



Campo di CALPURNIA

Aggiornamento al 31/12/16

Il campo di Calpurnia è ubicato nell'offshore Adriatico circa 55 km a NE di Ancona, a una profondità d'acqua di circa 72 m, nella concessione B.C22.AG evidenziata in Figura .

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
B.C22.AG	31/03/2018	Eni	Eni	100%	Marche

Il giacimento è costituito da una blanda anticlinale con asse principale orientato NW-SE e si estende per circa 7 km². La serie mineralizzata è compresa tra 570 m e 1015 m e interessa due diverse formazioni Pleistoceniche: F.ne Ravenna e F.ne Carola (Figura 2).

Il campo è stato scoperto nel 1983 con la perforazione del pozzo Calpurnia 1; per delimitare la struttura sono stati perforati, in seguito, altri 2 pozzi, Calpurnia 2 nel 1984 e Calpurnia 3 nel 1994.

Nel giugno 1998 è stata presentata da Eni una domanda di pronuncia di compatibilità ambientale concernente la realizzazione della piattaforma di Calpurnia con la perforazione di 5 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 del maggio 1998. Tale profilo prevedeva riserve a vita intera pari a 1980 MSm³, producibili in 16 anni con un picco di produzione giornaliera di 1000 kSm³/g.

Per lo studio di subsidenza, riportato nel SIA, è stato utilizzato un modello geomeccanico del tipo Geerstma cilindrico e un profilo di produzione ottenuto con un modello Eclipse del febbraio 1996 che prevedeva invece il recupero di 1536 MSm³ di gas in 9 anni.

Detto modello geomeccanico stimava dopo 9 anni dall'inizio della produzione un valore massimo di subsidenza pari a 8 cm (in corrispondenza del culmine del giacimento); alla stessa data il cono di subsidenza (linea d'isosubsidenza di 2 cm) risultava estendersi per circa 2,5 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 roccia serbatoio, in particolare:

- compressibilità uniassiale $C_m = 1,00 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$
- coefficiente di Poisson $\nu = 0,33$.

In seguito al Decreto VIA n° 4170 del 15/11/99 che approvava il programma lavori presentato, nel 1999 si è sviluppato il campo perforando cinque nuovi pozzi (Calpurnia 4, 5, 6, 7 e 8) da una piattaforma di tipo BEAF. La produzione è stata poi avviata nell'ottobre del 2000 con una portata iniziale di circa $1400 \text{ kSm}^3/\text{g}$.

Nel maggio 2007 è stata fatta una 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:

1. 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;
2. 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 Calpurnia (rel. *Eni-INPE n° 066b-07 del maggio 2007*) tale revisione ha portato a un aumento del 32% del GOIP totale rispetto al volume inizialmente stimato (*GOIP studio statico dell'ottobre 1998 pari a 3710 MSm^3 , GOIP revisione studio statico del maggio 2007 pari a 4900 MSm^3*). Il nuovo profilo di produzione ha previsto, inoltre, un aumento delle riserve producibili a vita intera del 13% (i.e. 2231 MSm^3 al 2016) rispetto alla stima iniziale del maggio 1998. Tale incremento delle riserve è risultato però inferiore a quello calcolato per il GOIP per la presenza di un acquifero attivo in alcuni livelli delle formazioni PLQ2 e PLQ1 con conseguente previsione di una chiusura anticipata di alcune string completate negli stessi.



Per ottimizzare il recupero delle riserve restanti, nel 2010 è stata fatta un'altra revisione dello studio statico e dinamico di giacimento (rel. *Eni-INPE n° 16-10 del maggio 2010*) che ha individuato nei side-track dei pozzi Calpurnia 4 e Calpurnia 5 gli interventi necessari a tale scopo. La nuova valutazione del GOIP è stata pari a 4164 MSm³, con una riduzione, quindi, del 15% rispetto a quanto stimato in precedenza (*GOIP del maggio 2007 pari a 4900 MSm³*).

Le riserve producibili a vita intera dal campo sono però aumentate del 6% poiché il nuovo profilo di produzione ha previsto di recuperare 2382 MSm³ entro il 2016 per effetto degli interventi proposti sui pozzi Calpurnia 4 e Calpurnia 5.

Tali interventi sono stati eseguiti nel mese di gennaio 2011 con la perforazione dei pozzi side track Calpurnia 4 dirA e Calpurnia 5 dirA che sono entrati in produzione tra febbraio e marzo 2011.

La revisione dello studio di giacimento fatta nel marzo 2013 (rel. *Eni-GISE n°04/2013 del 06/03/2013*) allo scopo di aggiornare il modello geomeccanico dei campi del *Clara Complex* e del campo di Calipso, ha sostanzialmente confermato i valori del GOIP e delle riserve stimate con lo studio del maggio 2010: le riserve producibili a vita intera dal campo al 2020 sono risultate, pertanto, pari a 2382 MSm³.

Nel 2015 si sono rivalutate nuovamente le riserve del campo che sono state stimate in 2287 MSm³ (Figura 3) producibili al 2017 (rel. *GISE-05/15_campo di Calpurnia–studio di giacimento, maggio 2015*). Si deve, però, osservare che tale volume è di fatto già stato prodotto a fine 2015, per cui sarà necessario riaggiornare il modello di giacimento per tener conto di una coda di produzione di durata maggiore rispetto alle attese.

Nel 2017 sarà realizzato un nuovo studio integrato (geologico, dinamico e geomeccanico) per i campi del *Clara Complex* (Clara Nord, Clara Est e Clara NW, Calpurnia), di Calipso e di Elettra.

In Figura 4 sono riportati gli andamenti storici della portata di gas (kSm³/g), d'acqua (m³/g) e della produzione cumulativa di gas aggiornata al 31/12/16 e pari a 2287 MSm³.

Nella Figura 5 è presentato il confronto del profilo di pressione calcolato dal modello Eclipse del 2015 con le pressioni statiche misurate per uno dei livelli più rappresentativi del campo (livello PLQ1-C).



Sulla base dei risultati degli 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 di Calpurnia 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 effettuate con tale modello avevano portato alle seguenti conclusioni:

1. per il campo di Calpurnia il valore di subsidenza massima era risultato pari a 53 cm al 2011. L'incremento di subsidenza massima rispetto a quanto riportato nel SIA del 1998 era da imputarsi principalmente ai seguenti fattori:
 - a. differenza nei valori dei coefficienti di compressibilità C_m utilizzati per il calcolo, in particolare per il livello PLQ2,
 - b. aumento dei gross pay considerati,
 - c. migliore modellazione dell'acquifero circostante;
2. 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'isosubsidenza di 2 cm era risultata, pertanto, pari a 32 km.

Era stata anche fatta un'analisi di sensitività sulle proprietà geomeccaniche considerando due diversi livelli di probabilità per la compressibilità C_m corrispondenti ai quantili 97.5% e 2.5% della relazione regionale proposta da *Hueckel et al.*¹. Da tale analisi si era concluso che i valori massimi di subsidenza stimati per il giacimento di Calpurnia ricadevano nell'intervallo 13÷75 cm rispetto al valore di 53 cm del caso più probabile. Per maggiori dettagli su tali scenari si rimanda alla sopracitata rel. *Eni-INPE n° 074-07 del maggio 2007*.

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

¹ T. Hueckel, G. Cassiani, J. H. Prévost, and D. A. Walters, Field derived compressibility of deep sediments of the northern Adriatic, in Land Subsidence – Special Volume, Proc. of the 7th Int. Symp. on Land Subsidence, P. R. China, 23-28 Oct. 2005.



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 protratte fino al 2054 per 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 Calpurnia è stata stimata in 43 cm al 2008 e a 42 cm al 2010, fino a ridursi ulteriormente a un valore di circa 38 cm alla fine della simulazione. 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, questa 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 workover del 2011 sui pozzi dei campi di Calpurnia e di Clara Nord. Nel caso di Calpurnia il nuovo studio di giacimento non ha portato a sostanziali variazioni per il GOIP e per le riserve rispetto alla valutazione fatta al dicembre 2010.

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 valore del 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.

Nel caso ritenuto più probabile (C_{m_Med}) la subsidenza massima per il campo di Calpurnia è stata stimata pari a 61 cm al 2017. Per lo scenario (C_{m_Upper}) più pessimistico e per tutti gli



scenari considerati nello studio, la linea d'isosubsidenza di 2 cm si mantiene sempre a una distanza dalla costa superiore ai 32 km.

Come accennato 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; i relativi risultati sono riportati in Tabella 1 per gli anni ritenuti più significativi durante e dopo la vita produttiva dei campi. Lo studio, infatti, 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.

Tabella 1 – Risultati finali: massima subsidenza (espressa in cm) per tutti gli scenari

Scenario	2013	2021	2026	2035	2065
Cm_Med	51	68	67	65	62
Cm_Upper	68	92	90	88	84
Cm_Lower	11	15	15	15	16



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 il campo di Calpurnia, la subsidenza massima (nel caso C_{m_Med}) risulta pari a 54 cm al 2021 (Figura 6).

Anche in questo nuovo aggiornamento del modello geomeccanico la linea di isosubsidenza dei 2 cm si è mantenuta per tutti gli scenari considerati a una distanza dalla costa sempre superiore a 32 km (Figura 7).

Un nuovo modello geomeccanico per valutare e prevedere la subsidenza indotta dalla produzione di gas di tutti i campi dell'area (Clara Complex, Calipso ed Elettra) è programmato per il 2017, una volta completato il relativo studio di giacimento di cui si detto in precedenza.

Il fatto che tutti gli studi geomeccanici sino ad ora eseguiti per valutare i possibili effetti d'interferenza idraulica e meccanica fra i vari campi considerati concordino nel prevedere che il fenomeno della subsidenza si esaurisca a grande distanza dalla costa (circa 32 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 sensibil-



mente la possibilità che si possa verificare una depressurizzazione e conseguente compattezza 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. 55 km per Calpurnia), 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 32 km).

Tra la fine del 2007 e l'inizio del 2008 è stato eseguito un rilievo batimetrico multi-beam di un'area (superficie 1662 km²) comprendente i campi del *Clara Complex*, di Calipso ed Elettra. Pur in presenza di un andamento irregolare del fondale marino, tale rilievo ha consentito di evidenziare per Calpurnia una zona di disturbo arealmente limitata e coincidente più o meno con la zona di culmine del giacimento.

Tale disturbo altimetrico, da ricondursi probabilmente alla coltivazione del giacimento, raggiunge al massimo un valore di circa 35 cm, inferiore (Figura 9) quindi ai 51 cm previsti dal modello di subsidenza del 2007 (rel. *Eni-Università di Urbino dell'agosto 2008 trasmessa a MATTM in data 11/11/2008 - prot.UGIT ET/mv 1410*).

A partire dai primi anni '70, Eni ha progettato e realizzato lungo la costa adriatica una rete di livellazione geometrica che, su richiesta degli Enti di Controllo a livello regionale e nazionale (Regione Emilia Romagna, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna e Ministero dell'Ambiente), viene rilevata da oltre un decennio 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. La rete di livellazione costiera sarà, pertanto, nuovamente rilevata nel corso del 2017.

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 2014 (ultimo rilievo fatto), 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 1100 km di sviluppo lineare;
- tratto da Pesaro a P.to San Giorgio, per un totale di circa 220 km di sviluppo lineare;
- tratto Marche-Abruzzo, da P.to San Giorgio a Pescara, per un totale di circa 110 km di sviluppo lineare.

Le operazioni si sono svolte nel periodo compreso tra giugno e ottobre 2014 sotto la diretta supervisione di tecnici Eni e dei tecnici dell'ente certificatore.

Si ritiene opportuno sottolineare 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 antistante alla piattaforma di Calpurnia, con l'acquisizione della campagna 2014 sono in totale disponibili 6 campagne di livellazione fatte negli anni 2006, 2007, 2008, 2009, 2011 e 2014. 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 2006-2014, 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

2017) e con il consolidamento dei dati CGPS e dei rilievi SAR, sarà possibile fare interpretazioni più sicure dei dati di livellazione anche per il tratto a sud di Pesaro.

Si deve, inoltre, osservare che i dati di livellazione, misurati sul singolo caposaldo, non sono di solito sufficienti per caratterizzare la distribuzione areale della subsidenza. Le misure sul singolo caposaldo, infatti, possono essere talvolta alterate da “disturbi” accidentali intervenuti nel tempo sul manufatto 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.

Per la tratta da Pesaro a P.to Sant’Elpidio le misure sui singoli capisaldi sono state elaborate tramite regressione lineare; le corrispondenti velocità medie annue d’abbassamento del suolo V_a^2 sono state poi raggruppate 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).

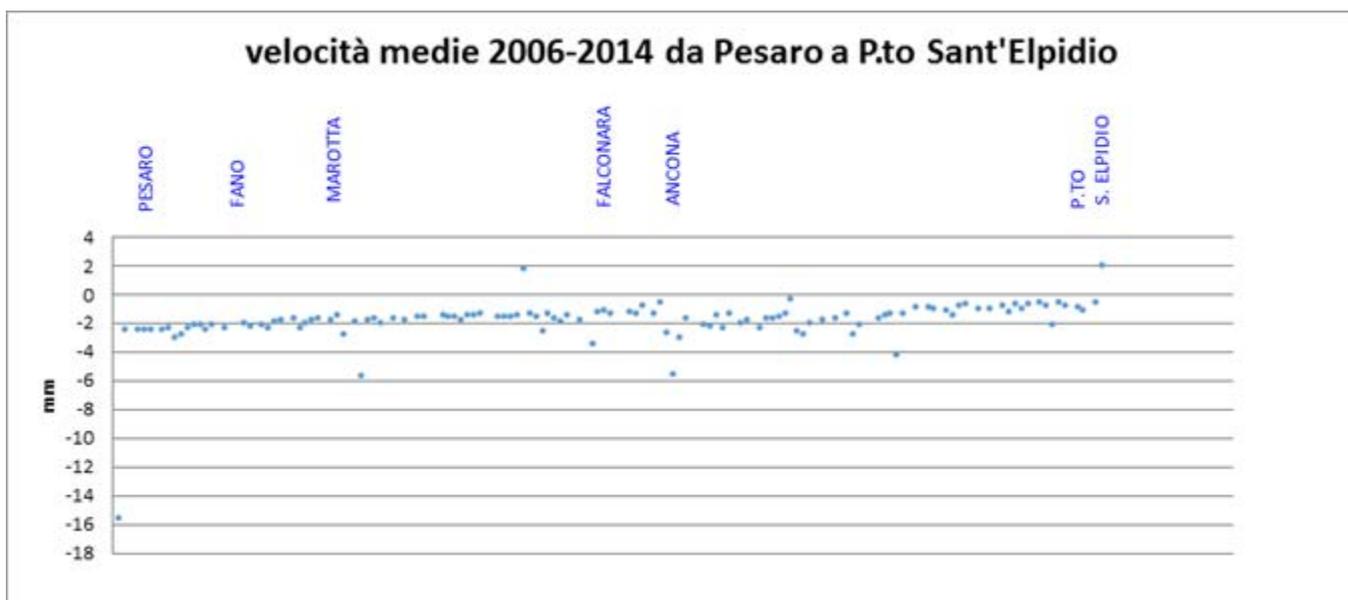
L’elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 2006-2014 mostra per l’area in esame un quadro di generale abbassamento (Figura A), caratterizzato però da valori poco significativi, ove si consideri che il 93% dei punti analizzati ricade nella classe 1 con una media pari a 1,6 mm/a.

