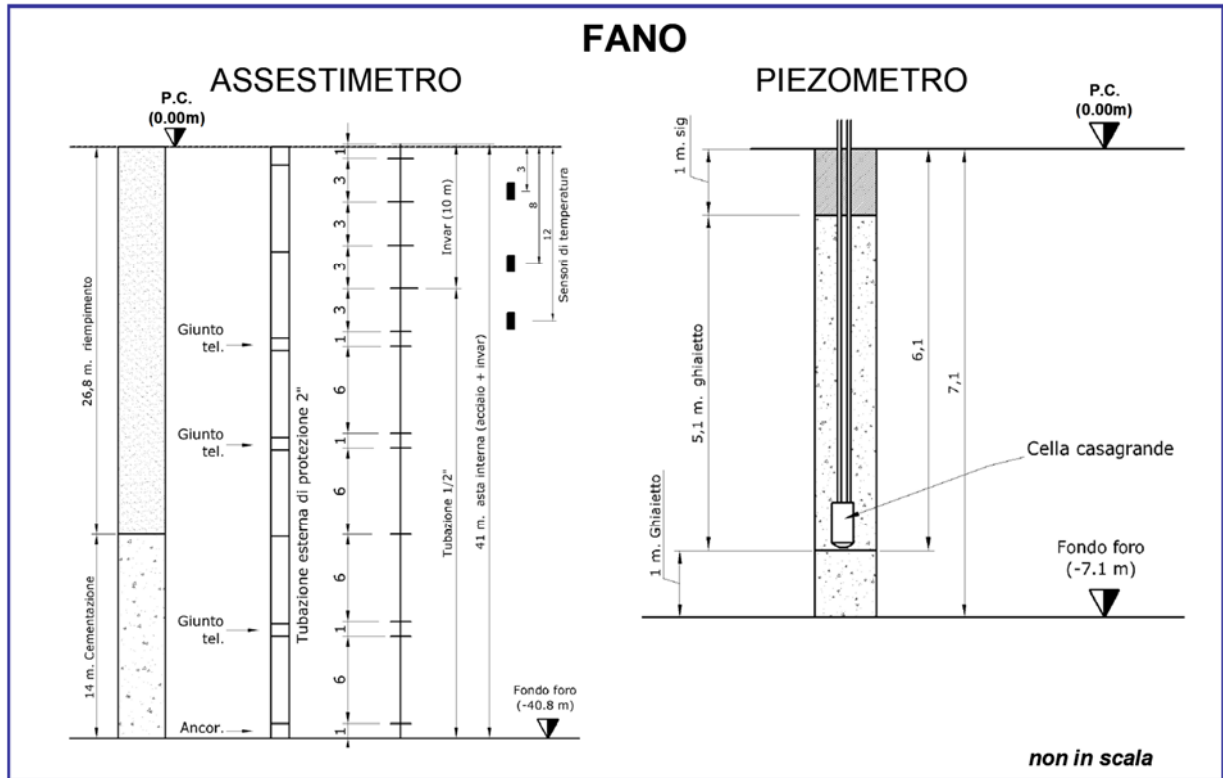


Figura 9B - Stazione EPSU di Fano

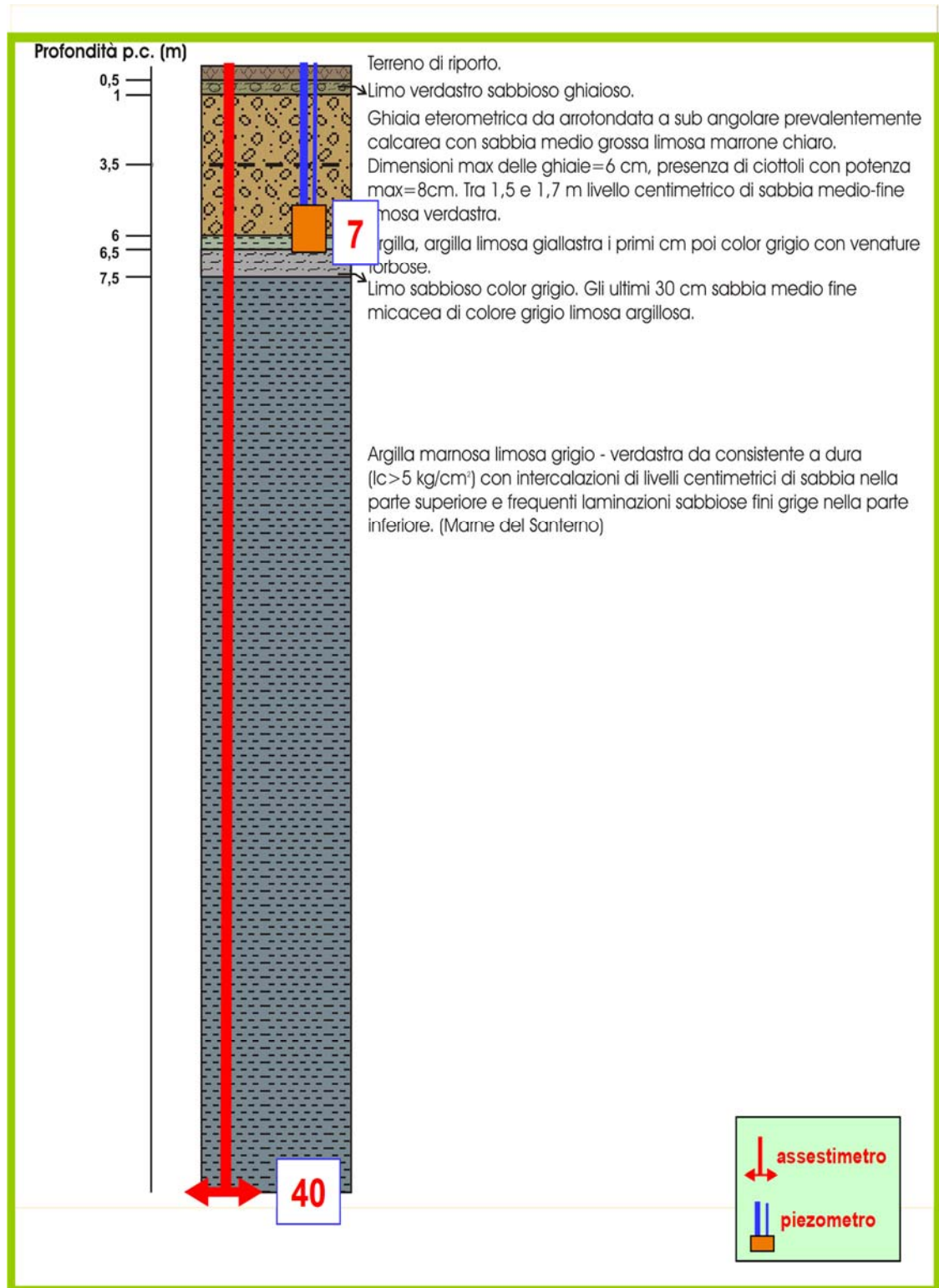


