

## Campo di CLARA EST- CLARA NW

Aggiornamento al 31/12/17

Il campo di Clara Est è ubicato nell'offshore Adriatico circa 45 km al largo di Ancona, a una profondità d'acqua di circa 75 m, nella concessione B.C13.AS evidenziata in Figura 1.

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
B.C13.AS	27/05/2020	Eni	Eni	51%	Marche
			Edison	49%	

Il giacimento è costituito da un'anticlinale pleistocenica, con asse orientato NW-SE e si estende per circa 70 km<sup>2</sup>. La serie mineralizzata è compresa tra 750 m e 1200 m slm e interessa i livelli della serie PLQ della Formazione Carola (Figura 2). Il campo di Clara Est è stato scoperto nel 1968 con la perforazione dal pozzo Clara Est 1; dal 1972 al 1996 sono stati perforati i pozzi Clara Est 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 per delimitare la struttura. Nell'ottobre 1998 è stata presentata da Eni una domanda di pronuncia di compatibilità ambientale concernente la realizzazione della piattaforma Clara Est con la perforazione di 4 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 *Eclipse*) del maggio 1998. Tale profilo stimava un recupero di 3120 MSm<sup>3</sup> di gas in 29 anni 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 geomeccanico del tipo Geertsma cilindrico, è risultata pari a 10 cm (in corrispondenza del culmine del giacimento) dopo 15 anni dall'inizio produzione; alla stessa data il cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) è risultato estendersi per circa 4,3 km verso la costa. Per tale previsione erano stati utilizzati i parametri geomeccanici che, con le informazioni disponibili a tale data, venivano considerati come più rappresentativi del comportamento della formazione, in particolare:

- compressibilità uniassiale  $C_m = 0,509 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$
- coefficiente di Poisson  $\nu = 0,33$ .

In seguito al Decreto VIA n° 4470 del 7/02/00 che approvava il programma lavori presentato, nel periodo 1999-2000 si è sviluppato il campo con la perforazione di 4 nuovi pozzi (Cla-



ra Est 10, 11, 12 e 13) da una piattaforma di tipo BEAF. La produzione è stata poi avviata nell'ottobre 2000 con una portata iniziale di circa 840 kSm<sup>3</sup>/g. Nel luglio 2005 è stato trasmesso al Ministero dell'Ambiente l'aggiornamento del modello di giacimento e di quello geomeccanico per il campo di Clara Est (*rel. INPE n° 95/05 – “Campo di Clara Est- Aggiornamento/taratura del modello predittivo di subsidenza” del luglio 2005*).

In tale aggiornamento il modello statico di giacimento è stato esteso agli acquiferi idraulicamente connessi ai livelli produttivi, e calibrato (modello dinamico *Eclipse*) sulla base della storia produttiva del giacimento stesso comprendente tutti i dati disponibili sino al 31/03/05. Con il nuovo modello dinamico di giacimento si è generato un nuovo profilo di produzione che ha stimato le riserve recuperabili a vita intera (21 anni) pari a 2118 MSm<sup>3</sup> con un calo, quindi, del 32% rispetto allo studio del maggio 1998.

La subsidenza massima, prevista in relazione a tale profilo e valutata con un modello geomeccanico del tipo Geertsma semianalitico, è stata di 31,6 cm al gennaio 2021; alla stessa data il cono di subsidenza (linea d'iso-subsidenza di 2 cm) è risultato estendersi per circa 6,6 km verso la costa. Tale previsione è riferita al caso ritenuto più conservativo (caso II della *rel. Eni-INPE n° 95/05 di luglio 2005*). Nel maggio 2007 si è fatta una nuova revisione degli studi di giacimento (statico e dinamico) dei campi del *Clara Complex* (Clara Est, Clara Nord, Calpurnia) e di Calipso per valutare anche possibili fenomeni d'interferenza idraulica e meccanica fra detti campi.

A tale proposito si è proceduto a:

- costruire un unico modello statico di giacimento per i 4 campi dell'area; modello che è stato esteso anche agli acquiferi idraulicamente connessi ai livelli produttivi;
- simulare il comportamento dinamico di tali campi con un unico modello *Eclipse* sia per calibrarne il modello statico, sia per tener conto di possibili interferenze dinamiche fra loro. Per la calibrazione si sono utilizzate le informazioni acquisite durante lo sviluppo e tutta la loro storia produttiva (aggiornata al 31/12/06).

Nel caso di Clara Est (*rel. Eni-INPE n° 066c-07 del maggio 2007*) tale revisione ha portato a una riduzione di circa il 10% del GOIP totale rispetto al volume inizialmente stimato (*GOIP studio statico del maggio 1988 pari a 5330 MSm<sup>3</sup>, GOIP revisione studio statico del maggio 2007 pari a 4830 MSm<sup>3</sup>*). Anche questo nuovo modello ha previsto una diminuzione delle



riserve producibili a vita intera; il nuovo volume delle riserve, infatti, è risultato di 2193 MSm<sup>3</sup> al 2021, con un calo, quindi, di circa 30% rispetto alla stima iniziale del maggio 1998. Le riduzioni delle riserve recuperabili a vita intera emerse dagli studi di giacimento del luglio 2005 e maggio 2007, conseguono dal fatto che, con la taratura del modello dinamico di giacimento, si è tenuto conto del reale comportamento produttivo dei pozzi, rivelatosi inferiore alle attese a causa della produzione d'acqua di formazione. Nel 2011, nell'ambito di una rivalutazione complessiva dei campi del *Clara Complex*, di Calipso e della struttura di Elettra (ipotesi di sviluppo), si è nuovamente rivisto lo studio statico e dinamico del giacimento di Clara Est (rel. *Eni-GISE n° 14-11 del novembre 2011*) con l'obiettivo di ottimizzare i recuperi di gas dai livelli già in produzione e di svilupparne altri ubicati nell'area NW del giacimento stesso e mai posti in produzione.

A tale scopo si è prevista una nuova piattaforma (progetto "Clara NW") da cui perforare nel 2015 quattro nuovi pozzi (Clara NW 1 Dir, Clara NW 2 Dir, Clara NW 3 Dir e Clara NW 4 Dir). È stata inoltre considerata la possibilità di sviluppare il potenziale residuo dell'area Est perforando un *side-track* del pozzo CLE-12 Dir e un pozzo di *infilling* CLE-14V equipaggiato con testa pozzo sottomarina o monotubolare.

Nel caso di Clara Est tale revisione ha portato a un aumento del GOIP totale del campo, rispetto al volume stimato in precedenza (*GOIP revisione studio statico del maggio 2007 pari a 4830 MSm<sup>3</sup>; GOIP previsione dello studio statico del novembre 2011 pari a 12614 MSm<sup>3</sup>*). Le riserve producibili a vita intera (fine 2028), stimate in quest'ultima revisione, si sono incrementate del 40% rispetto a quanto valutato nello studio del maggio 1998 ammontando complessivamente a 4354 MSm<sup>3</sup>. Nel marzo 2013 è stata fatta un'altra revisione dello studio dinamico del giacimento di Clara Est (rel. *Eni-GISE n°04/2013 del 06/03/2013*) con l'obiettivo di ottimizzare i recuperi di gas dai livelli già in produzione e di svilupparne altri ubicati nell'area NW del giacimento stesso e mai posti in produzione. Tale revisione si è resa necessaria in quanto, dopo l'emissione dello studio riportato nella rel. *Eni-GISE n° 14-11 del novembre 2011*, si sono verificati i seguenti eventi:

- 1) nel novembre 2012 si è avuta la chiusura del pozzo CLE-13D per rottura del *gravel pack* e conseguente venuta di sabbia a giorno. Di conseguenza oltre al già previsto *side-track* del pozzo CLE-12D si è considerato anche quello del pozzo CLE-13D;



2) si è rivista la strategia di sviluppo dell'area Sud-Est del campo (non più un pozzo verticale con testa pozzo sottomarina, identificato nello studio del 2011 come CLE-14V, ma due pozzi deviati con una semplice struttura di superficie ("Clara SE"), denominati CLE-14D e CLE-15D).

Le riserve producibili a vita intera (fine 2034) stimate in quest'ultima revisione sono state valutate pari a 6416 MSm<sup>3</sup> con un aumento del 47% rispetto alla revisione dello studio del 11/2011 grazie al contributo complessivo dei seguenti interventi:

- sviluppo dell'area NW;
- ottimizzazione del potenziale residuo dell'area Est con la perforazione dei due *side-track* dei pozzi CLE-12 Dir e CLE-13 Dir;
- perforazione dei due pozzi di *infilling* CLE-14D e CLE-15D.

Nel 2015, infine, si è nuovamente aggiornato il modello di giacimento (*Rel. GISE-11/15 - Campo di Clara Est Area Sud-Est - Rivalutazione scenari di sviluppo del luglio 2015*), con una nuova valutazione delle riserve a vita intera stimate in 5485 MSm<sup>3</sup> producibili al 2030. Questo aggiornamento è stato funzionale al nuovo progetto di sviluppo del campo nell'area Nord-Ovest, che ha visto la realizzazione di quattro nuovi pozzi, CLNW-1d, CLNW-2d, CLNW-3d e CLNW-4d, perforati a partire dalla seconda metà del 2015 dalla nuova piattaforma Clara Nord Ovest ed entrati in produzione ad aprile 2016. Sulla base dei risultati dei nuovi studi (statico e dinamico) di giacimento fatti nel corso delle varie revisioni sopra descritte, di volta in volta si sono aggiornate le previsioni di subsidenza del campo Clara Est e degli altri campi dell'area. A tale proposito si ricorda che nel 2007 è stato realizzato un unico modello geomeccanico a elementi finiti (FEM - Isamgeo) dei campi del *Clara Complex* e del campo di Calipso (*rel. Eni-INPE n° 074-07 del maggio 2007*).

Le simulazioni eseguite con tale modello avevano portato alle seguenti conclusioni:

- a) per il campo di Clara Est il valore di subsidenza massima era risultato pari a 24 cm al 2021. L'incremento di subsidenza massima rispetto a quanto riportato nel SIA del 1998 era da imputarsi principalmente ai nuovi valori utilizzati per il coefficiente di compressibilità  $C_m$ , assunti maggiori di quelli impiegati per la valutazione del 1998;
- b) l'estensione verso la costa del cono di subsidenza relativo ai 4 campi (*Clara Complex* e Calipso) era risultata sempre d'entità modesta (max. 6 km in corrispondenza di Clara Est) per la presenza di un limite deposizionale dei livelli mineralizzati situato a SW dei



campi di Calipso e Clara Est di cui si dirà con più dettaglio in seguito. La distanza minima tra la costa e la linea d'iso-subsidenza di 2 cm era risultata, pertanto, pari a 32 km.

Nel corso del 2010, nell'ambito della documentazione tecnica (SIA) preparata per l'istanza concernente il progetto di sviluppo della vicina struttura di Elettra, si è aggiornato il modello geomeccanico di tutta l'area al fine di prevedere l'eventuale subsidenza indotta dalla coltivazione dell'insieme dei campi in essa compresi (*Clara Complex*, Calipso ed Elettra). Tale previsione è stata fatta con il modello FEM Isamgeo relativamente a tre diversi scenari di compressibilità (rel. *Eni-Tera: Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza-Management Summary - agosto 2010*).

Le simulazioni con modello sono state protrate fino al 2054 onde tener conto degli effetti dell'evoluzione della pressione nelle zone mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione. Per lo scenario di riferimento ( $C_{m\_Med}$ ), ritenuto il più probabile, la subsidenza massima prevista per Clara Est è stata stimata in 25 cm al 2020. Per quanto riguarda la distanza dalla costa della curva d'iso-subsidenza di 2 cm, corrispondente alla massima estensione del cono di subsidenza relativo ai 5 campi, è risultata essere di circa 32 km.

Un ulteriore aggiornamento/taratura del modello geomeccanico del 2010 è stato fatto nel dicembre 2011, previa revisione del modello di giacimento 3D *Eclipse* dei campi dell'area (*Clara Complex*, Calipso ed Elettra). Quest'ultima revisione si è resa necessaria per tener conto sia del nuovo progetto di sviluppo "Clara NW" che ipotizzava la perforazione di 4 nuovi pozzi in corrispondenza di una culminazione secondaria (NW) di Clara Est, sia dei nuovi dati disponibili a seguito della campagna di *work-over* del 2011 sui pozzi dei campi di Calpurnia e di Clara Nord. Con questi nuovi studi di giacimento (statici, dinamici e geomeccanici) si sono voluti valutare gli effetti di eventuali interazioni di tipo idraulico e/o meccanico fra campi del *Clara Complex*, di Calipso ed Elettra (rel. *Eni-Tera: Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza-Management Summary - dicembre 2011*). Nel corso delle simulazioni con modello geomeccanico si sono considerati 3 possibili scenari per il coefficiente di compressibilità ( $C_m$ ), che a loro volta hanno generato altrettanti scenari previsionali di subsidenza i cui risultati oscillano nell'intorno di un valore medio all'interno di una banda di confidenza.

Per lo scenario ritenuto più probabile ( $C_{m\_Med}$ ), la subsidenza massima per il campo di Clara Est è invece stimata in 33 cm (in corrispondenza della stazione CGPS installata in piatta-



forma) a fine produzione (2028). Per lo scenario ( $C_m\_Upper$ ) più pessimistico e per tutti gli altri scenari considerati nello studio, la linea d'iso-subsidenza di 2 cm si mantiene sempre a una distanza dalla costa superiore ai 32 km.

Come ricordato in precedenza, è stato nuovamente aggiornato nel 2013 il modello dinamico di giacimento dei campi dell'area (rel. *Eni-GISE n.11/2013: Clara Complex – campi: Calipso-Calpurnia-Clara Est-Clara Nord-Elettra. Aggiornamento del modello di giacimento per modello geomeccanico. Scheda Riassuntiva aprile 2013*) a supporto del nuovo progetto di sviluppo “Clara SE”, che prevede l'installazione di una nuova piattaforma di produzione e la perforazione di due nuovi pozzi (Clara Est 14D e Clara Est 15D). Anche in quest'ultimo caso l'aggiornamento è stato fatto tenendo conto delle possibili interazioni di natura idraulica e meccanica fra i campi stessi. Un nuovo modello geomeccanico 3D a elementi finiti (rel. *Eni-Tera: Campi del Clara Complex, con il nuovo sviluppo “Clara Sud-Est”, Calipso ed Elettra - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza-Management Summary - settembre 2013*) è stato poi finalizzato per valutare l'entità della subsidenza e l'estensione del relativo cono indotti dalla produzione complessiva dei campi sopracitati. Ancora una volta le simulazioni fatte hanno preso in esame tre diversi scenari di compressibilità.

Nel caso ritenuto più probabile (scenario di compressibilità  $C_m\_Med$ ), la subsidenza massima prevista per tutta l'area in esame si verifica in corrispondenza del campo di Clara Nord ed è pari a circa 68 cm al 2021; tale valore si riduce a circa 62 cm alla fine della simulazione. Per quanto riguarda Clara Est, la subsidenza massima (nel caso  $C_m\_Med$ ) risulta pari a 56 cm al 2026. Lo studio è stato protratto fino al 2065 (fine simulazione) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione. Anche in questo nuovo aggiornamento del modello geomeccanico la linea d'iso-subsidenza dei 2 cm si mantiene per tutti gli scenari considerati a una distanza dalla costa sempre superiore a 32 km. Nel 2017 è stato eseguito un nuovo studio integrato per un nuovo modello (statico e dinamico) dei giacimenti dell'area del Clara Complex, Calipso ed Elettra (*Eni-GISE 24/2017 Clara Complex – Scheda integrativa all'aggiornamento dello studio di giacimento per geomeccanica - Scheda riassuntiva – dicembre 2017*) che aggiorna le riserve di Clara Est in 5155 MSm<sup>3</sup> producibili al 2038.

Nelle Figure 3a, 3b e 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 aggiornata al 31/12/17 e pari a 3040



M<sup>3</sup>. Nella Figura 5 è presentato il confronto tra i profili di pressione calcolati con il modello *Eclipse* del novembre 2017 e le pressioni statiche misurate in uno dei livelli più rappresentativi del campo (PLQ A-E); tale confronto mostra come ci sia un buon accordo fra le 2 serie di dati (calcolati e misurati).

A seguito della revisione del modello di giacimento si è aggiornato anche il modello geomeccanico (rel. *Eni-REIT: Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra - Modello Elasto-Plastico di Subsidenza-Management Summary - dicembre 2017*)

Per le simulazioni del modello geomeccanico si sono considerati 3 diversi scenari di produzione:

- **DO NOTHING:** si assume di continuare lo sviluppo del giacimento con i completamenti aperti a fine *history match* (dicembre 2017), senza ulteriori interventi;
- **CLPS5:** si considera lo sviluppo del campo di Calipso con un nuovo pozzo (Calipso 5 dal 01/09/2019);
- **CLPS6:** si prevede lo sviluppo *full field* con due nuovi pozzi su Calipso (Calipso 5 dal 01/09/2019 e Calipso 6 dal 01/11/2019) e lo sviluppo del giacimento di Clara Est con due pozzi (Clara Est 14 dir e Clara Est 15 dir) in produzione dal 01/02/2021.

I risultati del nuovo studio, per il campo di Clara Est, mostrano per il caso CLPS6 un valore di subsidenza massimo di 129 cm al 2037, che rimane stabile fino a fine simulazione (2061).

Per tutti gli scenari considerati nello studio, inoltre, la massima estensione della subsidenza prevista, corrispondente alla curva di iso-subsidenza dei 2 cm, si mantiene a oltre 29 km dalla costa e dalla città di Ancona, per l'intera durata della simulazione di tutti gli scenari di produzione considerati.

In Figura 6 e 7 è mostrata per lo scenario produttivo CLPS6, l'evoluzione nel tempo, rispettivamente della linea dei -2 cm e della subsidenza prevista nel punto di massimo.

La Tabella1 riporta, per i cinque campi e per i 3 scenari di *forecast* considerati, i valori massimi di subsidenza ottenuti e le date alle quali si conseguono.

Per Clara Est tali valori si mantengono inalterati sino alla fine della simulazione.

**Tabella 1 – Valori di subsidenza alla fine della produzione**

	Clara Nord	Calpurnia	Elettra	Clara Est	Clara NW	Calipso
<b>DN</b>	32 cm (2022)	14 cm (2022)	11 cm (2030)	69 cm (2037)	81 cm (2039)	57 cm (2025)
<b>CLPS5</b>	32 cm (2022)	14 cm (2022)	11 cm (2030)	69 cm (2037)	81 cm (2039)	84 cm (2026)
<b>CLPS6</b>	32 cm (2022)	14 cm (2022)	11 cm (2030)	129 cm (2039)	94 cm (2039)	85 cm (2026)

Il fatto che tutti gli studi geomeccanici sino ad ora eseguiti per valutare i possibili effetti d'interferenza idraulica e meccanica fra i campi dell'area in esame concordino nel prevedere che il fenomeno della subsidenza si esaurisca a grande distanza dalla costa (circa 29 km), ha una spiegazione nel particolare assetto geologico dell'area stessa, come del resto già accennato in precedenza.

Tale assetto, rappresentato nello *sketch* stratigrafico-strutturale di Figura 8 e basato su un'interpretazione sismica controllata con dati di pozzo, definisce uno schema di rapporti verticali e laterali tra le formazioni che costituiscono i giacimenti (*reservoir* e copertura) e il substrato che limitano l'estensione del fenomeno subsidenziale verso costa.

Infatti, lungo la direttrice esaminata (WSW-ENE) in direzione della costa, i livelli mineralizzati si chiudono per limite deposizionale in *onlap* sui livelli argillosi della F.ne Santerno che rappresenta un'importante barriera idraulica verso costa.

Il substrato dell'offshore anconetano presenta, inoltre, una successione carbonatica prepliocenica posta talora a poche centinaia di metri di profondità – (pozzo Brezza 1 - Figura 8) che localmente affiora sulla costa (promontorio M.te Conero) in corrispondenza di alti strutturali appenninici, mentre la successione terrigena di copertura è relativa a intervalli stratigrafici differenti dalle zone *reservoir* del *Clara Complex* e campi limitrofi. Tutto ciò limita sensibilmente la possibilità che si possa verificare una depressurizzazione e conseguente compattazione dei sedimenti sulla costa e nelle fasce antistanti al litorale.

E, pertanto, del tutto comprensibile, quindi, che:

- sia per la presenza di tale barriera idraulica di tipo sedimentologico-strutturale interposta tra il complesso dei giacimenti in esame e la costa,
- sia per l'elevata distanza dei giacimenti stessi dalla costa (ad es. 45 km per Clara Est),



in tutte le previsioni il fenomeno di subsidenza si esaurisca rapidamente in direzione della costa e, quindi, la distanza del cono di subsidenza dalla costa stessa risulti elevata (almeno 29 km). Tra la fine del 2007 e l'inizio del 2008 è stato eseguito un rilievo batimetrico *multi-beam* di un'area (superficie 1662 km<sup>2</sup>) comprendente i campi del *Clara Complex*, di Calipso ed Elettra. L'andamento molto irregolare del fondale marino, soprattutto in corrispondenza del settore sud-occidentale del rilievo (area dei campi Clara Est e Calipso), e l'entità molto modesta della subsidenza, indotta, non consentono però di evidenziare in modo chiaro alcuna anomalia batimetrica significativa che si possa ritenere indotta dalla produzione di gas dal campo Clara Est (rel. *Eni-Università di Urbino dell'agosto 2008 trasmessa a MATTM in data 11/11/2008 - prot. UGIT ET/mv 1410*). Un nuovo rilievo batimetrico, da confrontarsi con quello base del 2008, sarà programmato nel corso del 2019.

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 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 fatto) 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.

