

## Campo di ANEMONE II FASE

Aggiornamento al 31/12/2018

Il campo di Anemone è situato nell'offshore Adriatico circa 20 km a NE di Rimini, a una profondità d'acqua di circa 23 m, nella concessione A.C8.ME (Figura 1).

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C8.ME	2 <sup>a</sup> proroga scadenza 05/11/20	Eni	Eni	81%	Emilia-Romagna
			Edison	19%	

Il giacimento si presenta come un'anticlinale orientata NW-SE associata a un sovrascorrimento immergente a SW. L'estensione del giacimento è di circa 6 km<sup>2</sup>. La serie mineralizzata è compresa tra i 2100 e 3570 m slm e interessa livelli della sequenza PL e PL1 della Formazione Porto Corsini (Figura 2 e Figura 3). Il campo di Anemone è stato scoperto nel 1973 con il pozzo Anemone 1, ed è stato in seguito delimitato e sviluppato mediante la perforazione di 8 pozzi (Anemone 1, 2, 3, 4, 4bis, NW1, NW1bis e 5), di cui solo 4 sono risultati mineralizzati a gas e aperti alla produzione (pozzi Anemone 1, 3 e 4bis perforati dal Cluster Anemone e il pozzo Anemone 2 isolato). Tra il 1997 e il 1998 è stata eseguita una campagna d'interventi di *side-track* sui pozzi 1, 3 e 4bis del Cluster Anemone ed è stato chiuso minerariamente il pozzo isolato Anemone 2. Nell'agosto 1996 è stata presentata da Eni una domanda di pronuncia di compatibilità ambientale concernente la realizzazione della piattaforma Anemone B (*Anemone II Fase*) con la perforazione di 6 nuovi pozzi e la posa del relativo *sealine* di collegamento. Nel documento SIA si riportava un profilo di produzione ottenuto dagli studi statico e dinamico di giacimento (modello monocella) del giugno 1995. Tale profilo, riferito all'intero campo di Anemone, prevedeva il recupero di 6077 MSm<sup>3</sup> di riserve residue producibili in 23 anni. Le riserve totali stimate dall'inizio produzione per campo di Anemone ammontavano, pertanto, a 7142 MSm<sup>3</sup>, tenuto conto che alla stessa data il campo aveva già prodotto 1065 MSm<sup>3</sup>. In seguito al Decreto VIA n° 2979 del 3/03/98 che esprimeva un giudizio positivo circa la compatibilità ambientale del programma di sviluppo, nel periodo 1998÷1999 è stato completato lo sviluppo del campo con la perforazione, da una piattaforma di tipo BEAF, di 7 nuovi pozzi produttori (Anemone 6dir÷12dir), uno dei quali (Anemone 6dir) è stato

equipaggiato con marker per il monitoraggio in situ della compattazione. La piattaforma Anemone B è stata messa in produzione nel maggio del 1999 con una portata iniziale di circa 1400 kSm<sup>3</sup>/g. Nel periodo aprile-dicembre 2006 sono stati fatti interventi di *work-over* sui pozzi Anemone 8, 12 e 7.

I risultati dello sviluppo del campo hanno sostanzialmente confermato le dimensioni della struttura. Il comportamento produttivo durante i primi 5 anni della piattaforma Anemone B, però, è stato inferiore alle attese a causa dell'arrivo prematuro dell'acqua di formazione e ha reso necessaria una revisione degli studi statico e dinamico del campo.

Tale revisione, fatta nel settembre 2006, confermava il GOIP dei livelli del campo (*GOIP studio statico del giugno 1995 pari a 10 GSm<sup>3</sup>, GOIP revisione studio statico del settembre 2006 pari a 10 GSm<sup>3</sup>*) e consentiva una migliore taratura del meccanismo di produzione, evidenziando il contributo dell'acquifero al sostegno della pressione dei singoli livelli messi in produzione. La migliore conoscenza di tale contributo dell'acquifero portava a un aggiornamento del valore delle riserve a vita intera producibili dal campo con una riduzione delle stesse stimata in circa il 24%. Il nuovo profilo di produzione, infatti, prevedeva il recupero entro il 2040 di 5400 MSm<sup>3</sup> con una graduale chiusura dei pozzi dovuta all'alta percentuale di acqua prodotta. Come previsto nel programma lavori specificato nella relazione conclusiva del Gruppo di Lavoro istituito dal Ministero dell'Ambiente per il monitoraggio dei fenomeni geodinamici (luglio 2007), nel corso del 2007 è stato fatto un modello geomeccanico a elementi finiti (FEM) del campo di Anemone. Per realizzare tale modello si è deciso d'eseguire un ulteriore aggiornamento degli studi statico e dinamico del campo stesso, onde tener conto sia degli andamenti produttivi osservati fino al 30/06/07, sia delle informazioni ottenute nel corso del 2006 dalla perforazione dei nuovi pozzi *side-track*.

In particolare, il nuovo studio statico di giacimento del dicembre 2007 (*rel. Eni-INPE n° 28-08 del gennaio 2008*) ha ridotto il volume del GOIP totale a 8216 MSm<sup>3</sup>, ovvero il 18% in meno del valore precedente (*GOIP revisione studio statico del settembre 2006 pari a 10 GSm<sup>3</sup>*). L'aggiornamento dello studio dinamico (modello *Eclipse* - dicembre 2007) non ha, però, sostanzialmente modificato il volume delle riserve a vita intera, che anzi è aumentato di circa 1.5%. Il nuovo profilo di produzione prevedendo il recupero entro il 2033 di 5484 MSm<sup>3</sup> con un anticipo nel recupero finale di 7 anni rispetto al profilo del 2006 per effetto degli interventi fatti sui pozzi. Lo studio ha anche confermato la graduale chiusura dei pozzi stessi per l'alta

percentuale di acqua prodotta. I risultati del modello dinamico *Eclipse* del dicembre 2007 sono stati utilizzati per una revisione del modello geomeccanico (FEM) a elementi finiti (*rel. TERA nr. 032-07 – Campo di Anemone – Studio di previsioni di subsidenza – Management Summary del dicembre 2007*) che ha stimato una subsidenza massima di 37 cm al 2036, e una distanza minima del cono di subsidenza dalla linea di costa sempre superiore a 8 km. Si ricorda che la previsione di subsidenza fatta nel 2006 con un modello geomeccanico del tipo Geertsma semianalitico (*rel. INPE n° 123-06 del 18/09/06*) stimava una subsidenza massima di 38.1 cm alla fine produzione del campo (2040). L'estensione del cono di subsidenza verso la costa (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) dopo 20 anni dalla fine produzione risultava essere di circa 12 km (al 2060), per cui la distanza minima del cono stesso dalla costa era pari a circa 8 km. Nel corso del 2010 si sono nuovamente aggiornati i modelli statico, dinamico e geomeccanico del 2007; in quest'ultimo studio, completato nell'aprile 2011, si è stimato un recupero di gas pari a 4914 MSm<sup>3</sup> al 2019 con una riduzione, quindi, di circa il 10% rispetto alla stima del dicembre 2007 (*rel. GISE del 04/2011- Campo di Anemone – Nota integrativa – Aggiornamento Studio di giacimento*). Con tale revisione si è pure aggiornato il modello geomeccanico (*rel. TERA n.15/2011 – Campo di Anemone – Modello Elasto-Plastico di Subsidenza – Management Summary del 12/2011*) i cui risultati hanno stimato un valore massimo di subsidenza, in corrispondenza del campo, pari a 36 cm al 2052 (fine simulazione) con esaurimento del fenomeno a circa 10 km dalla linea di costa. I risultati di questo modello geomeccanico sono sostanzialmente in linea con quelli del precedente modello realizzato nel 2007. I valori leggermente inferiori di subsidenza massima e d'estensione del cono di subsidenza sono da riferirsi alla riduzione del 10% delle riserve (modello di giacimento dell'aprile del 2011).

Un nuovo aggiornamento del modello dinamico di giacimento è stato fatto nel corso del 2013 (*rel. Eni-GISE n° 20-13 del novembre 2013*); tale aggiornamento ha stimato un recupero di gas di 4687 MSm<sup>3</sup> (caso *Do Nothing + Sidetrack Anemone 12 dirB*) al 2024, con una riduzione, quindi, del 5% rispetto allo studio del 2011. A questo studio è seguito un addendum nel 2014 (*rel. Eni-GISE n° 20-13 del 24 aprile: campo di Anemone - Appendice studio di giacimento*) in cui si è presa in esame la revisione/ottimizzazione della traiettoria del nuovo *side-track Anemone 12 dirB* con varie configurazioni di produzione in *commingling*. Nel corso del 2015 si è, pertanto, proceduto ad una ulteriore revisione del modello di giacimento statico

e dinamico (*rel. Eni-GISE n° 18-15 del dicembre 2015*) per tener conto dei nuovi dati acquisiti con la perforazione del *side-track* Anemone 12 dirB nel gennaio 2015.

Nella Figura 4 sono riportati gli andamenti storici della portata di gas (kSm<sup>3</sup>/g), d'acqua (m<sup>3</sup>/g) e della produzione cumulativa di gas al 31/12/2018 pari a 4596 MSm<sup>3</sup>.

Si noti come la produzione cumulativa reale del campo di 4596 MSm<sup>3</sup> al 31/12/2018 abbia, di fatto, anticipato quanto previsto dal nuovo profilo di produzione che stimava un recupero al 2018 di complessivi 4582 MSm<sup>3</sup>. Il fattore di recupero a fine 2018 è, pertanto, ormai pari al 100% (Figura 5, Figura 6 e Figura 7).

La Figura 8 riporta i profili di pressione calcolati con il modello *Eclipse* dell'aprile 2015 e le pressioni misurate con profilo statico e log RFT (Repeat Formation Test) per il livello PL1-KK1, ritenuto tra i più rappresentativi del campo. Il confronto fra tali profili e dati misurati mostra come le previsioni sul comportamento del campo, in termini di pressione, siano conservative.

A seguire è stato aggiornato il modello geomeccanico (*rel. TERA del 08/2015- Campo di Anemone – Modello Elasto-Plastico di Subsidenza – Management Summary del dicembre 2015*) i cui risultati sono riportati nella seguente Tabella 1.

**Tabella 1 – Risultati finali dello studio geomeccanico 12/2015: massima subsidenza ed estensione del fenomeno**

		Gennaio 2011	Luglio 2018	Gennaio 2033	Gennaio 2048
Max Subsidenza	(cm)	32	36	38	39
Max Estensione	(km)	8	9	12	14
Min Distanza Costa		12	12	11	11

In particolare, l'analisi dei risultati permette di osservare che:

- il valore massimo della subsidenza a fine produzione è pari a 36 cm;
- il valore massimo di subsidenza a fine simulazione (2048) è pari a 39 cm;

- nel 2018 (fine produzione) la massima estensione della linea d'iso-subsidenza dei 2 cm si verifica in direzione Nord-Ovest ed è pari a 9 km (Figura 9), mentre raggiunge i 14 km circa al termine della simulazione;
- al 2048 il cono di subsidenza si esaurisce a una distanza minima di circa 11 km dalla linea di costa (Figura 10).

In Figura 11 è rappresentata l'evoluzione temporale della subsidenza nel punto di massimo.

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, tale periodicità ha una cadenza triennale come raccomandato nelle *"Linee Guida per lo Studio dei 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 nei seguenti tronchi di livellazione:

- 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.

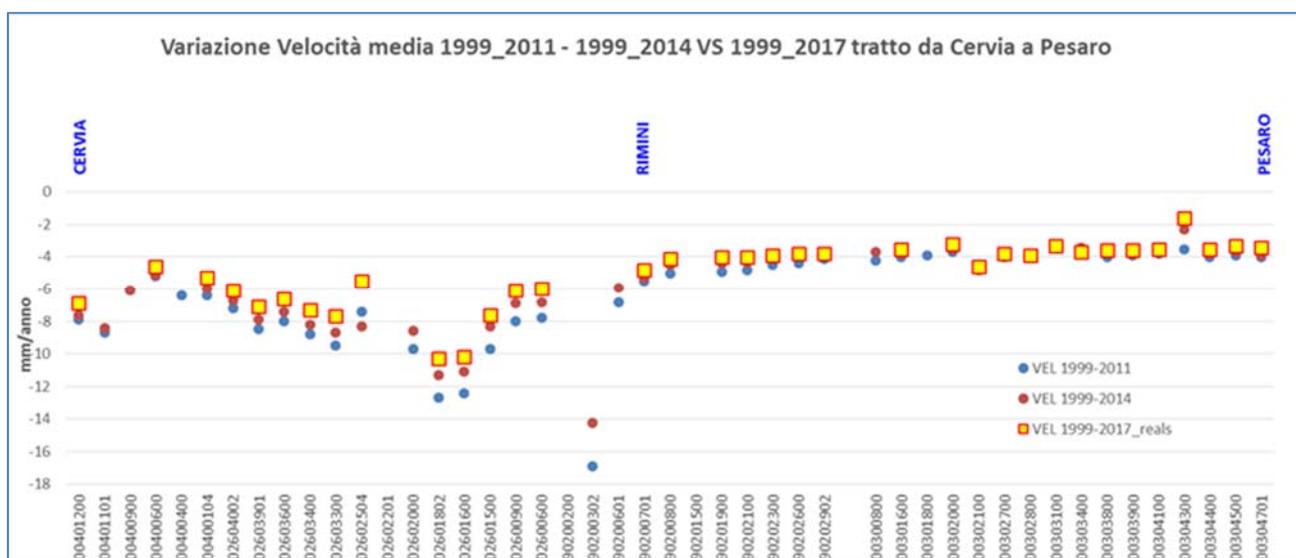
Le operazioni di campagna si sono svolte nel periodo compreso tra agosto e ottobre 2017 sotto la diretta supervisione di tecnici Eni e degli esperti dell'ente certificatore.

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 capisaldi

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 Ortona 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, in seguito 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 supervisori 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 notare, 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, quindi, avere 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).

---

<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, le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.

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, 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 12).

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, però, più operativa dal 19 aprile 2013 per l'alienazione dell'area. Nel novembre 2016, 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 Anemone-B, 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. Si segnala che la serie storica di misure CGPS presenta un'interruzione a fine dicembre 2014 a causa di operazioni di *work-over* in piattaforma. Ciò non ha permesso d'acquisire dati nel 2015 e nella prima parte del 2016.

Per rappresentare in grafici plano-altimetrici la serie storica più completa di misure, ovvero quella estesa al 31/12/2018 (Figura 13), sono stati utilizzati in questa relazione 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
Anemone-B	17.09	20.98	-4.66	17.04	20.78	-4.14	0.05	0.20	-0.52

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 Anemone, 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 -4.76 mm/a (Figura 13, Figura 14), sostanzialmente invariata rispetto a quanto riportato nella precedente relazione d'aggiornamento (4.5 mm/a al 2017).

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 ITRF2008lgb08 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.

---

<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.

I valori di subsidenza stimati con il modello geomeccanico del dicembre 2015 sono stati confrontati con quelli misurati dal CGPS (aggiornati al 31/12/2018), senza che questi ultimi siano stati depurati della componente di subsidenza naturale<sup>2</sup>.

Come si vede dalla Figura 15 sussiste, in generale, un buon accordo fra le due serie di valori anche se nel corso del 2018 si apprezza un leggero scostamento tra CGPS e modello previsionale. Nel corso del 2019 il modello geomeccanico sarà, comunque, nuovamente aggiornato per migliorare il match con il dato CGPS.

Al fine di controllare la compattazione della roccia serbatoio del giacimento si è effettuato, inoltre, il *survey* annuale dei *markers* installati nel pozzo di Anemone 6 Dir mediante log FMST (date dei *survey* precedenti: 11/2007, 09/2008, 1/2009, 11/2010, 12/2011, 10/2012, 8/2013, 11/2014, 10/2015, 12/2016, 12/2017 e 12/2018). Si sottolinea che a causa di motivi operativi/meteo le acquisizioni 2017 e 2018 sono state effettivamente eseguite rispettivamente a gennaio 2018 e gennaio 2019.

Pertanto nelle tabelle allegate l'acquisizione di gennaio 2018 è riferita per competenza al 2017 e gennaio 2019 al 2018 (Figura 16).

L'insieme complessivo delle registrazioni FMST, relative a un tratto di formazione di circa 171 m, hanno dato misure delle variazioni dello spessore totale dei livelli monitorati caratterizzate da valori con andamento altalenante nel tempo.

Nel periodo 2006-2010, infatti, si è registrato (con riferimento all'intero spessore monitorato):

- dal 2006 al 2007: espansione di circa 15 mm;
- dal 2007 al 2008: compattazione di circa 26 mm;
- dal 2008 al 2009: espansione di circa 10 mm;
- dal 2009 al 2010: compattazione di circa 3 mm.

Nel periodo 2010-2018 si è invece registrato:

- dal 2010 al 2011: espansione di circa 22 mm;
- dal 2011 al 2012: compattazione di circa 15 mm;
- dal 2012 al 2013: compattazione di circa 21 mm;
- dal 2013 al 2014: espansione di circa 11 mm;
- dal 2014 al 2015: compattazione di circa 19 mm;
- dal 2015 al 2016: espansione di circa 14 mm.

- dal 2016 al 2017: compattazione di circa 50 mm
- dal 2017 al 2018: espansione di circa 48 mm

Nella seconda serie di *survey* non si è considerato l'intervallo 2772-2783 m, poiché nel rilievo del 2013 il *marker* a quota 2772 m non è stato rilevato dallo strumento mentre la misura a 2780 m non viene ritenuta affidabile. Lo spessore totale monitorato si è ridotto, quindi, a 161 m. In conclusione, relativamente alle misure di compattazione acquisite con i *survey* annuali FMST si ha:

- per il periodo 2006-2010 e con riferimento all'intero spessore di formazione monitorato (171 m), una compattazione di circa 4 mm;
- per il periodo 2010-2018 e per uno spessore di 161 m, calcolato senza considerare l'intervallo 2772-2783 m, una compattazione di circa 11 mm.

Relativamente alle stime di compattazione da modello geomeccanico, queste sono risultate:

- nel periodo 2006-2010 e con riferimento all'intero spessore monitorato (171 m), una compattazione di circa 10 mm;
- nel periodo 2010-2018, senza considerare l'intervallo 2772-2783 m, una compattazione di circa 2 mm.