Figura 10B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Fano

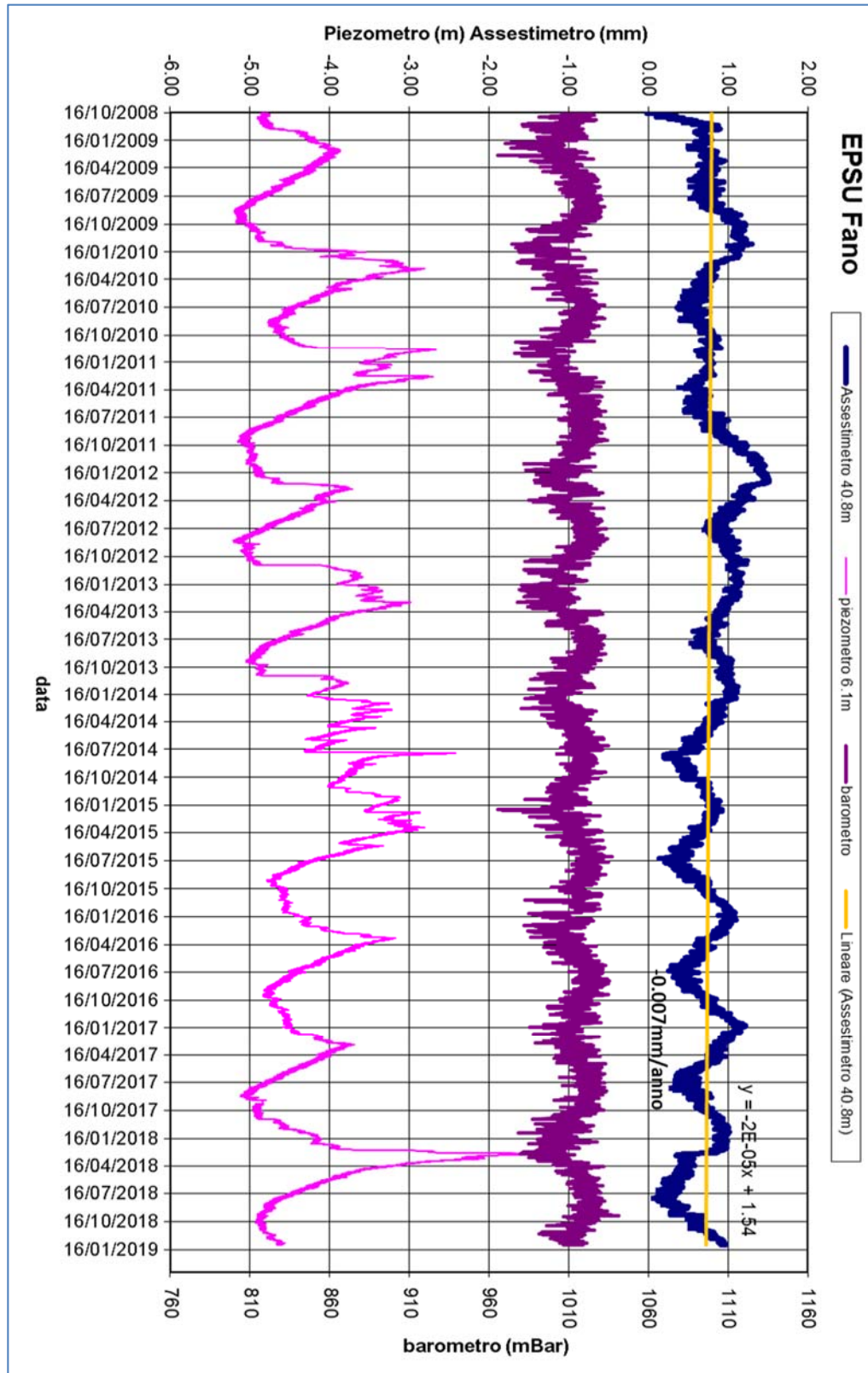


Figura 11B