I capisaldi per i quali si osservano alte velocità d’abbassamento (es. 15,6 mm/a nella zona di Pesaro), oppure fenomeni d’innalzamento del suolo (es. -2 mm/a nella zona di P.to Sant’Elpidio) sono scarsi di numero (1%) e isolati: sono, quindi, poco significativi dal punto

² Nel presente rapporto di norma le velocità di subsidenza (i.e di abbassamento della superficie) sono riportate con valori negativi. Per comodità d’interpretazione, però, nell’elenco che segue le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.

di vista areale. Non si possono escludere fenomeni localizzati dovuti a instabilità dei capisaldi stessi, che saranno comunque oggetto di verifica nelle prossime campagne di misura.

Figura A – Tratta Pesaro-Sant’Elpidio: Misure di livellazione (periodo 2006-2014)



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 (settembre 2016) per un’analisi areale altimetrica integrata (Appendice 1) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 11).

Le attività di monitoraggio sono state potenziate negli ultimi anni mettendo in opera un numero crescente di stazioni CGPS sulle piattaforme offshore. 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) e 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 PC 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 Bonaccia-NW (settembre 2015) e, infine, di Clara NW (marzo 2016).

Le serie storiche delle misure CGPS acquisite nelle stazioni messe in opera nel periodo 2014 - 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 2); negli stessi siti sono stati perforati tra ottobre e dicembre 2008 anche 3 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 è stata, infine, 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 Calpurnia, certificati fino al 2014 e in fase di certificazione fino al 2015, 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 31/12/2016 (Figura 11) - sono stati 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 31/12/2014

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
Calpurnia	17,96	23,04	-4,53	17,98	23,33	-6,25	-0,02	-0,29	-1,72

A proposito dei monitoraggi CGPS è opportuno precisare che l'analisi e l'interpretazione degli andamenti nel tempo delle misure altimetriche, 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 di 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 misurato.

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 5.2, 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.

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 Calpurnia, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore ai 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale³ misurata pari a -2,1 mm/a (Figura 11 e Figura 12), in calo rispetto al valore riportato nella precedente relazione di aggiornamento (-3,1 mm/a al 2015).

I valori di subsidenza stimati con il modello geomeccanico settembre 2013 per i campi del *Clara Complex*, di Calipso e di Elettra sono stati confrontati con quelli misurati dalle stazioni CGPS installate sulle rispettive piattaforme di produzione senza che questi ultimi siano stati depurati dalla componente di subsidenza naturale. Per il campo di Calpurnia, si può notare come le previsioni modellistiche siano più conservative rispetto all'andamento misurato dal CGPS (Figura 13).

³ 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.



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 Calpurnia), dal campo di Calipso e da quello di Elettra possa avere qualche impatto sull'andamento altimetrico del tratto di litorale monitorato.

Si segnala infine che:

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



Figura 1 - Ubicazione del campo di Calpurnia

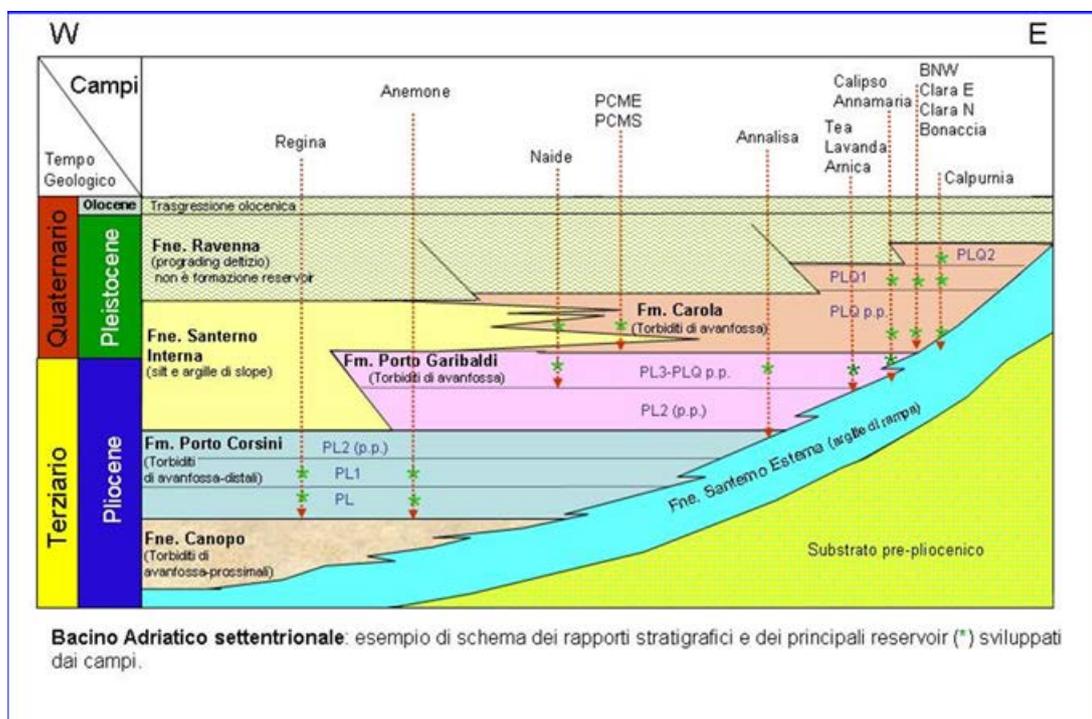


Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici



CAMPO DI CALPURNIA					
ANNO	Produzione annuale (MSm ³)		Produzione cumulativa (MSm ³)		Rapporto Produzione reale vs Riserve modello 3D ECLIPSE
	Reale	Modello 3D ECLIPSE	Reale	Modello 3D ECLIPSE	
2000	61	61	61	61	3%
2001	441	441	502	502	22%
2002	454	453	956	956	42%
2003	349	349	1305	1305	57%
2004	262	262	1567	1567	69%
2005	205	205	1771	1771	77%
2006	145	145	1916	1916	84%
2007	79	79	1995	1995	87%
2008	43	42	2038	2038	89%
2009	13	13	2050	2050	90%
2010	5	5	2056	2056	90%
2011	87	87	2143	2143	94%
2012	70	70	2212	2212	97%
2013	44	44	2256	2256	99%
2014	18	18	2274	2274	99%
2015	9	10	2282	2283	100%
2016	5	3	2287	2287	100%
2017		1		2287	
2018					
2019					
2020					
2021					
2022					
2023					
2024					
2025					
2026					
2027					
2028					
2029					

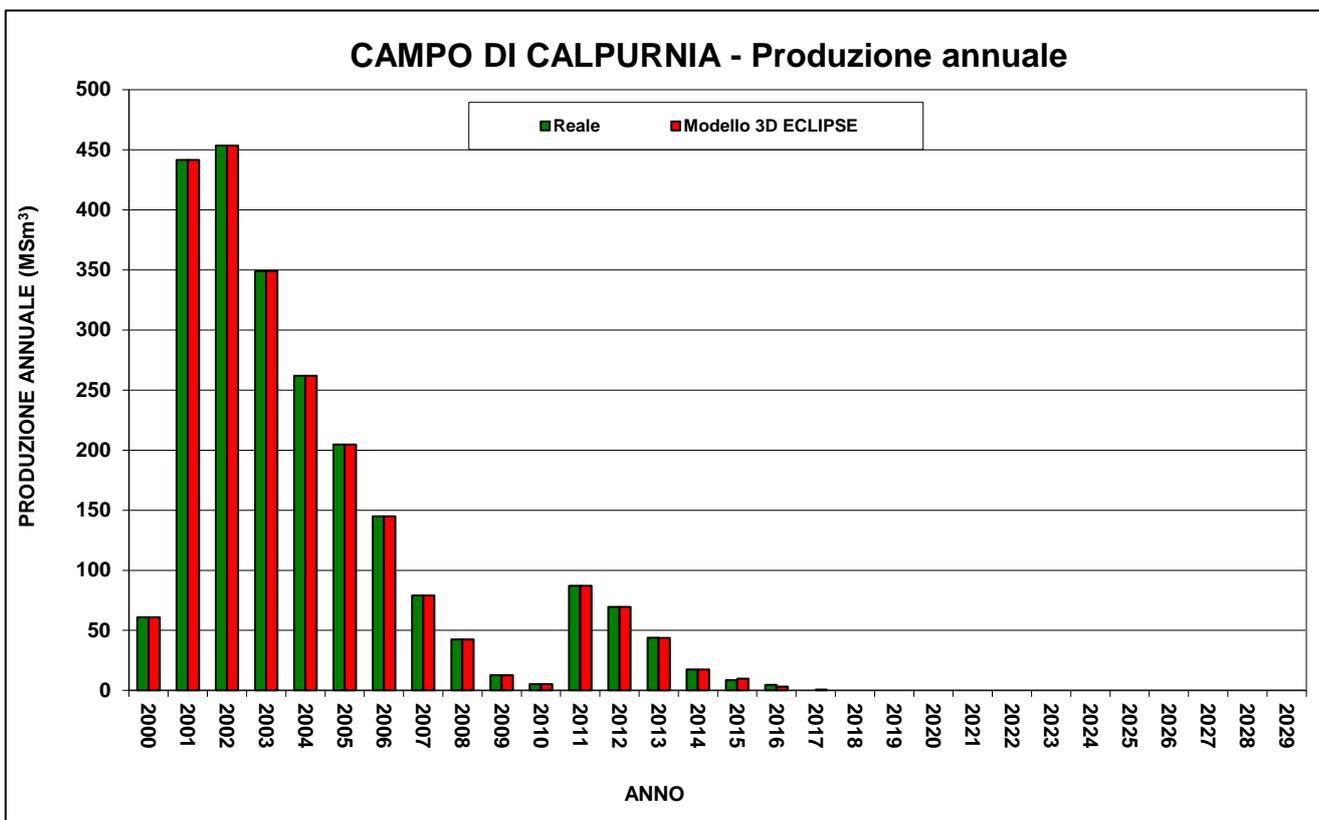
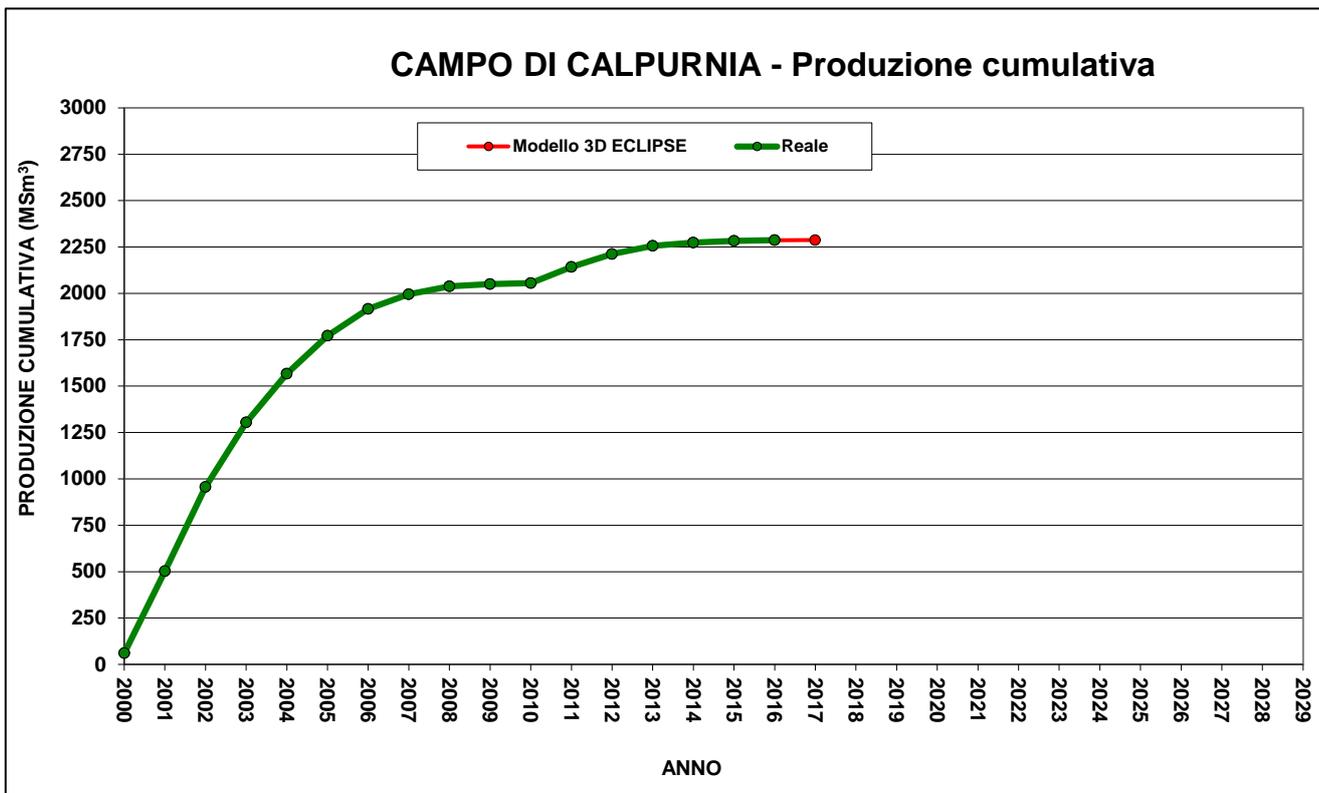


Figura 3 – Campo di Calpurnia: tabella e grafico di produzione vs. modelli Eclipse (maggio 2015)