Tenuto conto dell'elevato spessore di formazione monitorato e dell'alto numero di livelli produttivi in esso compresi, si può ritenere che la misura in situ della compattazione profonda relativa al periodo 2006-2018 e il corrispondente valore calcolato con modello geomeccanico rientri nel limite di tolleranza degli errori sperimentali.

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

Si segnala infine che:

- a) in Figura 17 è presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 18 è presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.

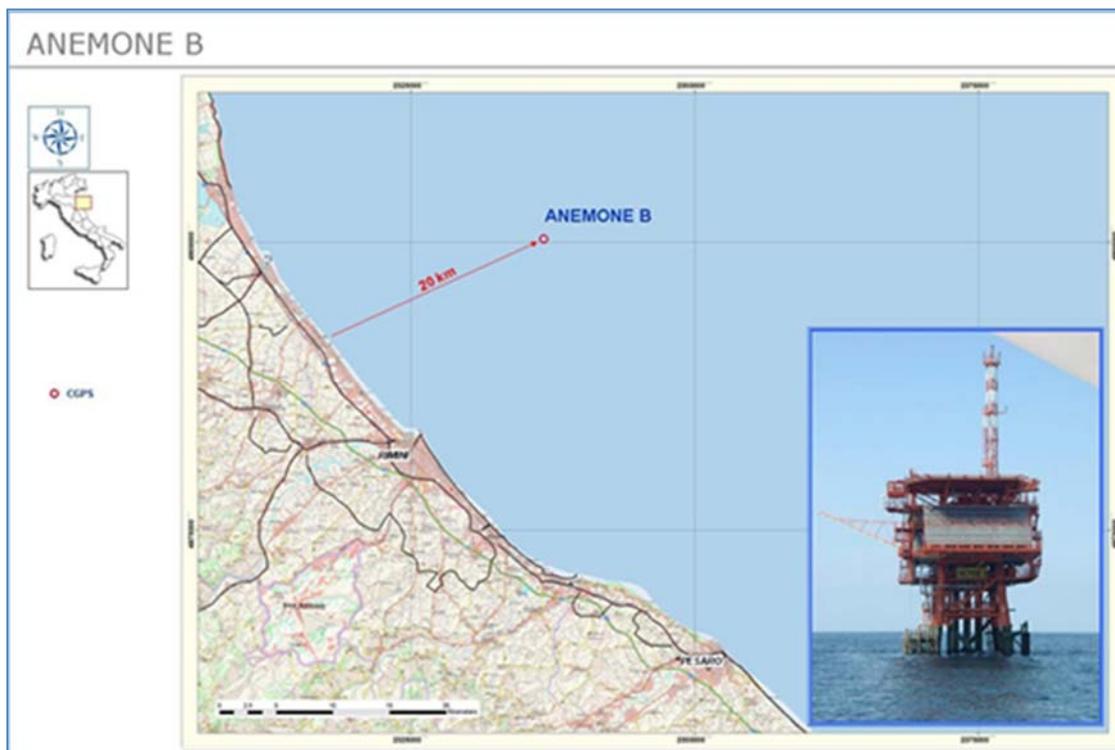


Figura 1 - Ubicazione del campo di Anemone

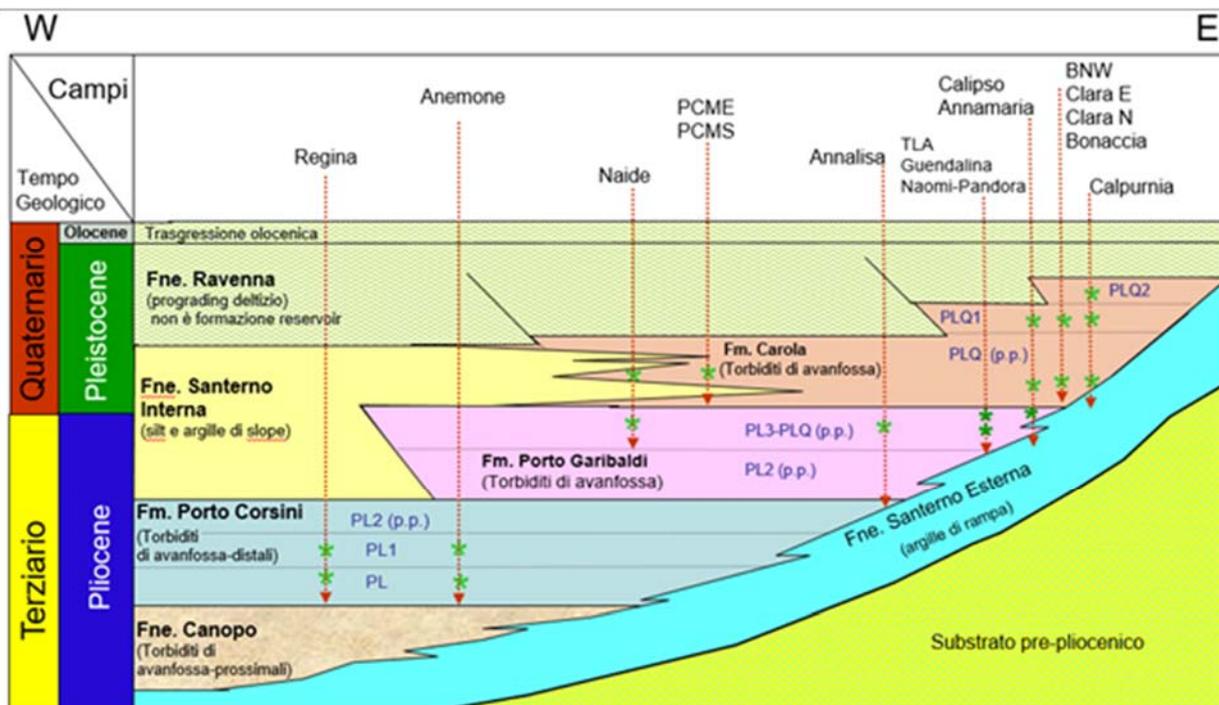


Figura 2 - Bacino Adriatico settentrionale: esempio di schema dei rapporti stratigrafici e dei principali reservoir (\*) sviluppati dai campi

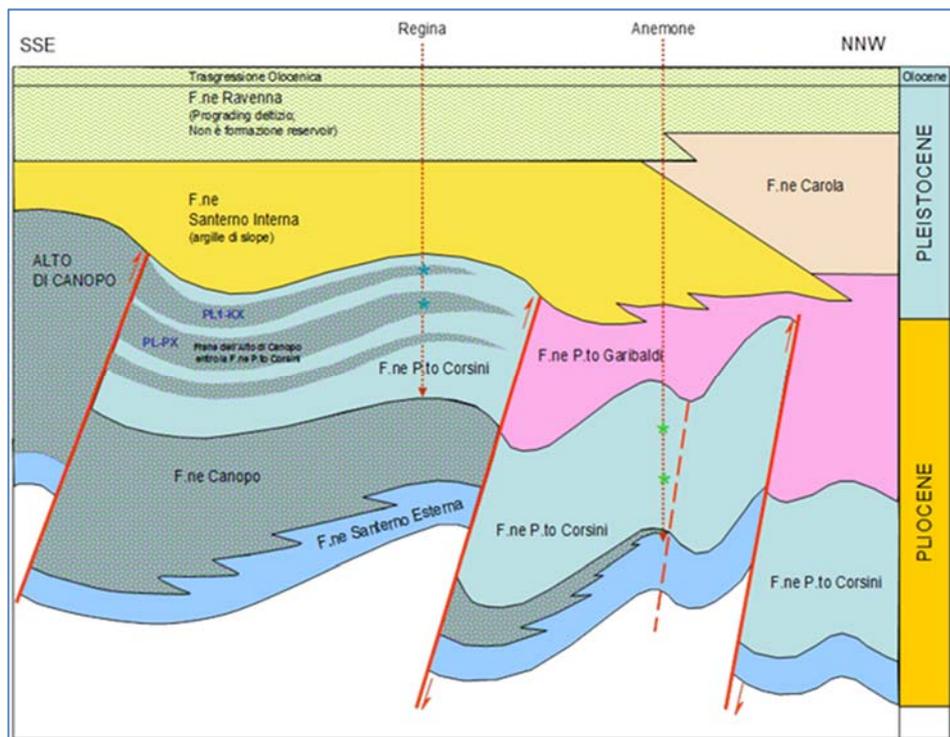


Figura 3 - Schema dei rapporti stratigrafico-strutturali dei campi di Anemone e Regina

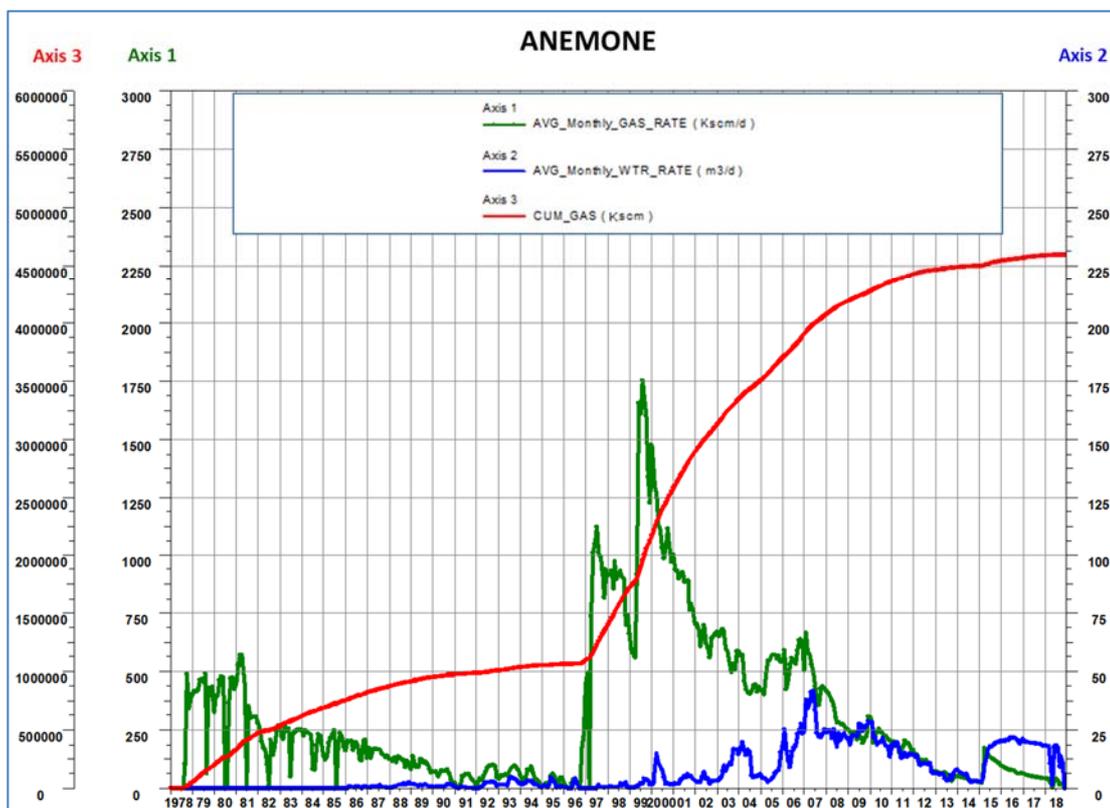


Figura 4 - Campo di Anemone: produzione storica



CAMPO DI ANEMONE					
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	
1978	41	41	41	41	1%
1979	148	148	189	189	4%
1980	130	130	318	318	7%
1981	142	142	460	460	10%
1982	68	68	528	528	12%
1983	83	83	611	611	13%
1984	74	74	685	685	15%
1985	64	64	749	749	16%
1986	66	66	814	814	18%
1987	56	56	870	870	19%
1988	43	43	913	913	20%
1989	37	37	950	950	21%
1990	23	23	974	974	21%
1991	13	13	987	987	22%
1992	23	23	1010	1010	22%
1993	25	25	1035	1035	23%
1994	19	19	1054	1054	23%
1995	12	12	1066	1066	23%
1996	17	17	1083	1083	24%
1997	291	291	1374	1374	30%
1998	322	322	1696	1696	37%
1999	432	432	2128	2128	46%
2000	421	421	2550	2550	56%
2001	322	322	2871	2871	63%
2002	238	238	3109	3109	68%
2003	219	219	3327	3327	73%
2004	170	170	3497	3497	76%
2005	189	189	3686	3686	80%
2006	203	203	3889	3889	85%
2007	176	176	4065	4065	89%
2008	118	118	4183	4183	91%
2009	85	85	4268	4268	93%
2010	86	86	4355	4355	95%
2011	67	67	4422	4422	97%
2012	43	43	4464	4464	97%
2013	21	21	4485	4485	98%
2014	14	14	4499	4499	98%
2015	40	38	4539	4537	99%
2016	29	28	4568	4565	100%
2017	19	13	4587	4578	100%
2018	9	4	4596	4582	100%
2019					
2020					

Figura 5 - Campo di Anemone: produzione reale e da modello Eclipse 2015

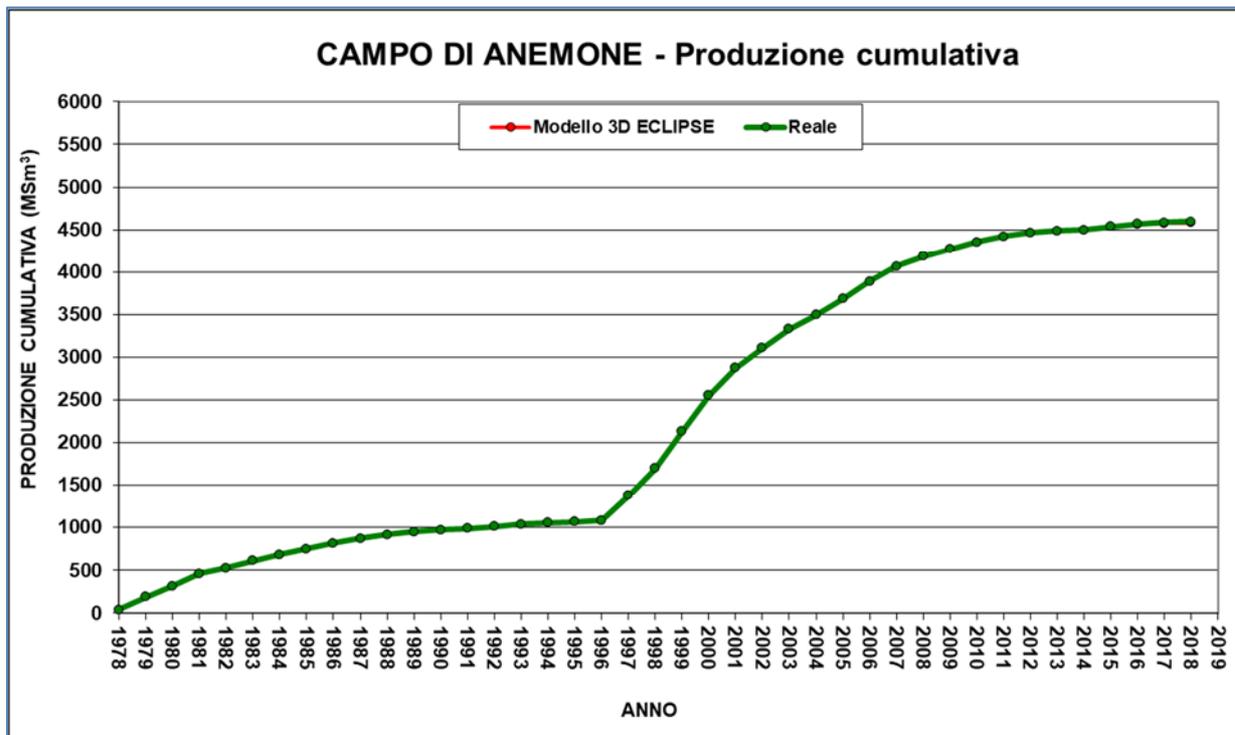


Figura 6 - Campo di Anemone: grafico di produzione reale e da modello Eclipse 2015

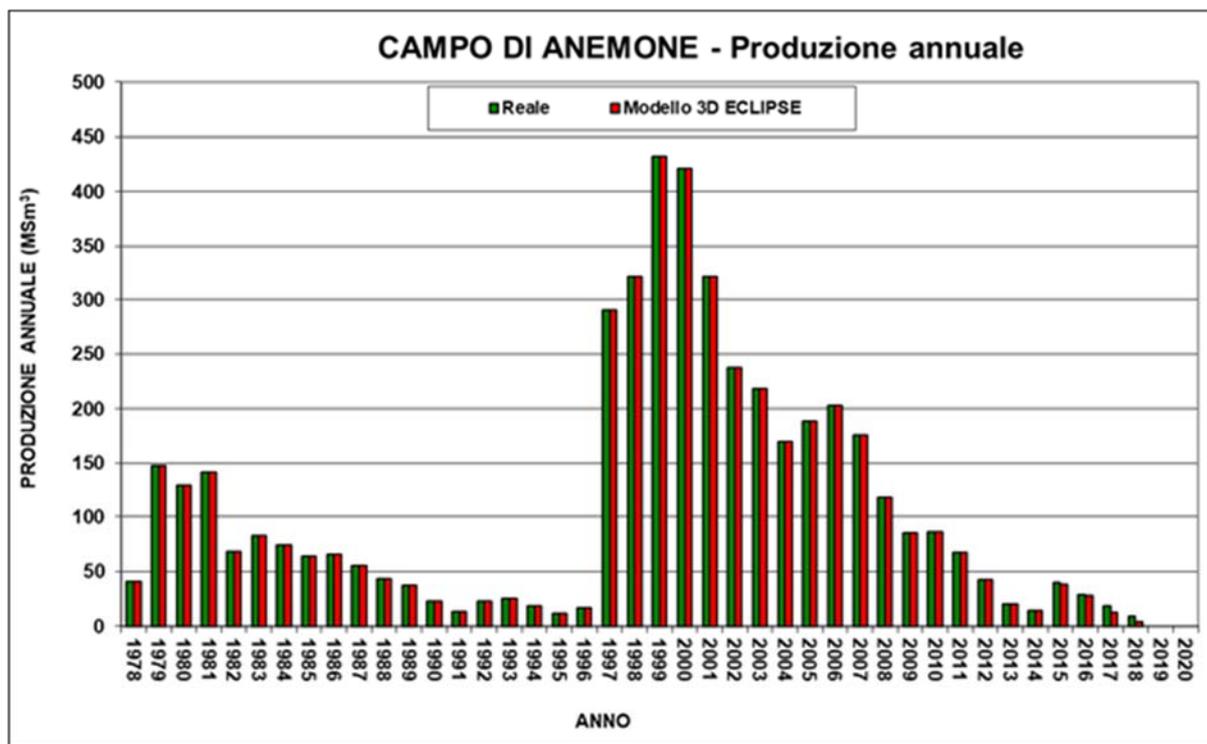


Figura 7 - Campo di Anemone: produzione (annuale) reale e da modello Eclipse 2015