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestometriche

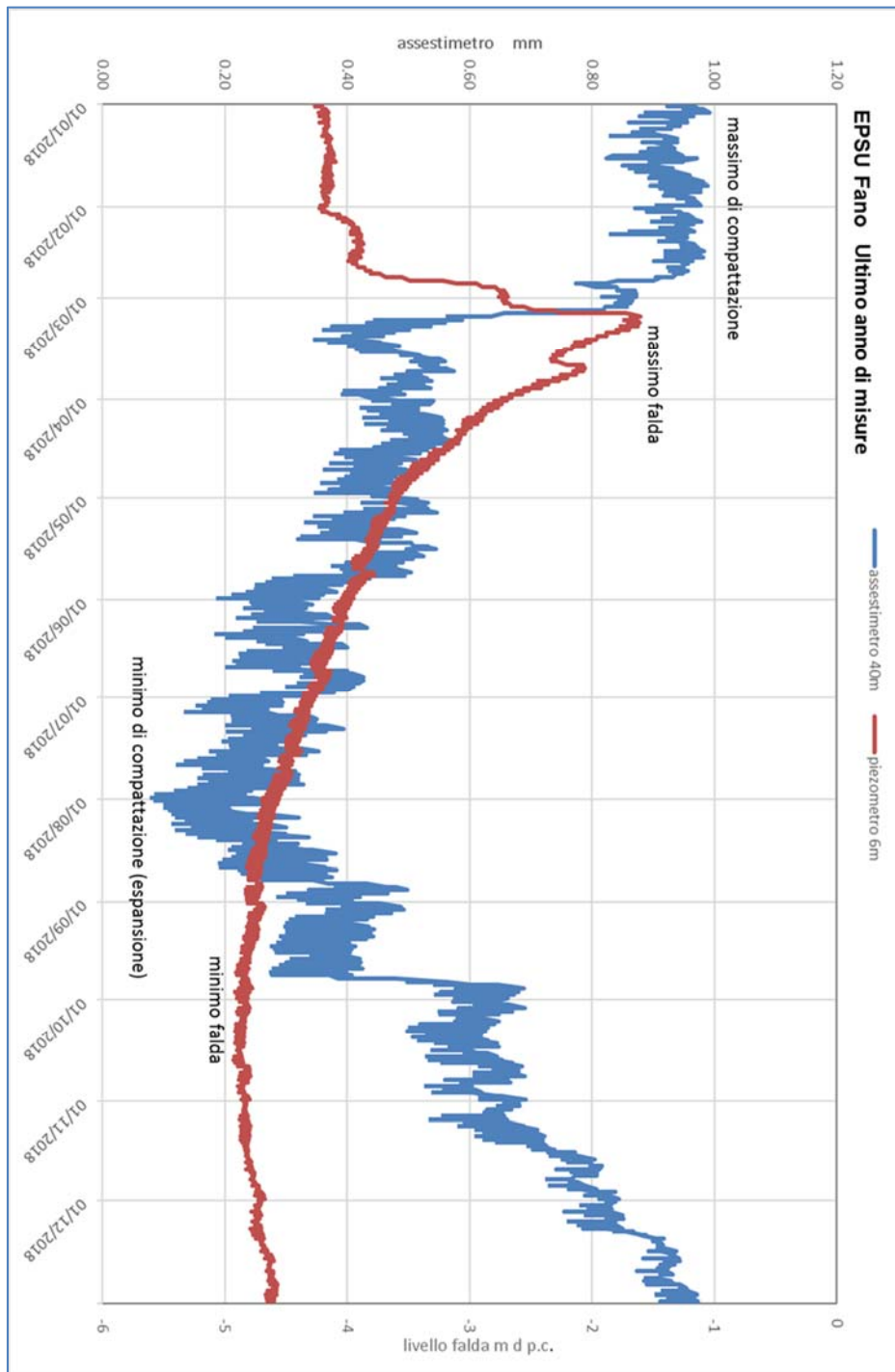
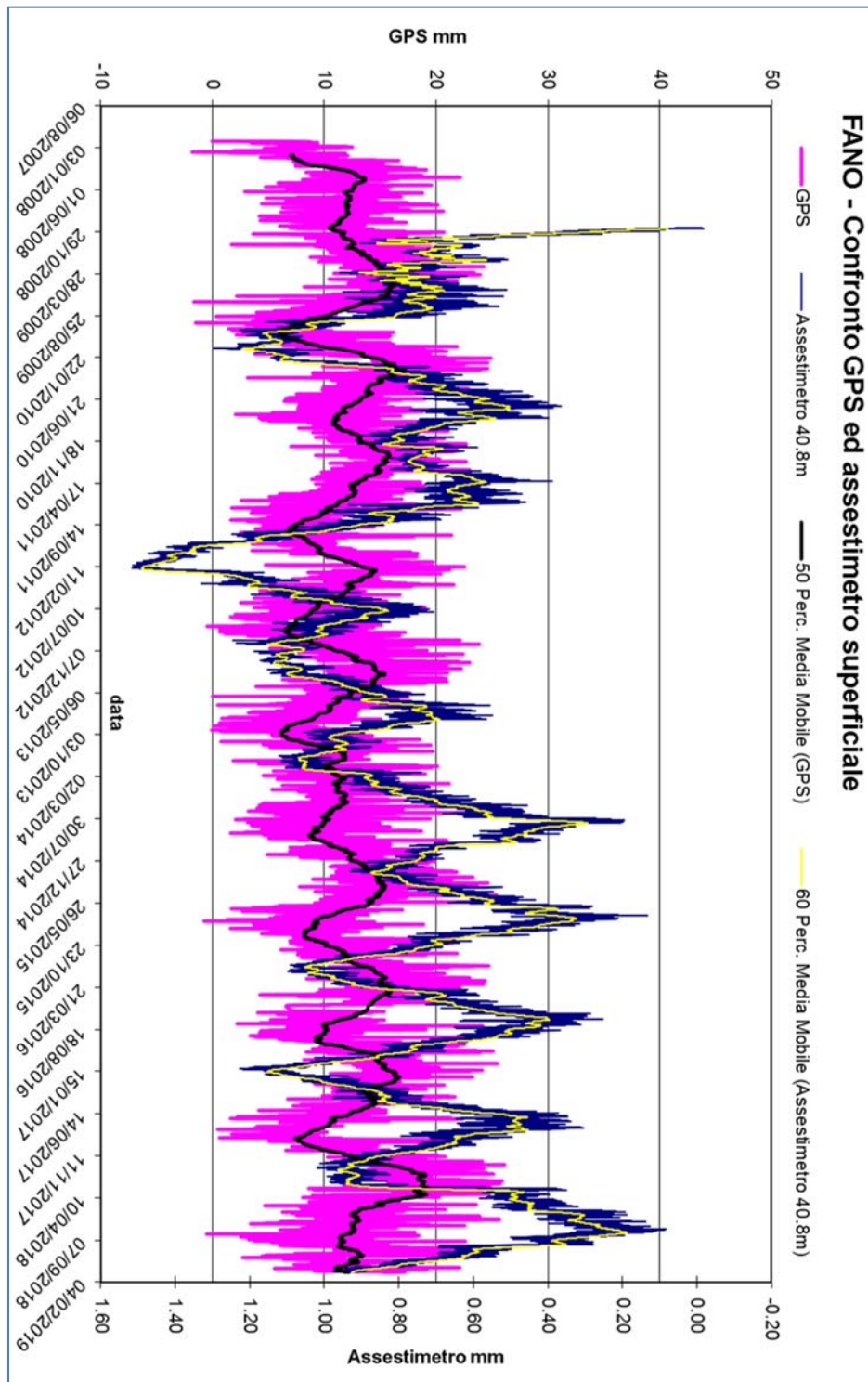