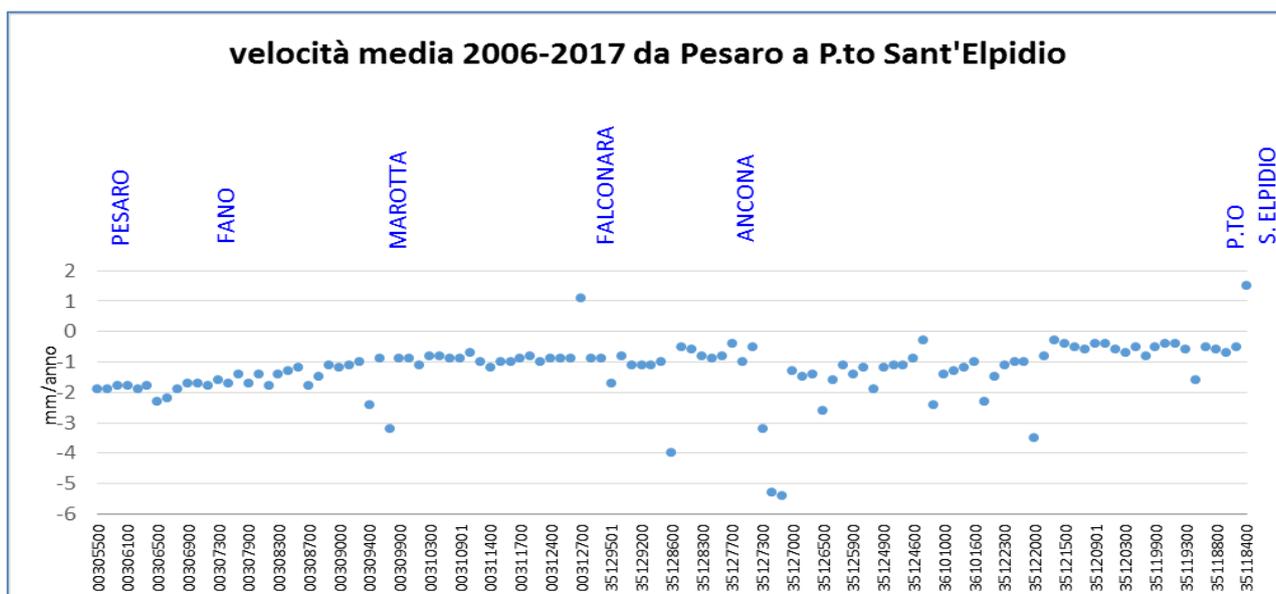
Si ritiene opportuno sottolineare, inoltre, che, sebbene vi siano punti di contatto tra i vari tratti di livellazione afferenti alla rete Eni, allo stato attuale non è possibile utilizzare in modo congiunto i valori di quota ottenuti sulle singole reti, a causa della disomogeneità tra i capisaldi origine 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 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. Nel tratto di costa da Pesaro a P.to San Giorgio, antistante alle piattaforme di Clara Est e Clara NW, con l'acquisizione della campagna 2017 sono in totale disponibili 7 campagne di livellazione fatte negli anni 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2014 e 2017. Si tratta complessivamente di una serie di misure ancora poco consolidata; il loro esame può consentire valutazioni d'ordine generale in merito alla velocità media di subsidenza del periodo 2006-2017, ma non può ancora essere considerato del tutto esaustivo ai fini del monitoraggio della costa che, comunque, è garantito da altri tipi di rilievo.

Nei prossimi anni, con nuove campagne di misura (il prossimo rilievo è previsto nel 2020), e con il consolidamento dei dati CGPS e dei rilievi SAR, sarà possibile fare interpretazioni più puntuali dei dati di livellazione anche per il tratto a sud di Pesaro. 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 di una certa area è necessario avere, quindi, misure di livellazione di più capisaldi, per la cui interpretazione può convenire poi una suddivisione in opportune classi di valori, come di seguito specificato.

A questo proposito si sono stimate con regressione lineare le velocità medie annue d'abbassamento del suolo  $V_a^1$  dei singoli capisaldi della tratta Pesaro - P.to Sant'Elpidio, raggruppandole poi nelle seguenti 5 classi:

- classe 4: include i capisaldi con  $V_a > 10$  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).

**Figura A – Tratta Pesaro - Sant'Elpidio: velocità medie di subsidenza (periodo 2006-2017)**





no scarsi di numero e isolati: sono, quindi, poco significativi dal punto di vista areale. Non si possono inoltre escludere fenomeni localizzati, dovuti a instabilità dei capisaldi stessi, che saranno comunque oggetto di verifica nelle prossime campagne di misura.

Il confronto tra i dati CGPS delle stazioni ubicate nell'area in esame (Fano, Falconara e P.to San Giorgio) con le misure delle livellazioni mostra andamenti che, fatte salve le diverse precisioni in termini di ripetibilità, sono assolutamente compatibili.

Per completare il monitoraggio altimetrico del tratto di costa antistante alle piattaforme si è proceduto, inoltre, ad aggiornare la copertura SAR (dicembre 2017) per un'analisi areale altimetrica integrata (Appendice 1) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 9).

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) che, una volta acquisita e consolidata una serie storica sufficientemente lunga di misure, entrerà 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 Clara Est, certificati fino al 2015 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 31/12/2017 (Figura 11), si sono utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati come mostrato in Tabella 2.

**Tabella 2 - Confronto dati CGPS certificati e non certificati aggiornati al 31/12/2015**

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
Clara-Est	16,28	21,79	-13,46	15,92	21,09	-13,6	0,36	0,7	0,14

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 di poter disporre di un numero sufficiente d'osservazioni per il corretto inquadramento delle componenti periodiche,



della loro incidenza sulle misure e per 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 di 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 < 12mesi: 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). Nel corso del 2013, a seguito del rilascio del nuovo sistema di riferimento, sono stati rielaborati tutti i dati secondo il sistema ITRF2008-IGB08, al quale fanno riferimento i grafici della presente relazione.

Dalle prossime relazioni i dati saranno riferiti al sistema di riferimento ITRF2014, reso disponibile nel 2017 e per il quale è necessaria la rielaborazione di tutte le serie storiche esistenti. 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 Clara Est, sulla base di una serie storica di misure GPS di durata superiore a 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale<sup>2</sup> pari a -13,7 mm/a (Figure 11 e 12), praticamente invariata rispetto al valore riportato nella precedente relazione di aggiornamento (-13,5 mm/a al 2016). Si fa osservare che l'acquisizione dati fatta dalla stazione CGPS di Clara Est presenta alcune lacune a causa di anomalie al sistema di misura che hanno richiesto interventi di manutenzione sia nel corso del 2015 che nei primi mesi del 2016. La serie storica di misure è, tuttavia, sufficientemente estesa e robusta da far ritenere affidabile il valore calcolato della velocità di subsidenza totale.

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. Relativamente alle misure CGPS della stazione installata su Clara NW (Figura 10), la serie storica acquisita nel periodo marzo 2016 - dicembre 2017 è di durata ancora troppo breve per poterne trarre indicazioni quantitative attendibili sui cedimenti della piattaforma. Tenuto conto di quanto sopra detto e del fatto che i dati CGPS del 2017 non sono ancora stati certificati, si sono tuttavia confrontati i valori di subsidenza previsti dal modello geomeccanico del dicembre 2017 per i campi del *Clara Complex*, di Calipso e di Elettra con quelli misurati dalle stazioni CGPS installate sulle rispettive piattaforme, senza che questi ultimi siano stati depurati dalla componente di subsidenza naturale. Per il campo di Clara Est, si può notare come il modello geomeccanico preveda un andamento della subsidenza in linea con quanto misurato dal CGPS (Figura 13).

In sintesi, le indicazioni del modello previsionale di subsidenza e i monitoraggi fatti da Eni consentono di escludere che l'eventuale subsidenza indotta dalla produzione di gas dai campi del *Clara Complex* (in particolare da Clara Est), dal campo di Calipso e da quello di

---

<sup>2</sup> La "subsidenza totale CGPS" 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.



Elettra possa avere qualche impatto sull'andamento altimetrico del tratto di litorale monitorato.

Si segnala infine che:

- a) in Figura 14 è presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 15 è presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.



Figura 1 - Ubicazione del campo di Clara Est

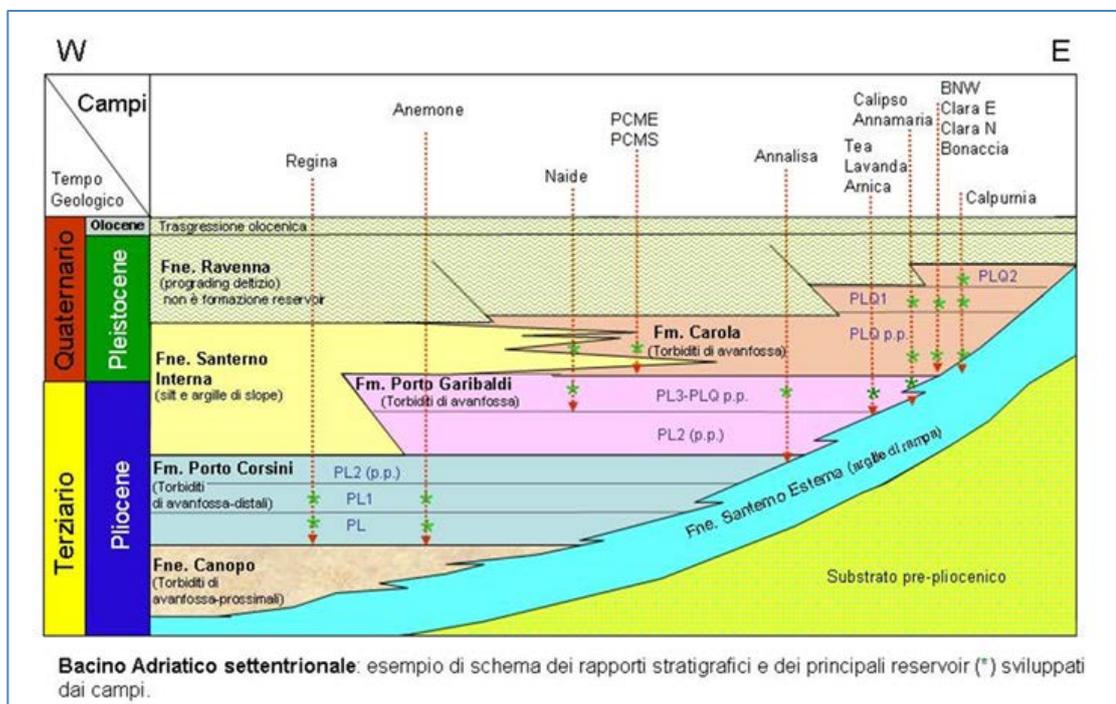


Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici



CAMPO DI CLARA EST					
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	
2000	46	46	46	46	1%
2001	274	274	320	320	6%
2002	298	298	619	619	12%
2003	273	273	892	892	17%
2004	231	231	1122	1122	22%
2005	204	204	1326	1326	26%
2006	170	170	1496	1496	29%
2007	123	123	1620	1620	31%
2008	137	137	1756	1756	34%
2009	88	88	1844	1844	36%
2010	91	91	1935	1935	38%
2011	99	99	2034	2034	39%
2012	81	81	2115	2115	41%
2013	32	32	2146	2146	42%
2014	82	82	2229	2229	43%
2015	86	86	2314	2314	45%
2016	308	308	2622	2622	51%
2017	418	417	3040	3039	59%
2018		380		3419	
2019		329		3748	
2020		273		4021	
2021		210		4231	
2022		178		4409	
2023		143		4552	
2024		103		4655	
2025		89		4744	
2026		66		4810	
2027		59		4869	
2028		53		4922	
2029		47		4969	
2030		39		5008	
2031		26		5034	
2032		24		5058	
2033		22		5080	
2034		20		5100	
2035		18		5118	
2036		16		5134	
2037		11		5145	
2038		10		5155	

Figura 3a – Campo di Clara Est: tabella e grafici di produzione vs. modello *Eclipse* (2017)

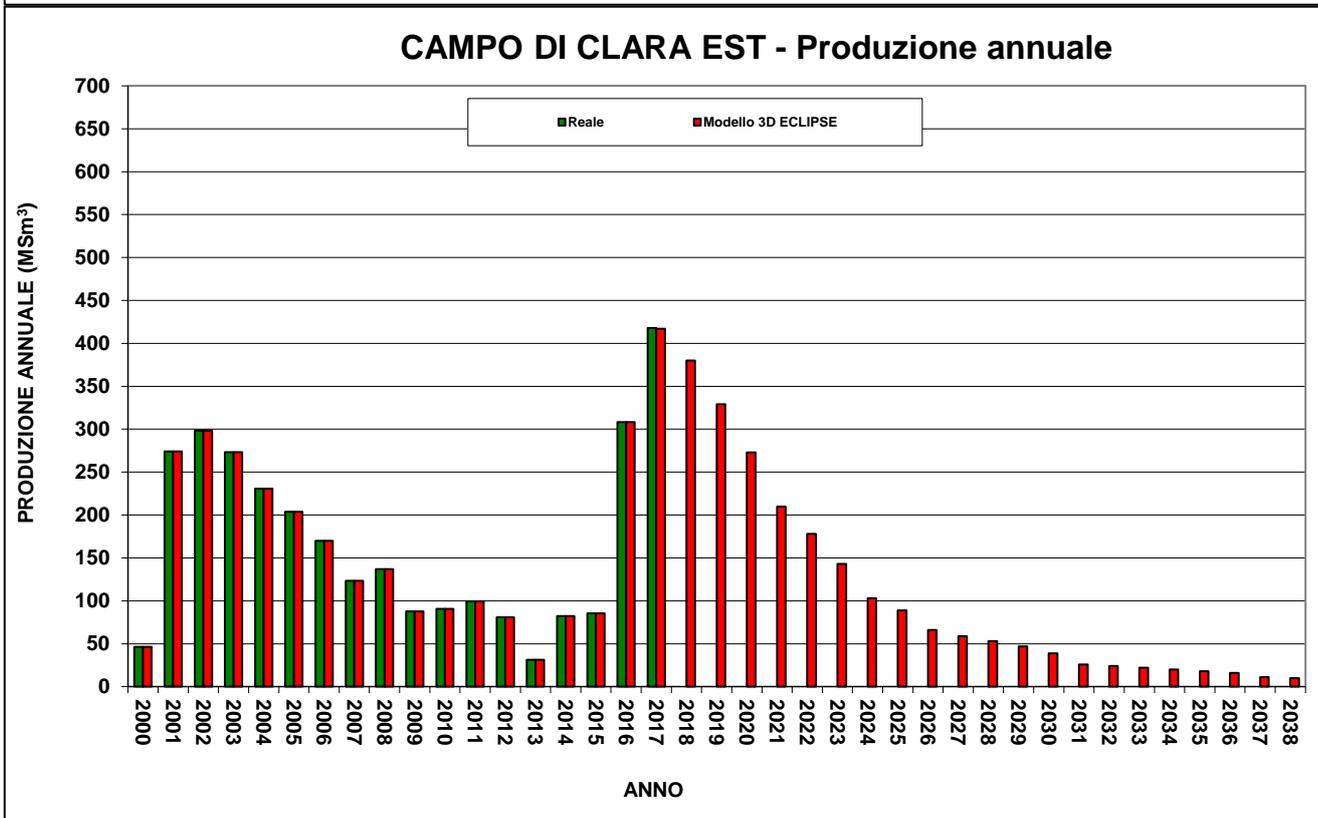
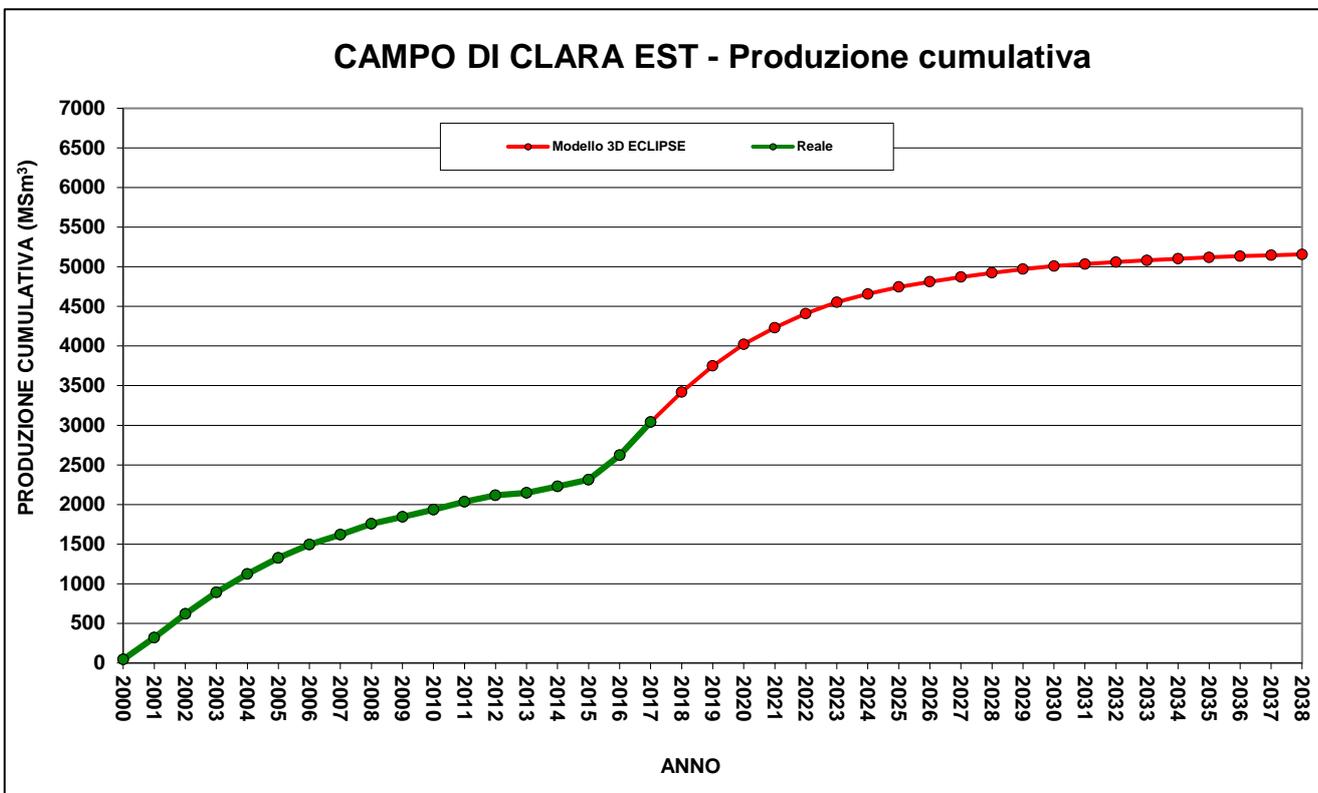


Figura 3b – Campo di Clara Est: tabella e grafici di produzione vs. modello *Eclipse* (2017)

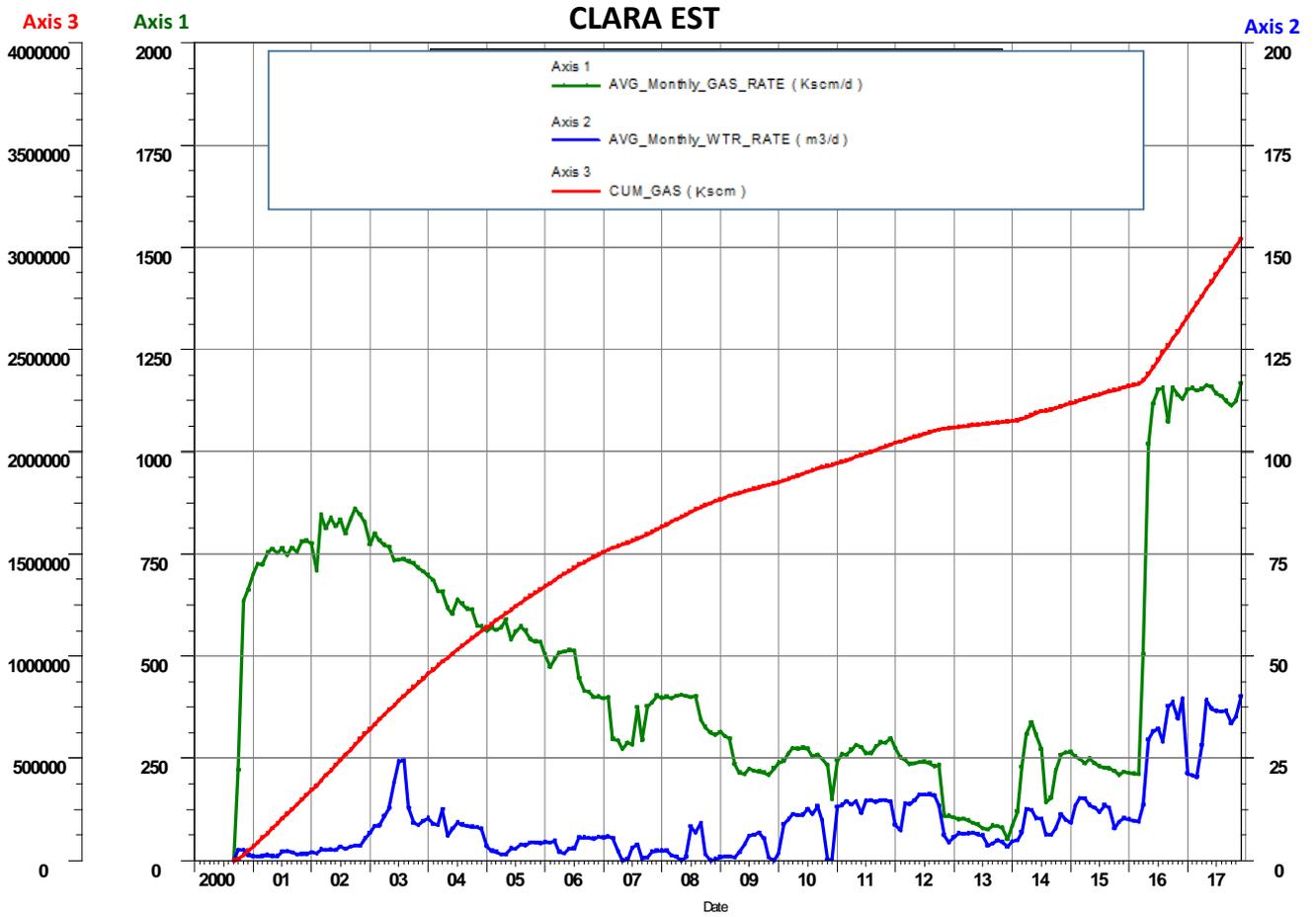


Figura 4- Campo di Clara Est-NW: grafico di produzione storica



CAMPO DI CLARA EST						
Data	Livello PLQ-AE			Livello PLQ1-A		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
01/04/2000	109	10				
02/04/2003	86		10 C			
01/06/2003	85		12 C			
17/04/2005	78		12 C			
03/04/2007	80		10 C			
12/02/2010	80		10 C			
20/11/2011	79		10 C			
07/12/2013	86		10 C			
01/07/2014	81		10 C			
24/02/2015	67		12 C*			
06/07/2015				78	NW 2 Dir	
29/09/2016	71		12 C*			
28/09/2017	74		12 C*			
25/12/2017				71		NW 2 C