CAMPO DI ANEMONE			
Data	Livelli PL1-KK1		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
01/10/1977	269		2 C
01/10/1996	237	3 Dir A	
01/07/2004	161		9 C
01/06/2006	154	12 Dir A	
01/09/2008	106	12 Dir A	
01/10/2009	193		10 C
16/11/2010	202		10 C
25/09/2012	206		10 C
01/09/2013	207		10 C
01/10/2014	208		10 C
01/01/2015	143	12 Dir B	
12/12/2016	86		12 C
30/12/2017	84		12 C
29/12/2018	101		12 C

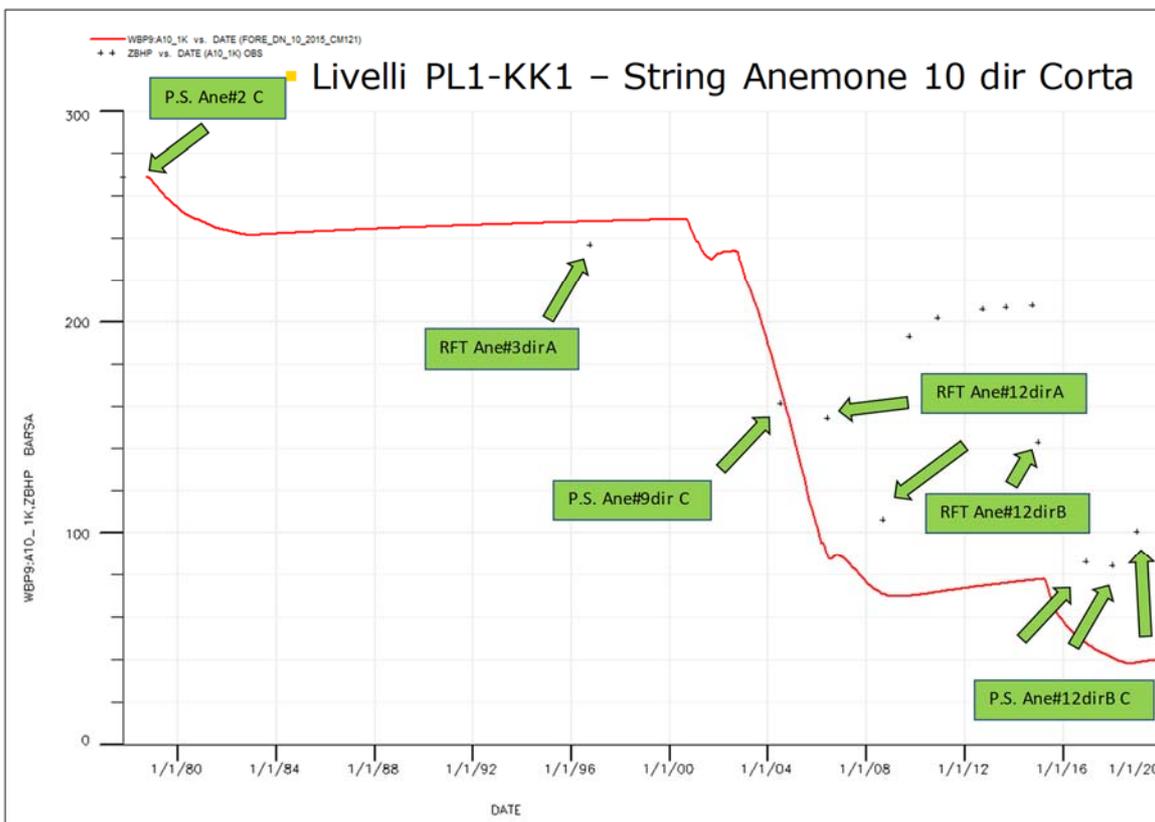


Figura 8 - Campo di Anemone: pressioni statiche misurate e modello Eclipse 2015 (livello PL1-KK1)

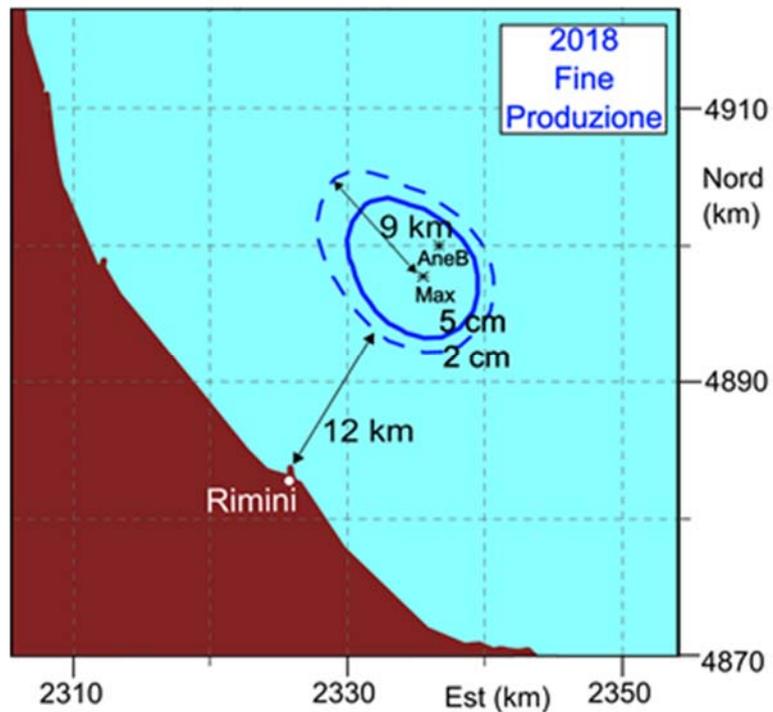


Figura 9 - Campo di Anemone: curve d'iso-subsidenza a fine produzione (2018)

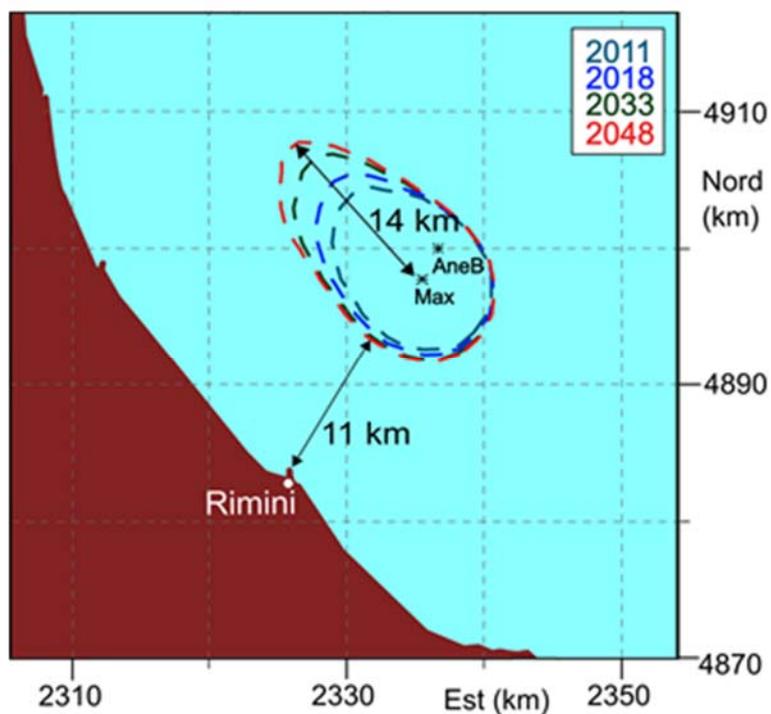


Figura 10 - Campo di Anemone: evoluzione nel tempo dell'estensione della linea dei 2cm

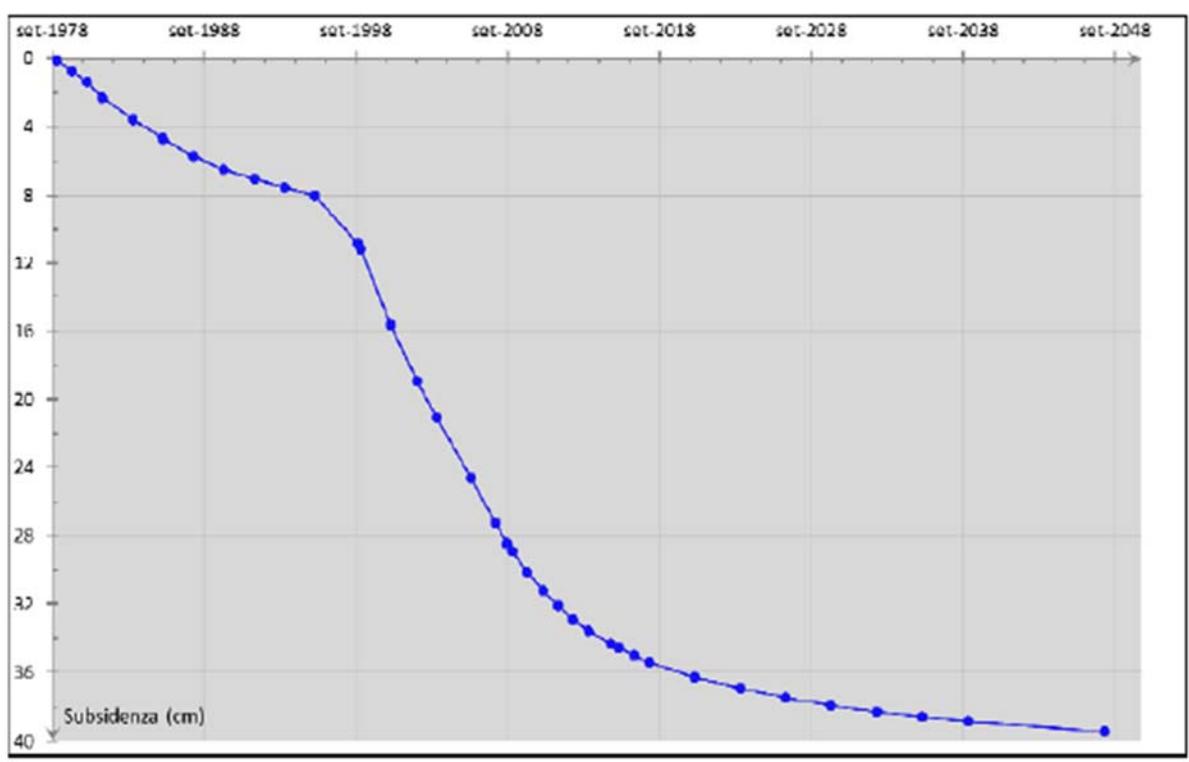


Figura 11 - Campo di Anemone: evoluzione nel tempo del valore di subsidenza nel punto di massimo

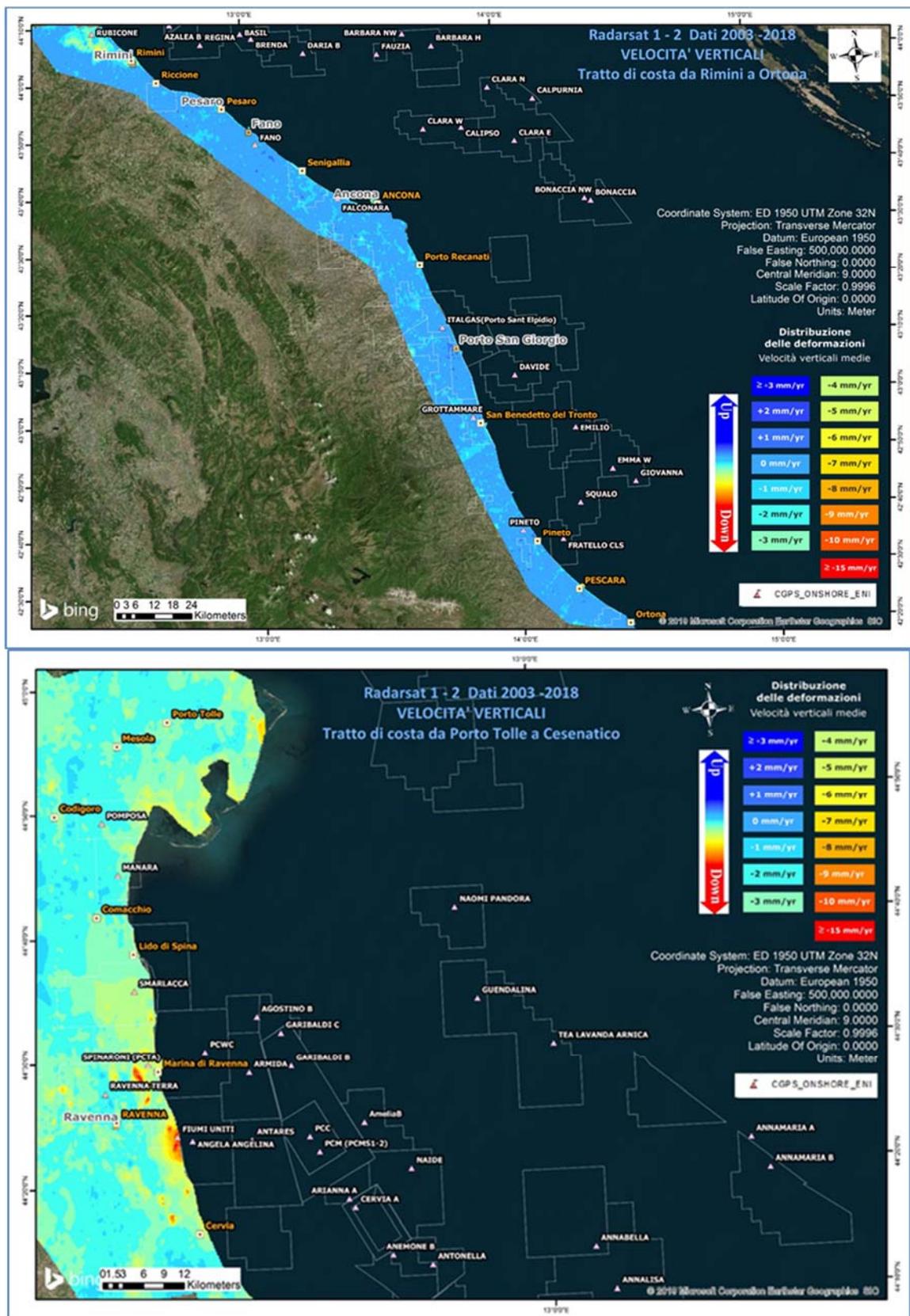
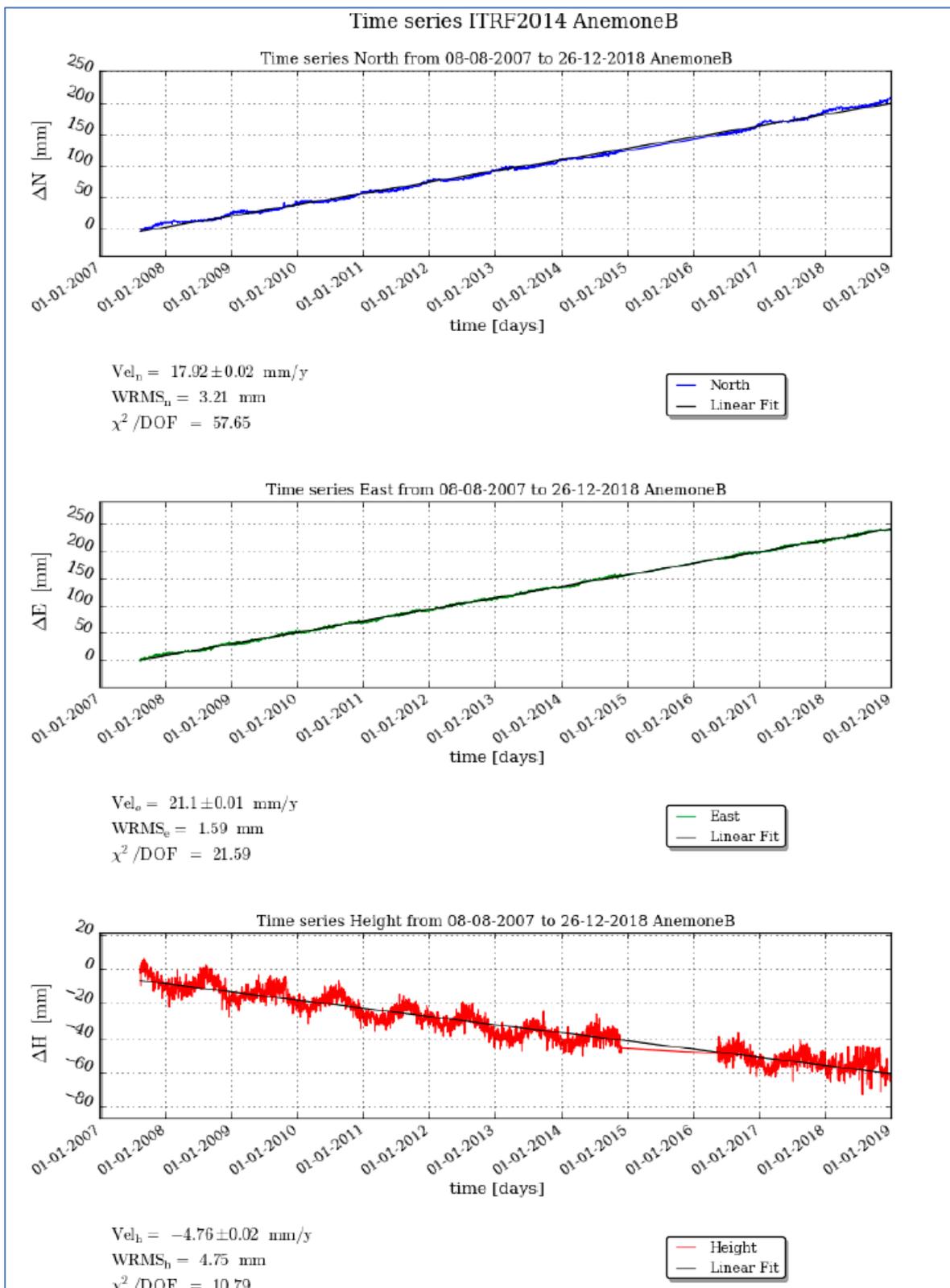