Figura 12B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestometriche



**Figura 13B - Stazione EPSU di Fano: confronto fra misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimetriche**

*N.B.: nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assestimetrica è stata graficata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coerente con le modulazioni del CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).*





## **Stazione *EPSU* di FALCONARA (installata ottobre 2008)**

### **Strumentazione:**

- assestimetro - quota bottom: 40.3 m da p.c.
- piezometro a cella singola - quota cella: 21 m da p.c.

Lo schema della strumentazione messa in opera nella stazione è illustrato nella Figura 14B, mentre la Figura 15B riporta la litologia dei terreni attraversati dal pozzetto assestimetrico.

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 43° 38' 28.86"N e 13° 21' 23.69"E.

La raccolta dati di questa stazione è iniziata il 16 ottobre 2008.

A tale data (in occasione del collaudo) è stato fatto "lo zero" dei sensori di misura.

L'acquisizione dati è stata fatta con regolarità secondo la seguente frequenza:

- 16 ottobre 2008 -18 maggio 2009: una misura ogni ora;
- 08 maggio 2009 - 31 dicembre 2014: una misura ogni 6 ore.

Nei periodi 07 ottobre 2011- 02 novembre 2011 e 03 dicembre - 13 dicembre 2011 si è avuto un problema d'alimentazione all'apparecchiatura d'acquisizione automatica dei dati, con conseguente mancata registrazione degli stessi. Identico problema si è verificato tra febbraio e aprile 2012; si è perciò sostituito parte dell'hardware del sistema d'acquisizione.

L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori, è stata effettuata nell'ottobre 2018.

### **Analisi dei dati assestimetrici**

L'assestimetro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra il piano di campagna (p.c.) e il punto più profondo d'ancoraggio dello strumento (40.3 m da p.c.).

Nei grafici allegati sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici, sia quelli assestimetrici (Figura 16B). I dati relativi all'assestimetro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale ("misura di zero"). Tale misura è quella del 16 ottobre 2008, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano una compattazione e, viceversa, valori negativi un incremento dello spessore (i.e.: espansione) degli strati di terreno monitorati.

Come nel caso della stazione di Rubicone, anche per quella di Falconara la variazione nel

tempo delle misure assestometriche è caratterizzata da una curva ad andamento oscillatorio molto ben correlabile con le variazioni di livello della falda d'acqua monitorate a 22 metri di profondità, dal piezometro nell'ultimo anno (Figura 17B).

L'assestometro, che reagisce quasi immediatamente, senza ritardi, all'escursione massima e minima annuale di tale falda, mostra, inoltre, uno stato del terreno assolutamente stabile nel tempo, cioè senza apprezzabile compattazione. La velocità media annua calcolata con regressione lineare delle misure assestometriche risulta, infatti, pari a ca. -0.1 mm/a (ovvero minima compattazione dello spessore di terreno monitorato).

Identico andamento emerge dall'analisi delle misure di abbassamento/sollevamento del suolo della stazione CGPS installata in loco. La correlazione tra le due curve, assestometrica e CGPS (Figura 18B), è estremamente elevata, il loro sfasamento temporale è pressoché nullo e le "pulsazioni" (espansioni e compattazioni) del terreno (tutte di piccolissima entità) sono correlate alle variazioni di livello della falda acquifera. La velocità media annua calcolata con regressione lineare dei dati CGPS risulta pari a -0.28 mm/a (ovvero leggerissimo abbassamento della superficie del suolo).

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico (Figura 18B):

- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestometrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