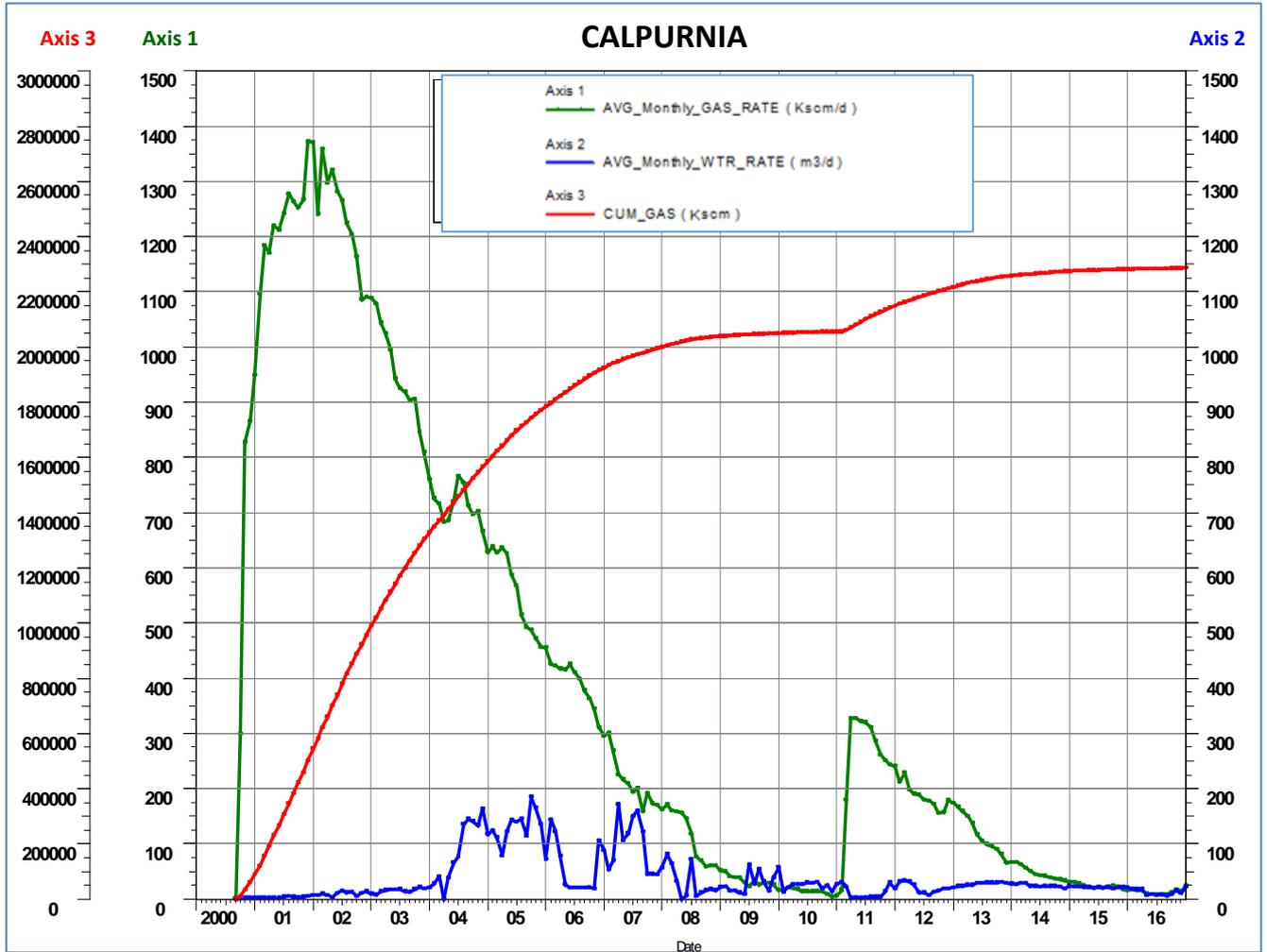


Figura 4 – Campo di Calpurnia: grafico di produzione storica



CAMPO DI CALPURNIA			
Data	Livello PLQ1-C		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
01/04/2000	86		6 C
01/10/2001	80		6 C
12/11/2002	72		6 C
29/02/2004	67		6 C
01/06/2009	82		6 C
11/01/2011	89	4 dir A	
09/12/2013	84		6 C
11/12/2014	83		6 C
01/09/2015	*		6 C
03/10/2016	83		7 C

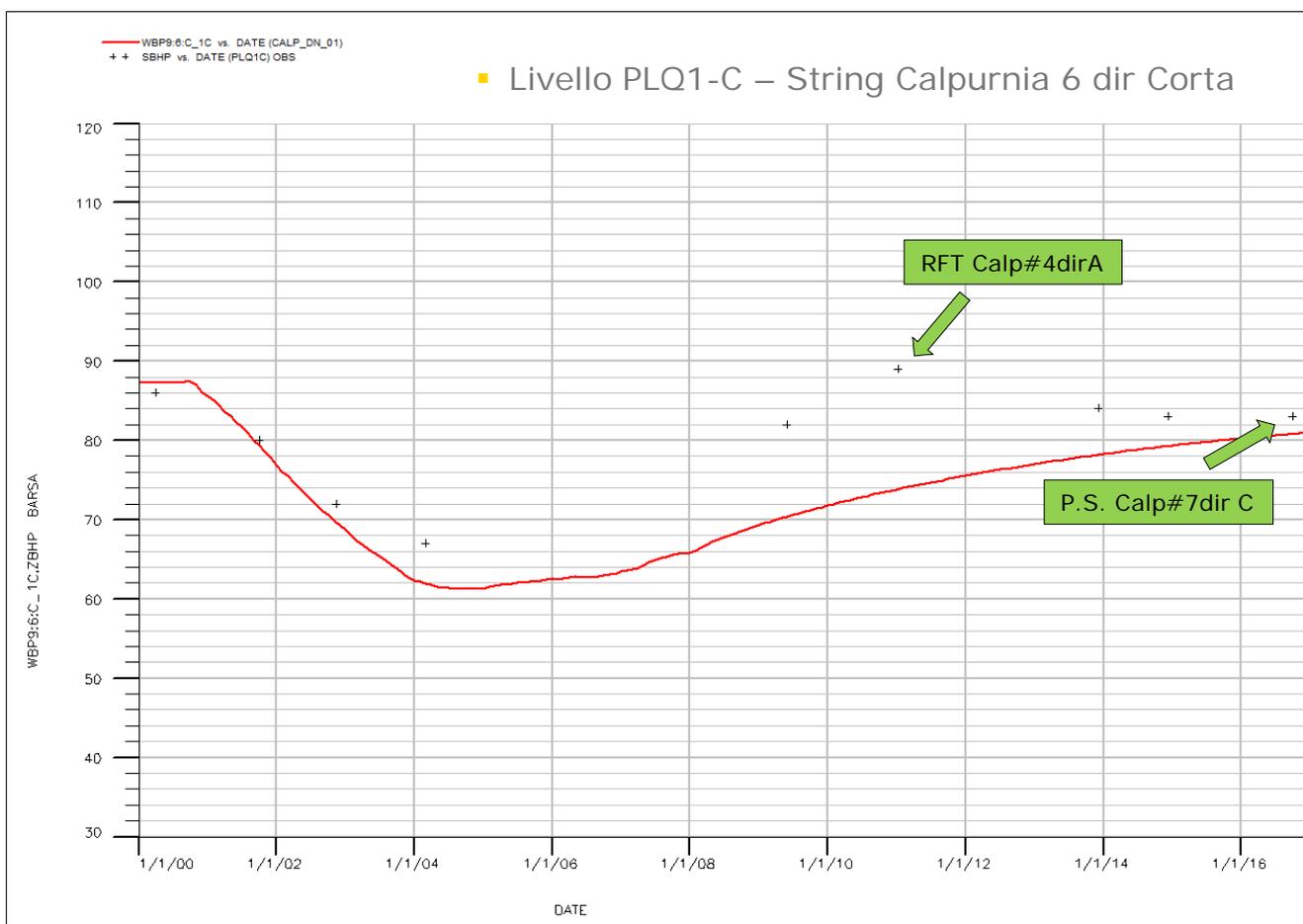


Figura 5 – Campo di Calpurnia: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello Eclipse



(livello PLQ1-C)

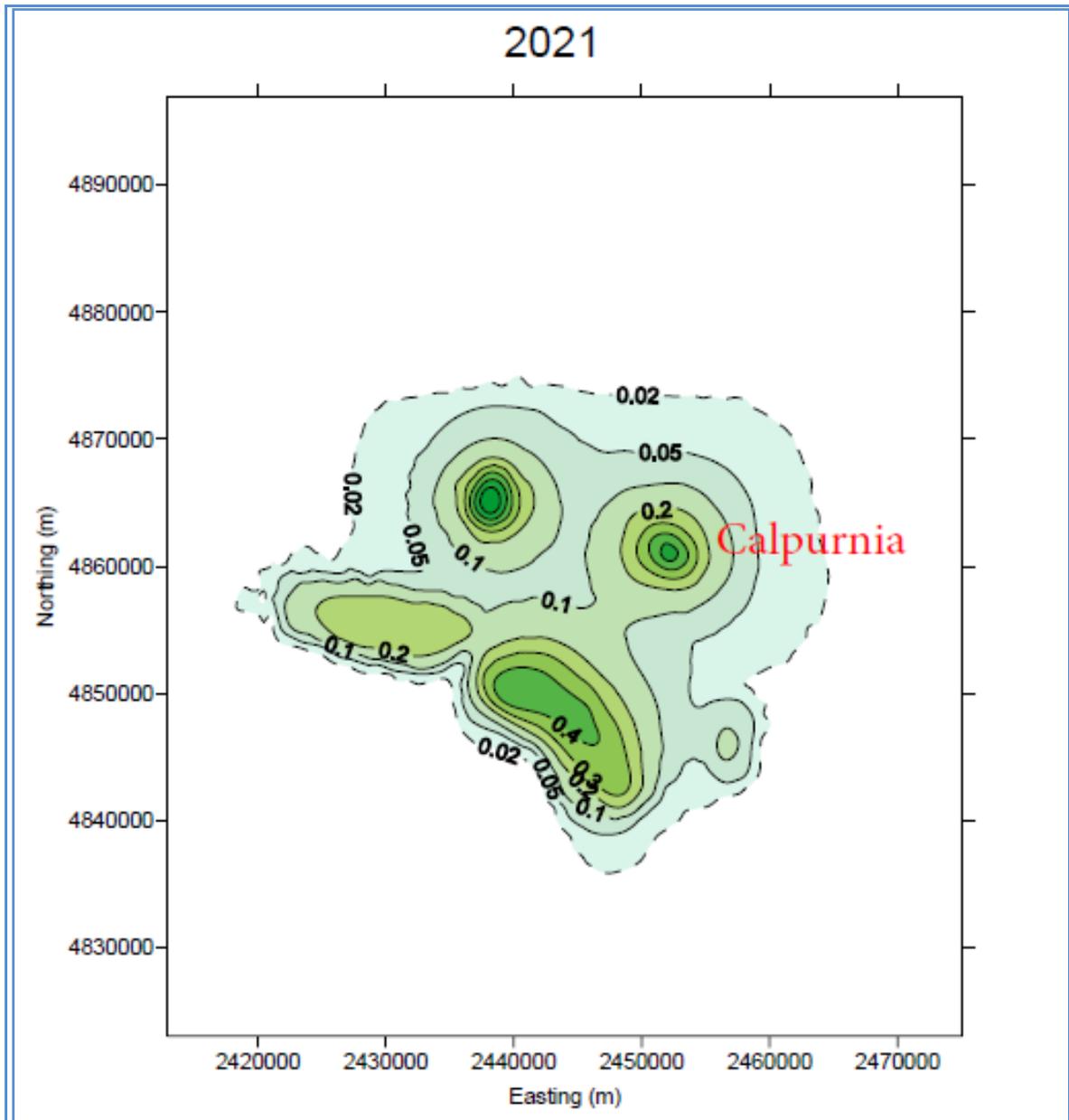


Figura 6 – Modello geomeccanico (settembre 2013): curve d'isosubsidenza (scenario di riferimento C_m_Med): Subs. max. su Calpurnia: 54 cm @ 2021

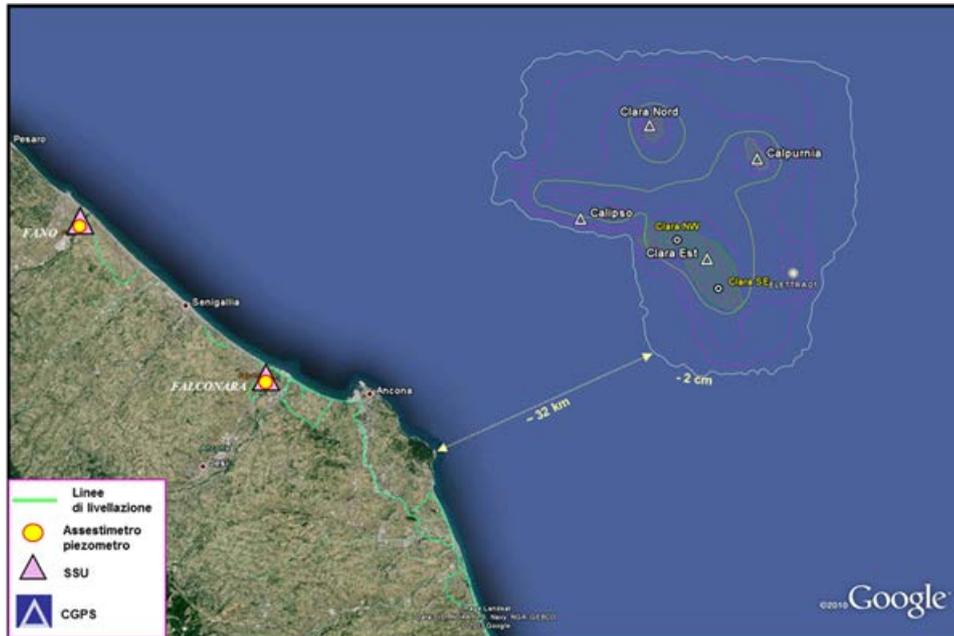


Figura 7- Modello geomeccanico (settembre 2013): curve d'isosubsidenza per lo scenario di riferimento (caso C_{m_Med} @ 2065)