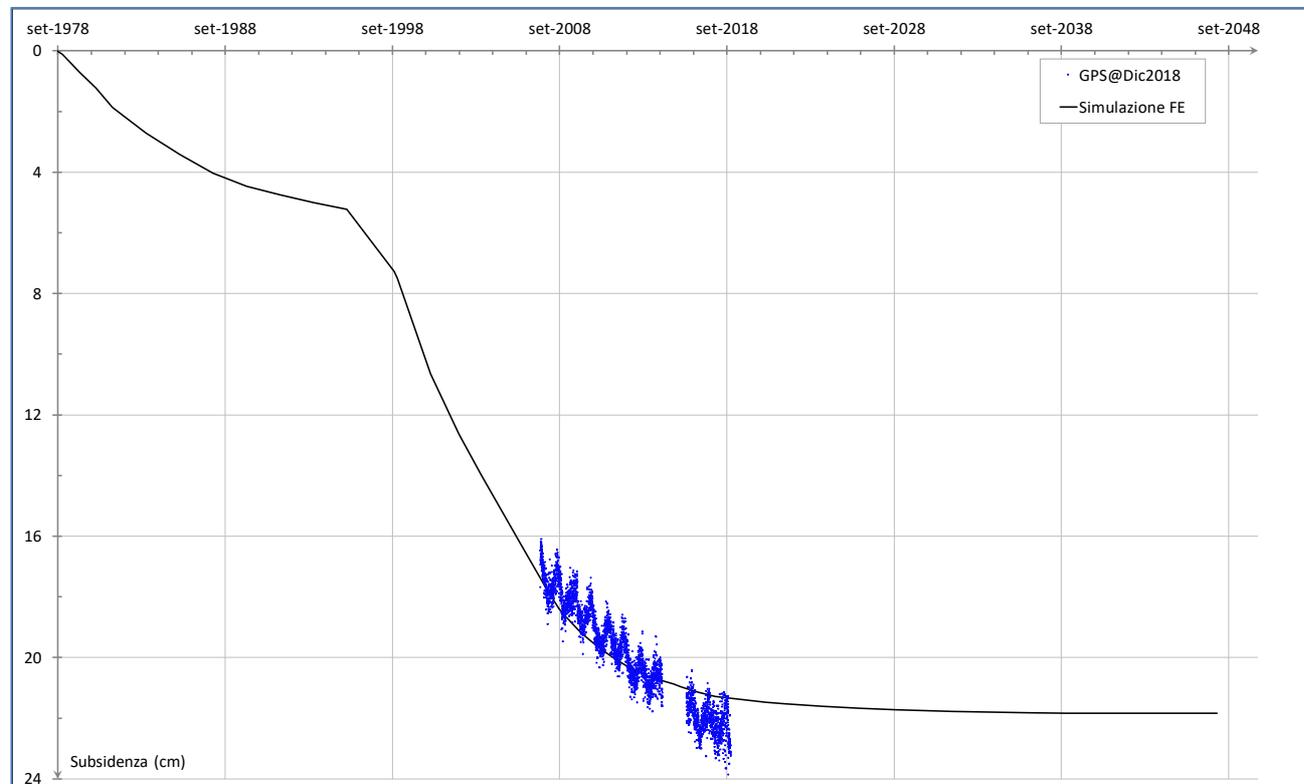
Figura 12 - Campo di Anemone: analisi dei dati SAR dal 2003 al 2018



**Figura 13 - Campo di Anemone: 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
ANNALISA	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 14 - Velocità medie di "subsidenza totale" calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli**



**Figura 15 - Campo di Anemone: misure CGPS (agg.@ dic. 2018) vs. previsioni di subsidenza da modello (in p.ma)**

Compattazione Anemone															
spacing	ref depth	Sept 2002	Apr 2006	Nov 2007	Sept 2008	Nov 2009	Nov 2010	Dec 2011	Oct 2012	Aug 2013	Nov 2014	Oct 2015	Dec 2016	Survey 2017	Survey 2018
#	MD	Oct 1998	Sept 2002	Apr 2006	Nov 2007	Sept 2008	Nov 2009	Nov 2010	Dec 2011	Oct 2012	Aug 2013	Nov 2014	Oct 2015	Dec 2016	Survey 2017
#	(m)	(mm)													
16	2473	-2	3	0	-3	2	1	2	-4	-2	2	-2	3	-5	3
15	2484	-6	3	1	-1	2	2	-3	0	1	2	-3	2	-4	4
14	2495	-6	2	2	0	2	1	-1	-1	-1	1	-1	2	-4	5
13	2505.5	-3	0	4	-5	2	0	0	0	2	-1	0	0	-3	2
12	2516	-11	7	-3	-3	2	2	-1	1	-1	0	0	-3	-1	4
11	2527	-2	-1	1	3	-3	1	0	-2	-5	2	-1	0	-3	5
10	2559	-8	0	2	-1	-1	1	1	0	0	0	-1	2	-3	2
9	2569.5	-10	3	1	-1	1	-1	3	-2	-1	1	-1	3	-4	5
8	2634	-7	-3	-3	-5	2	0	0	-1	-1	-1	-2	-1	-4	2
7	2644	-5	-8	-4	-1	-2	-1	3	-1	-1	1	-3	0	-3	0
6	2655	-4	-6	-2	-2	2	-3	4	-4	-3	2	-2	0	-5	4
5	2761.5	-175	3	-1	3	0	0	3	1	-4	2	-2	4	-4	3
4	2772	161	8	4	0	0	0	0							
3	2783	-5	2	3	-4	2	1	3	-4	-1	2	0	-1	-2	3
2	2793.5	-3	-4	5	-4	1	-5	5	1	-1	-3	2	2	-2	2
1	2943	-6	-3	6	-1	-1	-2	3	0	-3	2	-3	1	-3	3
TOTALE	#	-93	4	15	-26	10	-3	22	-15	-21	11	-19	14	-50	48

**Figura 16 - Pozzo Anemone 6 Dir: misure di compattazione in-situ (da FSMT)**

campo ANEMONE II <sup>a</sup> FASE - piattaforma Anemone B - (J.V. Eni 81% operatore - Edison Gas 19%)			
DATI DI CAMPO		DECRETO VIA n. 2979 del 3 MARZO 1998	
UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE	offshore - 20 km a NE di Rimini 23 m	AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (ANEMONE campo)	
LITOLOGIA	sabbie fini	STUDIO DI GIACIMENTO	SIA
FORMAZIONE RESERVOIR	Porto Corsini	MOD. STATICO E DINAMICO MONOCELLA "GIU 95"	Agg. studio di giacimento - Scheda riassuntiva, Rel. GISE-18/15 (dic 2015)
ZONA MINERARIA	PL1 - PL	RISERVE (MSm <sup>3</sup> )	4582
PROFONDITA' RESERVOIR	2100 - 3570 (TVDSS)	MOD. GEOMECCANICO	NON RICHIESTO
TIPO DI PIATTAFORMA (A/B)	BEAF	MAX SUBS AL CENTRO (cm)	#
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	campo compartimentato da faglie	MAX DIST. DAL CULMINE (km)	#
	D.M @ mar.'98 @ 31 dic. 2018	STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI	
CONCESSIONE	A.C8.ME	LIVELLAZIONI	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. I DATI FINO AL 2017 SONO STATI CERTIFICATI DALL'UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM IL PROSSIMO RILIEVO 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
DATA SCADENZA CONCESSIONE	05/11/2015	MARKERS	MARKERS SU ANEMONE 6D: ULTIMO SURVEY @ gen. 2019 Survey eseguiti: ott 1998 (rilievo base), sett. 2002, apr. 2006, nov. 2007, sett. 2008, ott. 2009, nov. 2010, dic. 2011, ott. 2012, ago 2013, nov. 2014, ott. 2015, dic. 2016 e gen. 2018
N. POZZI	6	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
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm <sup>3</sup> )	6077	SAR	ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ ottobre 2018 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLA P.MA ANEMONE B NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO
START UP PRODUZIONE	mag '99 (AM-B)		
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2023		
GAS PRODOTTO (MSm <sup>3</sup> )	4596		
% RISERVE PRODOTTE	100%		

**Figura 17 - Campo di Anemone: scheda di sintesi dati campo**

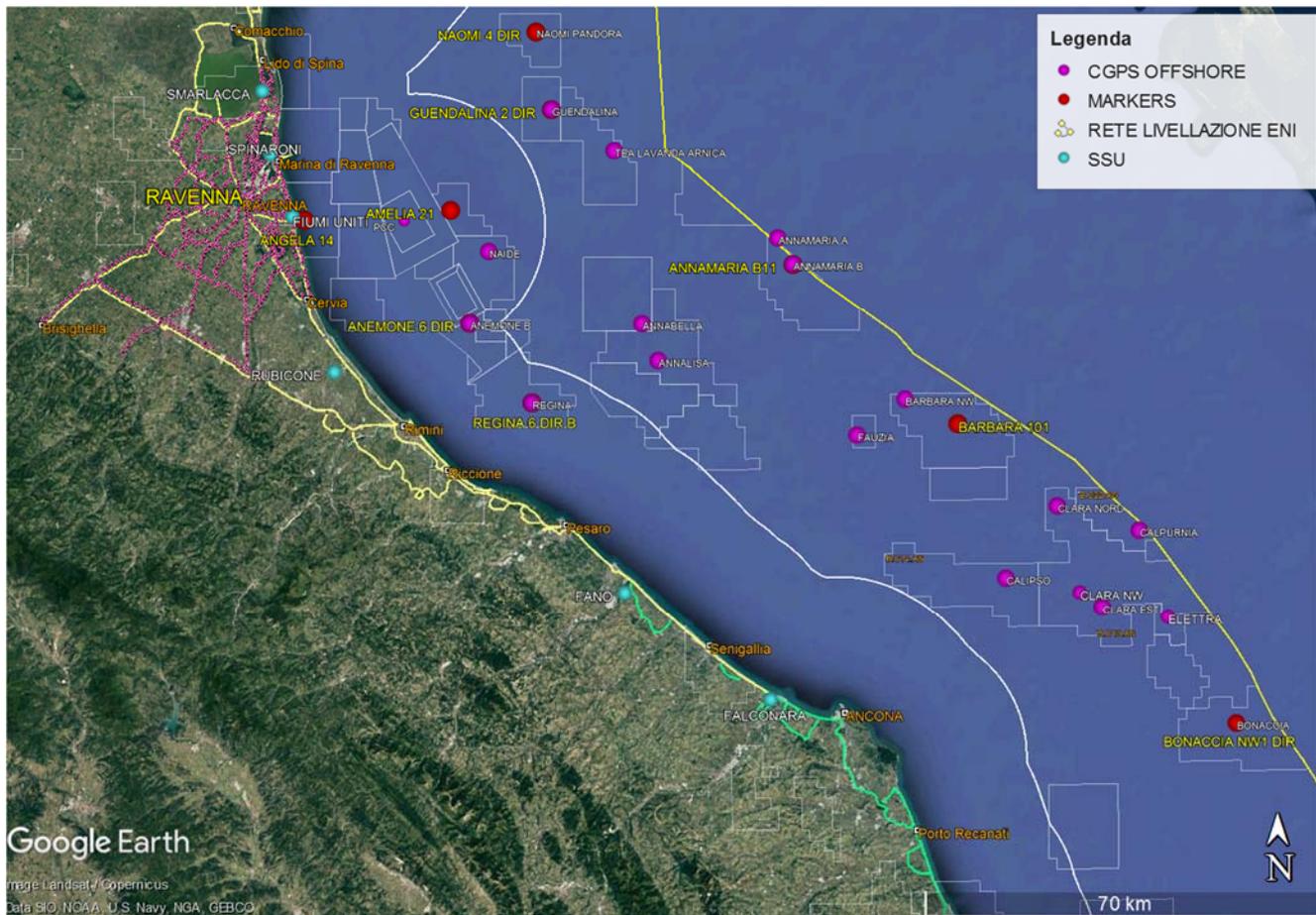


Figura 18 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

## 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 accoppiare 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

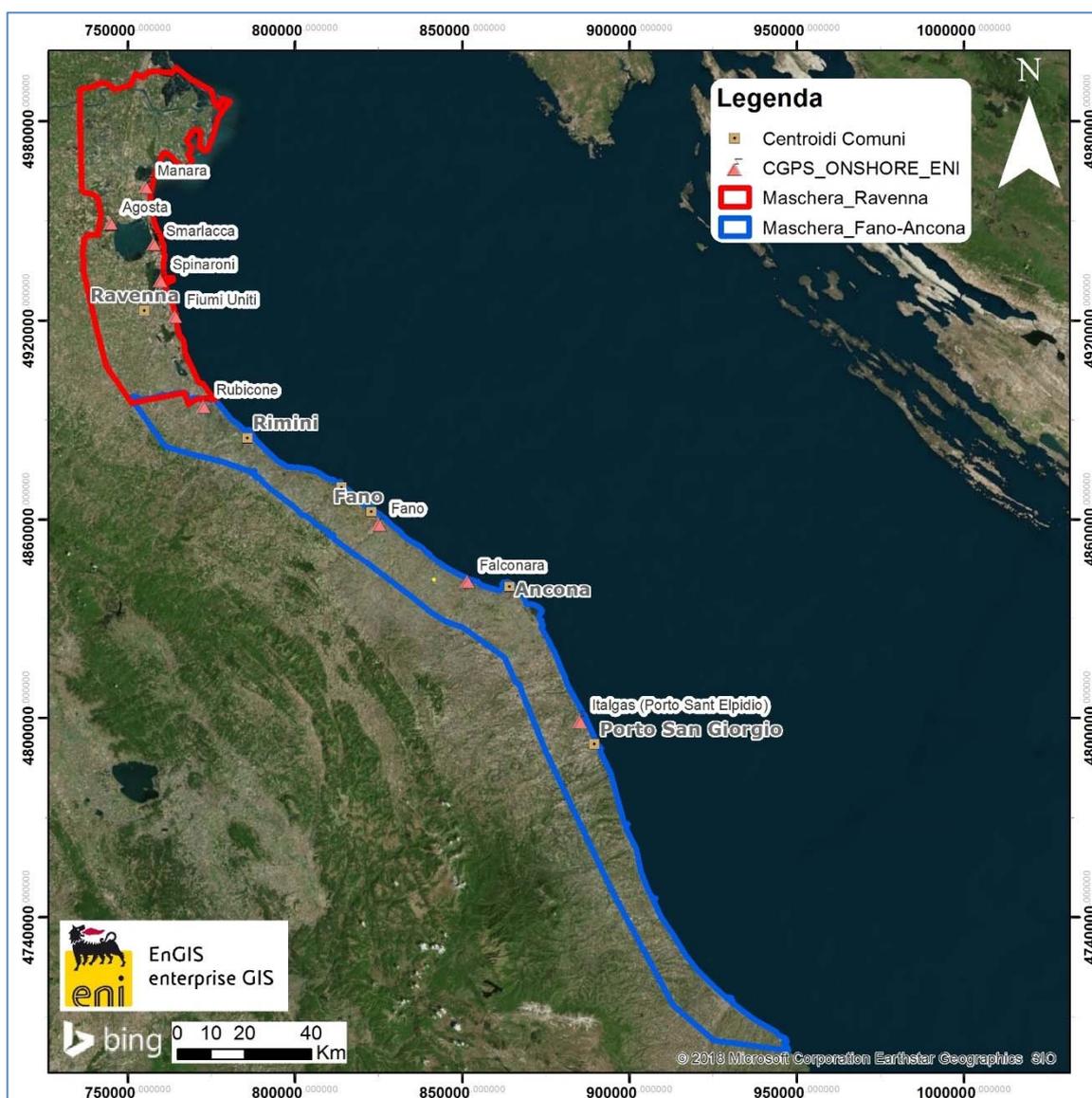


Fig. 1 – Mappa mosaicatura dati InSAR

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

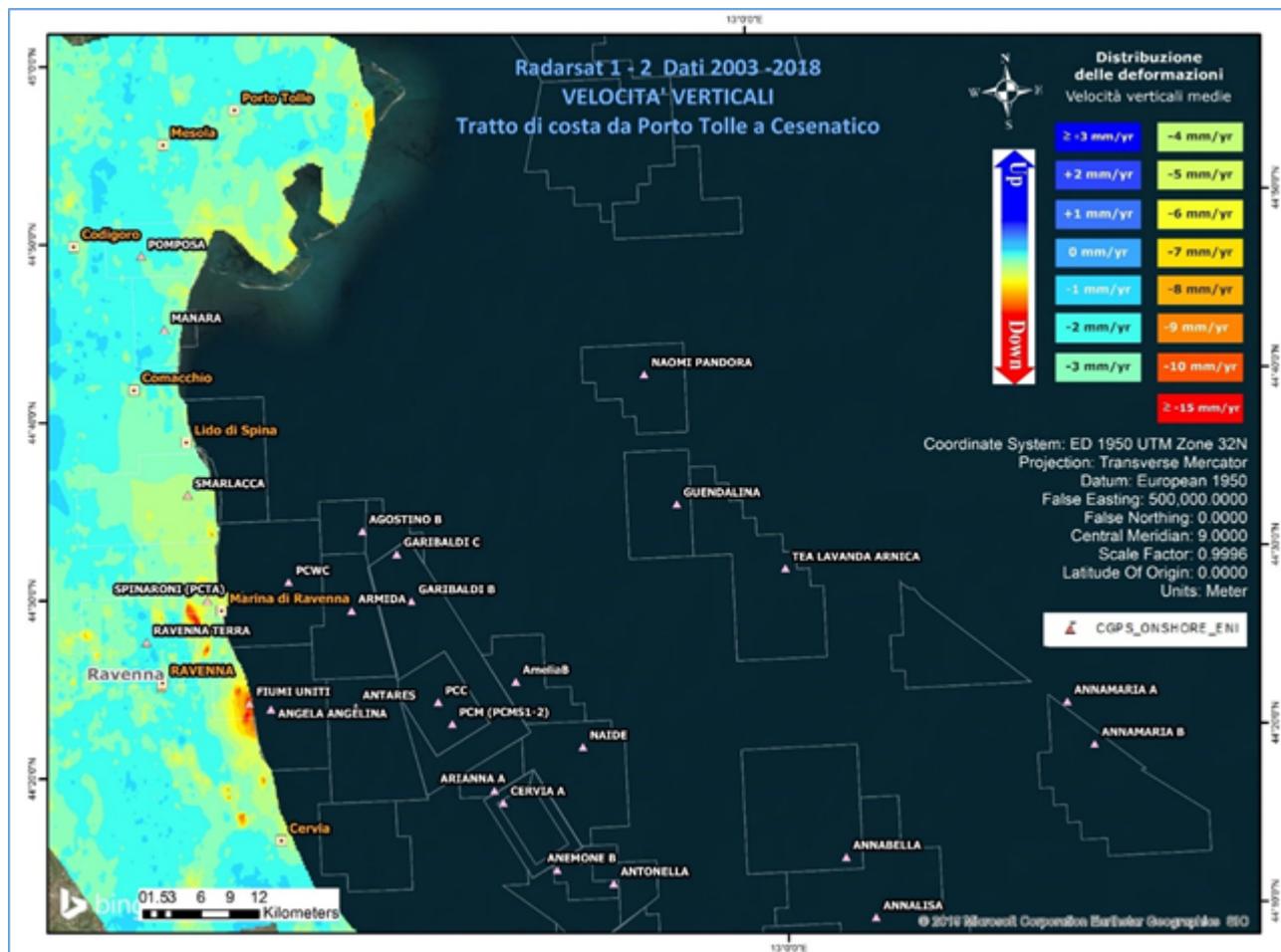
1. Area Ravenna: Manara, Smarlacca, Spinaroni, Fiumi Uniti
2. Area Fano-Ancona: Rubicone, Fano, Falconara, Italgas

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®.