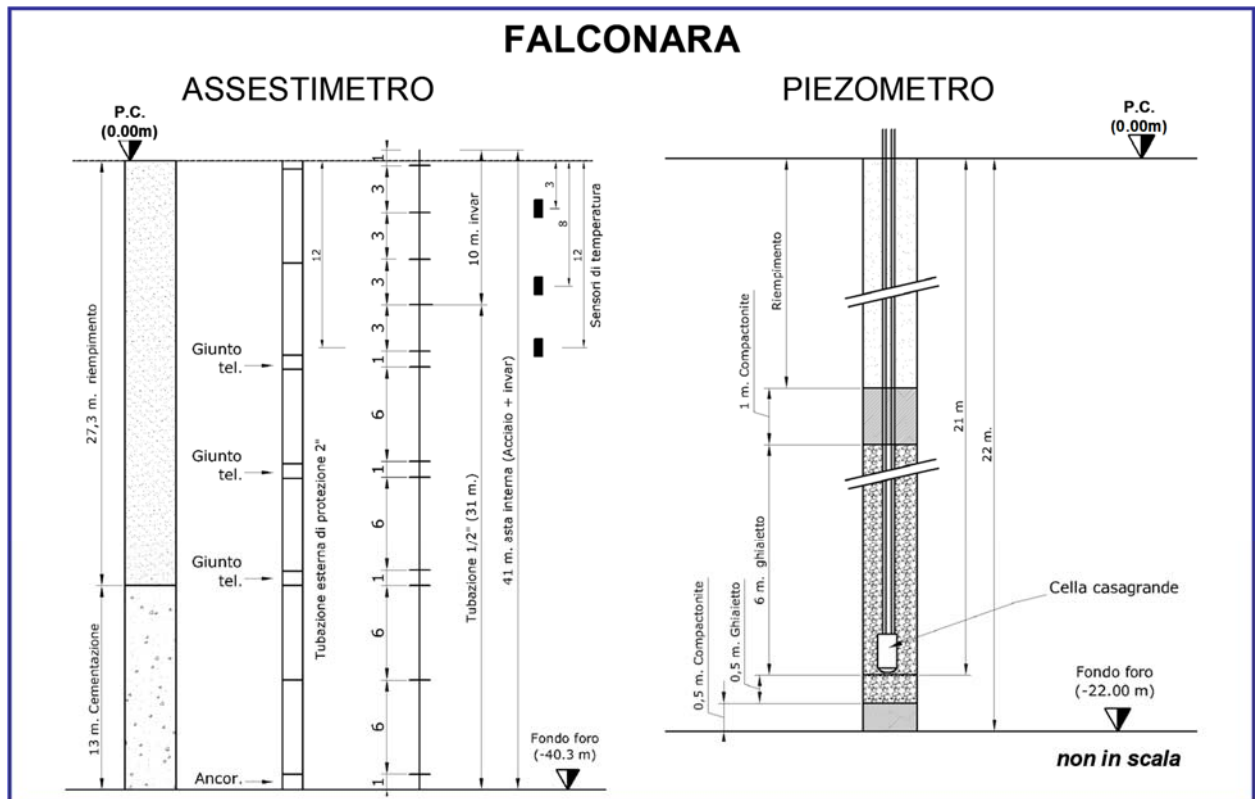
## **Analisi dei dati piezometrici**

Il grafico di Figura 14B oltre ai dati assestometrici riporta in ordinate sia la quota piezometrica (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna, sia il valore della pressione barometrica.

Nel caso di Falconara il livello della falda è risultato molto alto, circa 1.3 m da p.c. Dato che si sono utilizzati 2 trasduttori di pressione - uno per ogni canna del piezometro Casagrande - si è in grado di controllare l'attendibilità delle misure.

Nel 2018 è stata effettuata la manutenzione ordinaria delle apparecchiature nei mesi di febbraio, luglio e ottobre. In tutte le occasioni si è misurato manualmente con freatimetro il livel-

lo della falda per verificare la qualità delle misure registrate dai trasduttori. Le differenze riscontrate sono risultate sempre molto piccole, dell'ordine di 2-3 cm, per cui i piezometri sono da considerarsi affidabili e funzionanti.