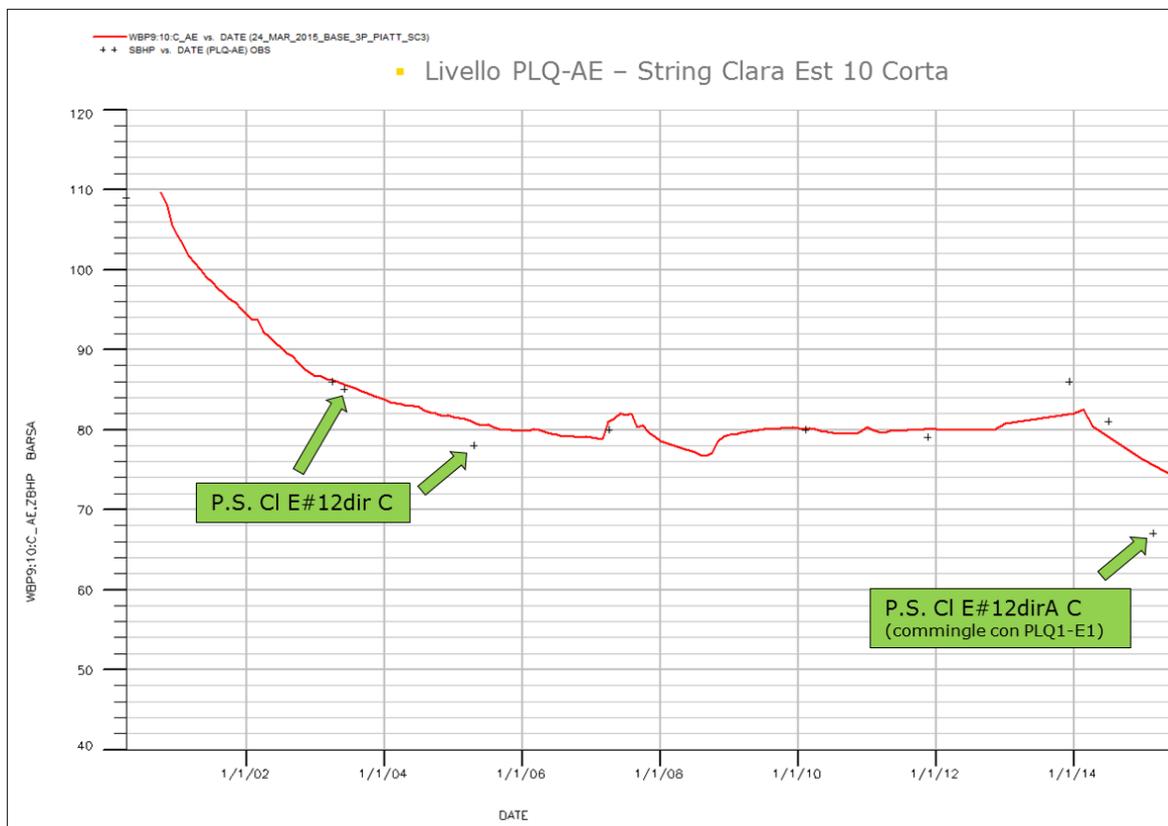


Figura 5 – Campo di Clara Est-NW: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello Eclipse 2017

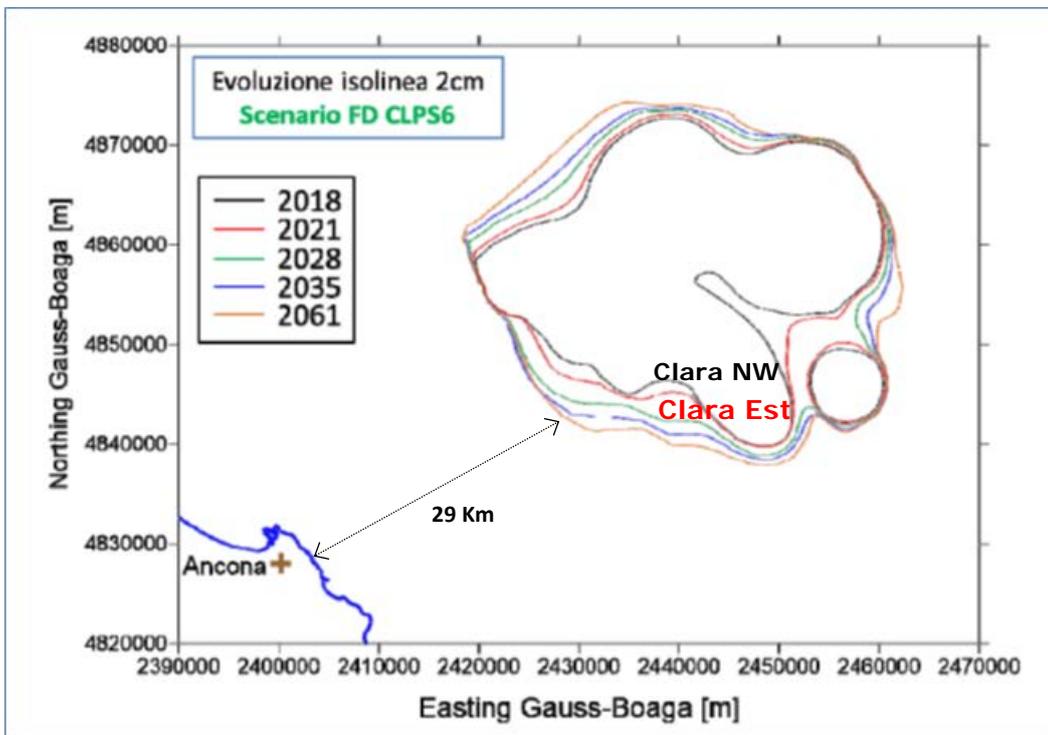


Figura 6 - Evoluzione nel tempo della linea dei -2 cm per lo scenario CLPS6

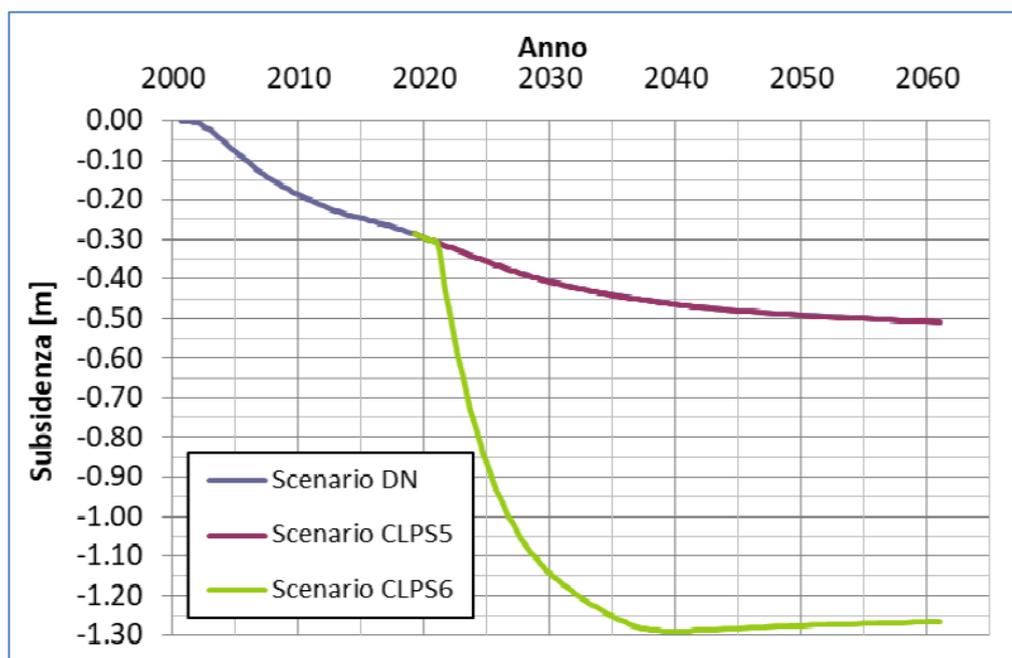


Figura 7 - Evoluzione temporale della subsidenza prevista nel punto di massimo di Clara Est

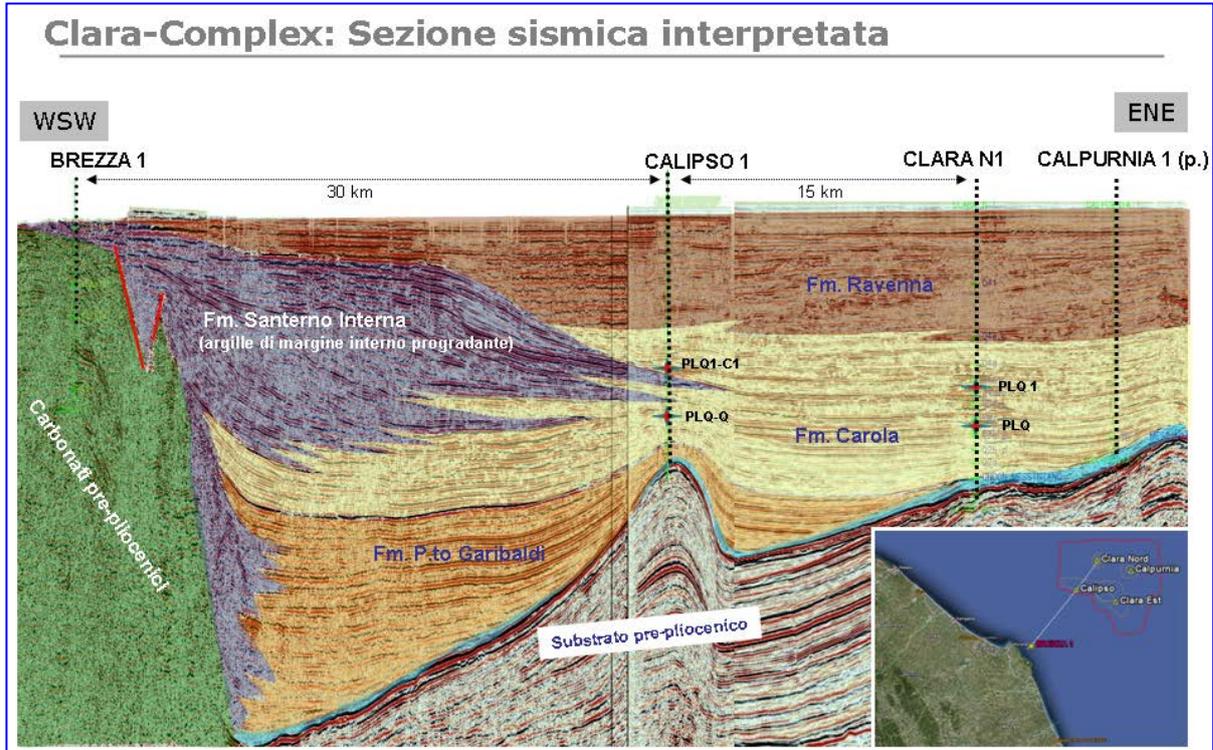


Figura 8 - Sezione sismica interpretata

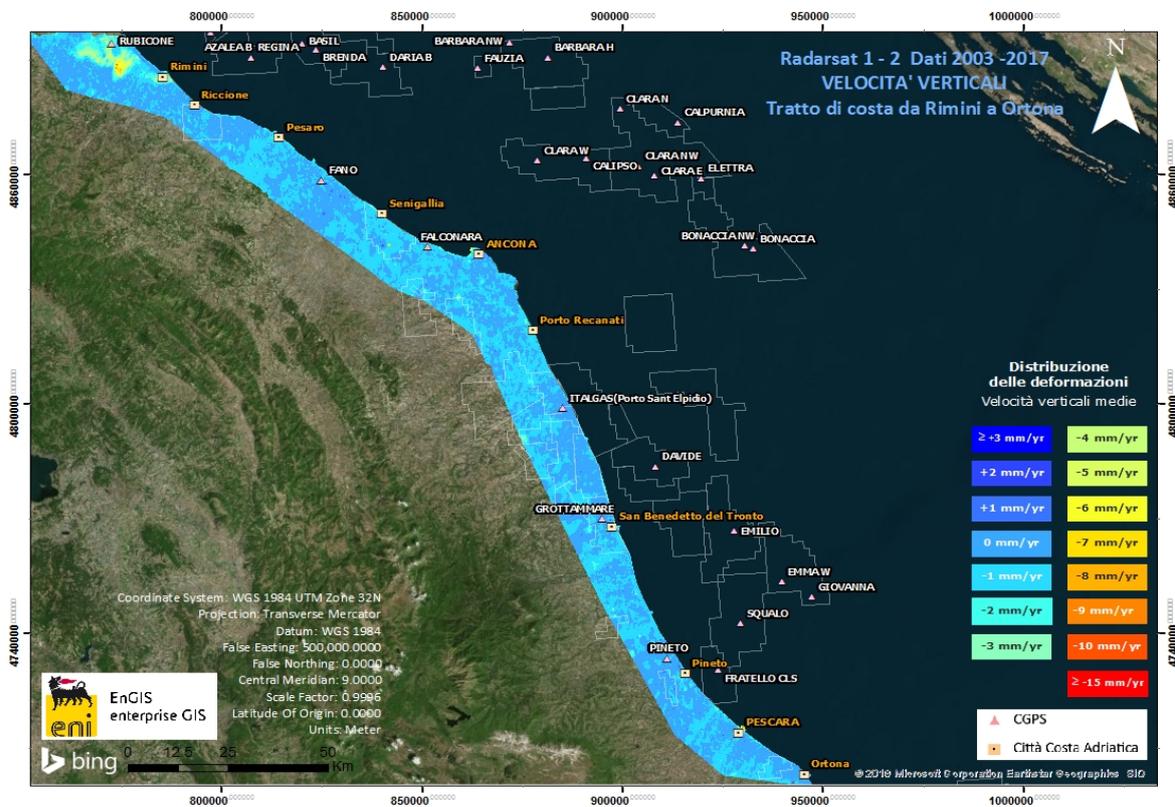
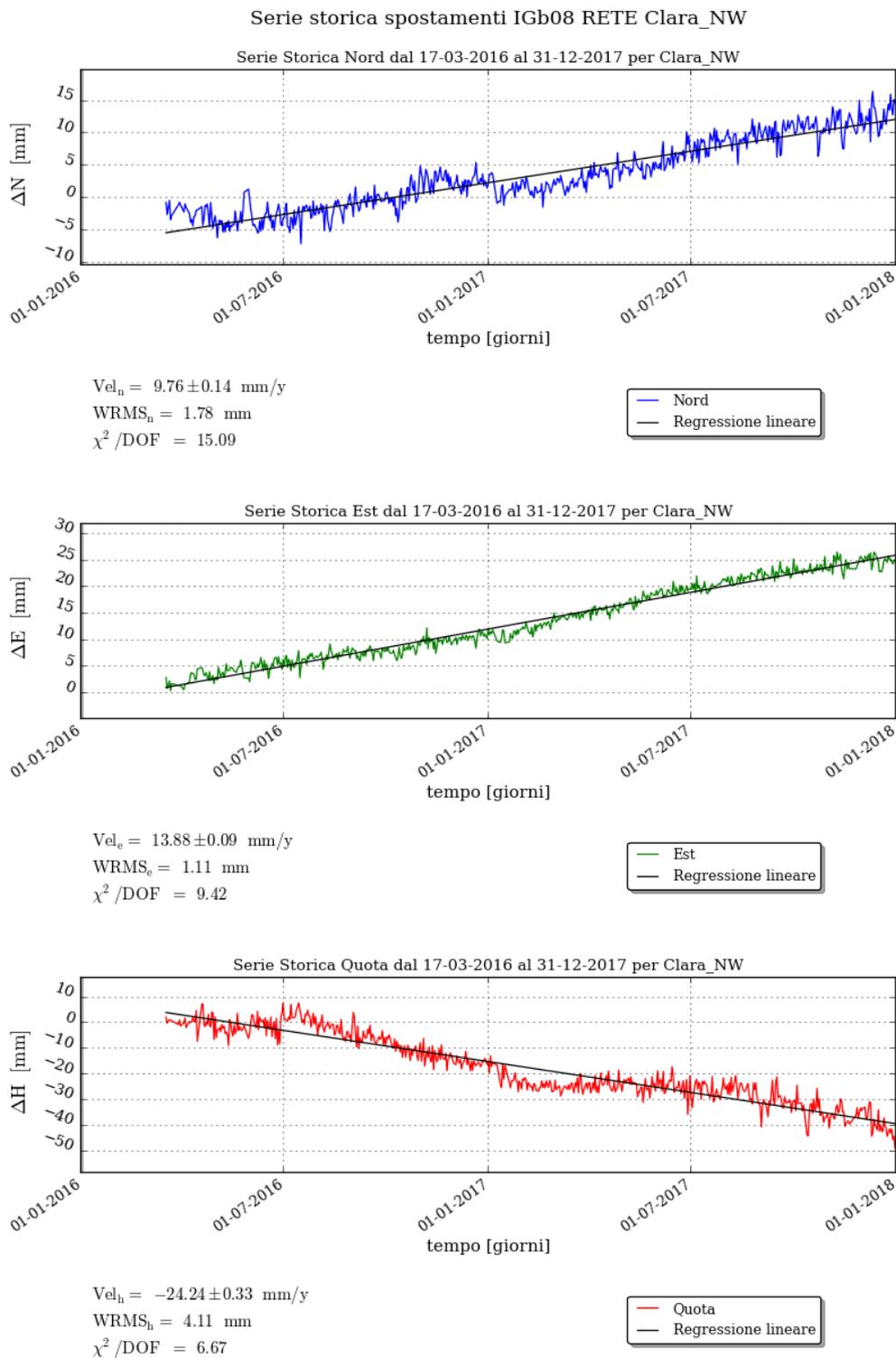
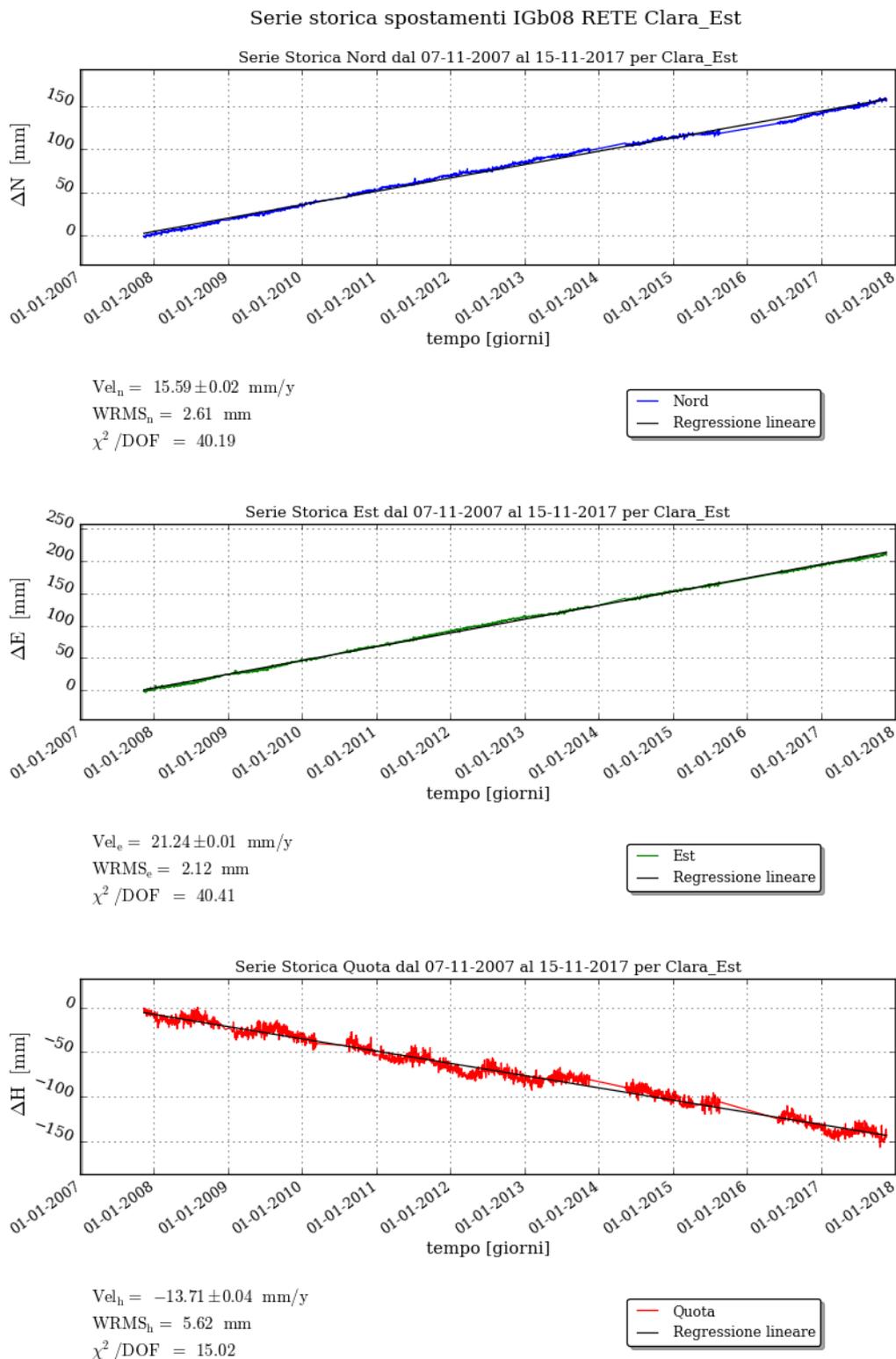