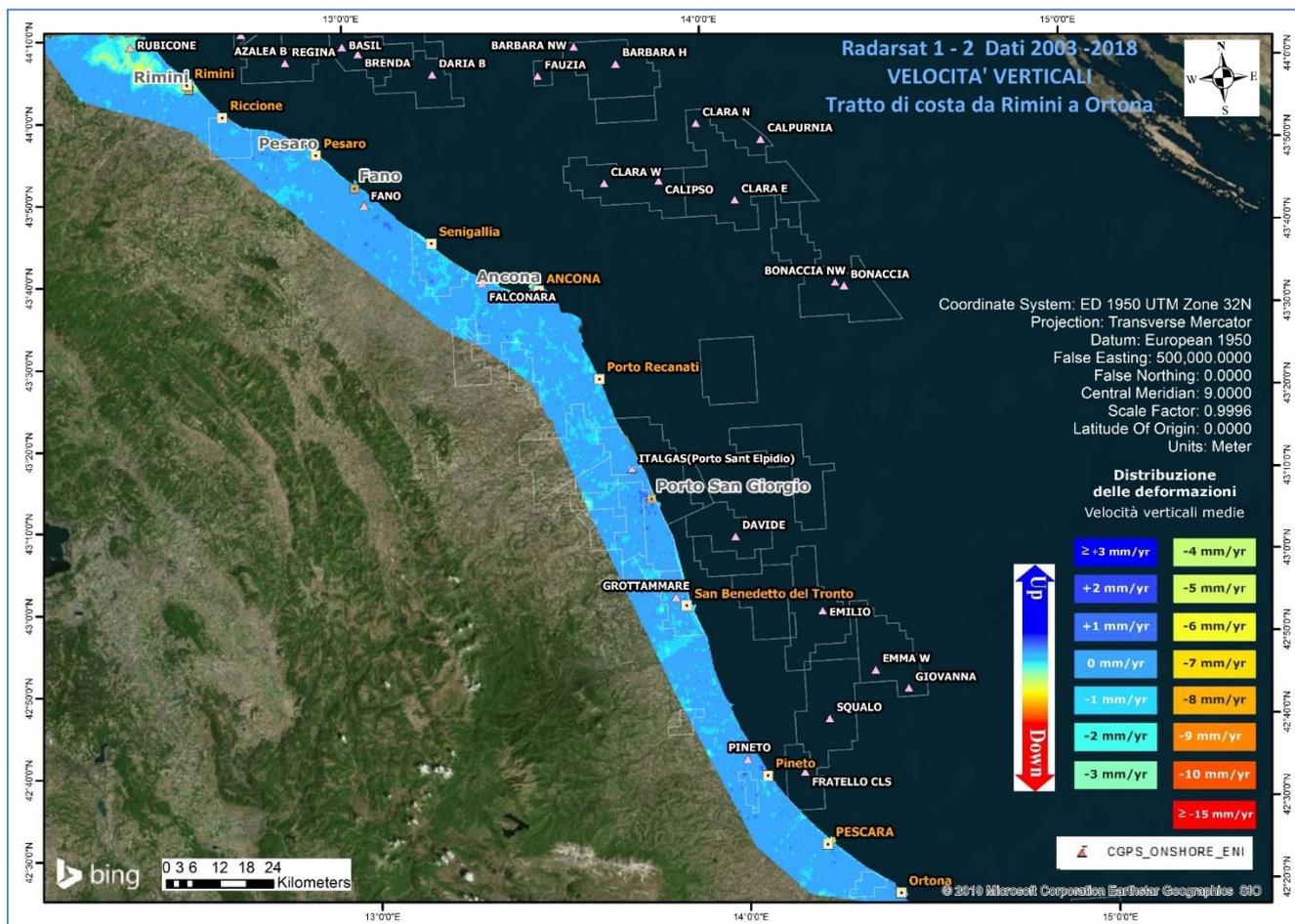


Fig. 3 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini ad Ortona.

### 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.

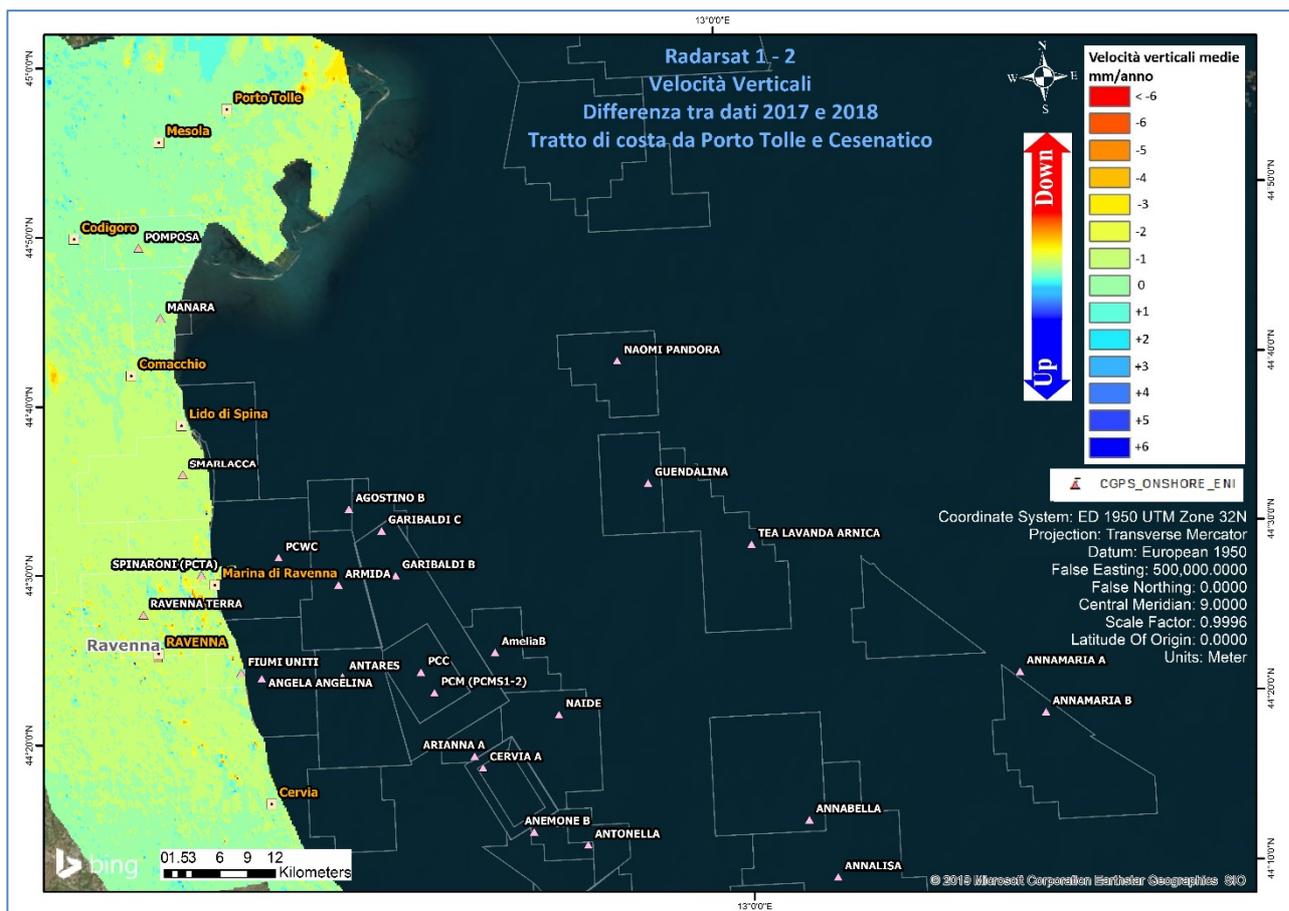
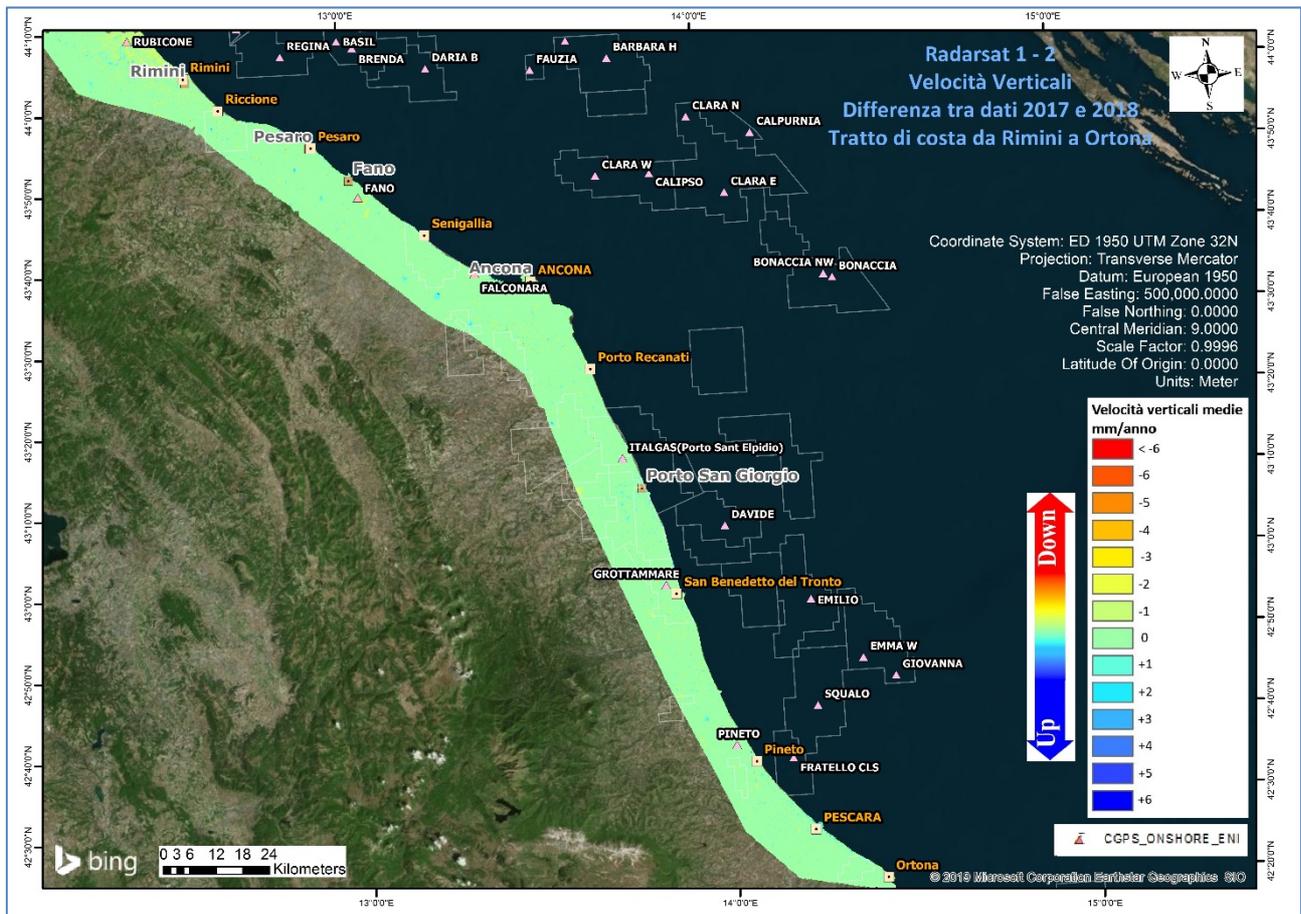


Fig. 4 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.



**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 sensore-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.

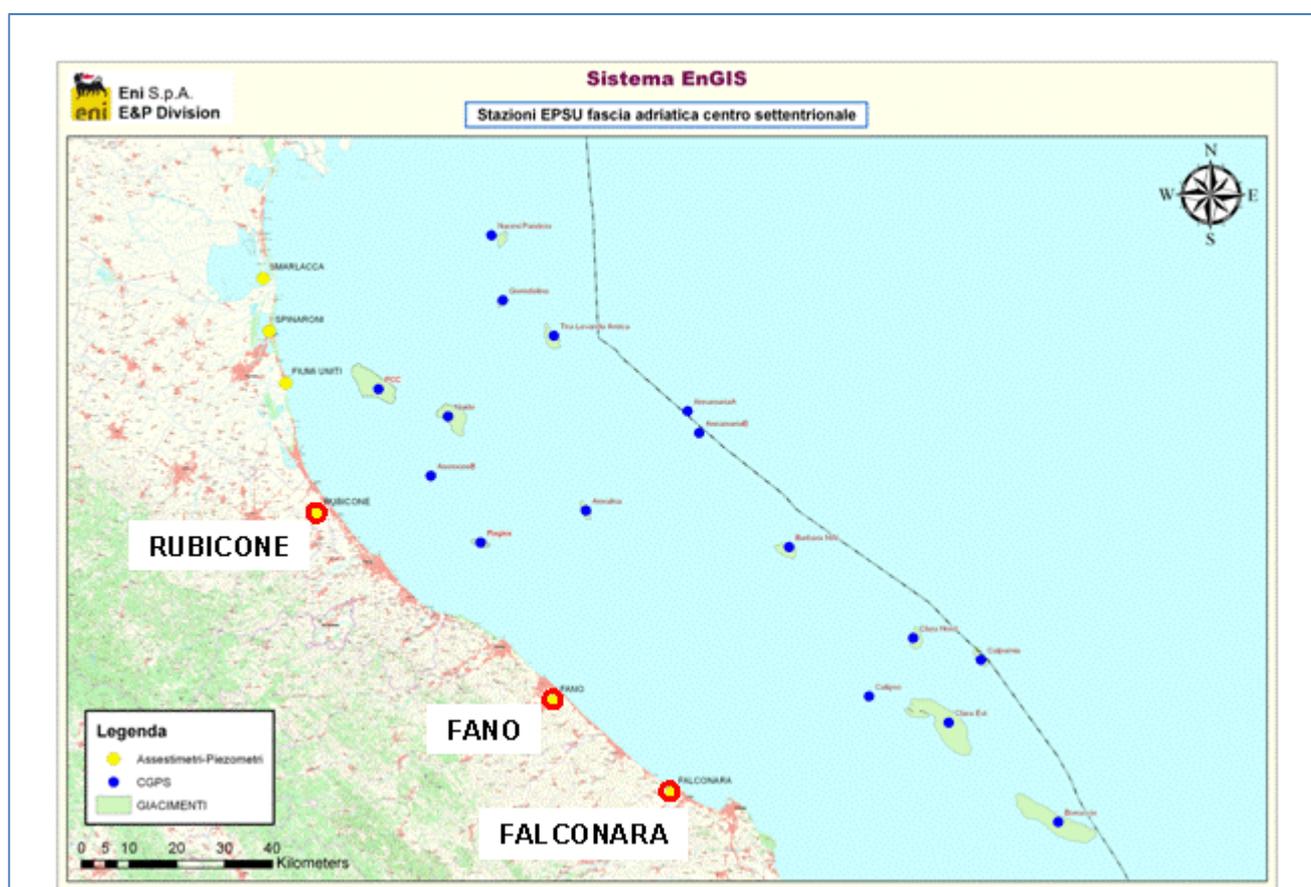


Figura 1B - Ubicazione delle stazioni *EPSU*

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 assestimetriche per le variazioni della temperatura e pressione atmosferica) come schematicamente rappresentato in Figura 2B.