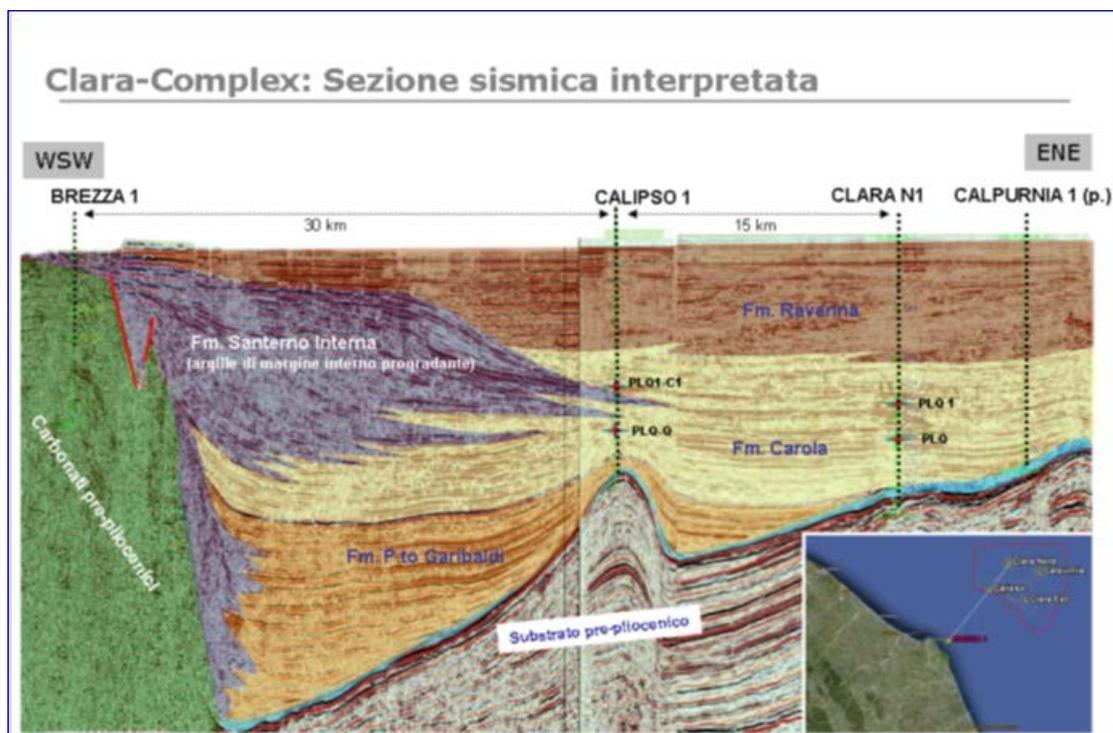


Figura 8 - Sezione sismica interpretata

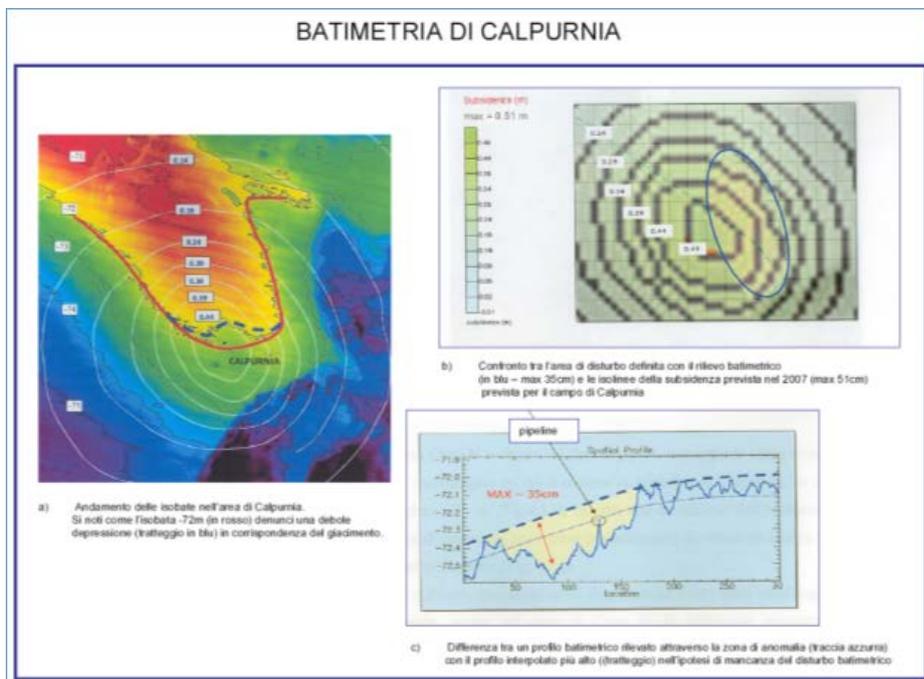


Figura 9 – Campo di Calpurnia: confronto tra batimetria e modello geomeccanico (maggio 2007): curve d'isosubsidenza per lo scenario di riferimento (Caso C_m_Med@ 2065)

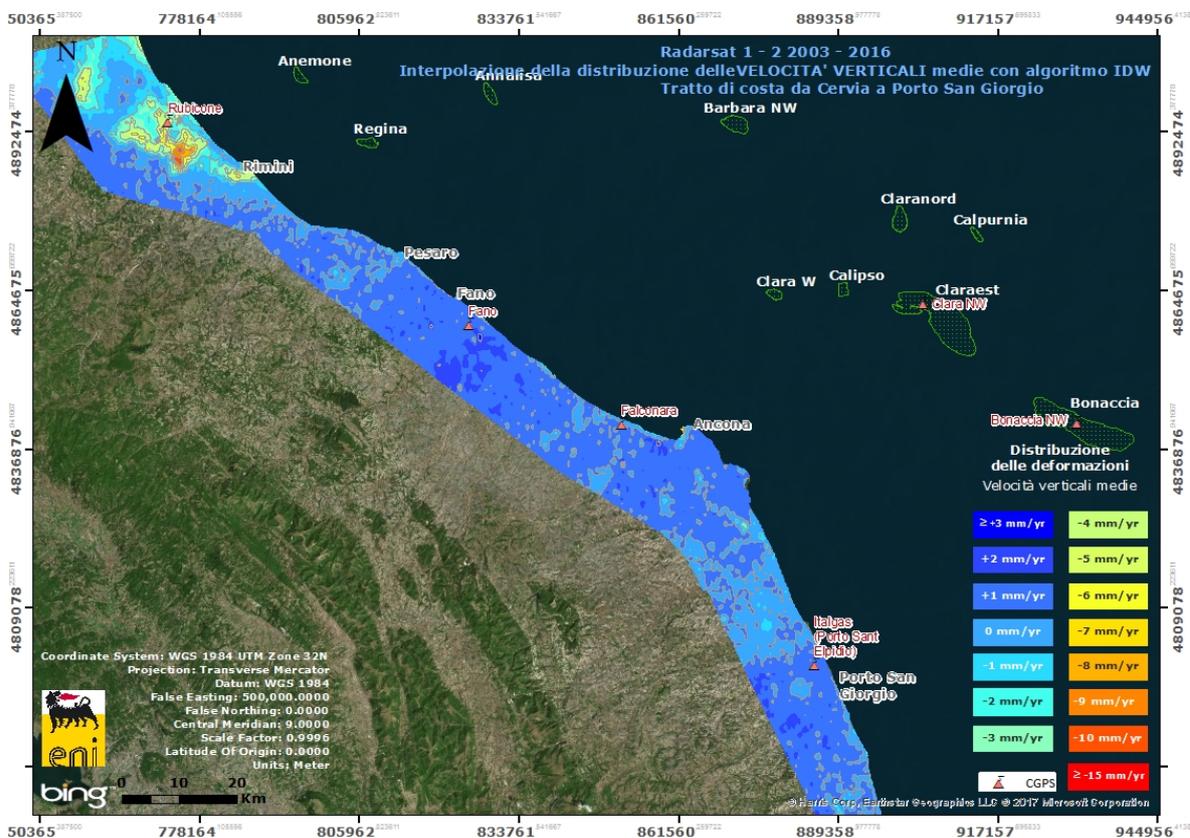


Figura 10 – Campo di Calpurnia: analisi dati SAR dal 2003 al 2016

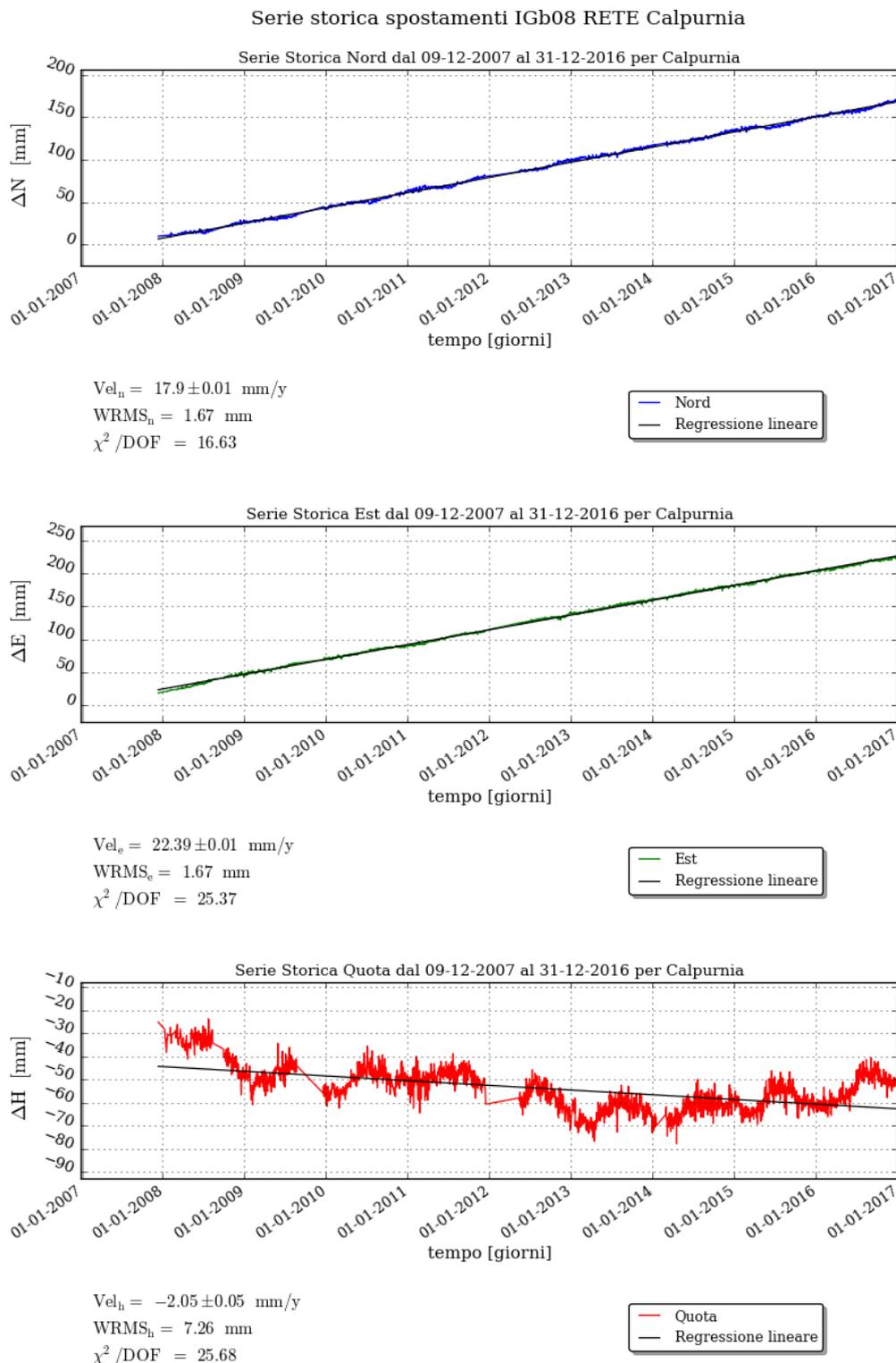


Figura 11 – Campo di Calpurnia: serie storiche di misure plano-altimetriche registrate dal CGPS installato sulla p.ma Calpurnia



CAMPO	Inizio produzione	Fine Produzione (rif. ultimo profilo di produzione - Mod. Eclipse)	Riserve prodotte @ dic.2016	Max Subsidenza prevista - scenario di riferimento	Ultimo aggiornamento studio	CGPS		
						inizio registrazione	vel.media (mm/a) @ dic.2016	TREND rispetto @ dic. 2015
ANEMONE	1978	2018	100%	-36cm al 2018	2015	giu-07	-4,7	invariato
ANNALISA	2000	2023	93%	-10cm al 2027	2014	ott-07	-4,1	invariato
ANNAMARIA B	2009	2039	66%	-51cm al 2040	2013	gen-10	-108,6	aumento
BARBARA-NW	1999	2040	71%	-76cm al 2024	2013	gen-08	-29,6	invariato
BONACCIA	1999	2035	65%	-423cm al 2033	2014	dic-07	-76,2	diminuzione
BONACCIA NW	2015					set-15	n.d.	n.d.
CALIPSO	2002	2026	82%	-33cm al 2021	2013	nov-07	-15	diminuzione
CALPURNIA	2000	2017	100%	-54cm al 2021	2013	giu-07	-2	diminuzione
CLARA EST	2000	2030	44%	-56cm al 2026	2013	nov-07	-13,5	invariato
CLARA NW	2015					mar-16	n.d.	n.d.
CLARA NORD	2000	2020	82%	-68cm al 2021	2013	nov-07	-23,6	invariato
ELETTRA	2014	2026	57%	-18cm al 2065	2013	lug-14	-23,6	n.d.
FAUZIA	2014	2024	53%	-11cm al 2060	2013	set-14	-5,5	n.d.
GUENDALINA	2011	2023	86%	-3cm al 2023	2015	ago-11	-5,4	diminuzione
NAIDE	2005	2022	88%	-8cm al 2023	2013	giu-05	-3,45	invariato
NAOMI-PANDORA	2001	2037	43%	-3cm al 2068	2013	giu-02	-1,5	invariato
PCC (PCMS 1,2)	2001	2014	100%	-6,8cm al 2017	2016	lug-05	-3,8	invariato
REGINA	1997	2023	91%	-139cm al 2044	2013	giu-07	-25,5	diminuzione
TEA-LAVANDA-ARNICA	2007	2018	101%	-5cm al 2018	2015	nov-07	-4,3	invariato

Figura 12 - Velocità medie di "subsidenza totale" calcolate per tutta la serie storica di dati CGPS vs. modelli