Figura 9 – Campo di Clara Est: analisi dati SAR dal 2003 al 2017



**Figura 10 – Campo di Clara Est: serie storiche di misure CGPS  
(stazione CGPS installata sulla p.ma Clara NW)**



**Figura 11 – Campo di Clara Est: serie storiche di misure CGPS  
(stazione CGPS installata sulla p.ma Clara Est)**



CAMPO	Inizio produzione	Fine produzione (rif. ultimo profilo di produzione - Mod. Eclipse)	Riserve prodotte @ dic.2017	Max subsidenza prevista (caso di riferimento)	Ultimo aggiornamento studio	CGPS				
						inizio registrazione	vel.media (mm/a) @ dic.2016	vel.media (mm/a) @ dic.2017	TREND rispetto @ dic. 2016	mesi di registrazione
ANEMONE	1978	2018	100%	-39cm al 2048	2015	giu-07	-4,7	-4,5	invariato	110
ANNALISA	2000	2023	94%	-10cm al 2027	2014	ott-07	-4,1	-3,6	diminuzione	93
ANNAMARIA B	2009	2030	73%	-163cm al 2031	2017	gen-10	-108,6	-109,6	aumento	93
BARBARA NW	1999	2035	74%	-44cm al 2029	2017	gen-08	-29,6	-29,3	diminuzione	106
BONACCIA	1999	2035	65%	-423cm al 2033	2014	dic-07	-76,2	-75,0	diminuzione	119
BONACCIA NW	2015					set-15	n.d.	-59,8	n.d.	27
CALIPSO	2002	2025	81%	-85cm al 2026	2017	nov-07	-15	-14,8	diminuzione	116
CALPURNIA	2000	2022	99%	-14cm al 2015	2017	giu-07	-2	-1,4	diminuzione	110
CLARA EST	2000	2038	59%	-129cm al 2037	2017	nov-07	-13,4	-13,7	invariato	122
CLARA NW	2016			-97cm al 2061		mar-16	n.d.	-24,2	n.d.	21,5
CLARA NORD	2000	2021	99%	-34cm al 2016	2017	nov-07	-23,6	-22,1	diminuzione	122
ELETTRA	2014	2029	58%	-11cm al 2061	2017	lug-14	-23,6	-24,2	aumento	41
FAUZIA	2014	2020	94%	-5cm al 2068	2017	set-14	-5,5	-4,9	diminuzione	39
GUENDALINA	2011	2023	98%	-3cm al 2023	2014	ago-11	-5,4	-5,5	invariato	76
NAIDE	2005	2020	95%	-8cm al 2020	2017	giu-05	-3,4	-3,3	invariato	150
NAOMI - PANDORA	2001	2037	48%	-4,7cm al 2049	2017	giu-02	-1,5	-1,5	invariato	186
PCME (PMS)	2001	2014	100%	-5,4cm al 2020	2016	lug-05	-3,8	-3,7	invariato	149
REGINA	1997	2030	97%	-130cm al 2061	2017	giu-07	-25,5	-23,7	diminuzione	126
TEA - LAVANDA - ARNICA	2007	2018	103%	-5cm al 2018	2015	nov-07	-4,3	-3,7	diminuzione	122

Figura 12 - Velocità medie di “subsidenza totale” calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli

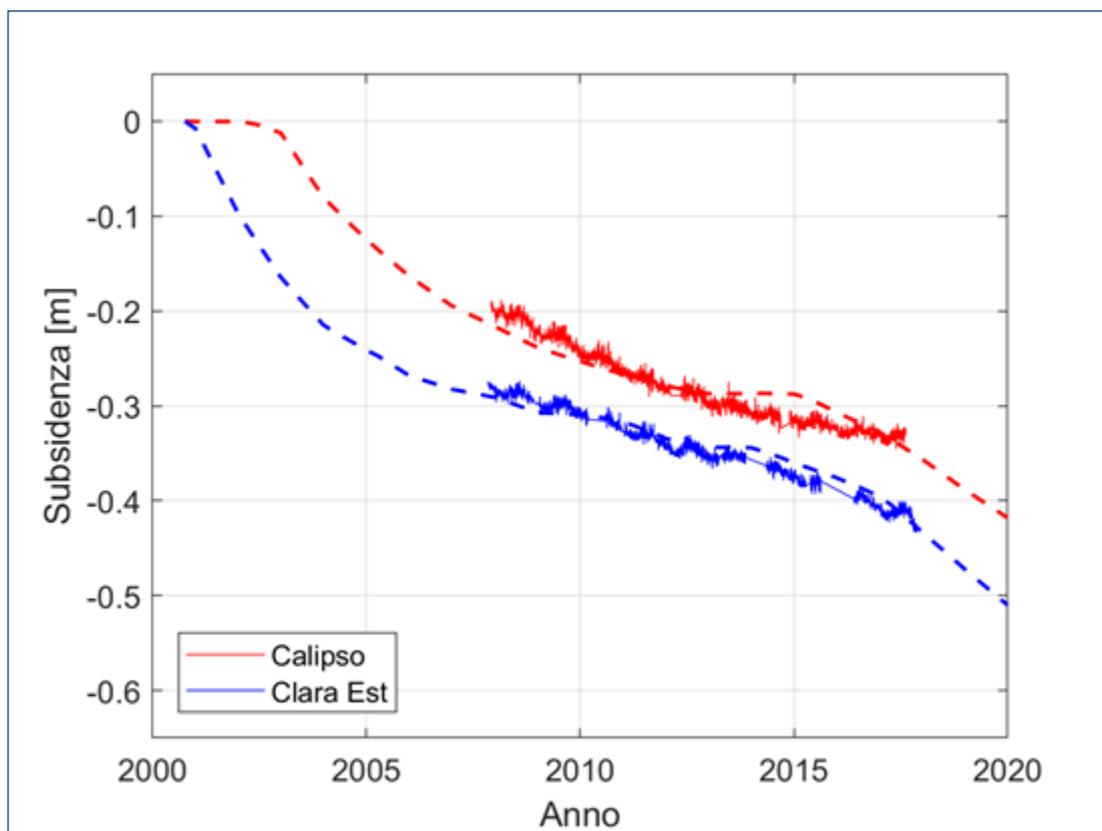


Figura 13 – Andamento della subsidenza misurata (CGPS in p.ma) comparata con la simulazione per i campi di Clara Est e Calipso.



campi CLARA EST- CLARA NW ( J.V. Eni 51% - Edison Gas 49% )			
DATI DI CAMPO		CLARA EST ( DEC VIA n. 4470 del 7/02/2000) - CLARA NW ( DEC VIA n. 227 del 17/09/2014)	
UBICAZIONE: offshore - 45 - 50 km a NE di Ancona		AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (CLARA COMPLEX)	
PROFONDITA' FONDALE: 73 / 76 m		SIA	
LITOLOGIA: sabbie fini		ULTIMO AGGIORNAMENTO	
FORMAZIONE RESERVOIR: CAROLA		MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 30 "ottobre '98"	
ZONA MINERARIA: PL01, PL0		Clara Complex - Agg. Studio di Giacimento per Geomeccanica, Rel. IPET-8056D689-0 (dicembre 2017)	
PROFONDITA' RESERVOIR: 750-1300 (TVDSS)		RISERVE (MSm <sup>3</sup> ): 3120	
TIPO DI PIATTAFORMA: BEAF		MOD. GEOMECCANICO: CILINDRICO	
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE: TORBIDITI SOTTILI		MAX SUBS AL CENTRO (cm): 10 (dopo 15 anni)	
		ELEMENTI FINITI (F.E.M.): @ DICEMBRE 2017	
		Clara E: 129 @ 2037 / Clara NW: 97 @ 2061	
		DISTANZA DALLA COSTA (km): #	
		29 @ 2061	
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI			
CONCESSIONE: B.C13.AS		LIVELLAZIONI: ACQUISITI I DATI DI LIVELLAZIONE, CERTIFICATI UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM, RELATIVI AGLI ANNI: # 1998-2006	
DATA SCADENZA CONCESSIONE: 27/05/2020		# 2006-2009 / 2011-2017	
N. POZZI (produttori): Clara Est: 4, Clara Nord Ovest: 0		IL PROSSIMO RILIEVO DELLA " DORSALE ADRIATICA " PESARO-PT.S.GIORGIO" SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2020 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO	
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm <sup>3</sup> ): 3120 / 5155		MARKERS: NON PRESCRITTI	
START UP PRODUZIONE: ott.2000		CGPS: NEL CORSO DEL 2007 e 2016 SONO STATI INSTALLATI, NELLE 2 PIATTAFORME DI CLARA EST e NW, I RISPETTIVI CGPS. NEL 2008 E' STATO INSTALLATO UN CGPS NELLA CENTRALE ENI DI FALCONARA (ONSHORE) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LE PIATTAFORME	
FINE PRODUZIONE PREVISTA: 2029 / 2038		SAR: ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ Dicembre 2017 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LE PIATTAFORME PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.ME CLARA E e CLARA NW NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA. ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	
GAS PRODOTTO (MSm <sup>3</sup> ): 3040		BATIMETRIE: ESEGUITO RILIEVO BATIMETRICO. DATA RILIEVO SETT.2007-FEBBRAIO 2008	
% RISERVE PRODOTTE: 59%			

Figura 14 – Campo di Clara Est: scheda di sintesi dati campo

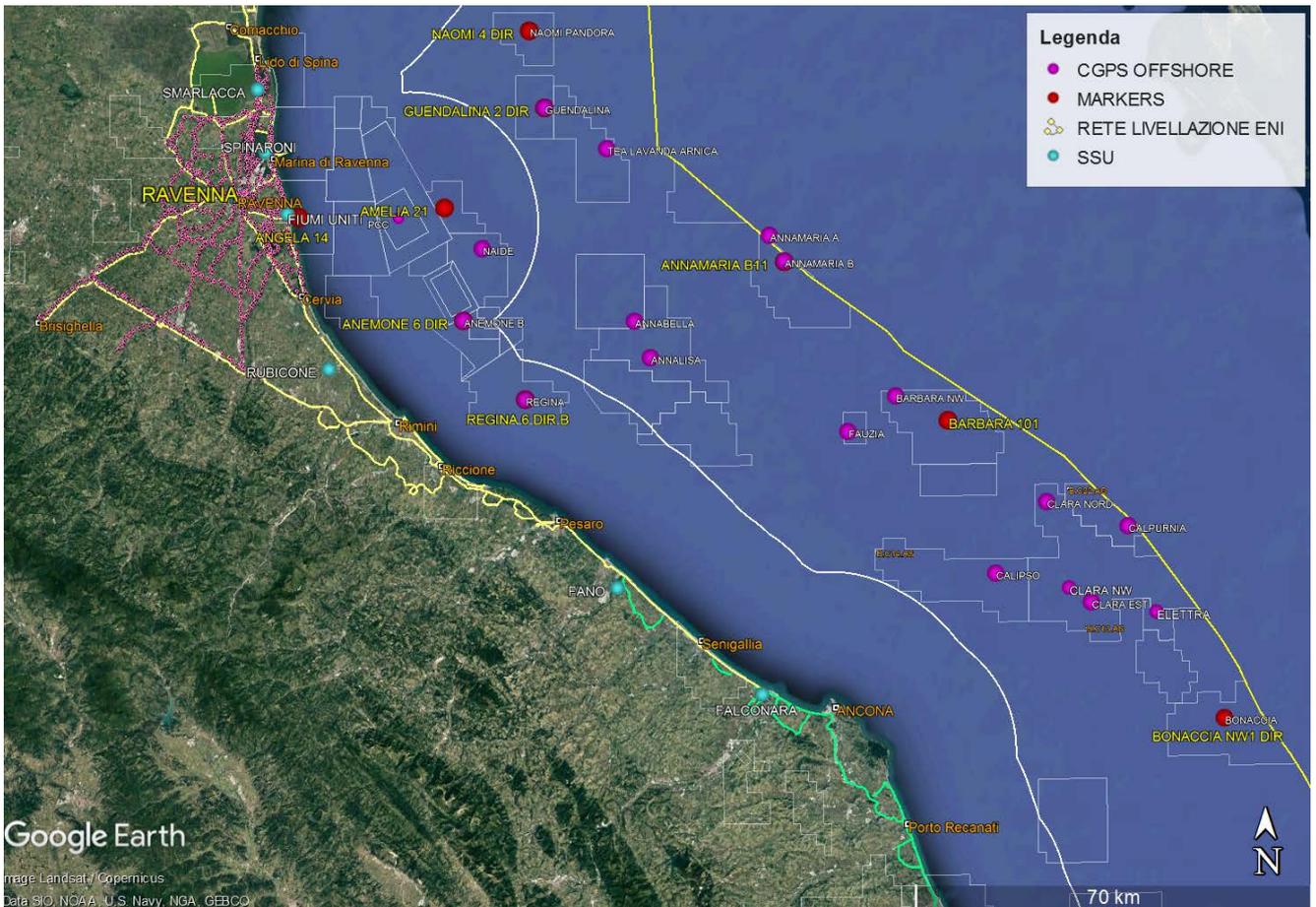


Figura 15 - Particolare della rete di monitoraggio Eni



## Appendice A: aggiornamento dati SAR 2003-2017

I dati InSAR del periodo 2003 – 2017 sono stati elaborati con un algoritmo diverso da quello utilizzato negli scorsi anni, essendo cambiato ad aprile 2017 il contrattista fornitore del servizio (Telespazio/e-GEOS).

Il nuovo algoritmo impiegato sarà descritto in seguito con maggior dettaglio (si veda la sezione “Tecnica PSP-DIFSAR”) allo scopo di evidenziare le differenze dei principali algoritmi utilizzati nell’elaborazione delle misure d’interferometria *radar*.

A valle dell’analisi dei dati interferometrici 2003 - 2017 si può, comunque, affermare che la qualità dei risultati ottenuti con il nuovo procedimento di elaborazione è del tutto comparabile con quella dei risultati riportati nella precedente relazione per il periodo 2003 – 2016.

### Analisi dati InSAR 2003 – 2017

L’analisi dei dati SAR ha interessato complessivamente dieci data-set, relativi ad altrettante aree geografiche, processati in modo tale da garantire continuità spaziale dei dati.

L’analisi delle differenze tra le componenti verticali delle velocità medie annuali di deformazione del suolo misurate dai CGPS installati nell’area in esame, e quelle ottenute dalle immagini SAR retroriflesse dai bersagli PS (*Permanent Scatterer*) situati in una zona circolare (raggio ca. 300 m) intorno alle corrispondenti stazioni CGPS (Tab. 1A), ha consentito d’accoppiare le suddette aree geografiche in solo due macro-aree, in modo tale da calibrare i dati InSAR minimizzandone le differenze di valore con le misure CGPS.

A tale proposito si veda la Tab.1A in cui sono riportate:

- sia la componente verticale della velocità media annua misurata dal CGPS (simbolo:  $V_{vert\_CGPS}$ ), sia il relativo scarto quadratico medio (simbolo:  $sqm\_CGPS$ );
- sia la media delle componenti verticali delle velocità medie annue registrate dai PS nell’intorno della corrispondente stazione CGPS (simbolo:  $Media\_V\_SAR$ ), sia il relativo scarto quadratico (simbolo:  $sqm\_SAR$ );
- la differenza tra le velocità CGPS e SAR e i relativi scarti quadratici medi (colonne 7 e 8).

Si noti che tutte le misure sono espresse in mm/a.

**Tab. 1A. Taratura dato InSAR con misure CGPS**

	CGPS	V_vert_CGPS [mm/a]	sqm_CGPS [mm/a]	Media_V_SAR [mm/a]	sqm_SAR [mm/a]	Vel (CGPS-SAR) [mm/a]	sqm_diff [mm/a]
RAVENNA	MANARA	-2,52	0,02	0,03	0,83	-2,55	0,85
	SMARLACCA	-6,18	0,01	-2,67	2,12	-3,51	2,13
	SPINARONI	-7,29	0,01	-3,28	1,64	-4,01	1,65
	FIUMI UNITI	-13,99	0,02	-10,96	2,66	-3,03	2,68
FANO-ANCONA	RUBICONE	-2,12	0,04	-2,90	2,03	0,78	2,07
	FANO	0,60	0,03	0,17	0,84	0,43	0,87
	FALCONARA	0,21	0,03	-0,13	1,46	0,34	1,49
	ITALGAS	0,56	0,03	0,47	0,90	0,09	0,93

Come si può osservare in detta tabella le differenze di velocità media tra le misure CGPS e quelle SAR hanno valori che si attestano a circa 3 mm/a per le prime quattro aree, mentre per le seconde quattro tali differenze sono dell'ordine di circa mezzo millimetro.

Per tale motivo si è scelto di mosaicare i dieci diversi data-set in due sole macro-aree denominate (Figura 1A):

1. Area di Ravenna che comprende le stazioni CGPS di Manara, Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti;
2. Area di Fano-Ancona che comprende le stazioni CGPS di Rubicone, Fano, Falconara e Italgas.

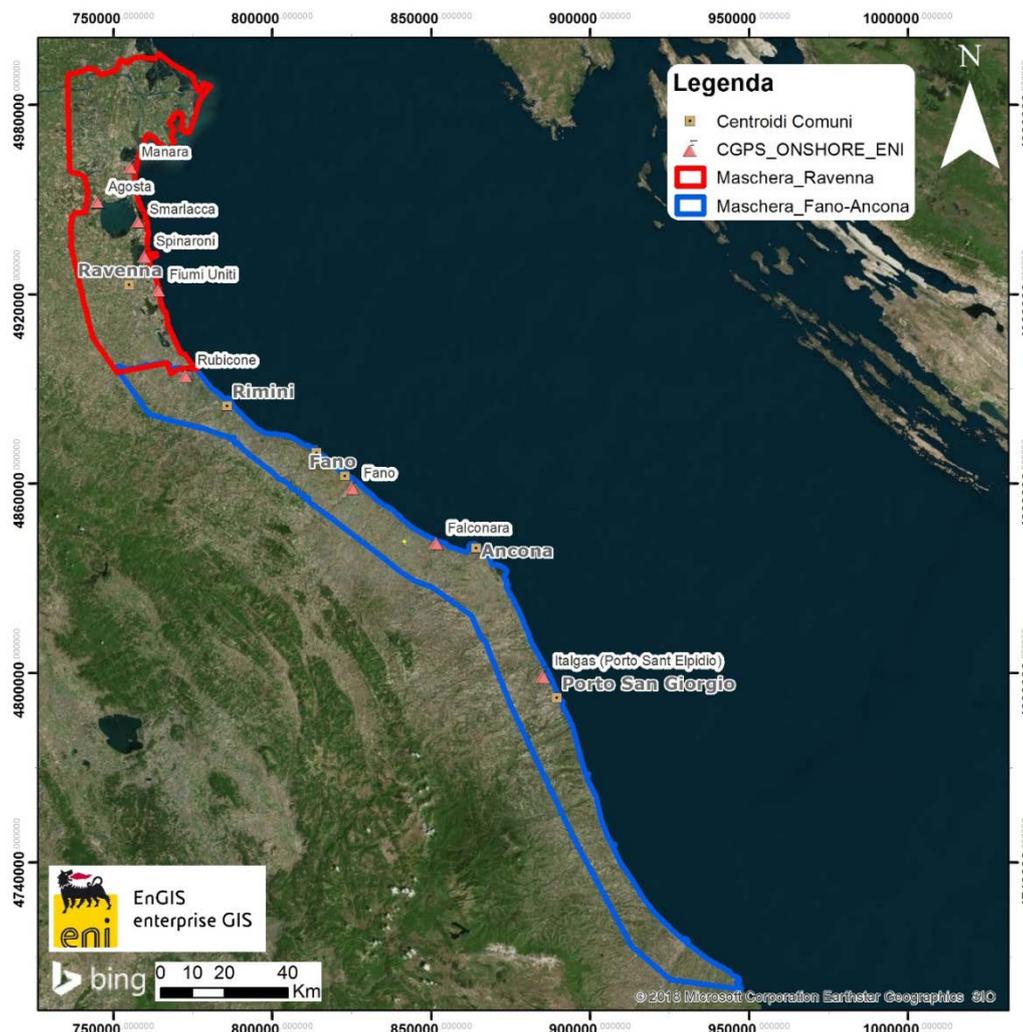


Fig.1A – Mappa mosaicatura dati InSAR

La calibrazione dei dati SAR è stata fatta con le misure CGPS acquisite nelle stazioni CGPS ubicate all'interno delle macro-aree analizzate, procedendo da quelle con la serie storica di dati più consistente (Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti dell'area di Ravenna).

Per il processo di calibrazione si sono utilizzate le misure della velocità verticale di deformazione del suolo dell'area SAR più a nord (area ravennate) e, in particolare, quelle della stazione di Smarlacca. I dati acquisiti nei siti di Fiumi Uniti, di Spinaroni e di Manara sono stati impiegati esclusivamente per la verifica dei risultati ottenuti dalla calibrazione.

Per la valutazione delle velocità verticali di deformazione del suolo fatta con le misure CGPS si è utilizzata tutta la serie storica disponibile di tali misure che, però, per le stazioni CGPS di Smarlacca, Spinaroni e Fiumi Uniti è iniziata a una data leggermente anteriore ri-



petto a quella d'inizio misure SAR. Si è, comunque, accertato che i valori di velocità così ottenuti differiscono in modo del tutto trascurabile ( $< 1$  mm/a) rispetto a quelli che si otterrebbero dagli stessi dati CGPS, utilizzando però una serie storica di misure leggermente ridotta, avente cioè la stessa data d'inizio di quella dei dati SAR.