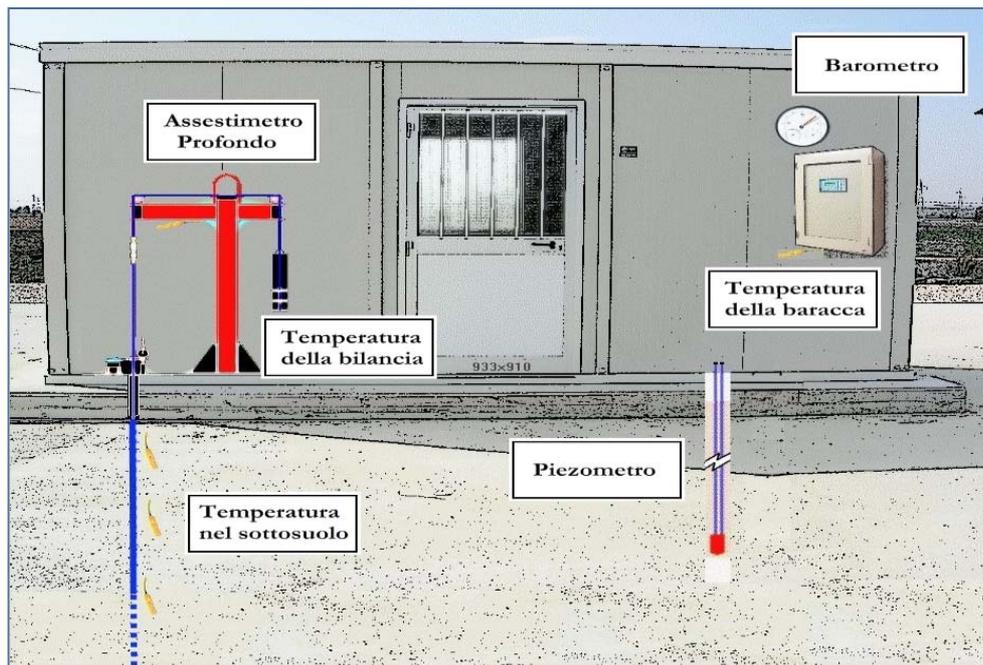


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

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 freatimetro. 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.

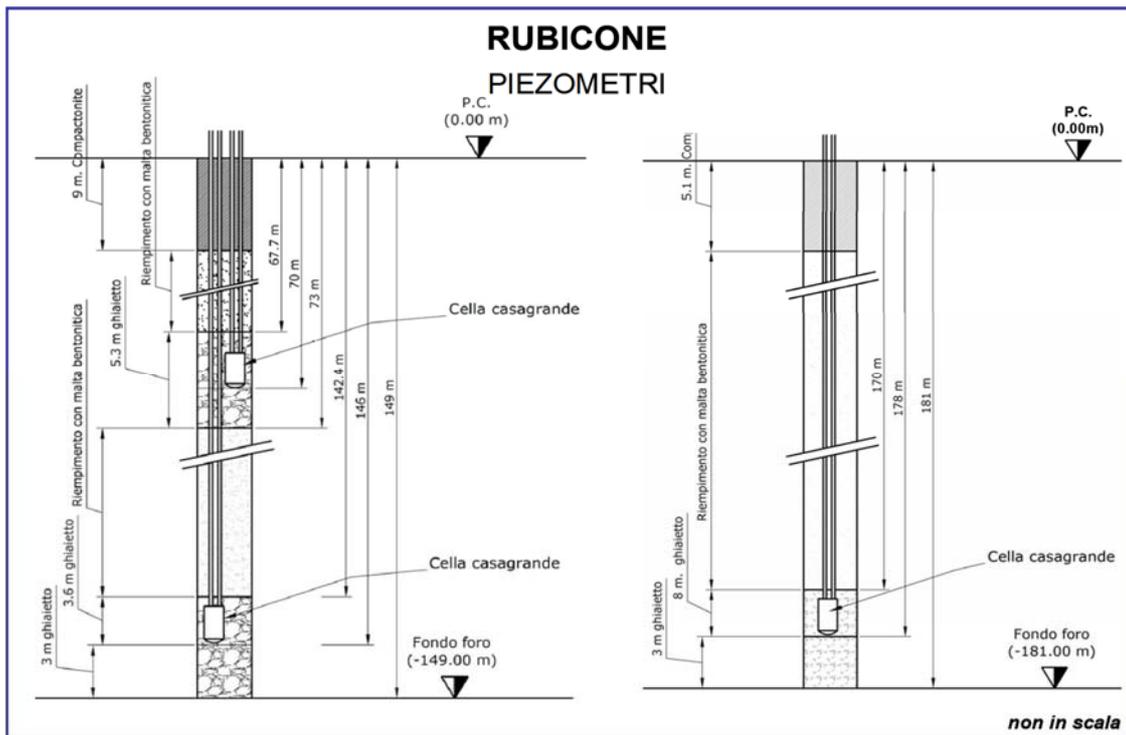


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Rubicone

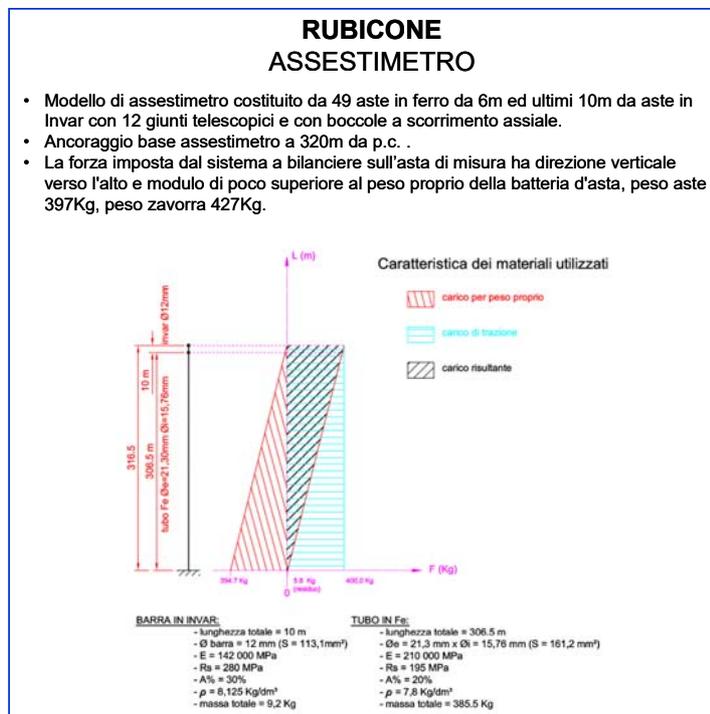


Figura 4B - Particolare di un assestimetro

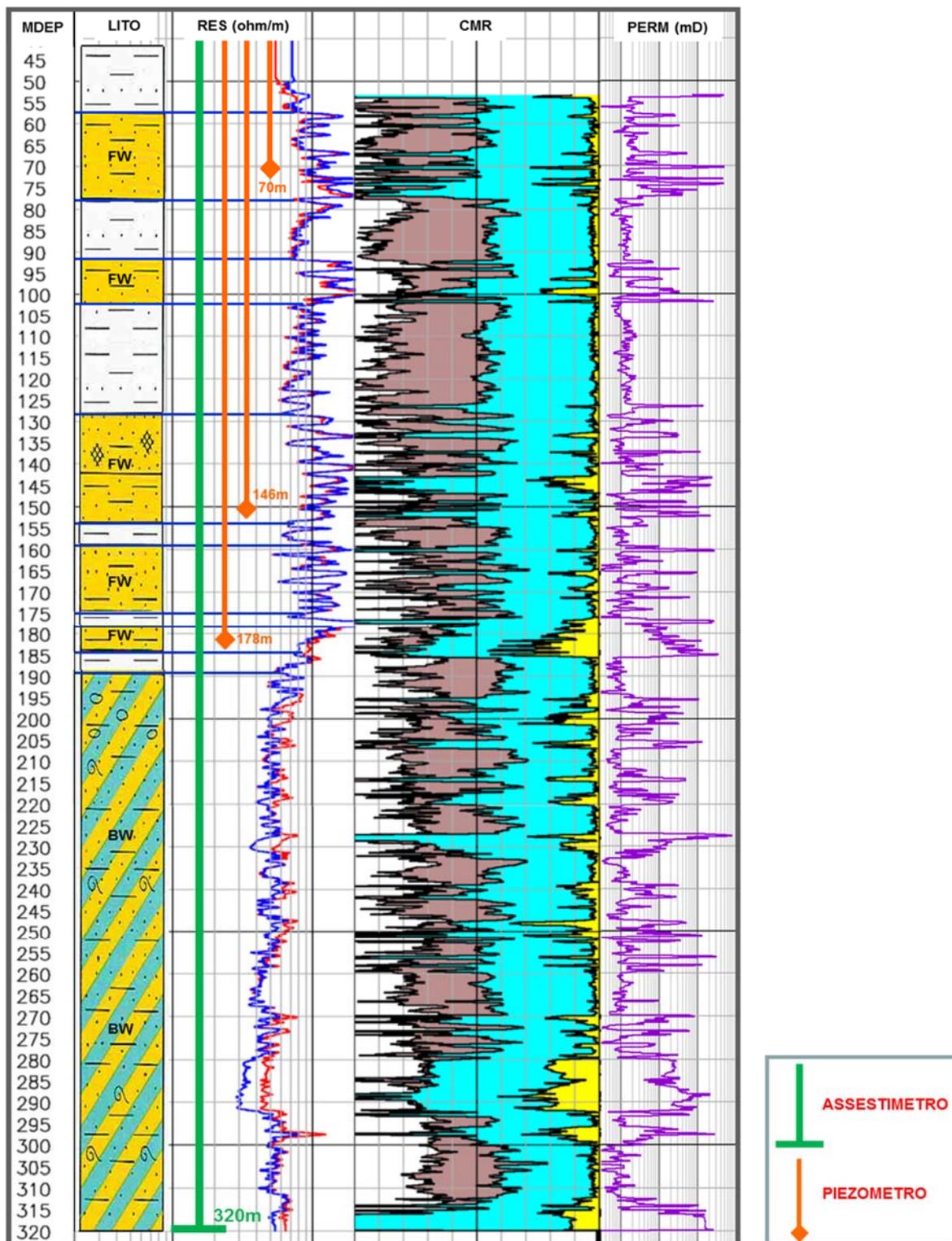


Figura 5B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Rubicone

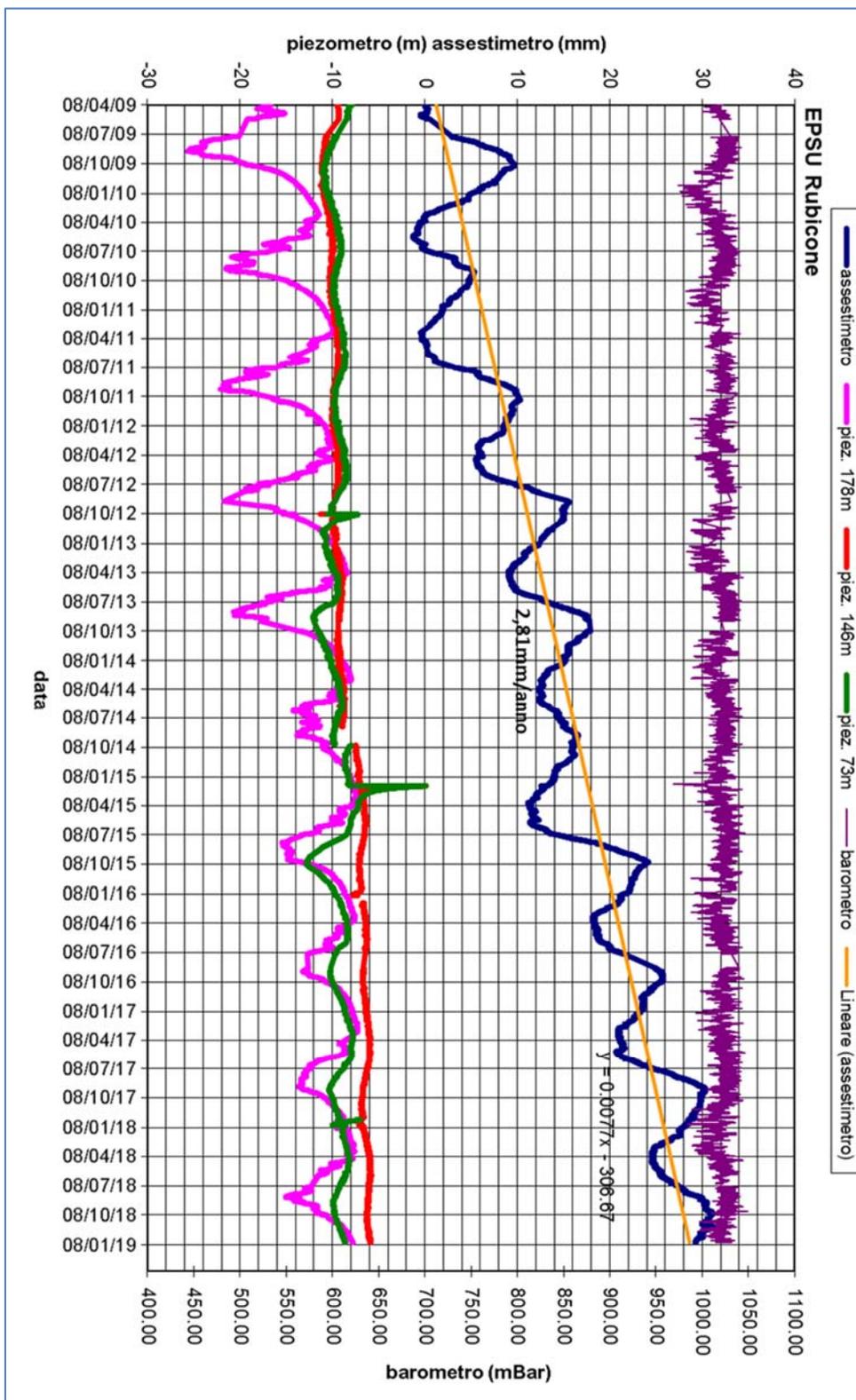


Figura 6B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestimetriche

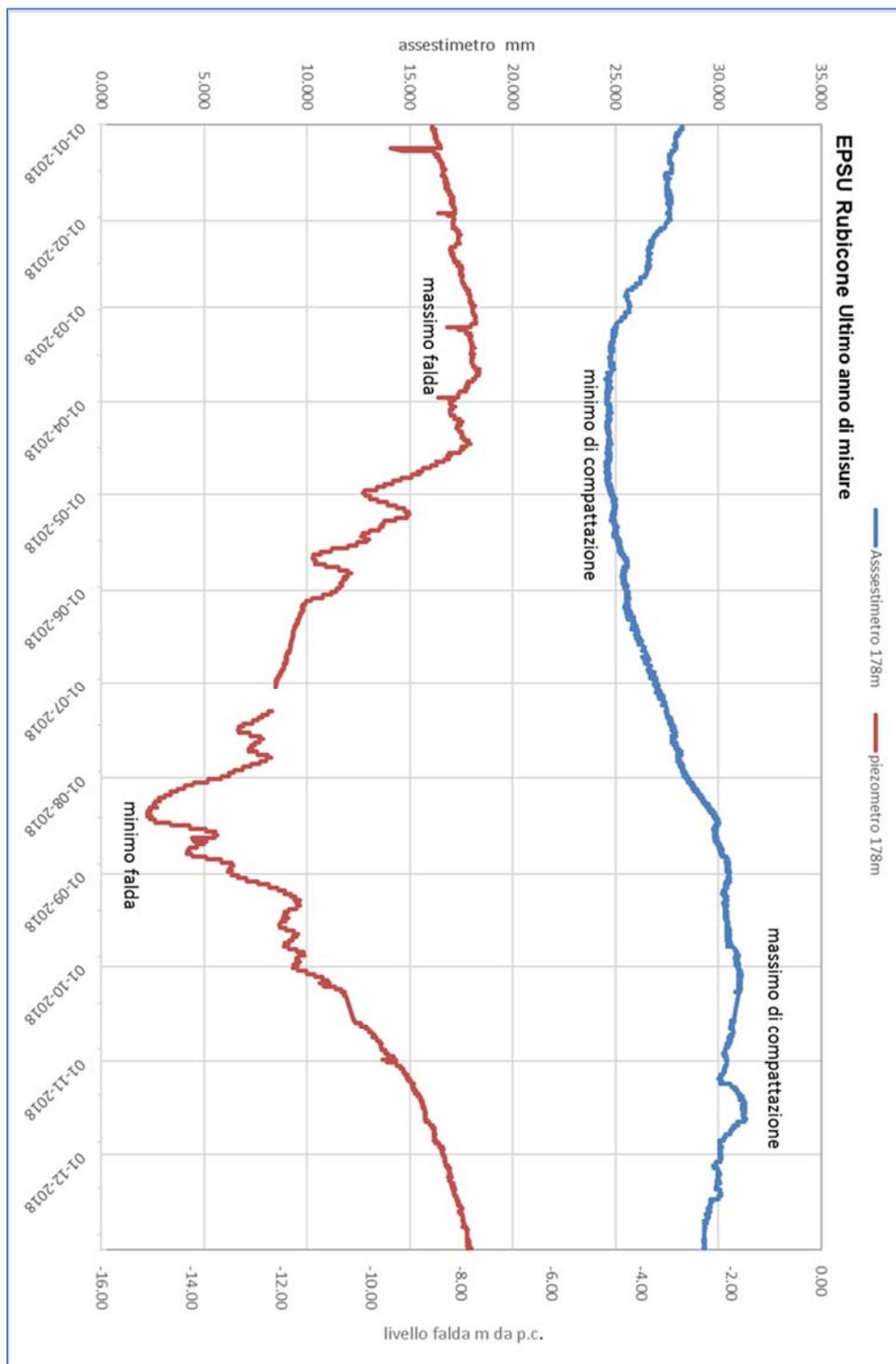
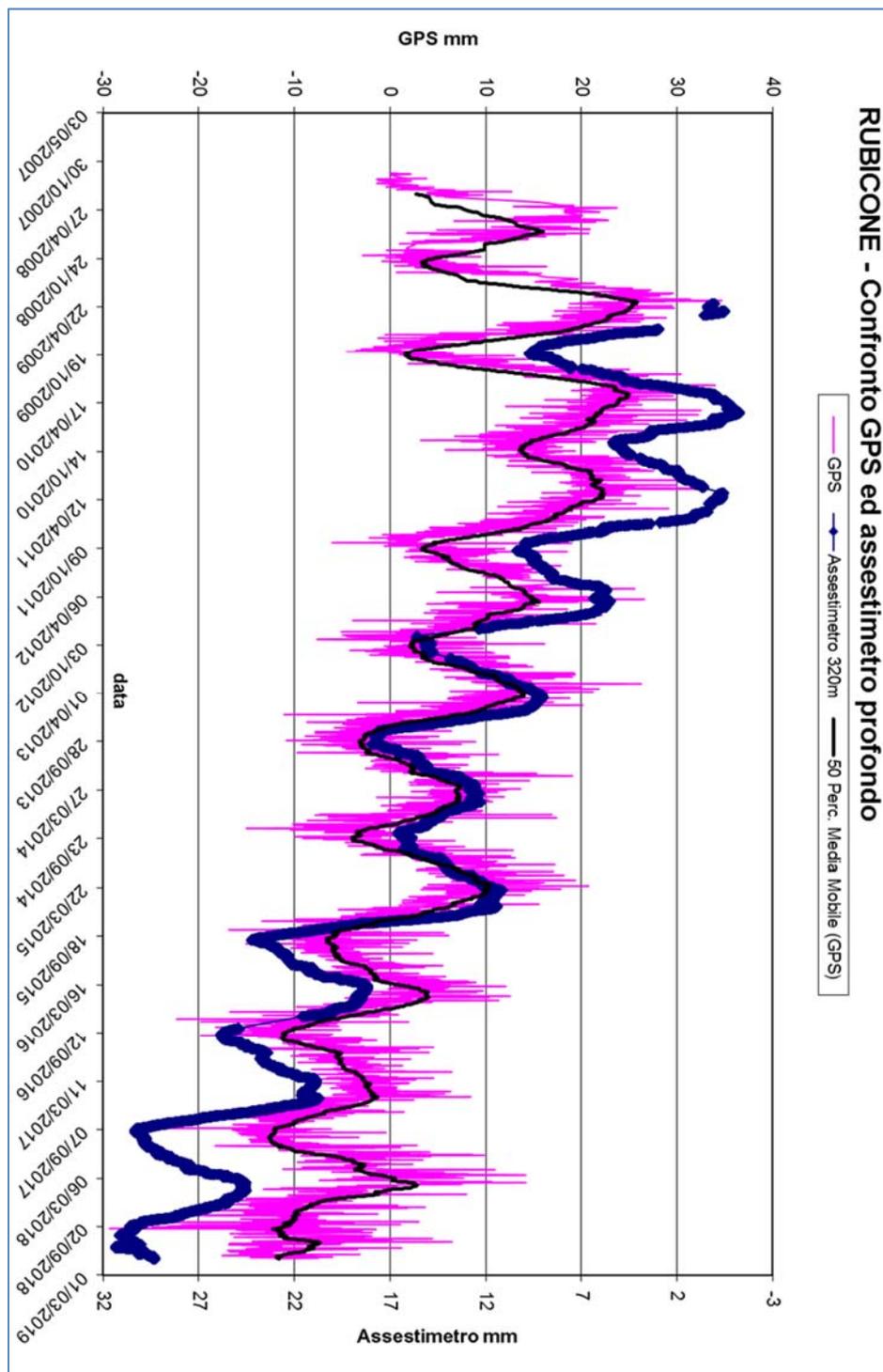