**Figura 14B - Stazione della stazione EPSU di Falconara**

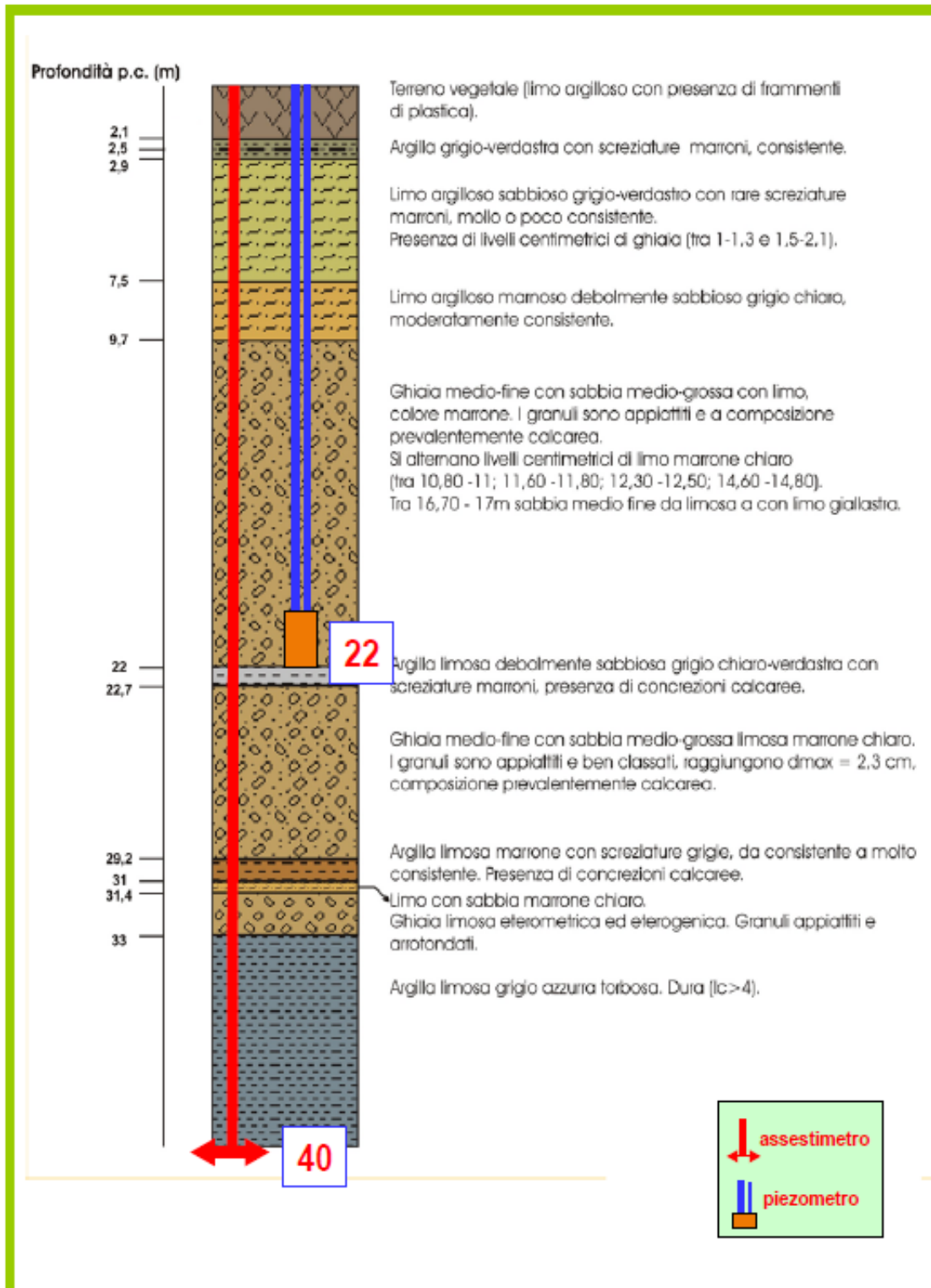


Figura 15B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Falconara