L'analisi dei dati SAR non calibrati e acquisiti in un'area circolare (raggio di circa 300 m) intorno alla stazione CGPS di Smarlacca, ha consentito di stimare una velocità media d'abbassamento del suolo di  $-2,67 \pm 2,12$  mm/a. Dato che la corrispondente velocità media ottenuta dalle misure del CGPS di Smarlacca è di  $-6,18 \pm 0,01$  mm/a, si ha uno scostamento fra le due misure di  $-3,51 \pm 2,13$  mm/a. Ai valori di velocità media della componente verticale, determinata con il monitoraggio SAR, si è applicata, pertanto, una correzione pari a  $-3,51 \pm 2,13$  mm/a. Si sono poi confrontati tali dati SAR con le misure dei CGPS di Manara, di Spinaroni e di Fiumi Uniti considerando i punti SAR disponibili in un'area circolare (raggio pari a 300 m) intorno a tali stazioni. Il confronto ha mostrato differenze mediamente inferiori a 1 mm/a tra le misure CGPS e i dati SAR calibrati, confermando la bontà del procedimento seguito. In Figura 2A sono rappresentati i dati InSAR ottenuti a valle del processo di calibrazione per l'area di Ravenna nel tratto di costa da Porte Tolle a Cesenatico. Tali dati sono stati ricavati per interpolazione con un algoritmo di IDW (*Inverse Distance Weighted*) mediante *Tool ArcGis Spatial Analyst*<sup>®</sup>.





Come già effettuato nel 2016 (vedi relazioni 2017) l'altro data set (Area di Fano-Ancona, vedi Fig.1A), è stato analizzato separatamente da quello dell'area Ravennate in quanto, come spiegato in precedenza, per ciascuna delle due macro-aree una buona coerenza delle misure SAR con quelle delle stazioni CGPS ubicate al loro interno.

Con il consolidarsi della serie storica di dati SAR (14 anni circa) si è notato, inoltre, come la calibrazione in sequenza delle diverse aree – a partire da quella di Ravenna e impiegando un valore di calibrazione ottenuto come media di valori di velocità verticale nelle zone di frontiera tra le aree contigue - introduca un errore sistematico. Tale errore, che consiste in uno spostamento verticale fittizio probabilmente dovuto anche alla propagazione della varianza, non deve essere trascurato nelle calibrazioni “a catena”. L'analisi dell'area SAR dell'area di Fano-Ancona mostra che le velocità verticali di deformazione del suolo registrate dalle stazioni CGPS di Rubicone, di Fano, di Falconara e di Italgas sono del tutto allineate con quelle misurate dal SAR: la differenza è inferiore al millimetro. Si noti che il confronto è stato fatto per una zona circolare (raggio di ca. 300 m) intorno a ogni stazione, e che le velocità verticali dei dati SAR sono una media delle misure relative ai permanent scatterer che ricadono all'interno di tale zona. Si sono, pertanto, calibrati i dati InSAR dell'area Fano-Ancona con la misura della velocità media annua del CGPS di Fano, sommando ai primi il valore di  $+0.43 \pm 0,87$  mm/a. Si sono poi confrontate le misure calibrate dei punti SAR appartenenti a una zona circolare (raggio di ca.300 m) intorno alle stazioni CGPS di Rubicone, di Falconara e Italgas, con i corrispondenti dati CGPS acquisiti in tali stazioni. Il confronto mostra differenze che sono in media di circa mezzo millimetro a conferma della validità della calibrazione fatta. In Figura 3A è riportata l'interpolazione dei dati mosaicati per l'area Fano-Ancona nel tratto di costa da Rimini a Ortona. Anche in questo caso si è impiegato l'algoritmo di IDW (*Inverse Distance Weighted*) mediante *Tool ArcGis Spatial Analyst*<sup>®</sup>.

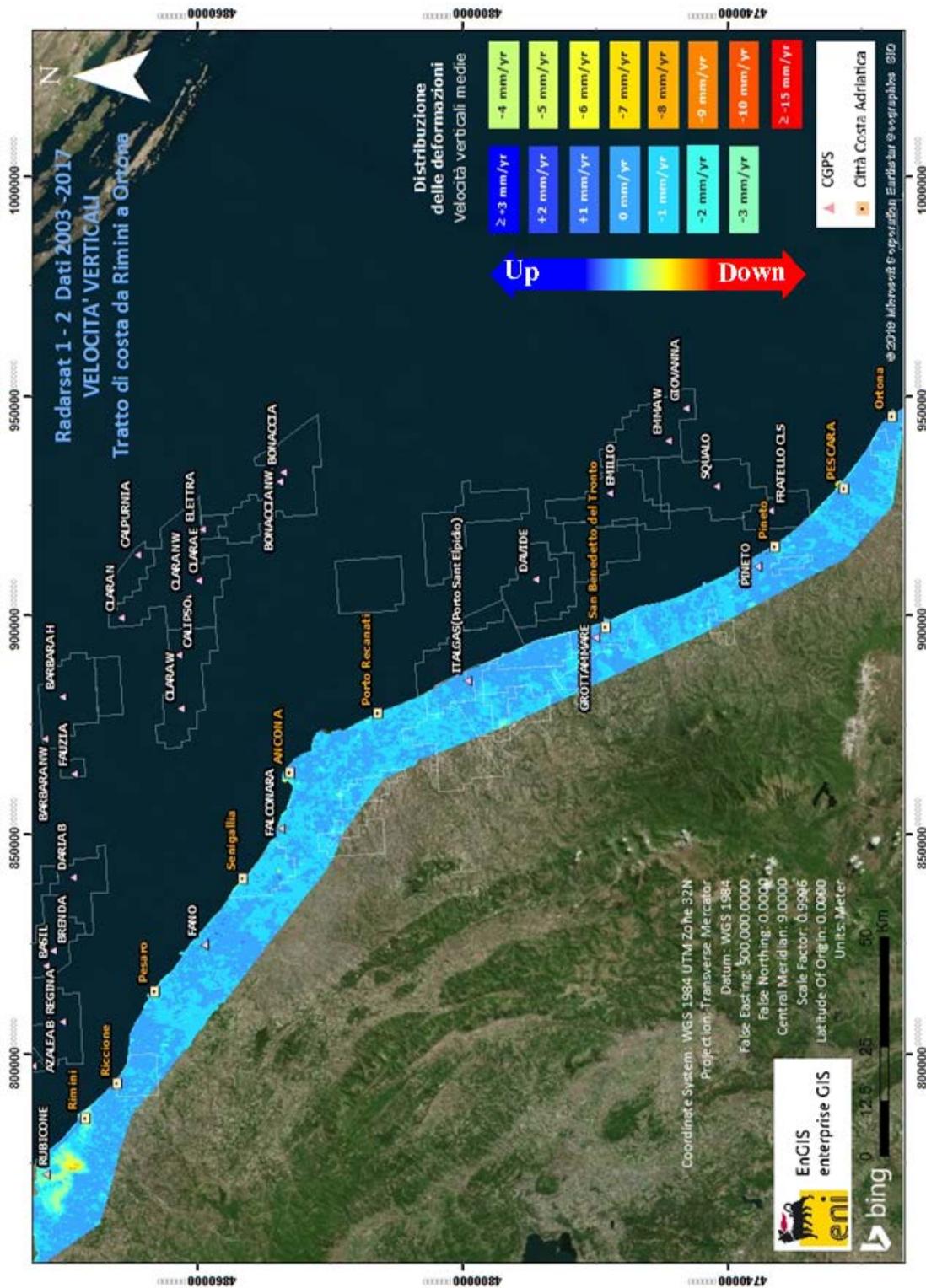


Fig.3A - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 - 2, per il periodo 2003 – 2017, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini a Ortona.



### **Confronto dati SAR 2003 – 2016 vs. 2003 – 2017**

Un confronto diretto tra i dati SAR relativi ai periodi 2003 – 2016 e i dati 2003 – 2017 per l'intero tratto di costa da Porto Tolle a Ortona non è fattibile in quanto, come già detto, le analisi dei dati SAR 2017 sono state effettuate con un algoritmo e perimetrazioni differenti rispetto all'anno precedente. Il confronto quantitativo sarà, pertanto, possibile solo quando saranno disponibili i dati acquisiti nel 2018.

### **Confronto dati SAR vs. Livellazione**

Si sono confrontate le velocità medie annue di subsidenza misurate con la livellazione geometrica con le corrispondenti velocità ottenute dai dati SAR calibrati e interpolati con algoritmo IDW (*Inverse Distance Weighted* con *Tool ArcGis Spatial Analyst*<sup>®</sup>).

Tale confronto, che è stato fatto con riferimento agli stessi capisaldi, non evidenzia differenze macroscopiche: entrambi i metodi di misura - tenuto conto della loro deviazione standard per effetto dell'errore strumentale - non presentano anomalie evidenti, come si può osservare nelle figure allegate.

In particolare, queste ultime sono così riferibili:

- alla tratta Codigoro-Cervia: Figure 4A e 5A,
- alla tratta Cervia-Pesaro: Figure 6A e 7A;
- alla tratta Pesaro-Porto San Giorgio: Figure 8A e 9A.

In quest'ultima tratta (Pesaro - Porto San Giorgio) si notano alcuni improvvisi picchi (“*spikes*”) nei valori di velocità di subsidenza delle livellazioni che non compaiono nei corrispondenti valori di velocità da misure SAR. Tali anomalie potrebbero essere state causate da instabilità dei relativi capisaldi, e saranno, quindi, oggetto di specifici controlli nelle prossime campagne di livellazione.

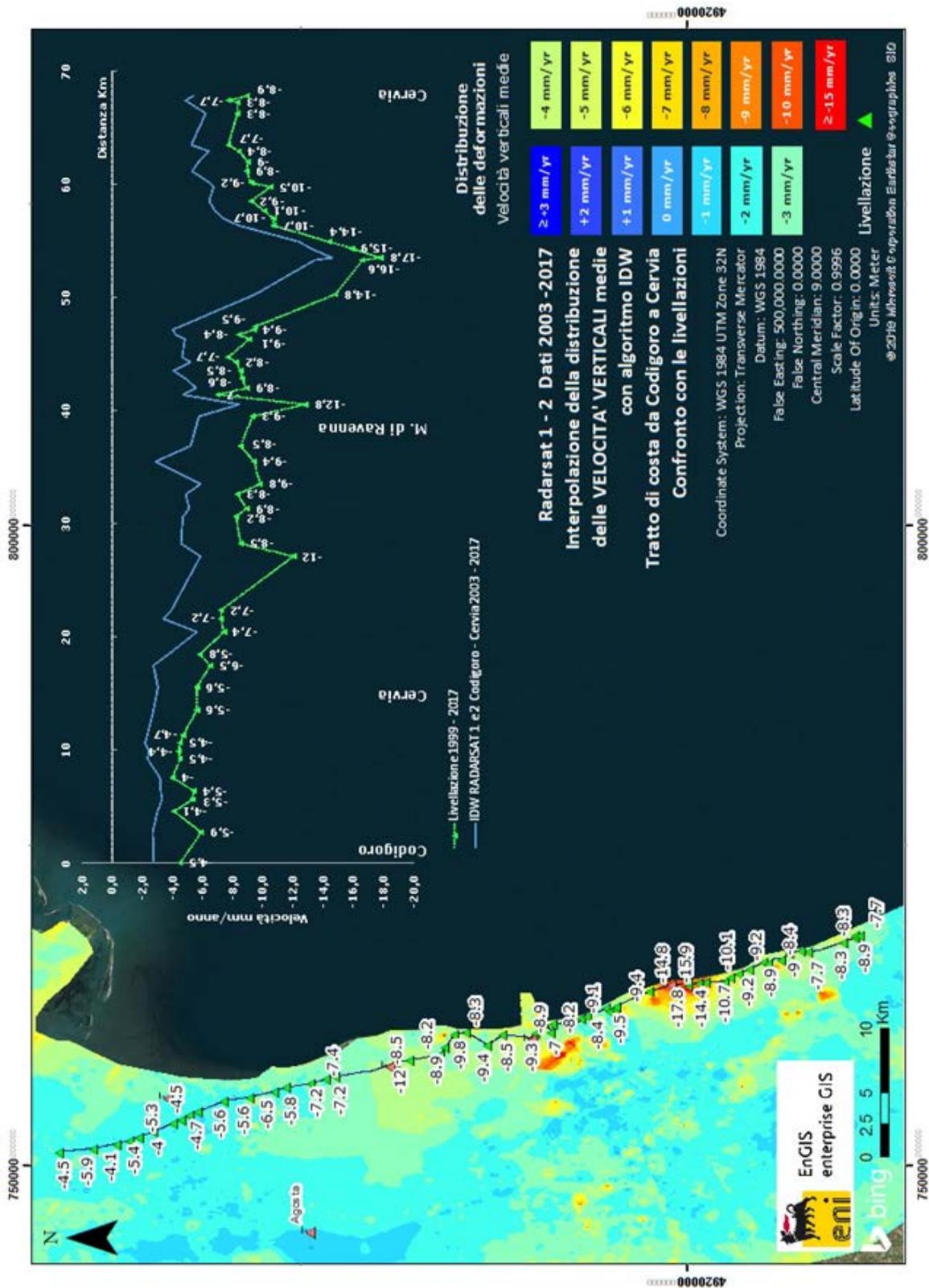
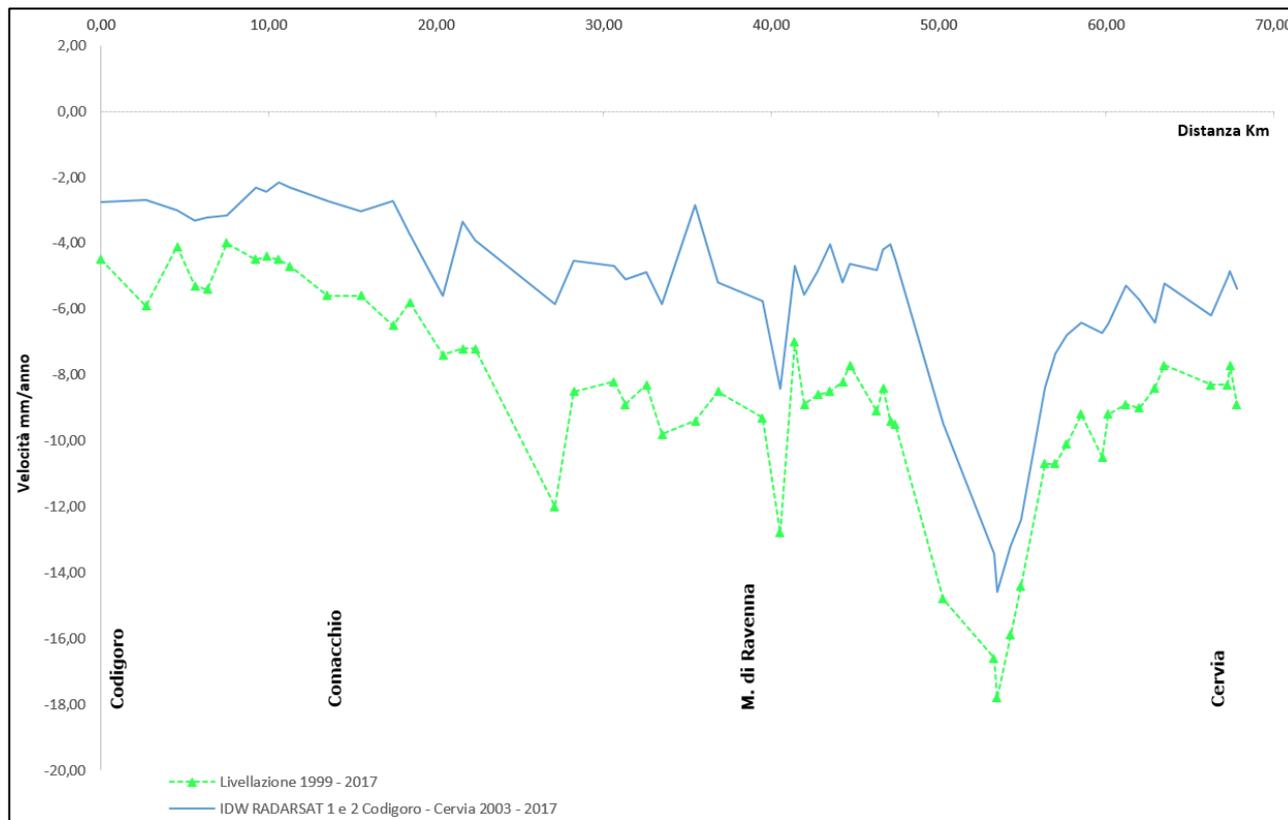


Fig. 4A – Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Codigoro - Cervia



**Fig. 5A - Dettaglio del grafico di confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Codigoro – Cervia. Non si notano delle anomalie, i due metodi descrivono lo stesso andamento**

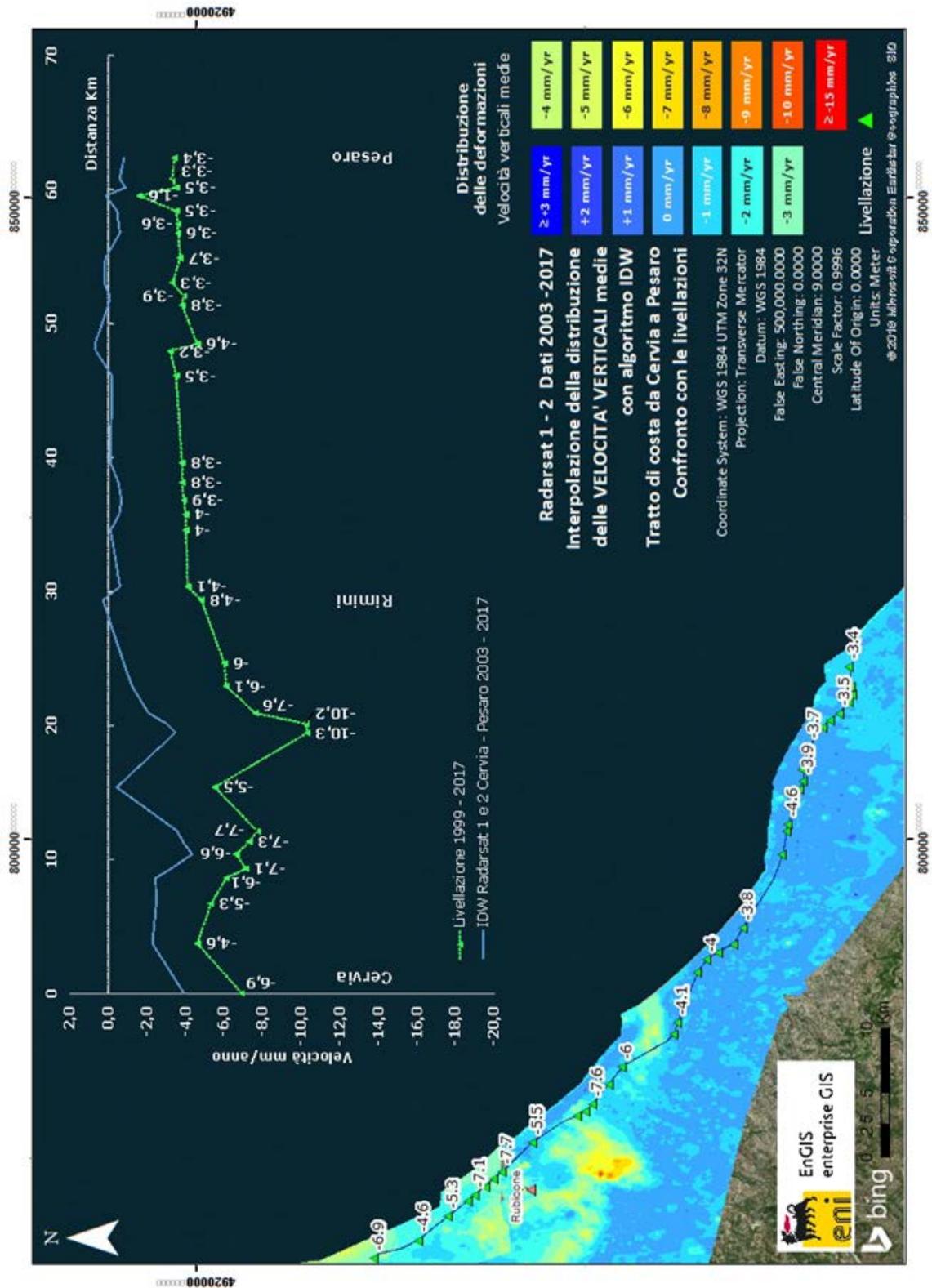
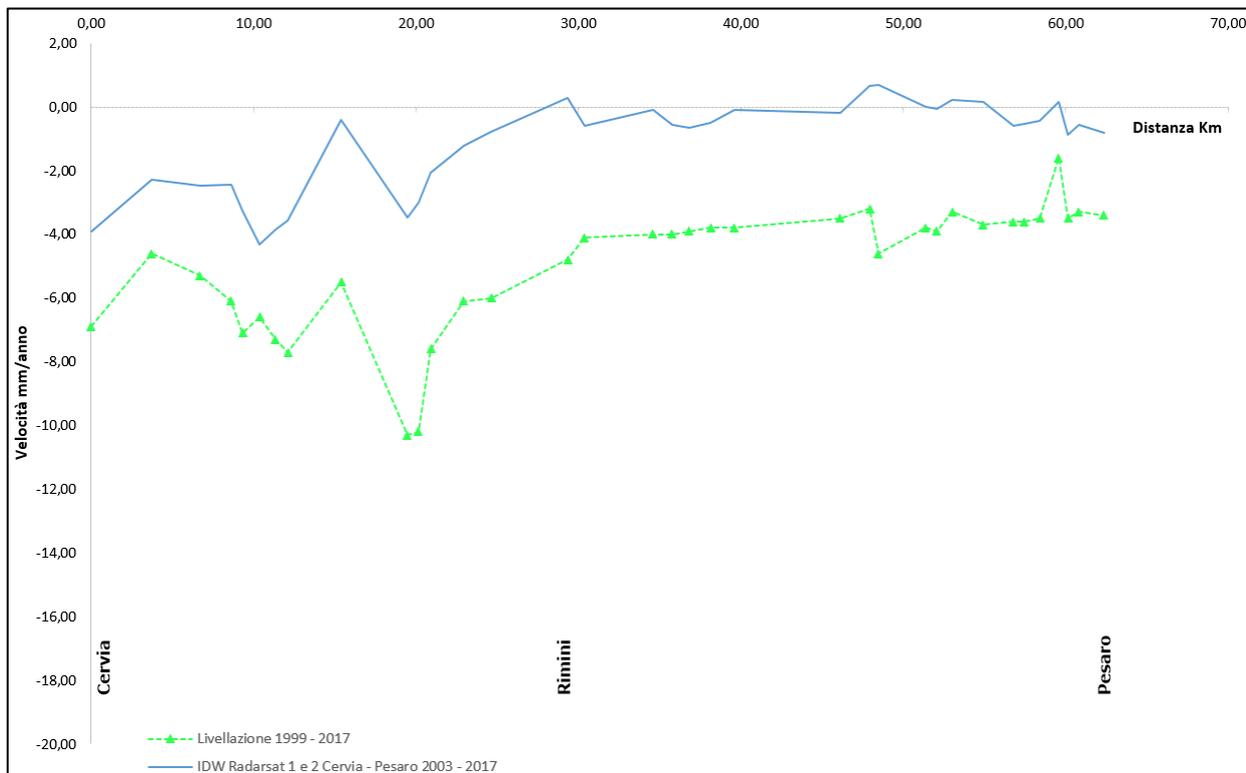