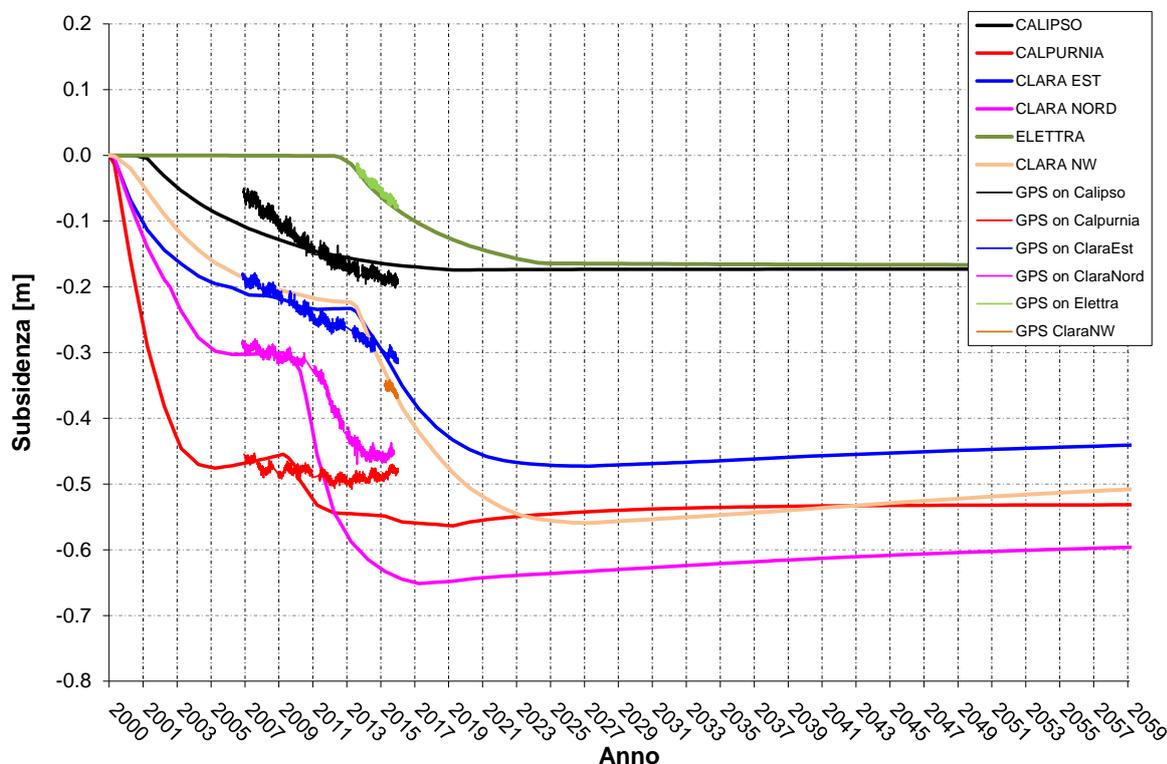


Figura 13 - Previsioni di subsidenza del modello geomeccanico (sett. 2013 - scenario C_m_Med) relative alla posizione delle piattaforme di produzione:, confronto con le corrispondenti misure CGPS aggiornate al dic.2016



campo CALPURNIA (Eni 100%)			
DATI DI CAMPO		DECRETO VIA n. 4170 del 15 novembre 1999	
UBICAZIONE	offshore - 55 Km a NE di Ancona 72 m	AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (CLARA COMPLEX)	
LITOLOGIA	silt-sabbie fini in livelli sottili	SIA	
FORMAZIONE RESERVOIR	Ravenna - Carola	STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D *FEBBRAIO '96*
ZONA MINERARIA	PLO2 - PLO1 - PLO	RISERVE (MSm3)	1536 (su un profilo di produzione di 9 anni)
PROFONDITA' RESERVOIR	570 - 1015 (TVDS)	MOD. GEOMECCANICO	GEERTSMA CILINDRICO
TIPO DI PIATTAFORMA	fissa - standard	MAX SUBS AL CENTRO (cm)	8 (dopo 9 anni)
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	torbiditi sottili	DISTANZA DALLA COSTA (Km)	> 32 Km (linea isosubsidenza -2cm)
		ULTIMO AGGIORNAMENTO	
		Studio di giacimento, Ref. GISE-05/15 (maggio 2015)	
		2287	
		ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ SETTEMBRE 2013	
		54 (@2021)	
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI			
CONCESSIONE	B.C22.AG	D.M @nov '99	@ 31 dic 2016
DATA SCADENZA CONCESSIONE	01/10/2014	LIVELLAZIONI	
N. POZZI	5	ACQUISITI I DATI DI LIVELLAZIONE, CERTIFICATI UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM, RELATIVI AGLI ANNI: # 1998-2005 # 2006-2009 e 2011-2014 IL PROSSIMO RILIEVO DELLA " DORSALE ADRIATICA E PESARO-PT.S.GIORGIO" SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2017 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO	
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm3)	1981	MARKERS	
START UP PRODUZIONE	ott-00	NON PRESCRITTI	
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2015	CGPS	
GAS PRODOTTO (MSm3)	2287	NEL CORSO DEL 2007 E' STATO INSTALLATO UN CGPS IN PIATTAFORMA. NEL 2008 E' STATO INSTALLATO CGPS NELLA CENTRALE ENI DI FALCONARA (ONSHORE) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA	
% RISERVE PRODOTTE	100%	SAR	
		ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ SETT.2016 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.MA CALPURNIA NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	
		BATIMETRIE	
		ESEGUITO RILIEVO BATIMETRICO. DATA RILIEVO SETT.2007-FEBBRAIO 2008	

Figura 14 – Campo di Calpurnia: scheda di sintesi dati campo



Figura 15 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

Appendice 1: aggiornamento dati SAR 2003-2016

L'analisi dei dati SAR ha interessato complessivamente tre data-set (Fig. 1A), suddivisi geograficamente in:

1. *Area di Ravenna da Porto Tolle a Cervia*
2. *Area di Rimini da Cervia a Cattolica*
3. *Area di Ancona da Cattolica a Civitanova Marche.*

In tali aree, che presentano una piccola zona di sovrapposizione sufficiente a garantire continuità nei dati, sono ubicate le seguenti stazioni CGPS della rete Eni:

1. *Area di Ravenna: Manara, Smarlacca, Spinaroni, Fiumi Uniti*
2. *Area di Rimini: Rubicone*
3. *Area di Ancona: Fano e Falconara.*



Fig. 1A - Mappa calibrazione dati SAR



La calibrazione dei dati SAR è stata fatta con le misure CGPS acquisite nelle stazioni poste all'interno delle aree analizzate, partendo 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 è impiegata la misura della velocità verticale di spostamento del suolo dell'area SAR più a nord (area ravennate), utilizzando in particolare le misure della stazione di Smarlacca. I dati acquisiti a Fiumi Uniti, a Spinaroni e in tutte le altre stazioni sono stati impiegati esclusivamente per la verifica dei risultati ottenuti.

Per la valutazione delle velocità verticali di spostamento del suolo sulla base dei dati CGPS si è impiegata 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 rispetto 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 $-3,22 \pm 0,42$ mm/a. Dato che la corrispondente velocità media ottenuta dalle misure del CGPS di Smarlacca è di $-6,37 \pm 0,01$ mm/a, si ha uno scostamento fra le due misure di $-3,15 \pm 0,43$ mm/a. Ai valori di velocità media della componente verticale, determinata con il monitoraggio SAR, si è applicata, pertanto, una correzione pari a $-3,15 \pm 0,43$ mm/a. Si sono poi confrontati tali dati SAR con le misure dei CGPS di Manara, Fiumi Uniti e Spinaroni 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 Fig. 2A sono rappresentati i dati SAR per l'area di Ravenna nel tratto di costa da Comacchio a Cervia ottenuti a valle del processo di calibrazione. Tali dati sono stati ottenuti per interpolazione con un algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) mediante Tool ArcGis Spatial Analyst®.

A differenza di quanto fatto negli anni precedenti, gli altri data set acquisiti (area di Rimini e area di Ancona, vedi Fig. 1A) sono stati analizzati separatamente da quello dell'area ravennate, poichè si è osservato un buon accordo fra le misure SAR e quelle registrate dalle stazioni CGPS site all'interno di ciascuna delle 2 aree sopracitate. Inoltre, con il consolidarsi della serie storica di misure SAR (circa 14 anni di dati) si è notato come la calibrazione delle aree di Rimini e Ancona - fatta a partire da quella di Ravenna e impiegando un valore di calibrazione ottenuto come media delle componenti verticali delle velocità di spostamento del suolo nelle zone di sovrapposizione tra le diverse aree - introduca un errore sistematico. Tale errore, che consiste in uno spostamento verticale fittizio ed è probabilmente causato anche alla propagazione della varianza, non può essere ignorato e, pertanto, sconsiglia l'applicazione della procedura di calibrazioni "a catena" fatta nel passato.

Per l'area di Rimini, analizzata congiuntamente a quella di Ancona Fermo, il procedimento seguito per la mosaicatura e calibrazione del dato SAR è illustrato sinteticamente nello schema esemplificativo di in Fig. 3A.

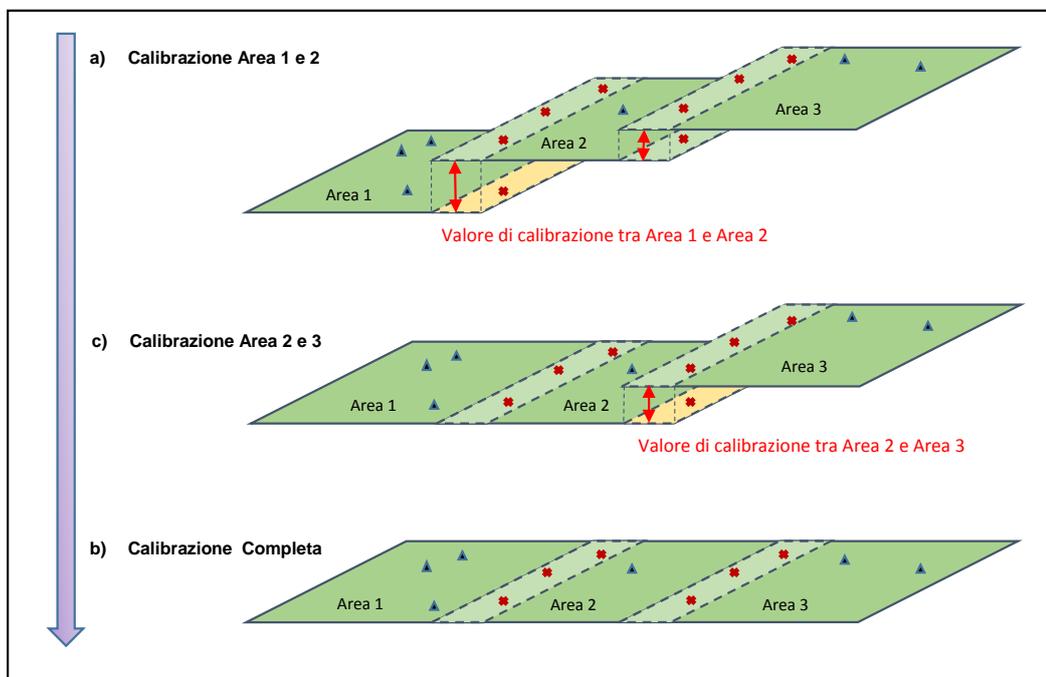


Fig. 3A – Schema illustrativo del processo di calibrazione delle immagini SAR con misure CGPS



L'analisi dell'area SAR di Ancona evidenzia che le velocità verticali di spostamento del suolo registrate dalle stazioni CGPS di Fano e Falconara sono allineate con quelle misurate dal SAR: la differenza è inferiore al millimetro. Si noti che il confronto è stato fatto per una zona di circa 300 m intorno a ogni stazione, e che le velocità dei dati SAR sono una media delle misure relative ai permanent scatterer (PS) che ricadono all'interno di tale zona.

Data l'ottima concordanza fra i dati CGPS e quelli SAR si è deciso, quindi, di non calibrare questi ultimi.

Si sono poi confrontate le velocità verticali di spostamento del suolo misurate dai PS nella zona di sovrapposizione tra l'area di Ancona e quella di Rimini (Fig. 3A). Per quanto osservato in precedenza (non calibrazione dato SAR vs. CGPS in quanto trascurabile) la mosaicatura/calibrazione è stata fatta in modo diretto senza alcun delta tra le due zone sovrapposte.

A valle del processo di mosaicatura/calibrazione si è esaminato l'andamento della differenza di velocità verticali tra misure SAR e dati CGPS per l'area di Rimini (Stazione S.S.U. di Rubicone, vedi Fig. 1A). Nella zona situata nell'intorno della stazione CGPS di Rubicone - installata nel dicembre 2007 - i data-set SAR (area SAR di Rimini), mostrano un rallentamento della velocità di subsidenza a partire dal 2008 (analisi dettagliata presentata nel 2013). La differenza fra le stime di tale velocità ottenute rispettivamente con le misure CGPS e quelle SAR è di 1.96 ± 0.67 mm/a. Al solito, la velocità media SAR è stata calcolata considerando i PS compresi in un intorno di 300 metri dalla stazione.

In Fig. 4A è visualizzata l'immagine ottenuta per interpolazione dei dati calibrati relativi alle aree di Ancona-Fano e Rimini. Per tale operazione si è impiegato l'algoritmo di IDW (Inverse Distance Weighted) mediante Tool ArcGis Spatial Analyst®.