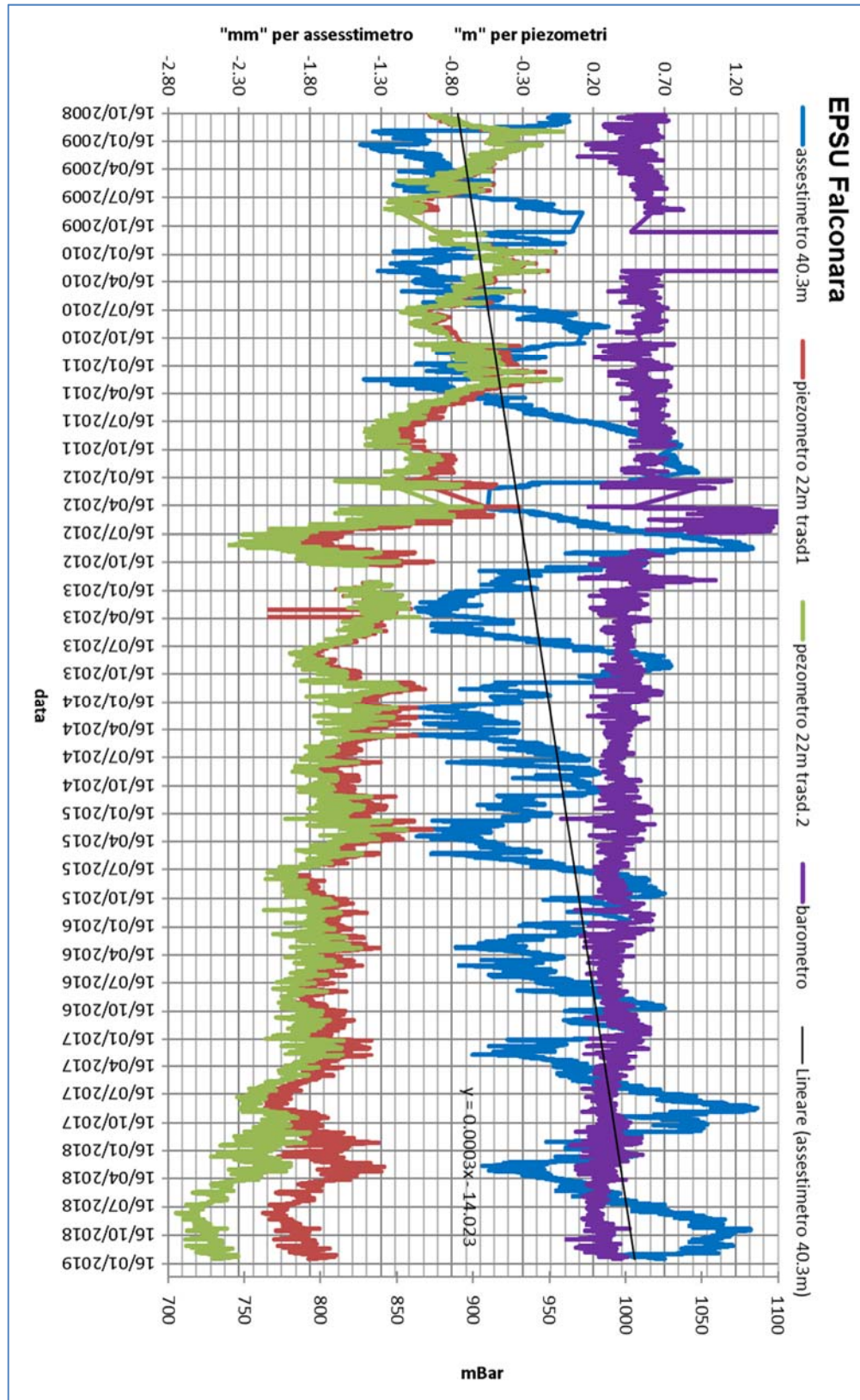


Figura 16B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche

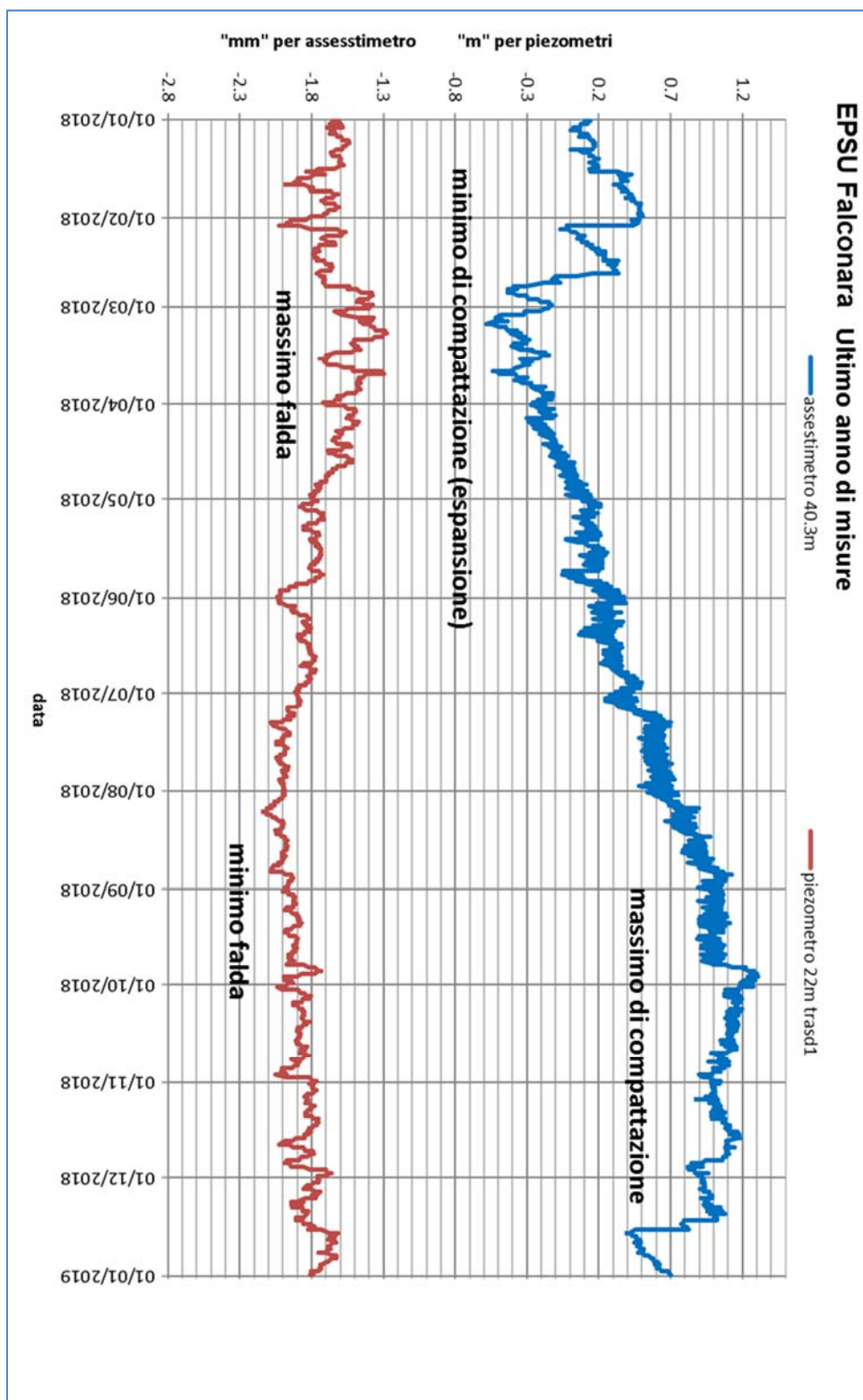
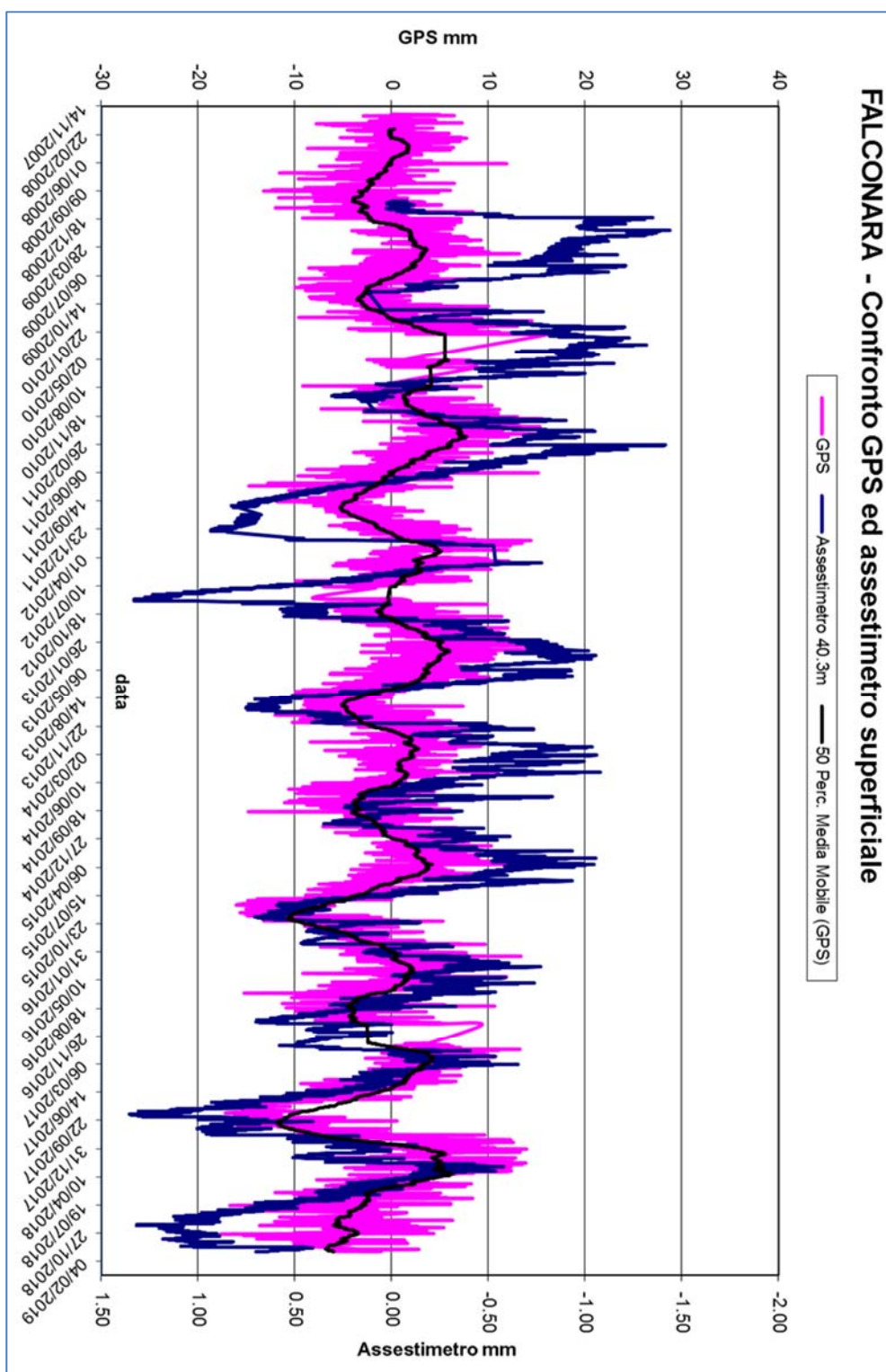