Fig. 6A - Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Cervia – Pesaro



**Fig. 7A – Dettaglio del grafico di confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Cervia – Pesaro. Non si notano delle anomalie, i due metodi descrivono lo stesso andamento**

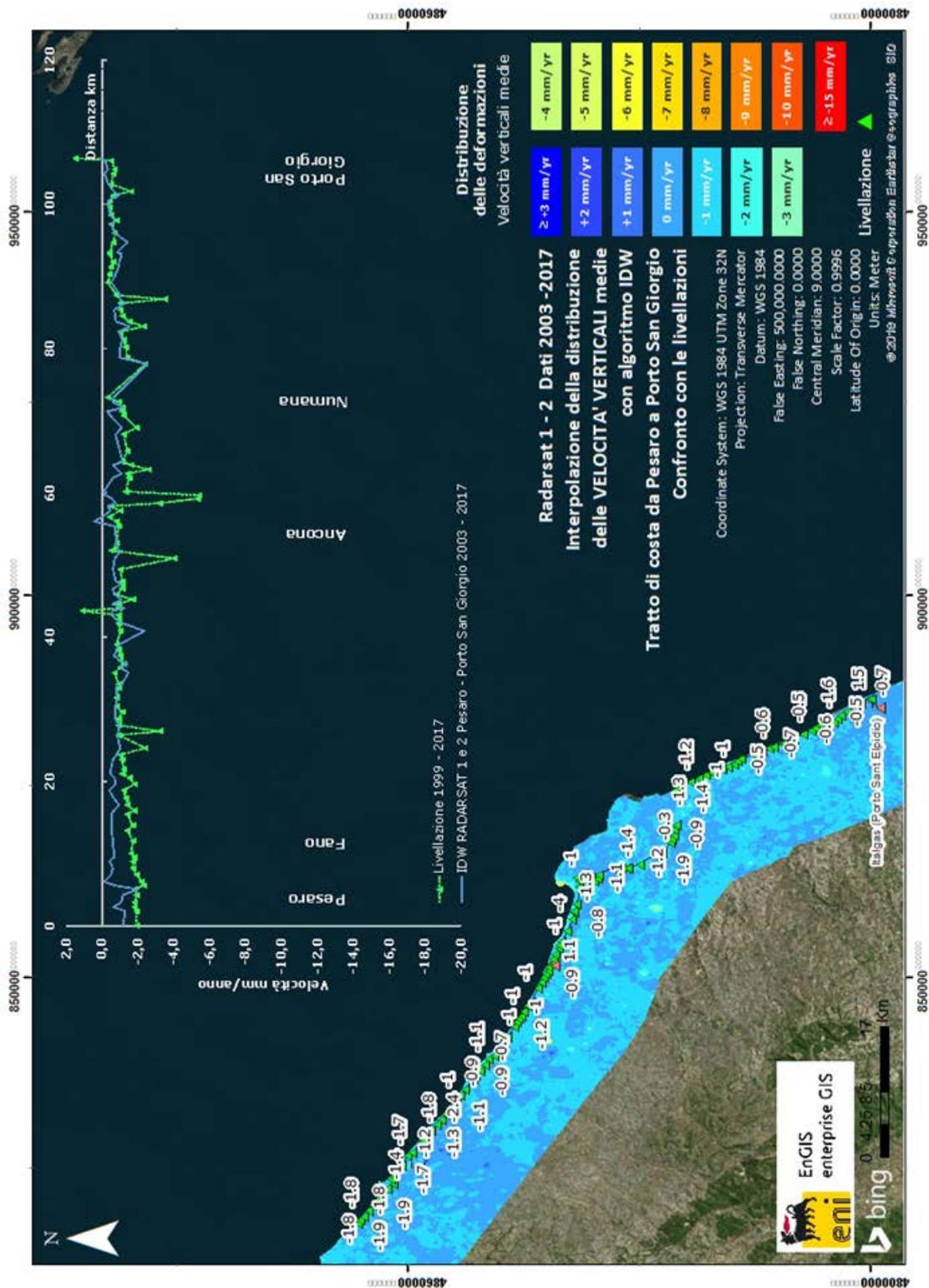
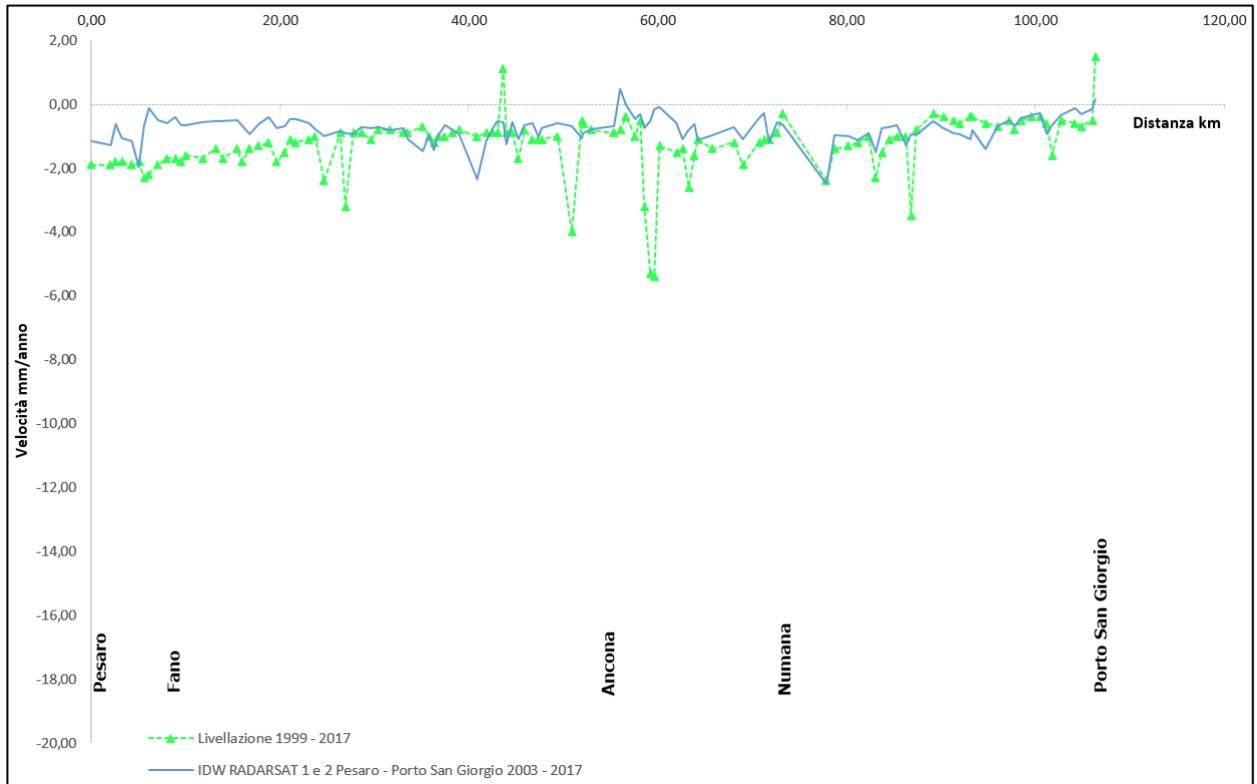


Fig. 8A - Confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Pesaro – Porto San Giorgio



**Fig. 9A - Dettaglio del grafico di confronto tra il database Radarsat 1-2 per il periodo 2003-2017 e le livellazioni del periodo 1999-2017, lungo il tratto Pesaro – Porto San Giorgio. Non si notano delle anomalie, i due metodi descrivono lo stesso andamento**



### **Tecnica PSP-DIFSAR (Estratto dalle Linee guida MATTM 2009)<sup>3</sup>**

La tecnologia 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 Scatterers* (PS) su lunghe serie di immagini SAR (radar ad apertura sintetica), allo scopo di misurare lenti movimenti del terreno causati da frane, da subsidenza o sollevamento del suolo per estrazione o iniezione di fluidi, da fenomeni vulcanici e sismici, da scavi in sotterraneo, ecc.

I PS sono bersagli riflettenti le onde radar e costituiti in genere da "oggetti" presenti sul terreno, quali manufatti (ad es., parti di edifici, antenne, tralicci, elementi metallici ecc.) ovvero corpi naturali (ad es., rocce esposte), che si distinguono rispetto ad altre strutture dell'area esaminata per il fatto di possedere un'elevata stabilità nel tempo della cosiddetta "firma radar". Questi "oggetti" hanno caratteristiche riflettometriche tali da consentire misure estremamente accurate della distanza sensore-bersaglio e, quindi, tali da poter rilevare spostamenti anche millimetrici dei PS nel tempo.

L'interferometria differenziale impiega un sensore SAR installato a bordo di un satellite che invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre e ne riceve di ritorno 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 una zona interessata da fenomeni di deformazione superficiale, il sensore, investigando con regolarità in tempi successivi la stessa area, ne registra gli eventuali spostamenti. I dati acquisiti, 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.), rendono possibili valutazioni accurate anche di movimenti superficiali lenti dell'area investigata. Una delle caratteristiche particolari 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 Scatterers*. Infatti, due punti vicini sono affetti allo stesso modo da artefatti atmosferici e orbitali, e in generale da tutti i contributi correlati spazialmente (anche i movimenti non lineari nel tempo).

---

<sup>3</sup> Le informazioni riportate in questa sezione sono tratte dalla versione 1.0 del rapporto: "Linee Guida per l'Analisi di Dati Interferometrici Satellitari in Aree Soggette a Dissesti Idrogeologici", emesso da **MATTM-Direzione Generale di Difesa del Suolo** nel Dic. 2009 ([www.pcn.minambiente.it/GN/images/documenti/](http://www.pcn.minambiente.it/GN/images/documenti/)).



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;
- permette una migliore identificazione di PS in terreni naturali e di PS caratterizzati da movimenti non lineari nel tempo;
- in aggiunta consente procedure di calcolo molto efficienti ed altamente parallelizzabili.

La densità dei PS individuati è solitamente molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e di aree rocciose mentre è praticamente nulla nelle zone con molta vegetazione o perennemente innevate. L'insieme dei PS sul territorio costituisce una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una rete di stazioni CGPS (*Continuous 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 2017

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.

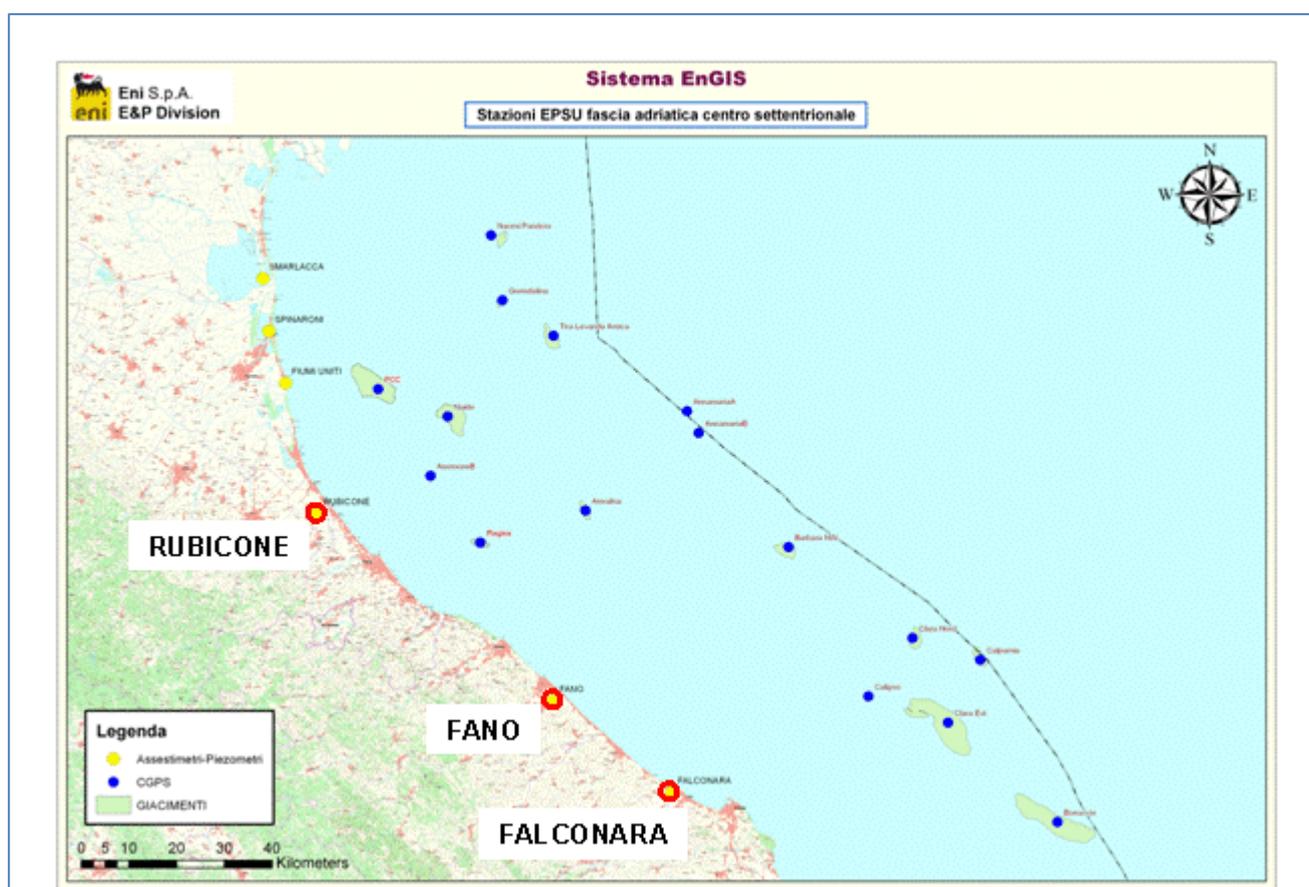


Figura 1B - Ubicazione delle stazioni *EPSU*

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.

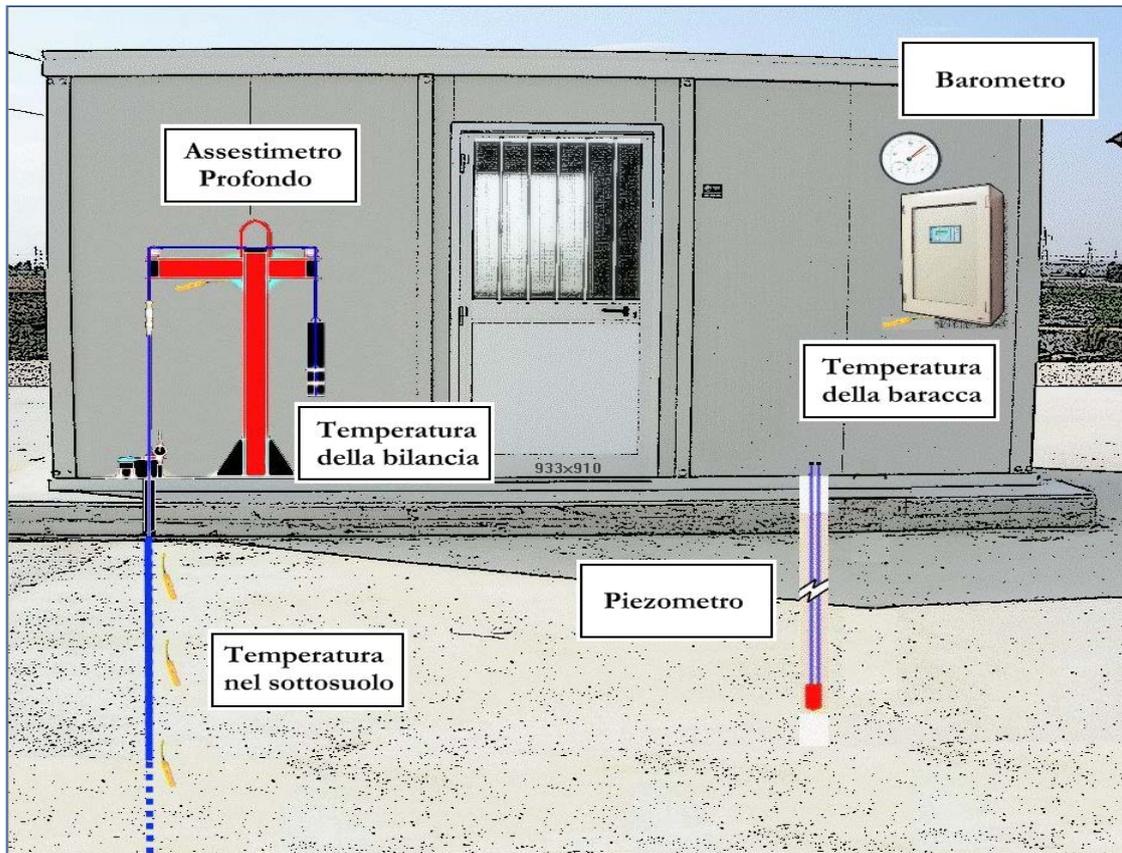


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione *EPSU*

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

Località	Pozzo	Strumentazione	Profondità (da P.C.)	Data d'installazione
Rubicone	CGRA-1	Assestometro 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	Assestometro superficiale	40,8 m	Lug. 2008
	CGFNP-1	Piezometro superficiale	6,1 m	Lug. 2008
Falconara	CGFLA-1	Assestometro 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'assestometro); al contrario i valori negativi costituiscono la componente dell'espansione (aumento dello spessore dello strato di sottosuolo attraversato dall'assestometro).



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

### **Strumentazione:**

- assestometro - 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 dalle Figure 3B e 4B, mentre la Figura 5B presenta in dettaglio la litologia dei terreni attraversati dai terreni attraversati dal pozzetto piezometrico.

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°09' 6.76"N e 12° 24' 36.37"E.

La raccolta dati di questa stazione 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 dei dati per mancanza di alimentazione dell'apparecchiatura tra il 29 settembre e il 14 ottobre. L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta nel dicembre 2017. Sempre a dicembre è stata effettuata una attività di manutenzione straordinaria di spurgo e lavaggio dei tre piezometri della stazione. Per i due piezometri ubicati sulla stessa verticale - quello superficiale e l'intermedio (70 e 146m da p.c.) - il lavaggio con acqua in pressione ha consentito di escludere che vi sia 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 sottoposti a manutenzione sono risultati fisicamente integri e attendibili al fine della restituzione dati.



## 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  $1,5 \div 2$  mesi nella espansione/compattazione del terreno rispetto all'escursione massima (marzo/aprile) e minima (agosto/settembre) dei livelli di tali falde. 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 7B). 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  $-2,1$  mm/a, abbastanza prossima a quella ottenuta in modo analogo dalle misure assestimetriche che è pari a  $-2,7$  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 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 al piezometro 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. Tutti i piezometri e relativi trasduttori sono, quindi, risultati integri e in grado di fornire dati attendibili.