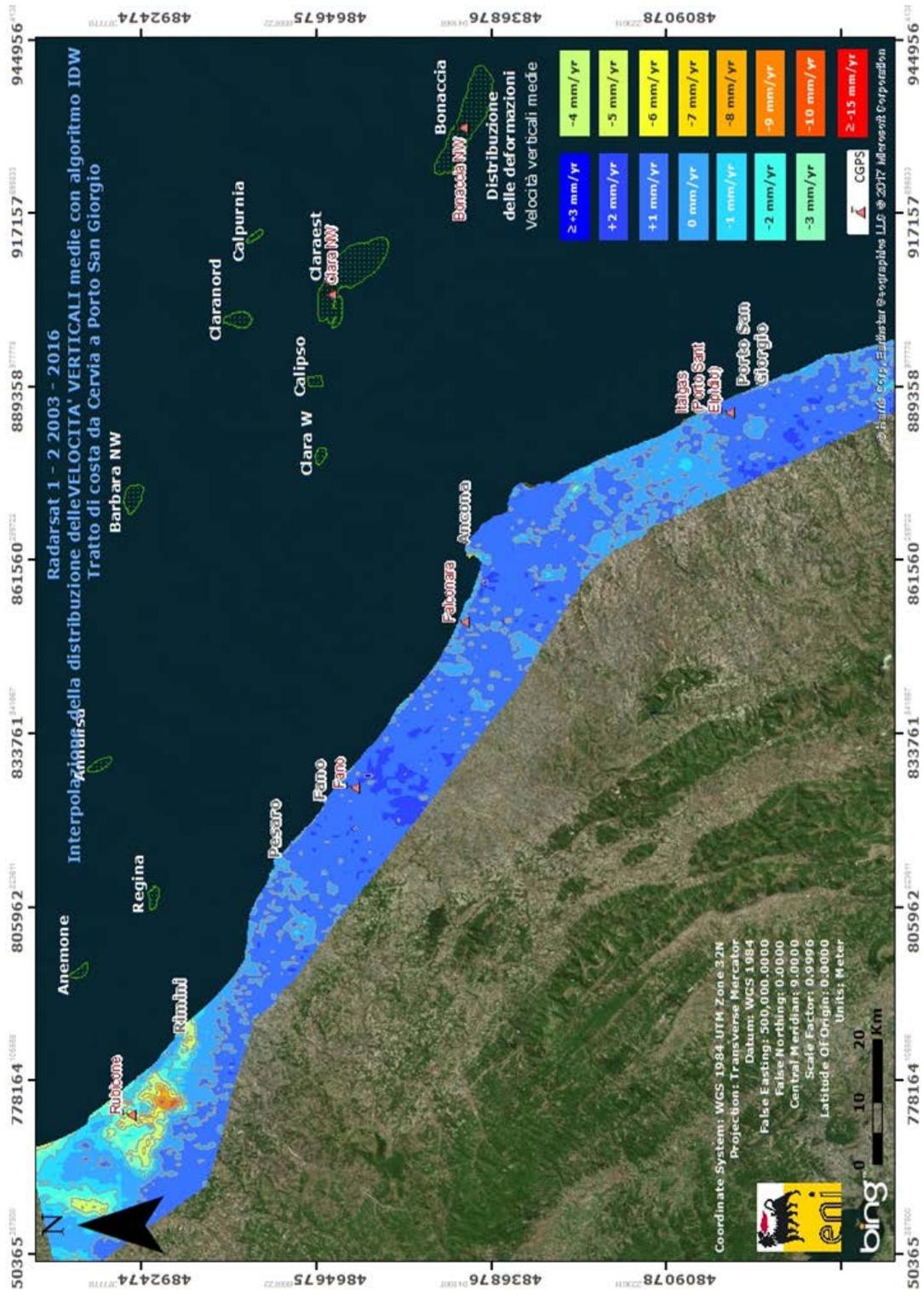


Fig. 4A - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2016, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Cervia a Porto San Giorgio



Confronto dati SAR 2003 – 2015 vs 2003 – 2016

Un confronto diretto tra i dati 2003 – 2015 e i dati 2003 – 2016 sull'intero tratto di costa da Comacchio a Porto San Giorgio non è possibile in quanto le analisi 2016 dei dati SAR sono state effettuate con procedura differente rispetto all'anno precedente.

E' possibile però effettuare un confronto per quanto riguarda l'area di Ravenna e l'area di Fermo-Ancona.

Come mostrano le immagini di Fig. 5A e Fig. 6A, non si notano delle differenze importanti, il valore modale si attesta intorno a -3,5 mm. L'unica area con valori di differenza che sono in media dell'ordine di -7 mm, è situata a sud della città di Ravenna. Questa anomalia è, però, molto probabilmente causata da una mancanza di dati in tale area per la scarsa coerenza del segnale SAR. Ciò ha prodotto un artefatto numerico, privo di significato fisico, nelle relative mappe d'interpolazione.

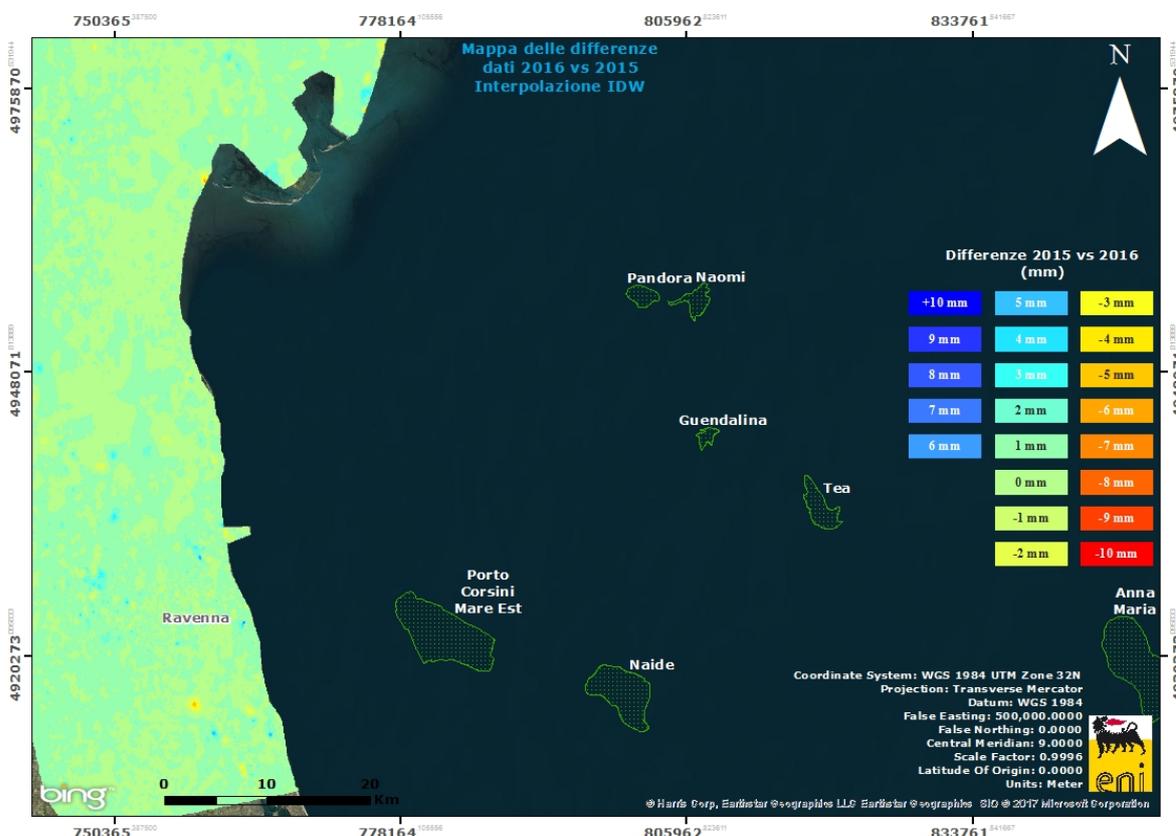


Fig. 5A – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2015 e il 2003-2016, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Comacchio a Cervia

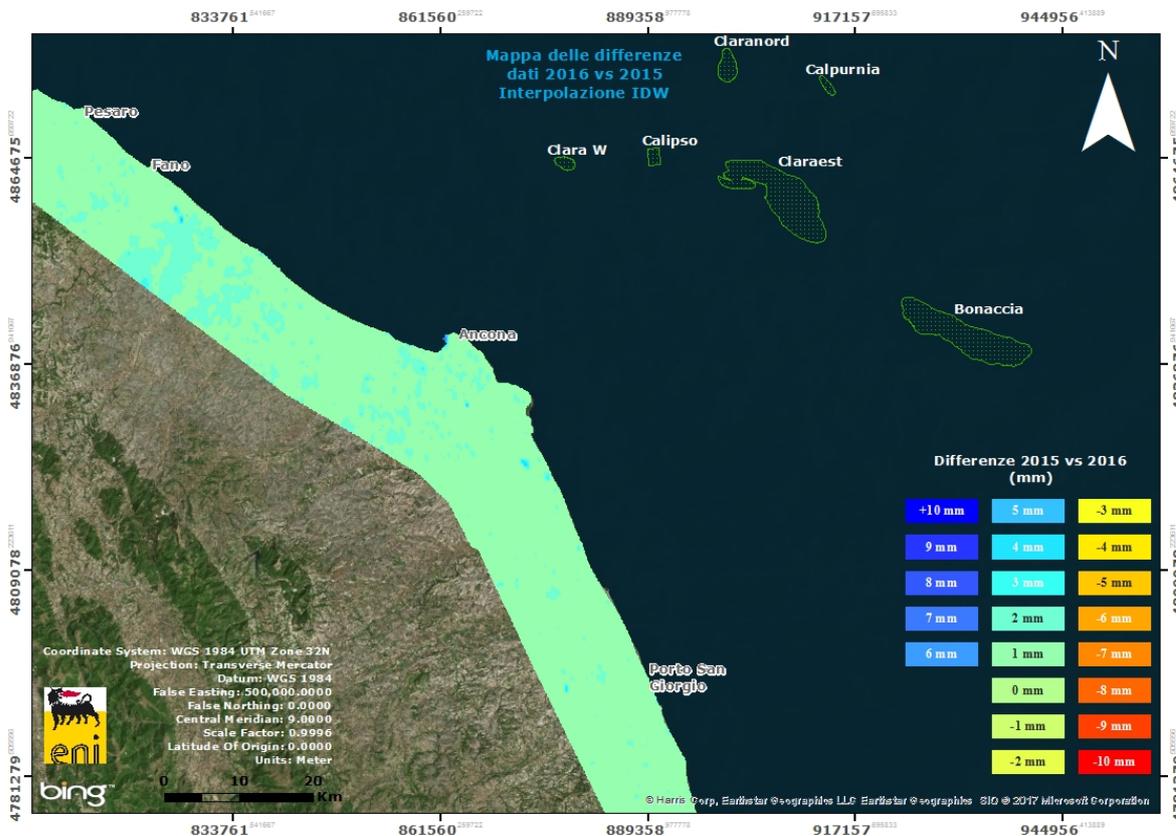


Fig. 6A- Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2015 e il 2003-2016, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Fano a Porto San Giorgio

Appendice 2: Stazioni EPSU lungo la fascia costiera compresa tra Cervia e Ancona - aggiornamento al dicembre 2016

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 2A.

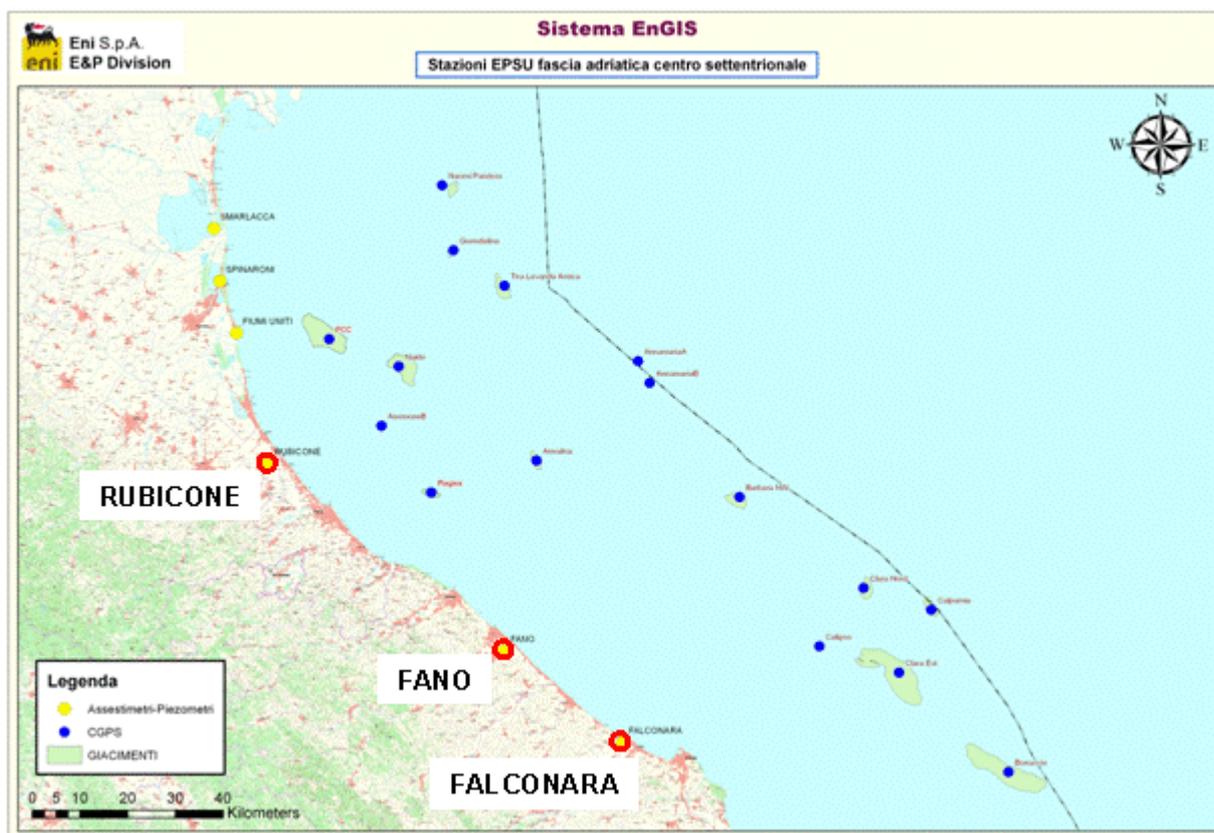


Figura 2A - Ubicazione delle stazioni EPSU.

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

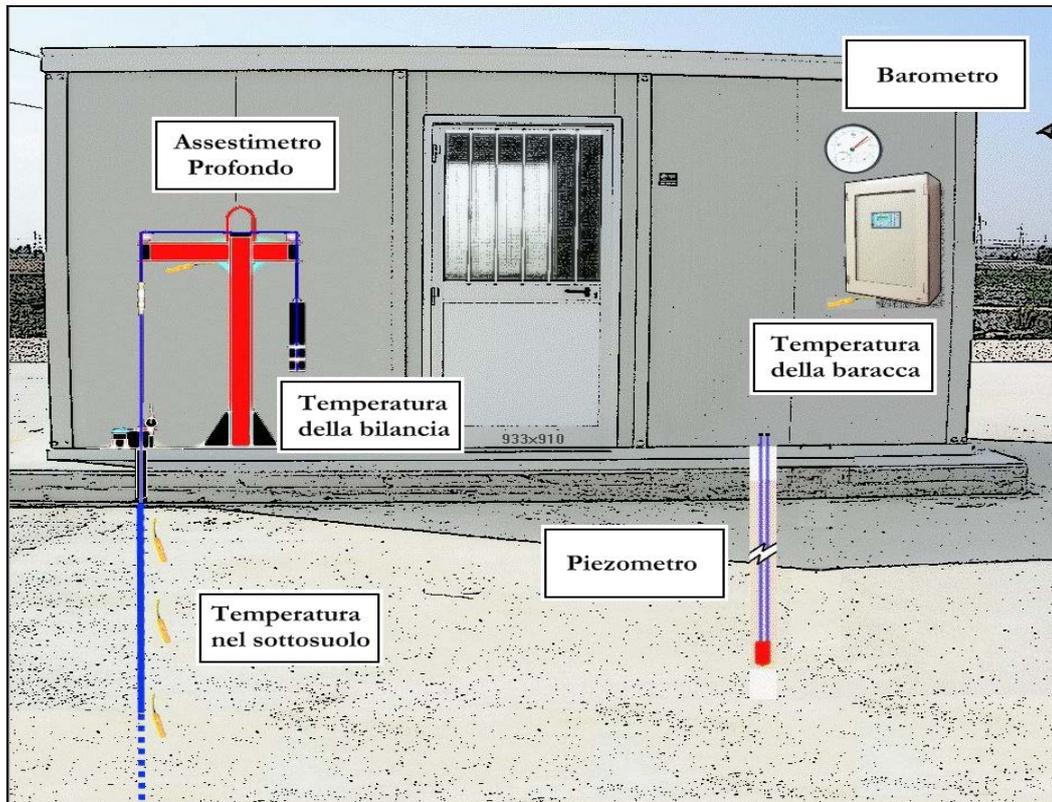


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU



Più in dettaglio, in ciascuna delle 3 stazioni EPSU sono state 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 si allegano:

1. scheda che ne descrive sinteticamente le principali caratteristiche;
2. grafico che mostra l'andamento temporale di tutte le misure;
3. file in formato excel che contiene i valori numerici di tali misure.