Figura 17B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche



**Figura 18B - Stazione EPSU di Falconara: confronto misure CGPS vs. misure piezometrico-assestimetriche**

*N.B.: nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva CGPS questa è stata filtrata con una media mobile su 50 campioni. Per comodità la curva assestimetrica è stata graficata con i valori in ordine inverso, in modo da renderla coe-*



rente con le modulazioni del CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

## Conclusioni

Dall'insieme dei dati sino ad ora raccolti nelle 3 stazioni *EPSU* si nota, in generale, una buona correlazione diretta tra l'andamento stagionale della piezometrica ed i cicli di compattazione ed espansione del terreno misurati dagli assestimetri.

Tale correlazione è più evidente nel caso di Falconara, dove il piezometro monitora le falde superficiali più sensibili a tutte le variazioni stagionali di piovosità.

Anche nel caso di Rubicone c'è un'ottima correlazione tra i cicli stagionali di compattazione/espansione del terreno monitorati dall'assestimetro e le corrispondenti variazioni di livello delle tre falde registrate dai piezometri. Le compattazioni massime (contrazioni del terreno), infatti, si hanno all'incirca a settembre/ottobre di ogni anno dopo circa 1.5 / 2 mesi dai minimi livelli di falda; le espansioni massime si verificano, invece, mediamente verso aprile/maggio di ogni anno e a loro volta sono in buona correlazione con i livelli piezometrici massimi delle stesse falde avvenuti 1.5/2 mesi prima. L'assestimetro di questa stazione, essendo il più profondo di quelli installati nelle 3 *EPSU*, è anche quello che registra nel tempo un aumento progressivo della compattazione del terreno monitorato (spessore 320 m). Lo strumento a dicembre 2018, dopo 9.73 anni di funzionamento, misurava, infatti, una compattazione complessiva (rispetto allo zero iniziale) di 29.31 mm, che con un semplice calcolo equivale a una velocità media annua di compattazione pari a circa 3 mm/a. Tale valore si riduce leggermente a circa 2.8 mm/a se si elaborano i dati delle misure assestimetriche con una regressione lineare. Nel caso di Fano, il trend delle curve piezometrica e assestimetrica è maggiormente influenzato dalla litologia attraversata dai pozzi, litologia che rende meno evidente la correlazione tra andamento stagionale del livello della falda e misure assestimetriche. Infatti, mentre il piezometro monitora le variazioni di livello della falda in uno strato ghiaioso-sabbioso superficiale (max. profondità 6 m dal p.c.), l'assestimetro è ancorato all'interno di uno strato argilloso spesso circa 32 m e scarsamente comprimibile, lo strumento, infatti, nei circa 10 e più anni di funzionamento ha misurato una compattazione complessiva quasi nulla (0.91mm). A tale spessore di litologia argillosa si potrebbero imputare i ritardi nella compattazione espansione del terreno rispetto all'escursione della falda freatica monitorata. La tabella che segue riporta per ciascuna stazione la compattazione complessiva del terreno al 31/12/2018 e la relativa velocità media annua, valutata sempli-





cemente come rapporto fra la misura assestimetrica a fine 2018 e gli anni complessivi di monitoraggio. In questo caso non si è fatta alcuna regressione lineare dei valori della serie storica assestimetrica. Questo procedimento potrebbe, pertanto, dare risultati non perfettamente uguali, anche se molto simili, a quelli riportati nelle precedenti analisi dei dati assestimetrici. Si noti, altresì, che per le stazioni di Fano e Falconara le misure assestimetriche hanno valori molto piccoli, e che nel periodo d'osservazione non è emerso un trend ben definito di compattazione del terreno. In questo caso le medie annuali non si possono considerare veramente significative.

Sito	Anni di osservazione	Assestimetro profondo		Assestimetro superficiale	
		Spostamento compl. (mm)	Velocità (mm/a)	Spostamento compl. (mm)	Velocità (mm/a)
<b>Rubicone</b>	9.73	29.31	3	n.i.	-
<b>Fano</b>	10.21	n.i.	-	0.91	n.v.
<b>Falconara</b>	10.21	n.i.	-	0.69	n.v.

n.i. = non installato

n.v. = non valutabile