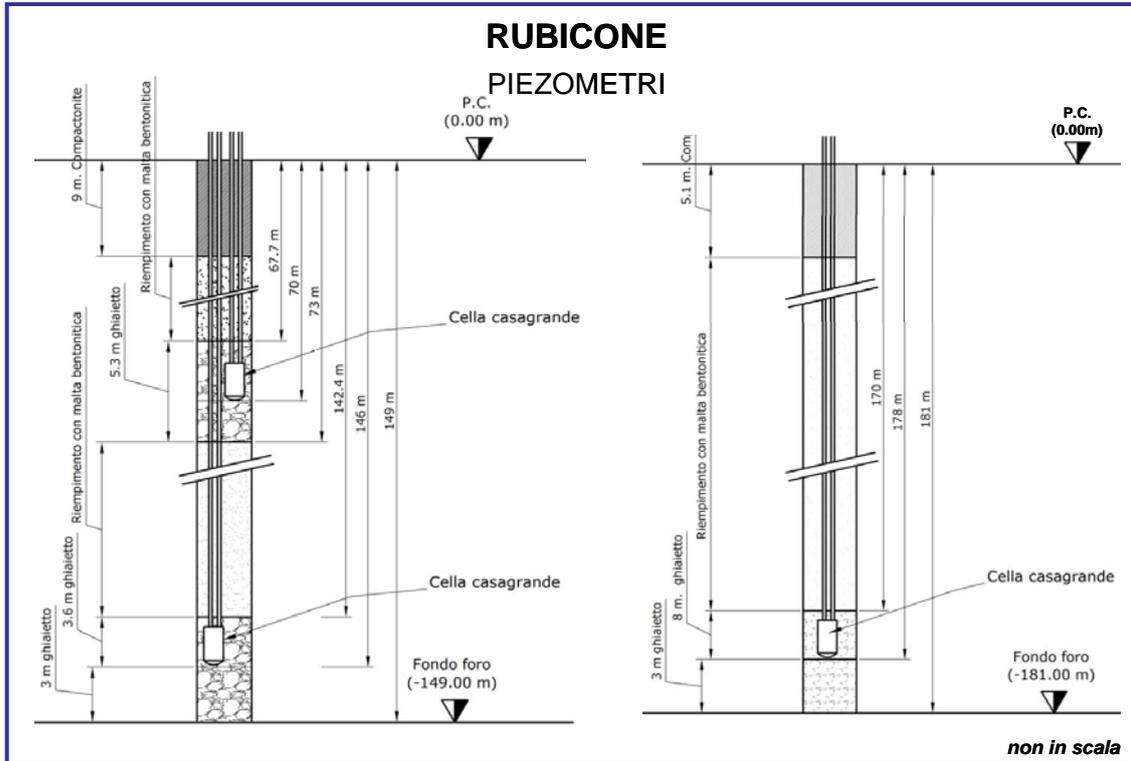


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Rubicone

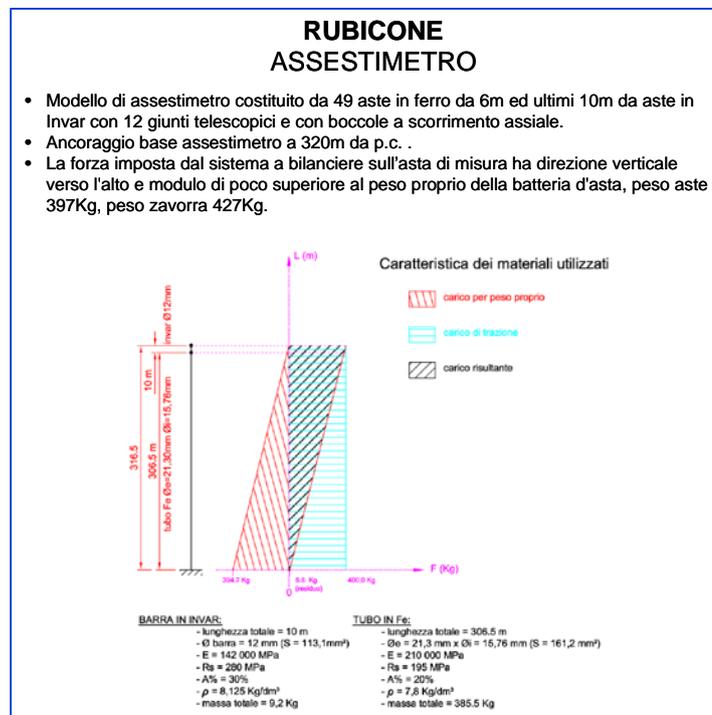


Figura 4B - Particolare di un assestimetro

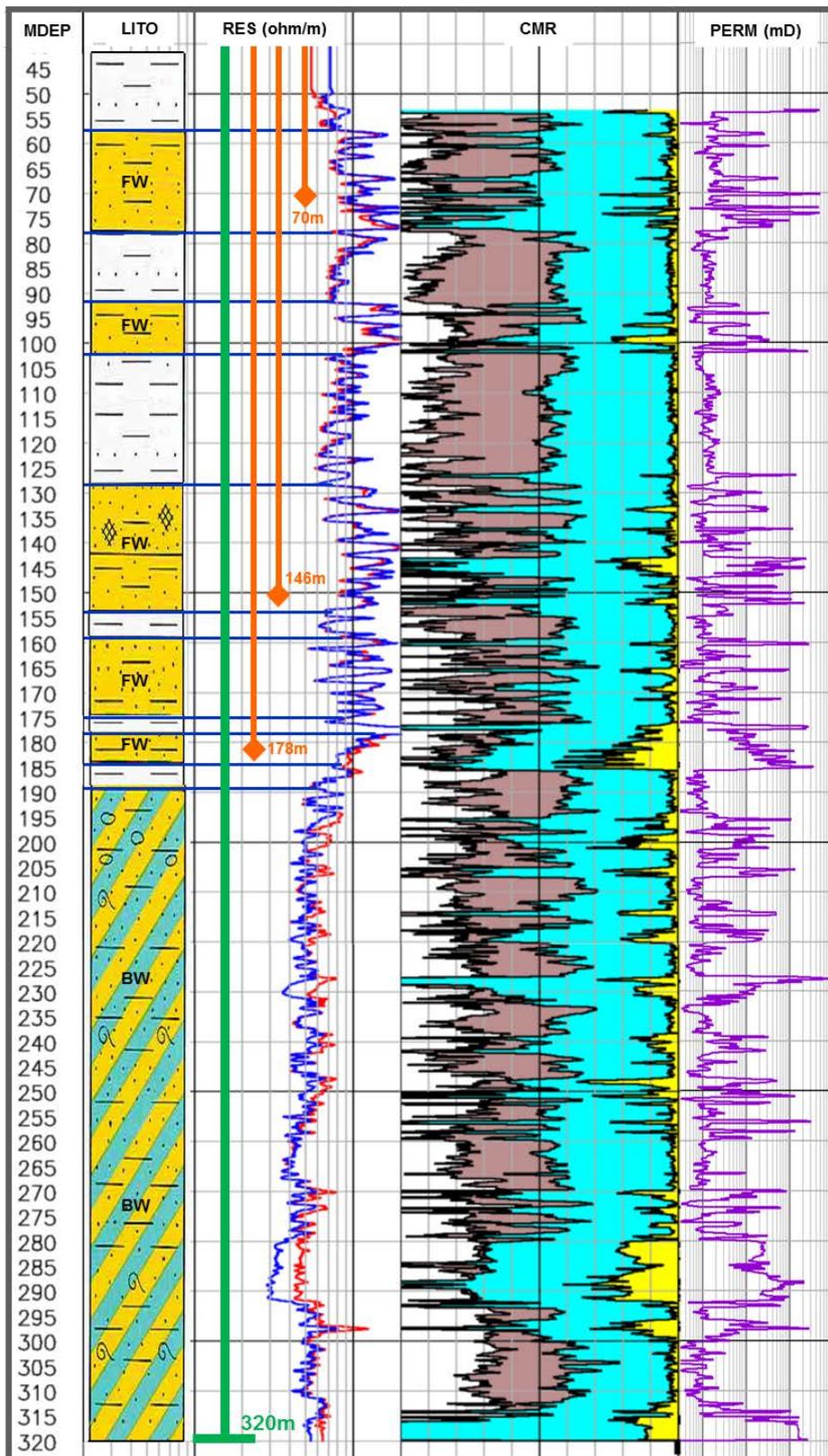


Figura 5B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Rubicone

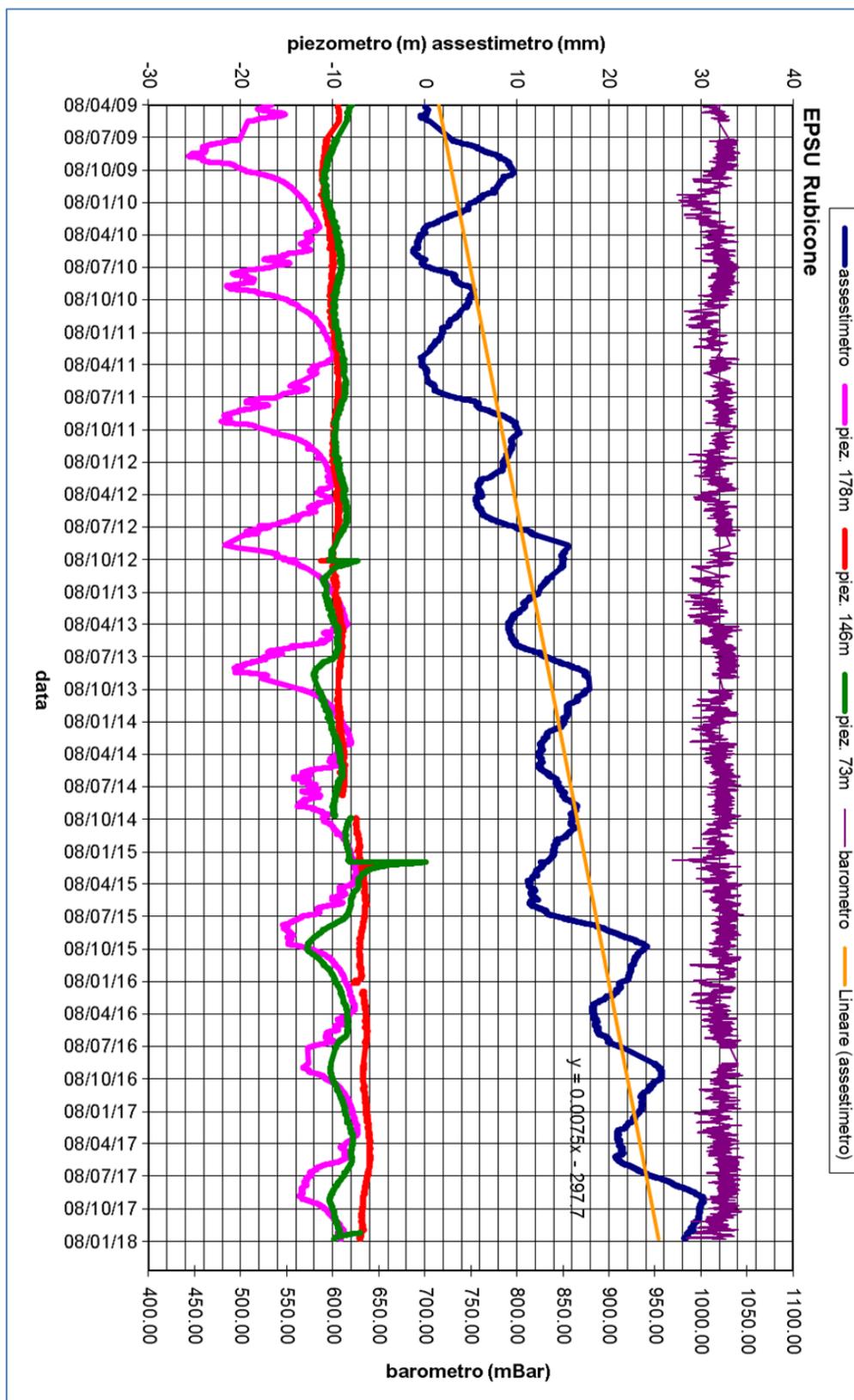
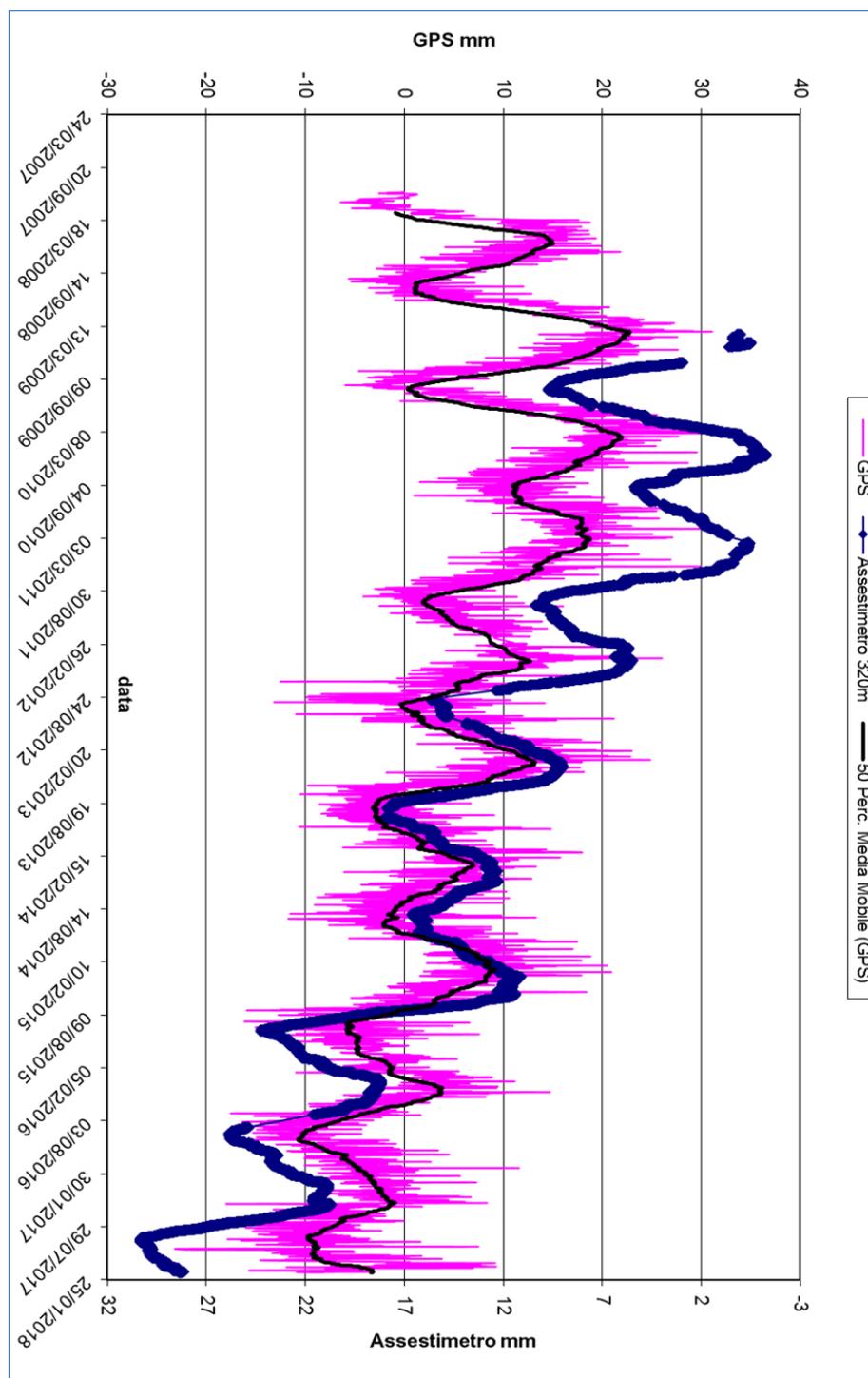


Figura 6B - Stazione *EPSU* di Rubicone: misure piezometrico-assestimetriche dal 2008 al 2018 inclusi i dati barometrici



**Figura 7B - Stazione EPSU di Rubicone: confronto misure CGPS vs. misure assestimentriche.**

*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 assestimentrica 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:**

- assestometro - 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 8B, mentre la Figura 9B 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. A 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 dicembre 2017.

### **Analisi dei dati assestimetrici**

L'assestometro 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 10B) sono riportati per un confronto sia i dati piezometrici, sia quelli assestimetrici. I dati relativi all'assestometro 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'assestometro 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 2017 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), per ritornare poi a un valore di circa 1 mm (compattazione) nel periodo autunno-invernale.

Per tutto il 2017 l'assestimetro registra, quindi, una compattazione complessiva di ca. 1 mm. Se si prendono in esame tutti le misure assestimetriche registrate nei nove anni di osservazioni in questa stazione, queste ultime mostrano, analogamente a quelle di Falconara, una situazione del terreno sostanzialmente stabile, con una compattazione complessiva pressoché nulla, 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. 0,6 mm/a. A sua volta la velocità media di compattazione stimata con regressione lineare dei dati della serie assestimetrica è praticamente nulla (0,003 mm/a). L'esame comparato delle due serie di misure (assestimetriche e geodetiche CGPS - Figura 11B) 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 geodetica. 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 geodetica 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 tre/quattro mesi dopo il massimo del livello piezometrico. Questo comportamento potrebbe essere spiegato dal ritardo con cui si contrae o rigonfia un grosso strato d'argilla (ca. 32 m) quando varia la sua saturazione in



acqua. La presenza di tale strato d'argilla è stata rilevata durante la perforazione del foro assestometrico. La curva dei dati CGPS sembra invece più in fase con le variazioni del livello d'acqua nella falda. La curva dei dati CGPS sembra invece più in fase nel registrare in superficie i movimenti d'espansione e contrazione degli strati di terreno causati dalle variazioni del livello d'acqua nella 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 11B):

- 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).

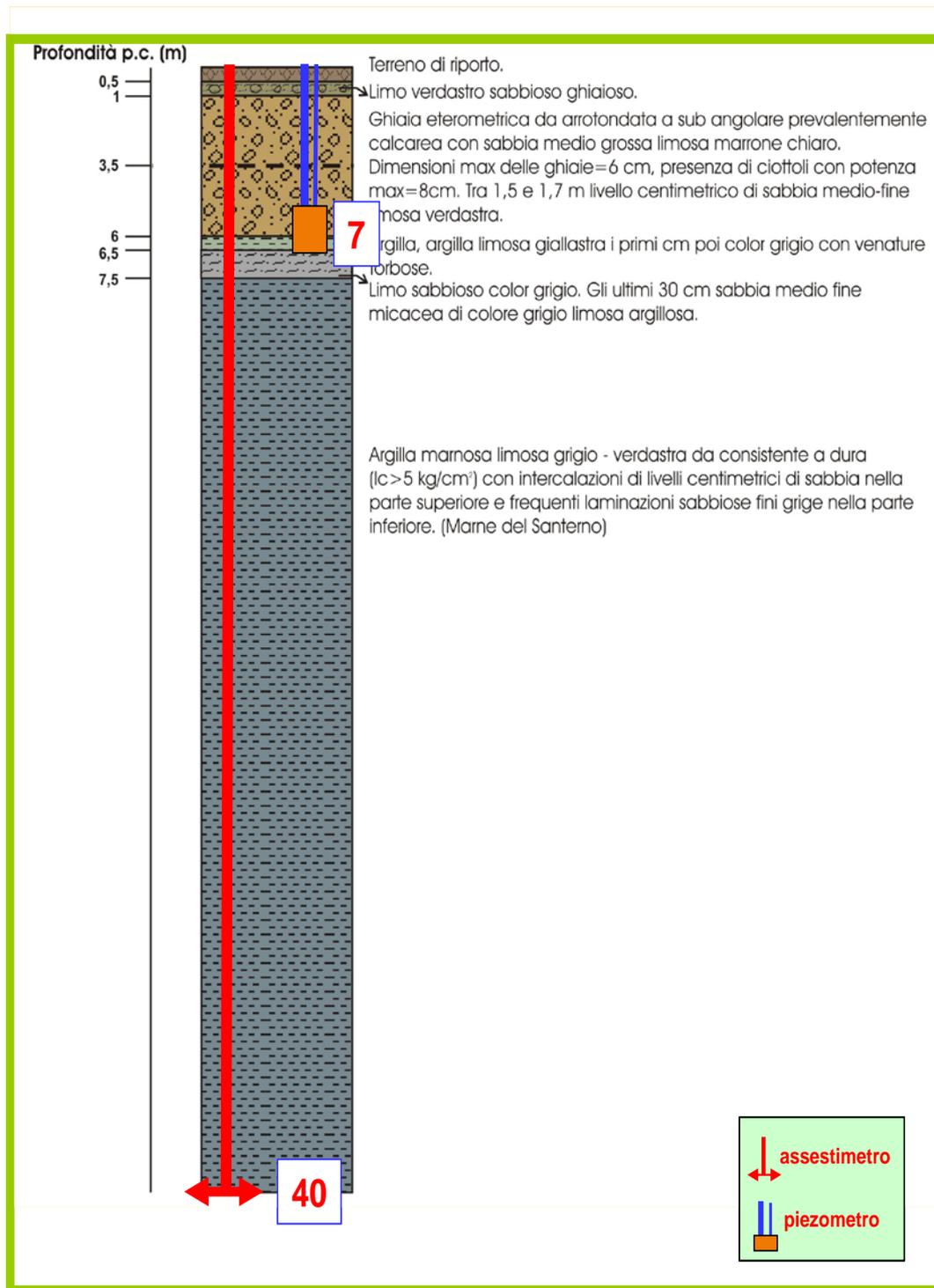
### **Analisi dei dati piezometrici**

Nello stesso grafico (Figura 10B) dei dati assestometrici 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  $\pm 8$  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 fatto nel dicembre 2017.