Figura 7B - Stazione EPSU di Rubicone: misure piezometrico-assestimetriche



**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 ( $-0.007$  mm/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 piezometrico (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.

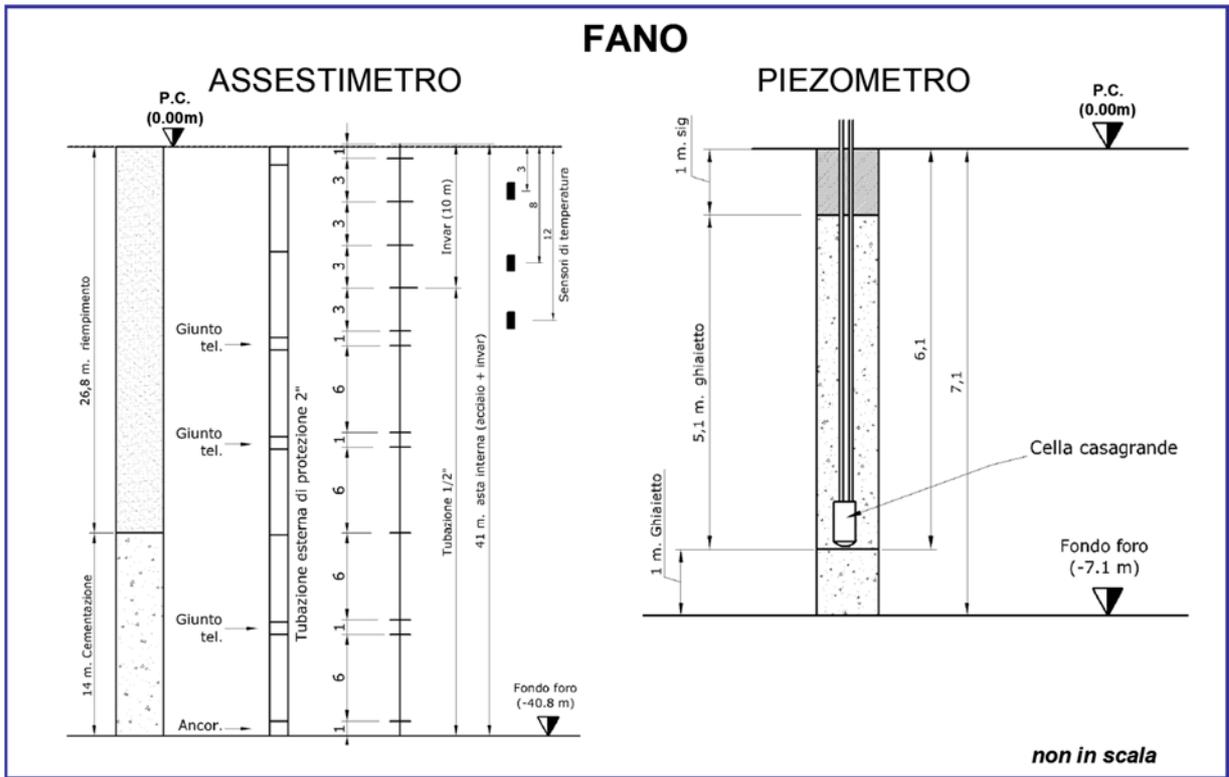


Figura 9B - Stazione EPSU di Fano

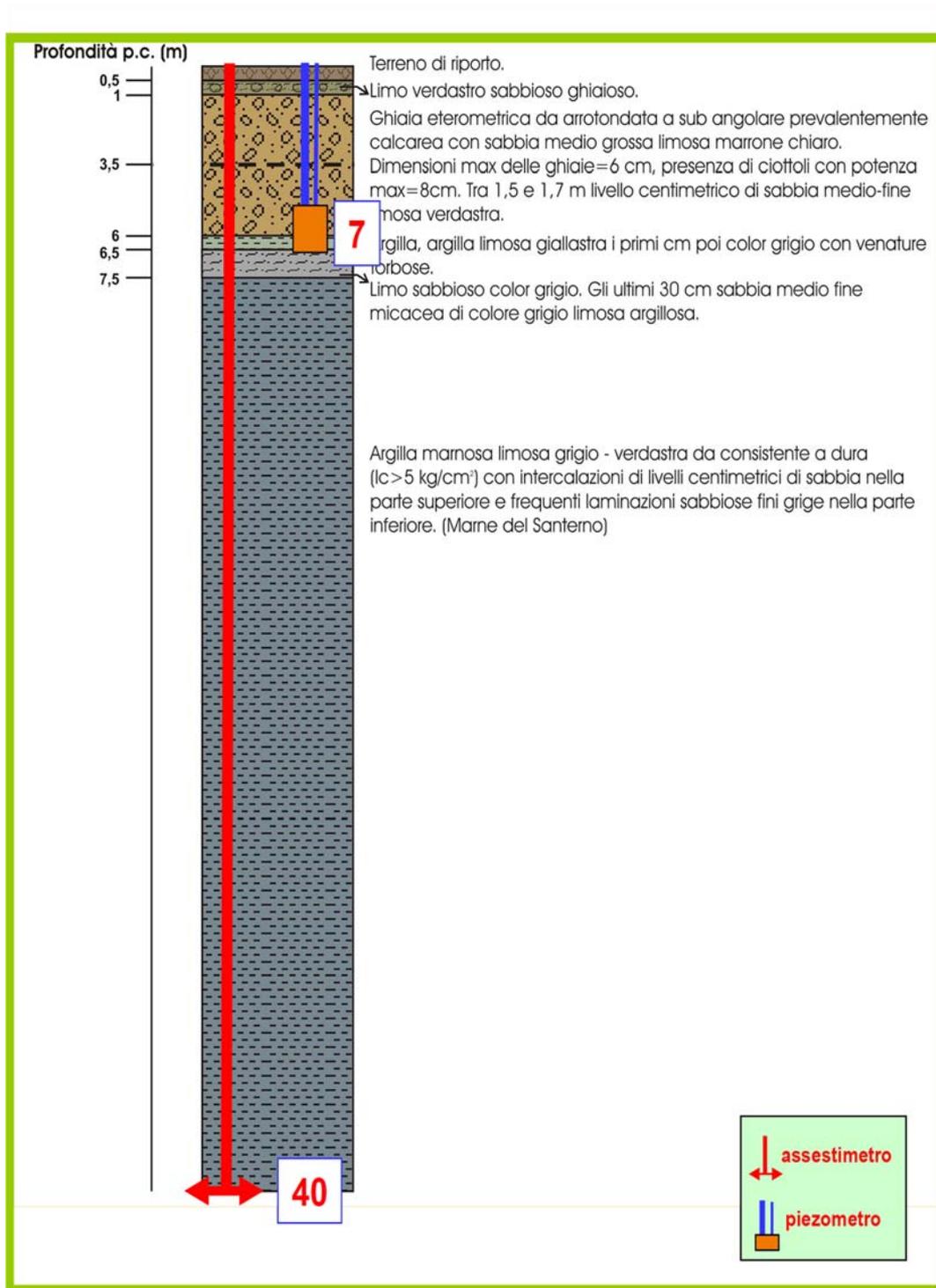


Figura 10B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Fano

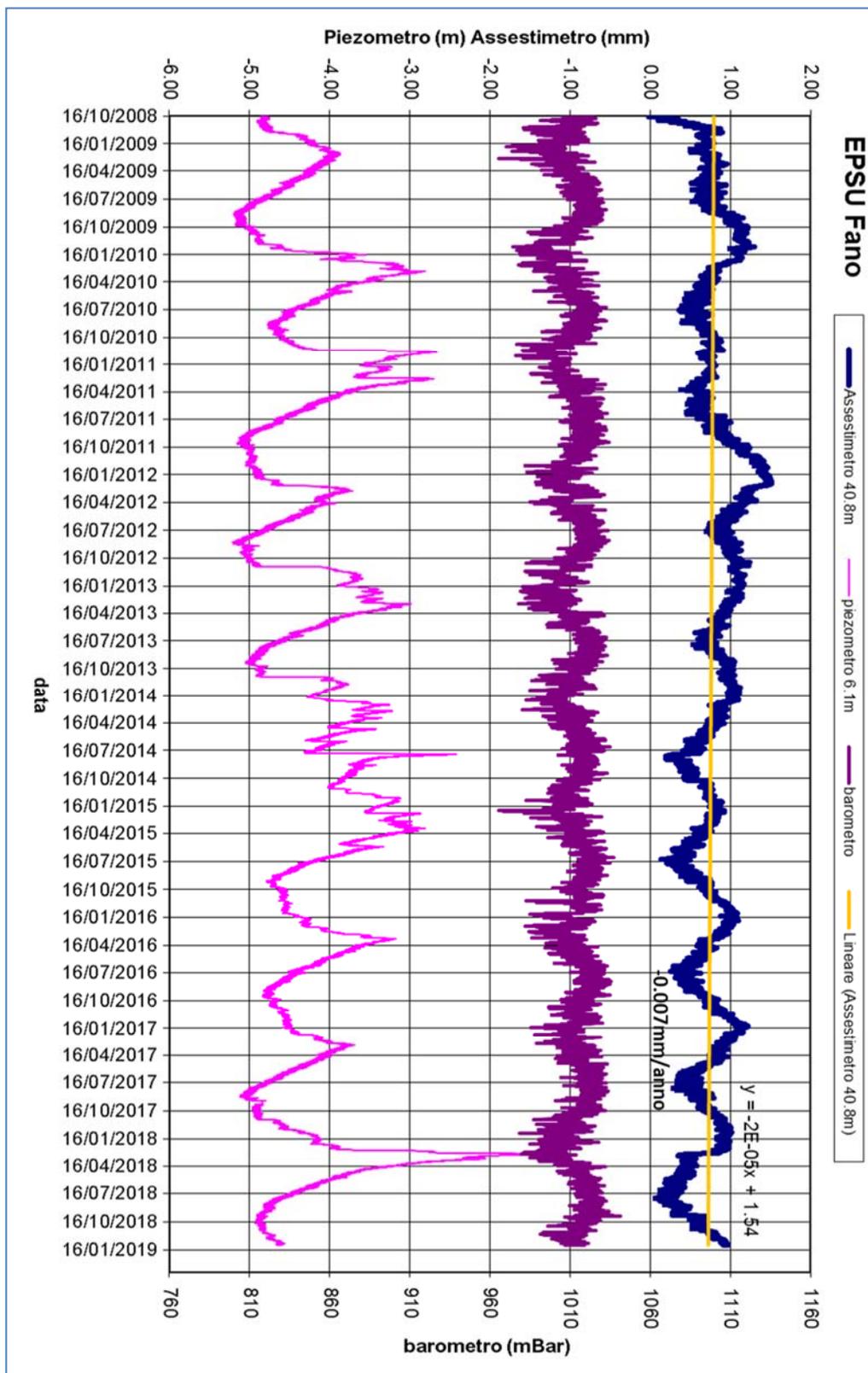


Figura 11B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimetriche

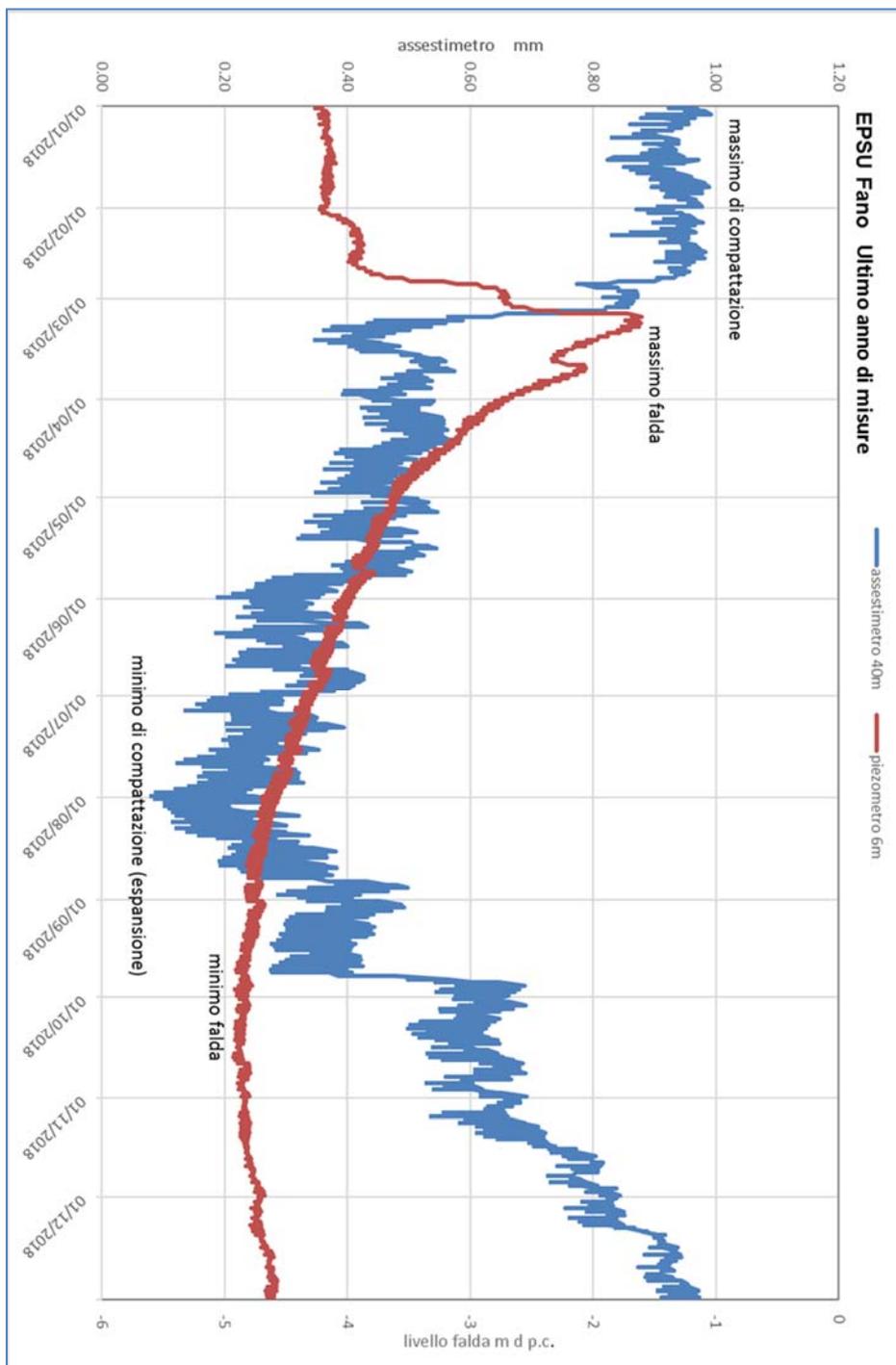
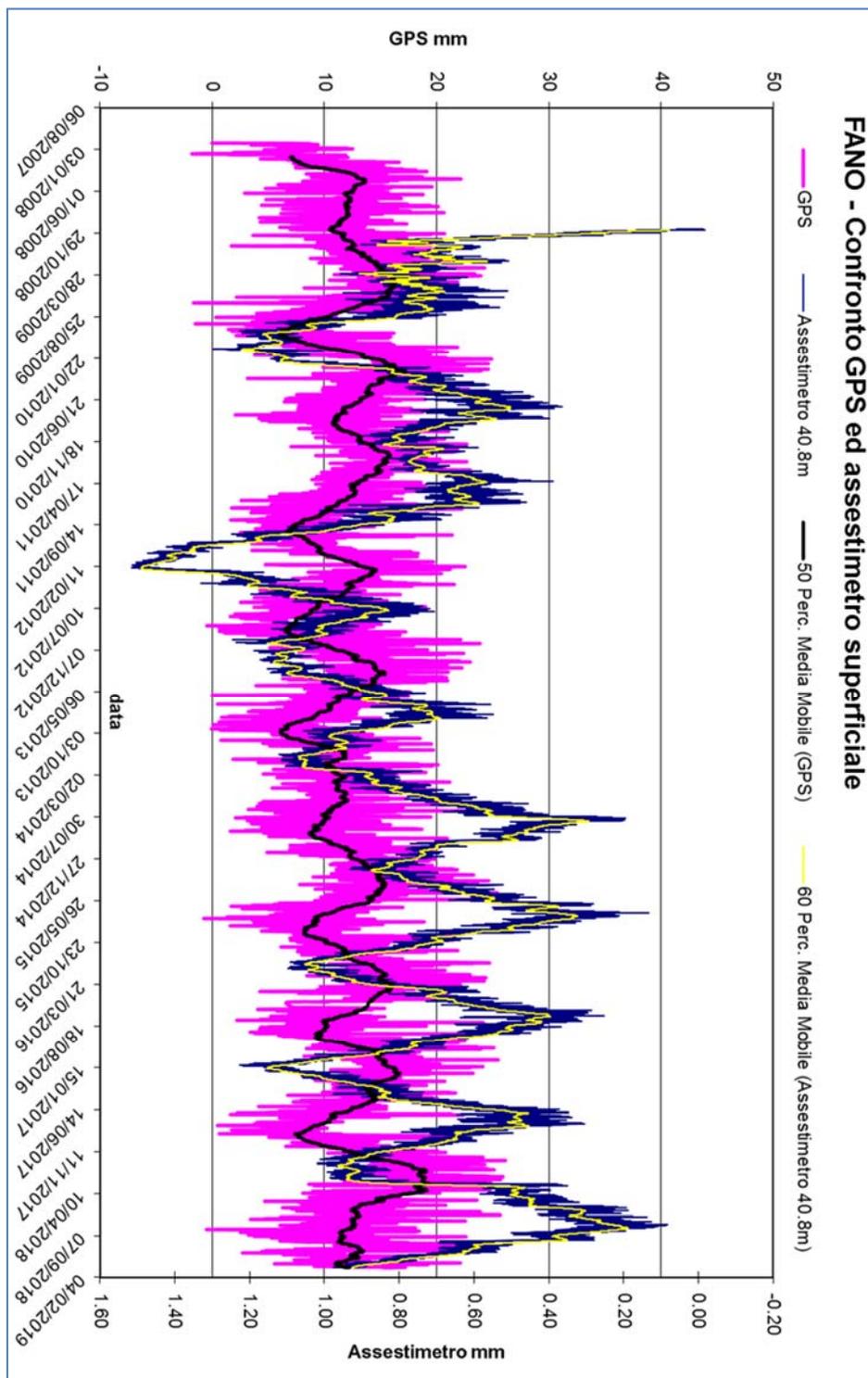