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:

- assestimetro - quota bottom: 316 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 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:

- 8 aprile 2009 - 22 maggio 2009 una misura ogni ora;
- 22 maggio 2009 - 2 novembre 2009 una misura ogni 2 ore;
- dal 2 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 black-out 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 2016.

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 (316 m da p.c.).

Nei grafici allegati 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. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano, quindi, una compattazione, valori negativi, viceversa, un incre-

mento 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'assestometro si correla molto bene con le variazioni di quota delle due falde acquifere monitorate dai piezometri rispettivamente a 77 m e 150 m di profondità. Per tutto il periodo osservato si nota, infatti, un ritardo medio di circa 1,5÷2 mesi nella compattazione/espansione del terreno rispetto all'escursione massima (marzo/aprile) e minima (agosto/settembre) di tali falde.

Il livello della falda acquifera sita a 180 m di profondità presenta, invece, un andamento piuttosto costante nel tempo, con basse escursioni stagionali (ca.+/- 1 m), in fase con l'andamento dell'assestometro. Ai massimi (minimi) della falda corrisponde il massimo (dell'espansione (compattazione) registrata dall'assestometro.

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. 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 risultata, infatti, di -2,0 mm/a, ed è abbastanza prossima a quella ottenuta in modo analogo dalle misure assestimetriche che è pari a -2,4 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 causata dalle oscillazioni stagionali delle falde acquifere.

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

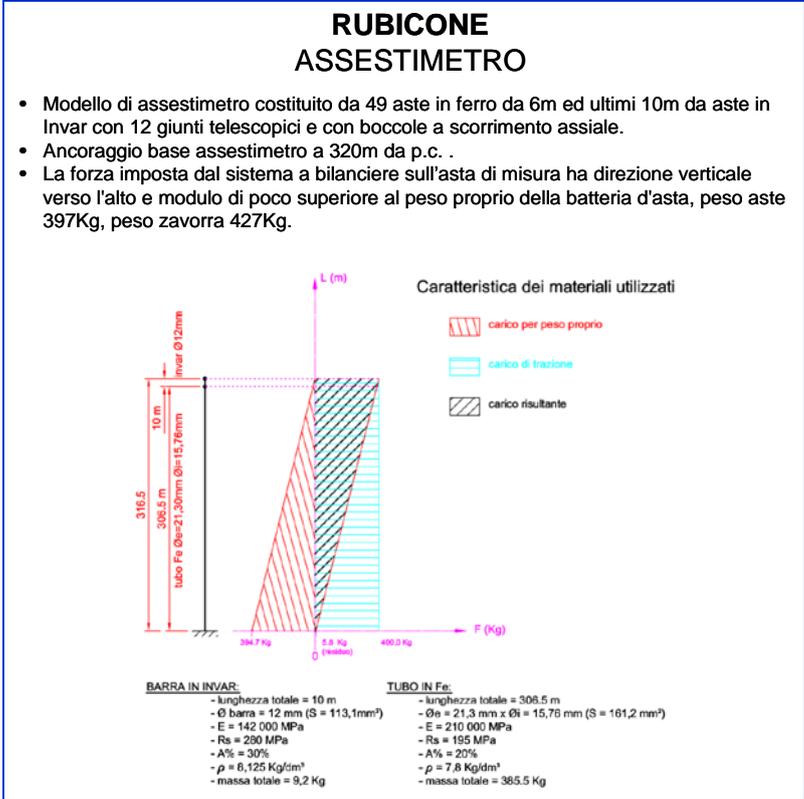
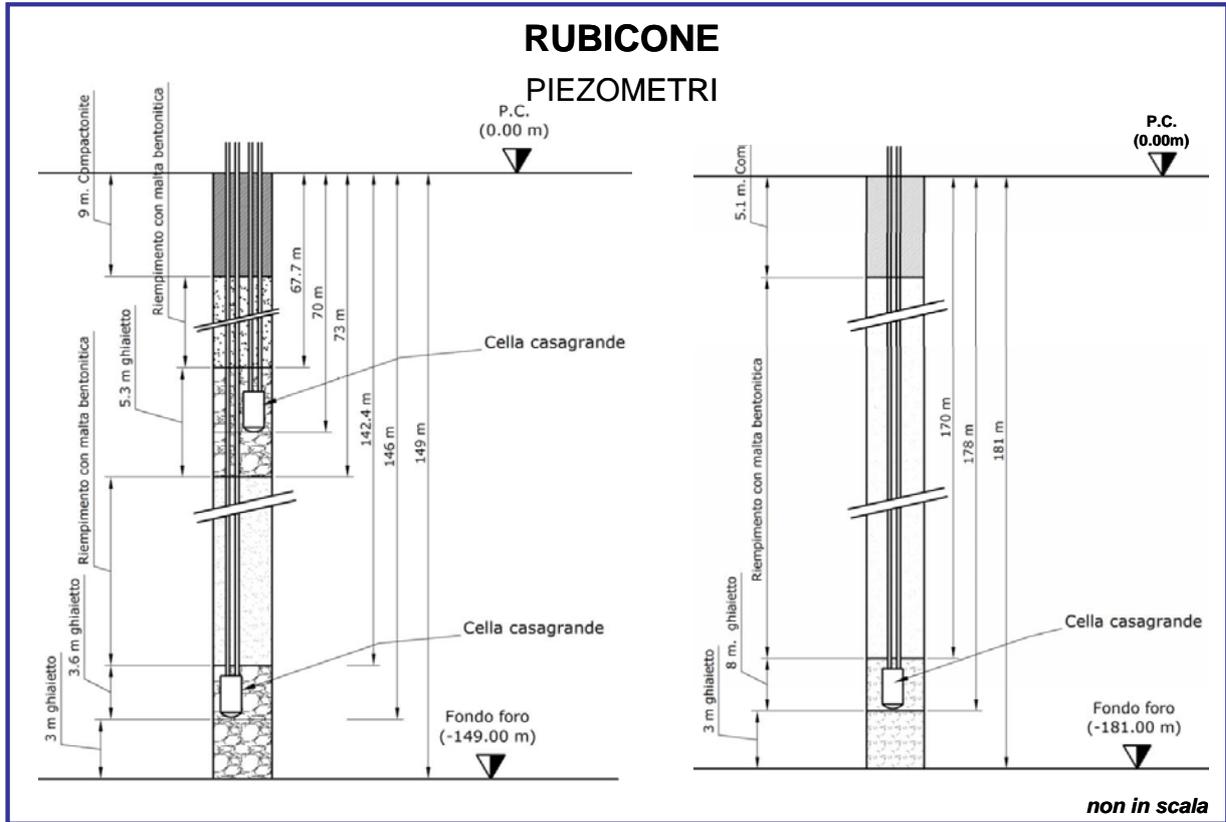
Nei grafici dei piezometri l'ordinata è la quota piezometrica (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico (come seconda ordinata) è riportato il valore della pressione barometrica.

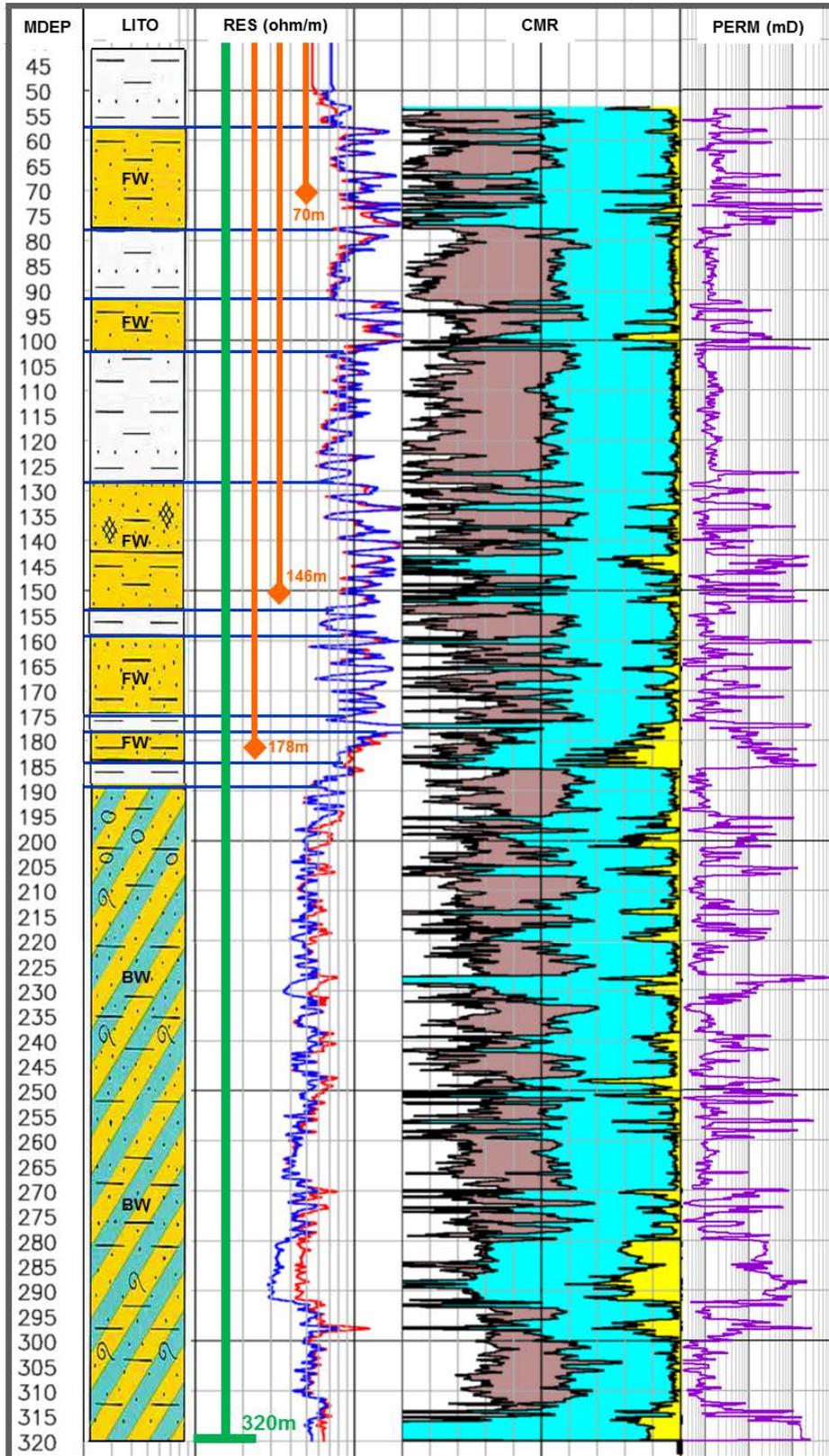
Nel caso di Rubicone si notano delle effervescenze gassose nei tubi piezometrici causate dalla presenza di piccole quantità di gas nell'acqua; il fenomeno del resto era già osservato durante le operazioni di messa in opera dell'attrezzatura. Queste piccole effervescenze causano differenze di misura dei 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.

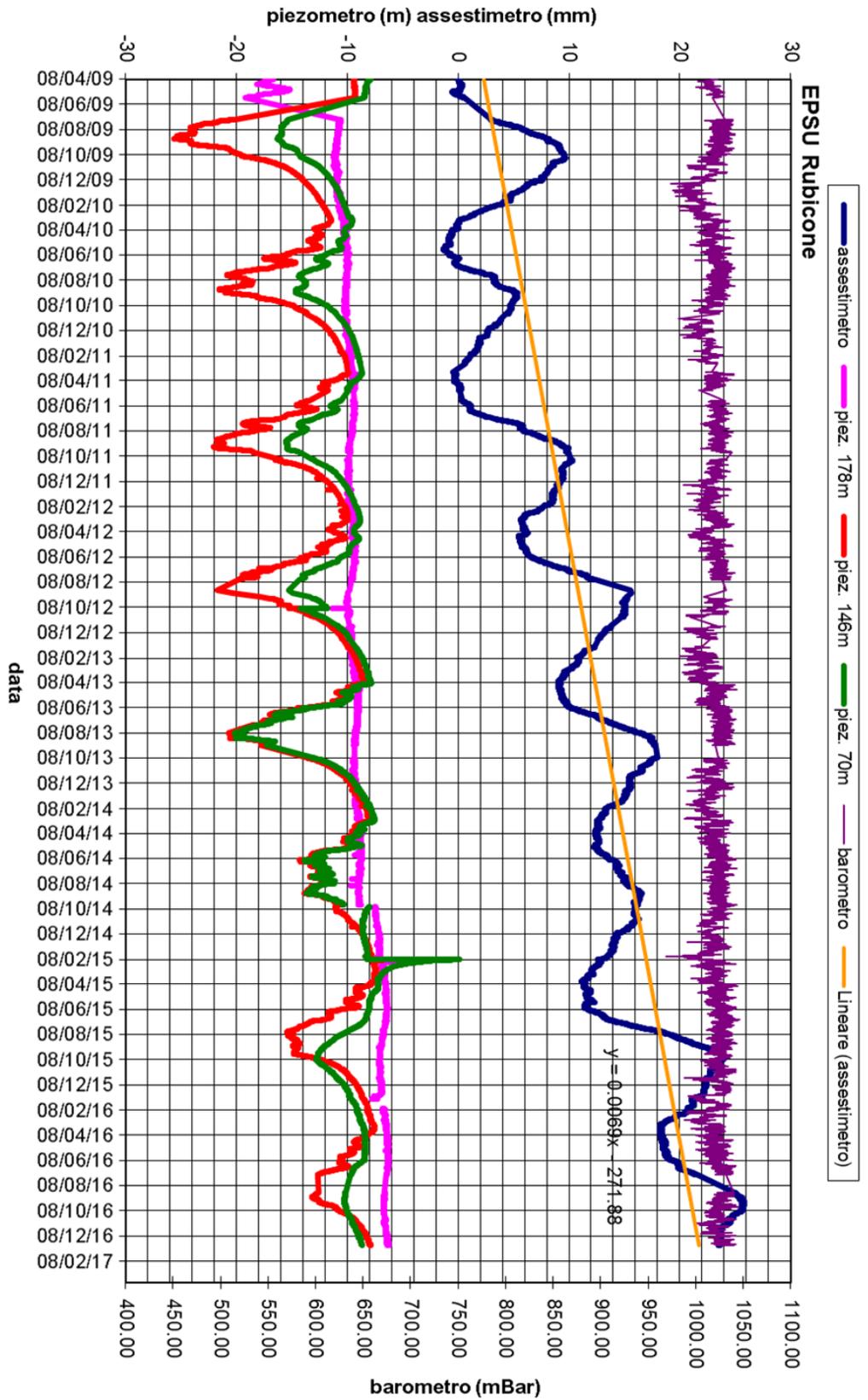
Un nuovo spurgo è stato fatto a fine settembre 2014, controllando accuratamente piezometri e trasduttori. L'affidabilità di questi ultimi, in particolare, è stata accertata facendo alcune misure manuali con freatimetro. Queste sono risultate del tutto in linea con le misure automatiche, consentendo di concludere che tutti i trasduttori erano perfettamente funzionanti e affidabili.