Figura 9B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione *EPSU* di Fano

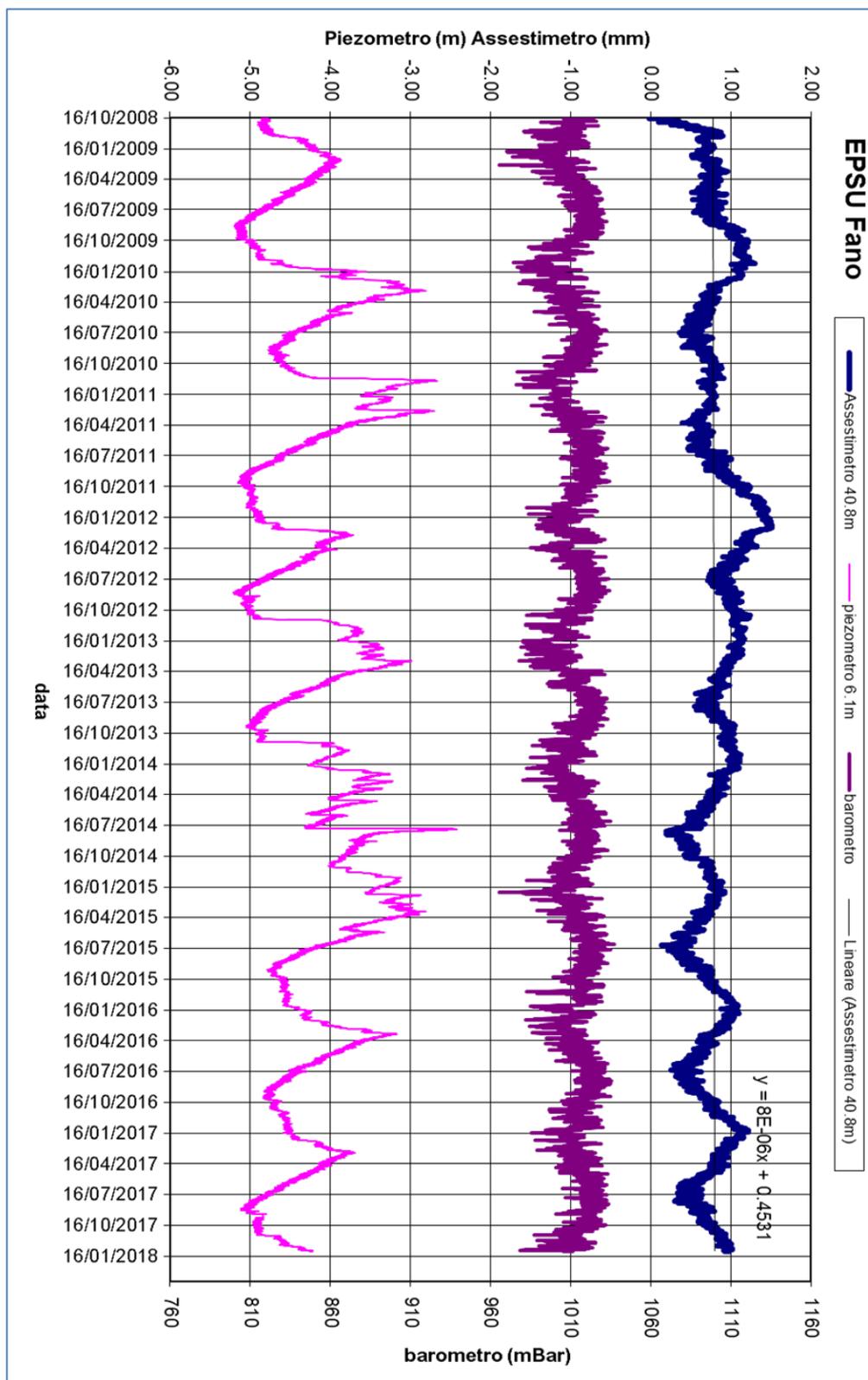


Figura 10B - Stazione EPSU di Fano: misure piezometrico-assestimetriche e dati barometrici dal 2008 al 2018

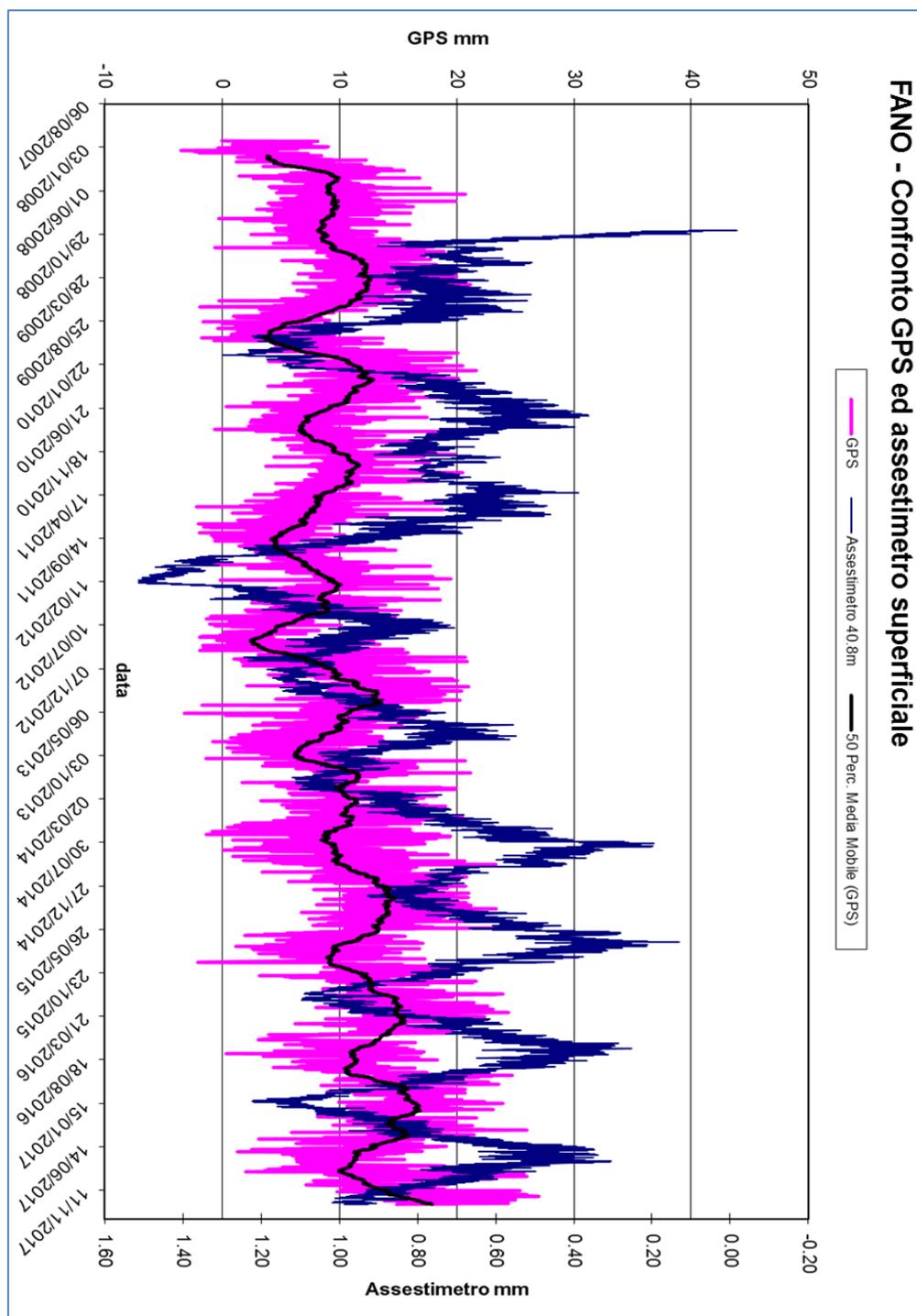


Figura 11B - Stazione EPSU di Fano: confronto fra misure CGPS vs. misure assestimetriche

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:**

- assestometro - 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 12B, mentre la Figura 13B 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 nel dicembre 2017.

### **Analisi dei dati assestimetrici**

L’assestometro 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 14B). I dati relativi all’assestometro 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’assestometro indicano una compattazione e, viceversa, quelli 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.

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 espansione 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 geodetica (Figura 15B), 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 +0,2 mm/a (ovvero leggerissimo sollevamento della superficie del suolo).

Si segnala, inoltre, che per comodità di lettura del grafico (Figura 15B):

- 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 dicembre del 2017 è stata fatta l'ultima manutenzione ordinaria della stazione e sono

stati controllati anche i piezometri. In tale occasione si è misurato manualmente con un frea-  
timetro il livello 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.

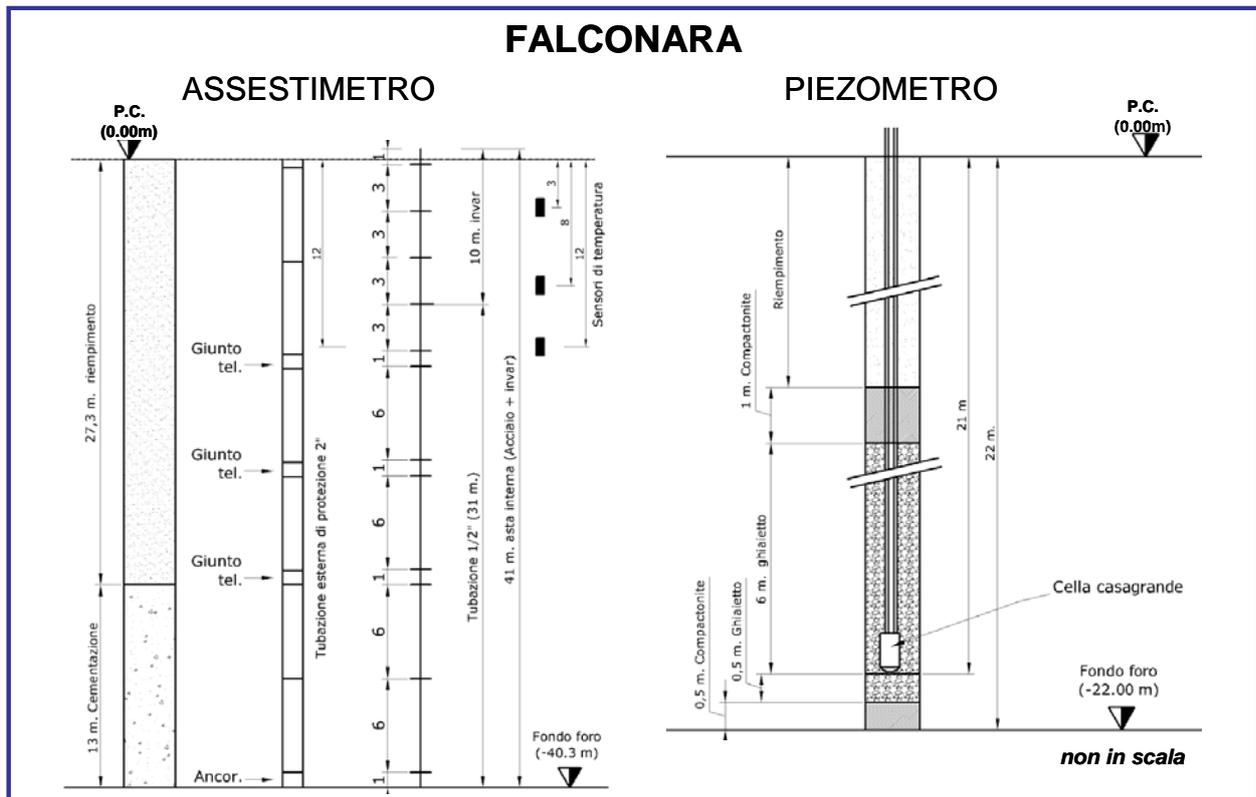


Figura 12B - Schema della stazione EPSU di Falconara

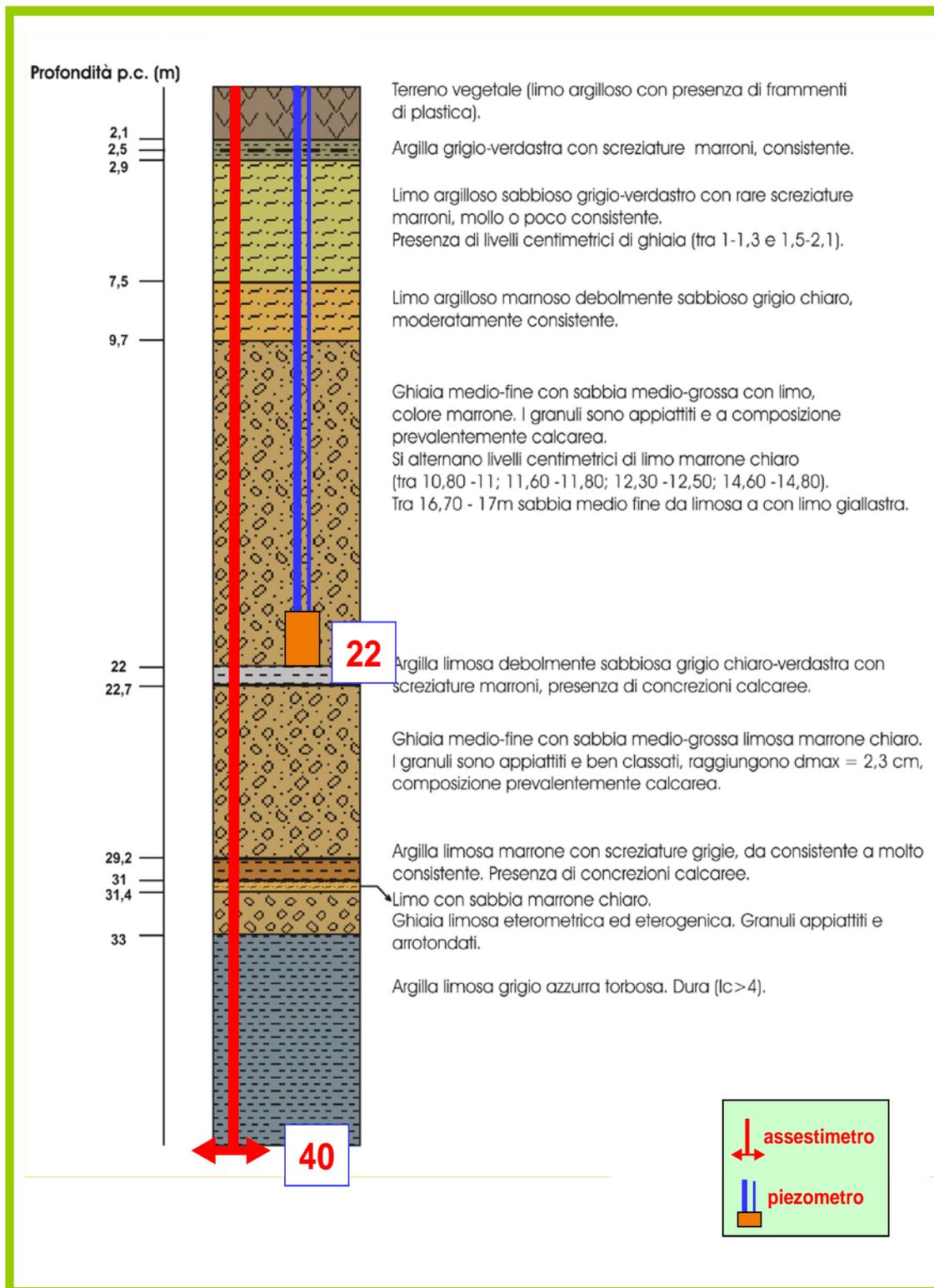


Figura 13B - Litologia dei terreni monitorati dalla stazione EPSU di Falconara

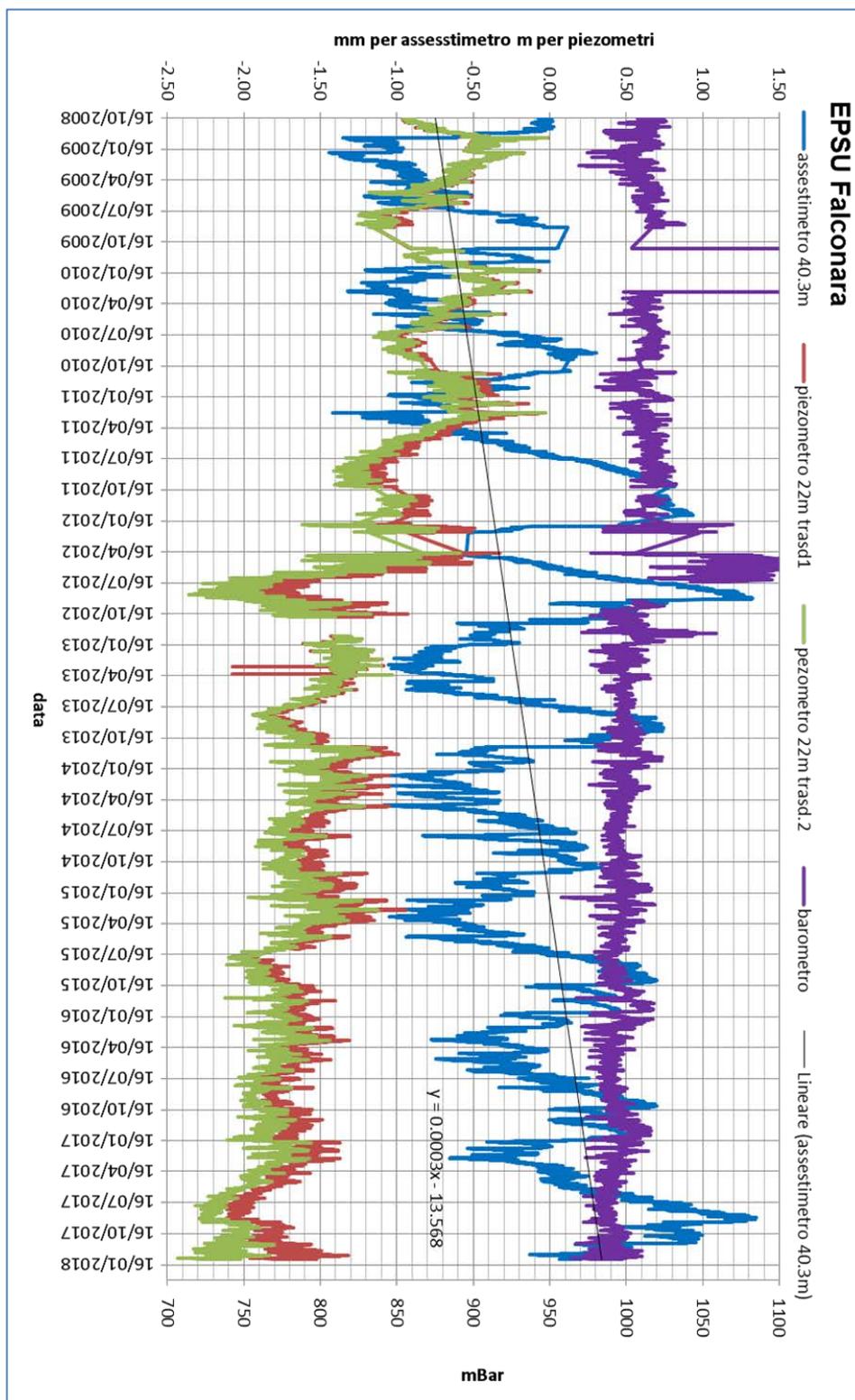


Figura 14B - Stazione EPSU di Falconara: misure piezometrico-assessimetriche e dati barometrici dal 2008 al 2018

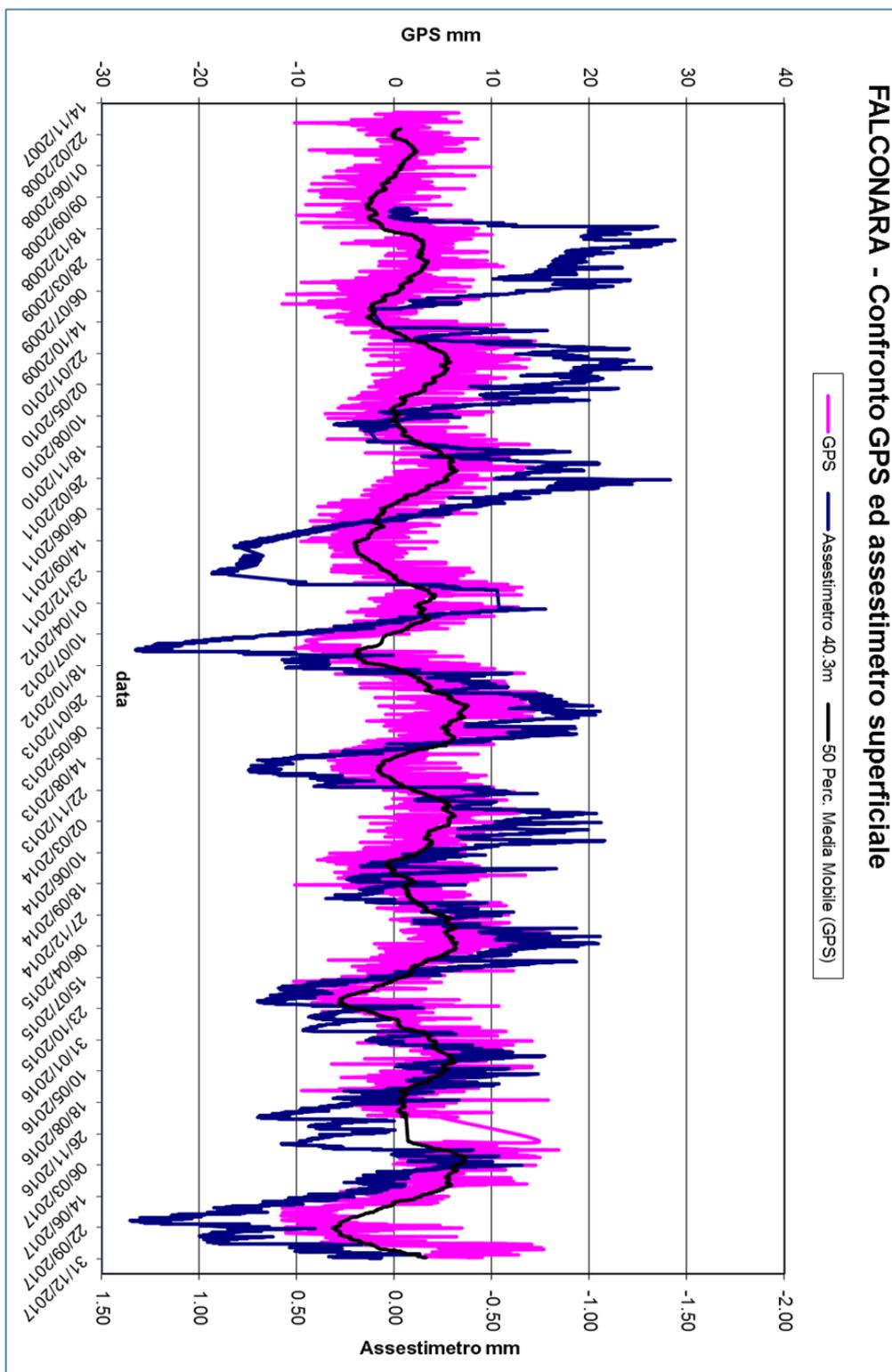


Figura 15B Stazione *EPSU* di Falconara: confronto misure CGPS vs. misure assestimetriche

*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, infatti, si hanno all'incirca a settembre/ottobre di ogni anno quando i livelli piezometrici delle falde sono minimi; 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. 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 2017, dopo circa 8,73 anni di funzionamento, misurava, infatti, una compattazione complessiva (rispetto allo zero iniziale) di 28,2 mm, che con un semplice calcolo equivale a una velocità media annua di compattazione pari a circa 3,2 mm/a. Tale valore si riduce leggermente a circa 2,7 mm/a se si elaborano i dati delle misure assestimetriche in modo un po' più sofisticato, ad es. con metodi di 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 alla base di uno strato argilloso spesso circa 32 m e scarsamente comprimibile: lo strumento, infatti, nei circa 9 e più anni di funzionamento ha misurato una compattazione complessiva quasi nulla.



La tabella che segue riporta per ciascuna stazione la compattazione complessiva del terreno al 31/12/2017 e la relativa velocità media annua, valutata semplicemente come rapporto fra la misura assestimetrica a fine 2017 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>	8,73	28,22	3,2	n.i.	n.i.
<b>Fano</b>	9,21	n.i.	n.i.	0,9	n.v.
<b>Falconara</b>	9,21	n.i.	n.i.	0,1	n.v.

n.i. = non installato

n.v. = non valutabile