Figura 12B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimetriche



**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.



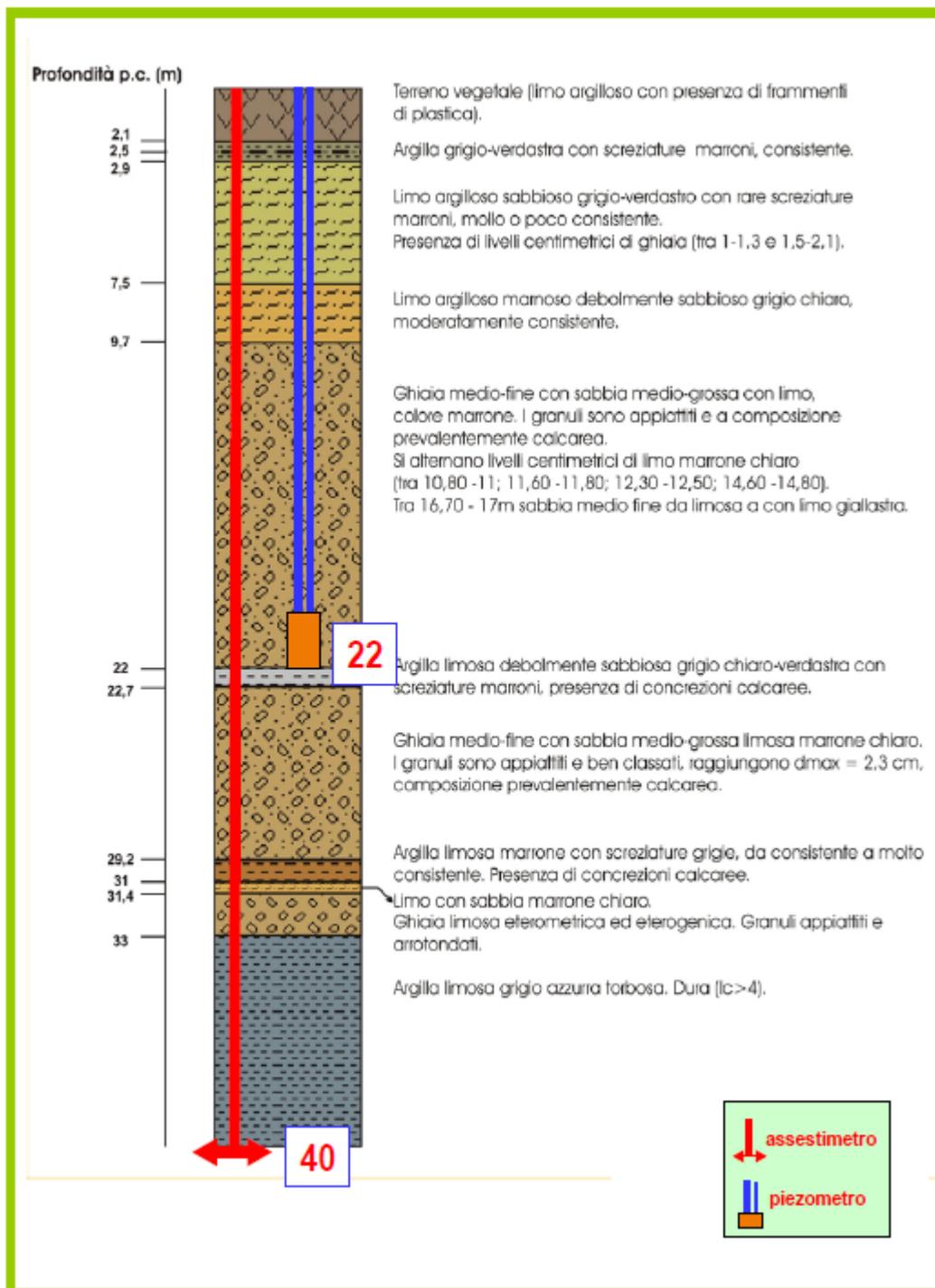


Figura 15B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Falconara

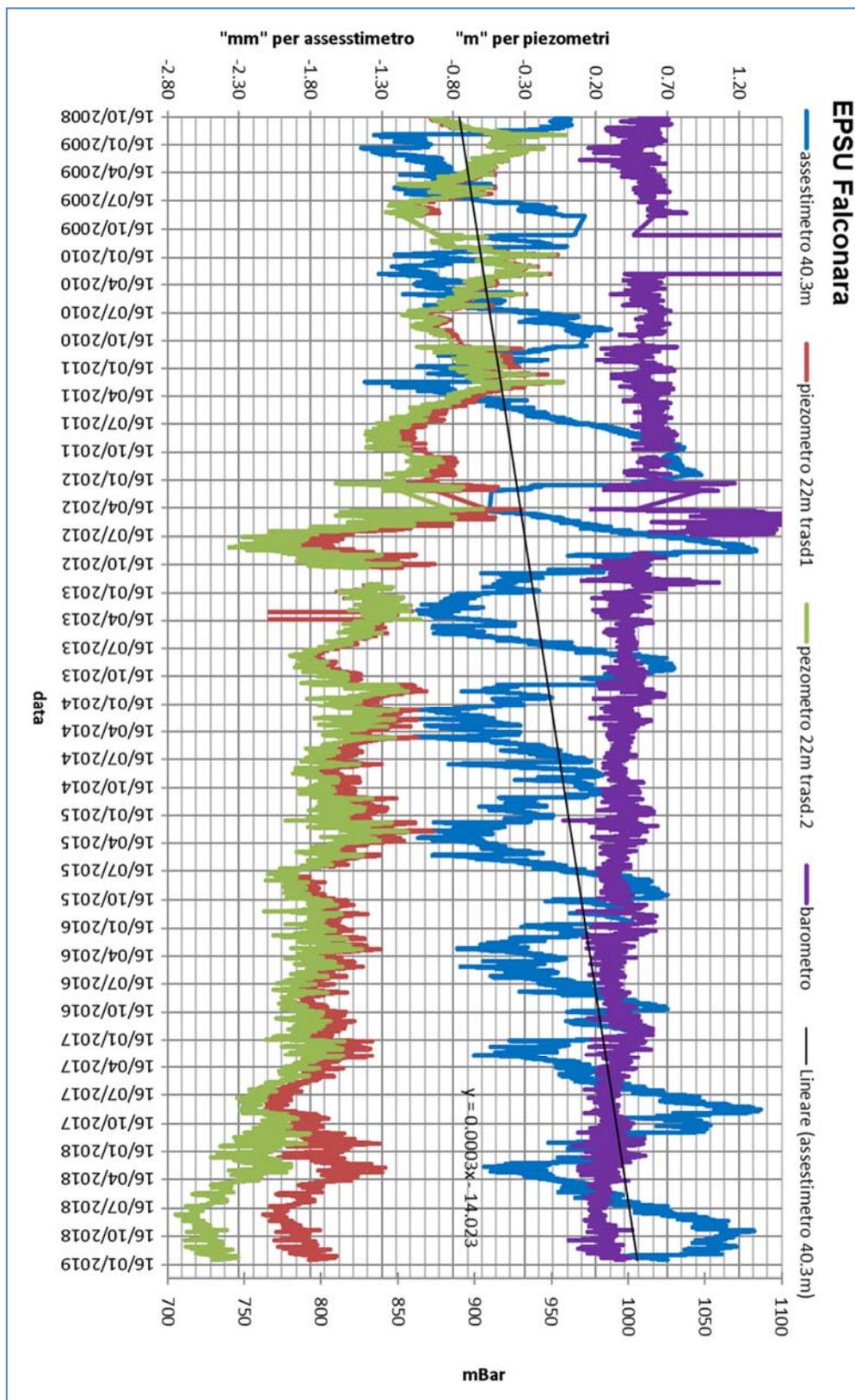


Figura 16B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assestometriche

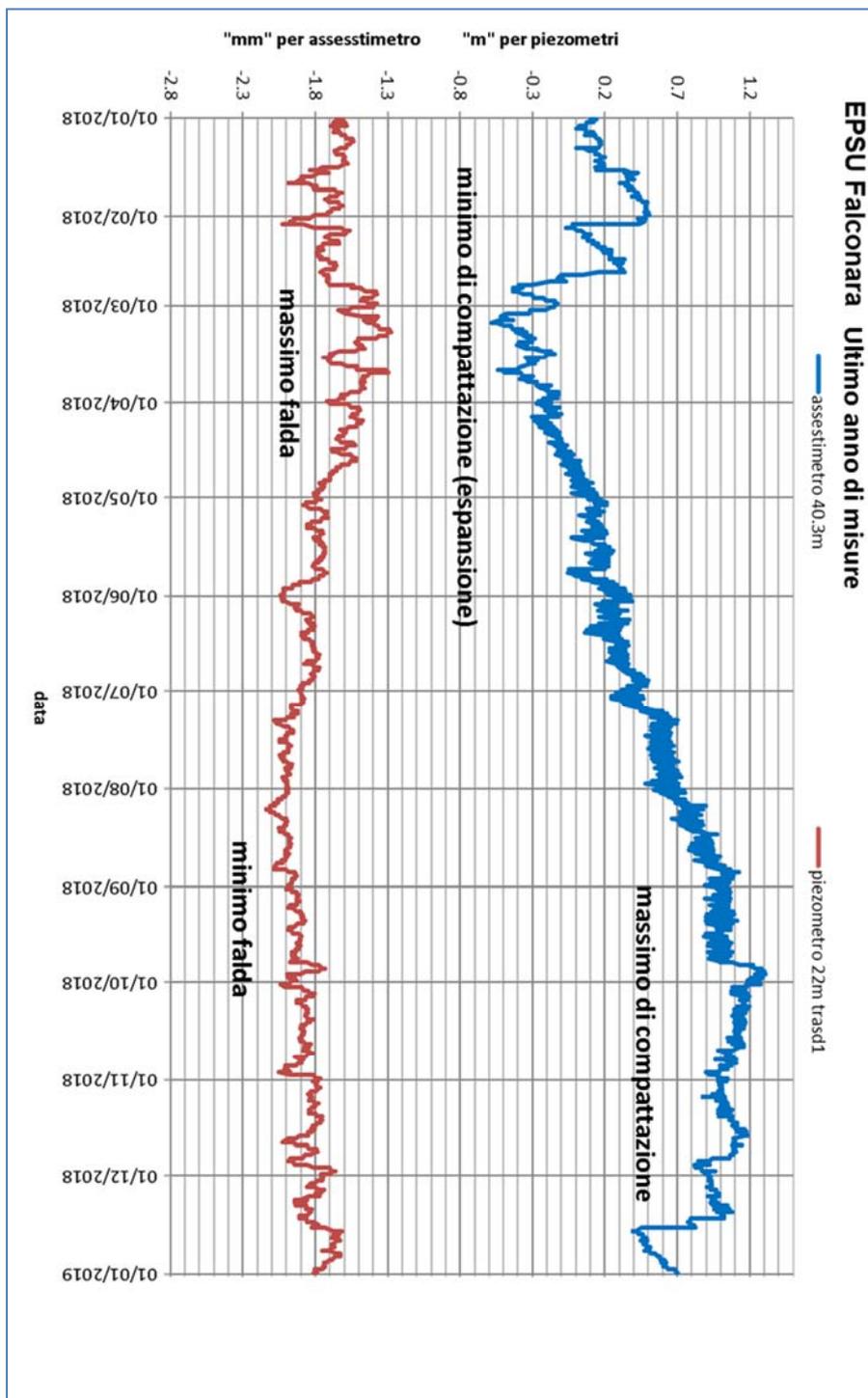
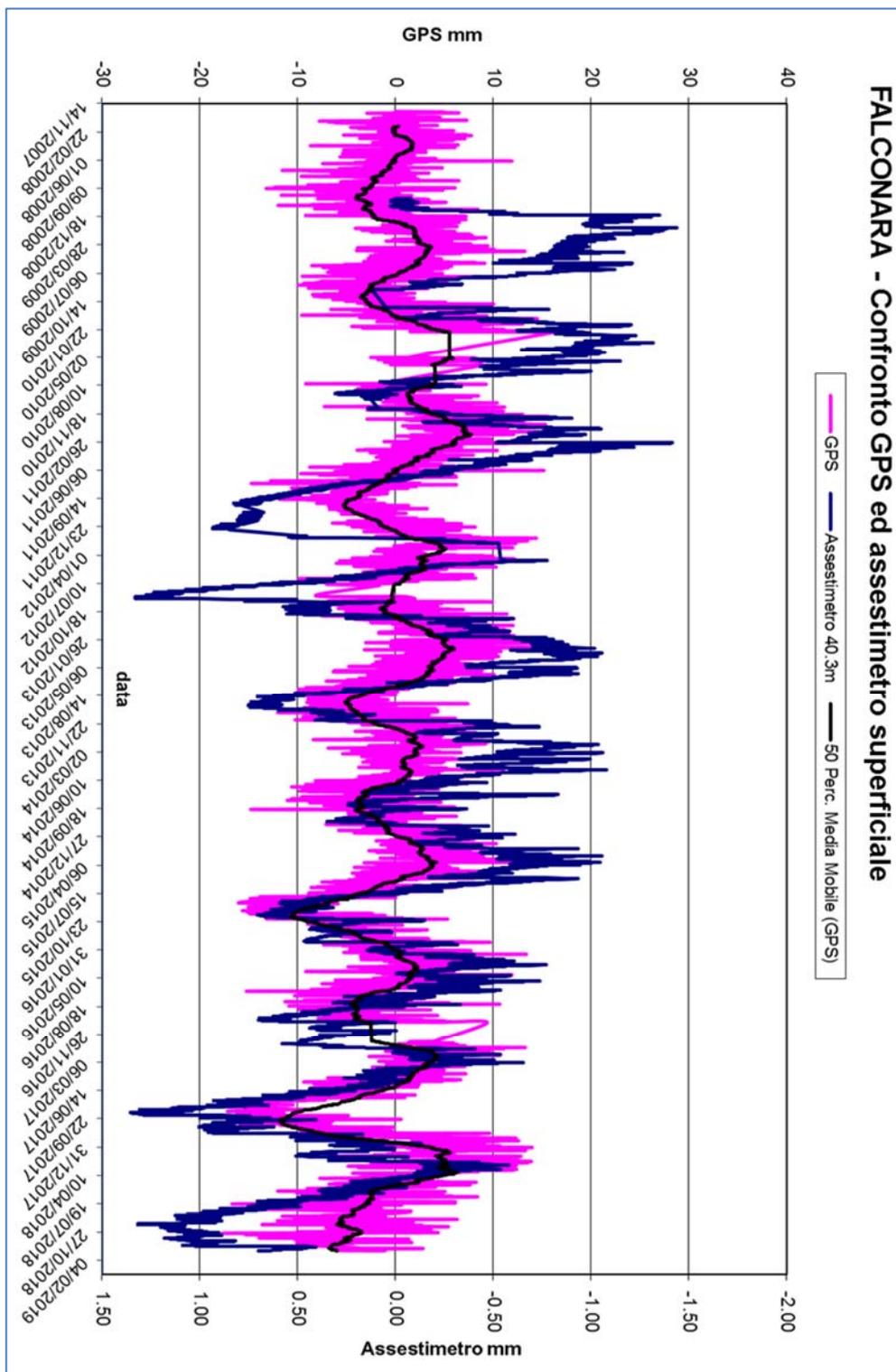


Figura 17B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assestimetriche



**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 coerente 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 semplicemente 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