A dicembre 2016 si sono effettuati nuovi controlli manuali del livello delle falde acquifere, accertando una buona rispondenza con le misure automatiche. Tutti i trasduttori si sono, quindi, dimostrati perfettamente funzionanti e affidabili.





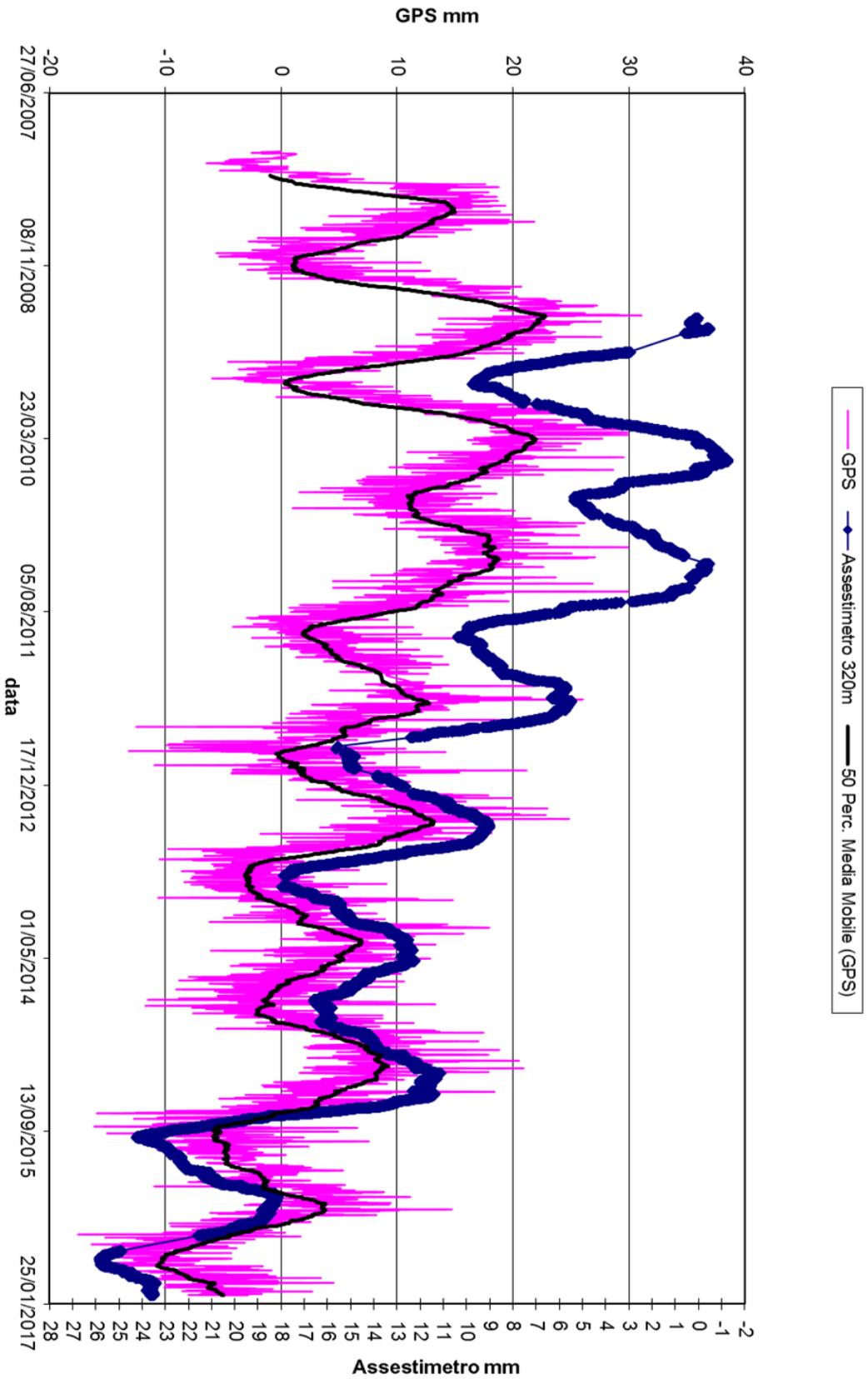
Stazione EPSU Rubicone. Le curve rappresentano i logs litologico-petrofisici tramite cui è stata ricostruita la serie stratigrafica del suolo attraversato.



L'assestimetro misura cedimenti del terreno rispetto all'ancoraggio profondo
 valori positivi = abbassamento
 valori negativi = sollevamento



RUBICONE - Confronto GPS ed assestimetro profondo



Nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva GPS 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 GPS (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: 22 m da p.c.

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,
- 8 maggio 2009 - 31 dicembre 2014 una misura ogni 6 ore.

Nei periodi 7 ottobre 2011 - 2 novembre 2011 e 3 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 2016.

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. 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, quindi, una compattazione e, viceversa, valori negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

Come nel caso della stazione di Rubicone, anche per quella di Falconara la variazione nel tempo delle misure assestimetriche è caratterizzata da una curva ad andamento oscillatorio



molto ben correlabile con le variazioni di livello della falda d'acqua monitorata a 22 metri di profondità dal piezometro. L'assestometro, che reagisce quasi immediatamente all'escursione massima e minima annuale di tale falda, mostra, inoltre, uno stato del terreno senza apprezzabile compattazione.

Identico andamento emerge dall'analisi delle misure di abbassamento/sollevamento del suolo della stazione CGPS installata in loco. La correlazione tra le due curve, assestimetrica e geodetica, 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 calcolata con regressione lineare della serie storica di misure CGPS fornisce una velocità sollevamento di circa 0,2 mm/a; la serie assestimetrica mostra una velocità media annua di compattazione di circa 0,1 mm/a.

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

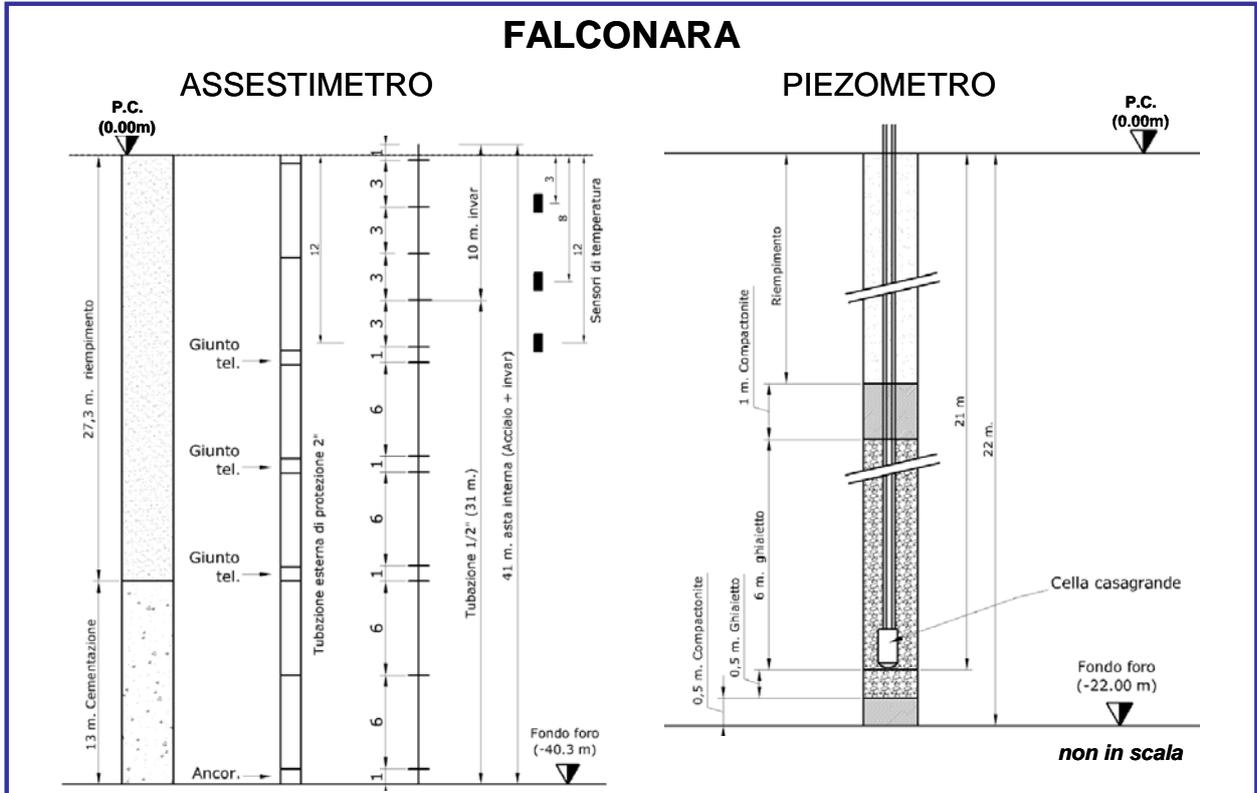
- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano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

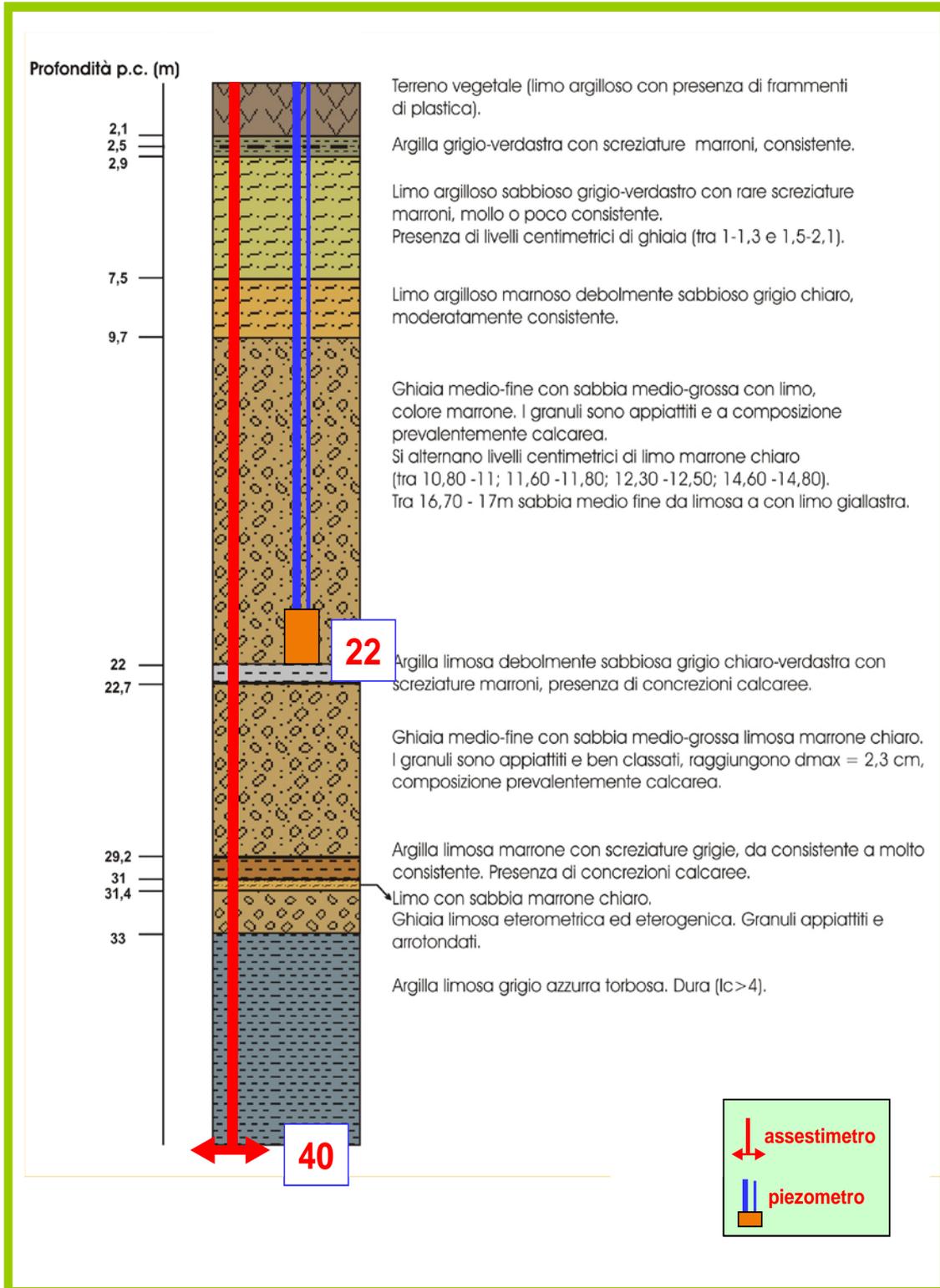
Analisi dei dati piezometrici

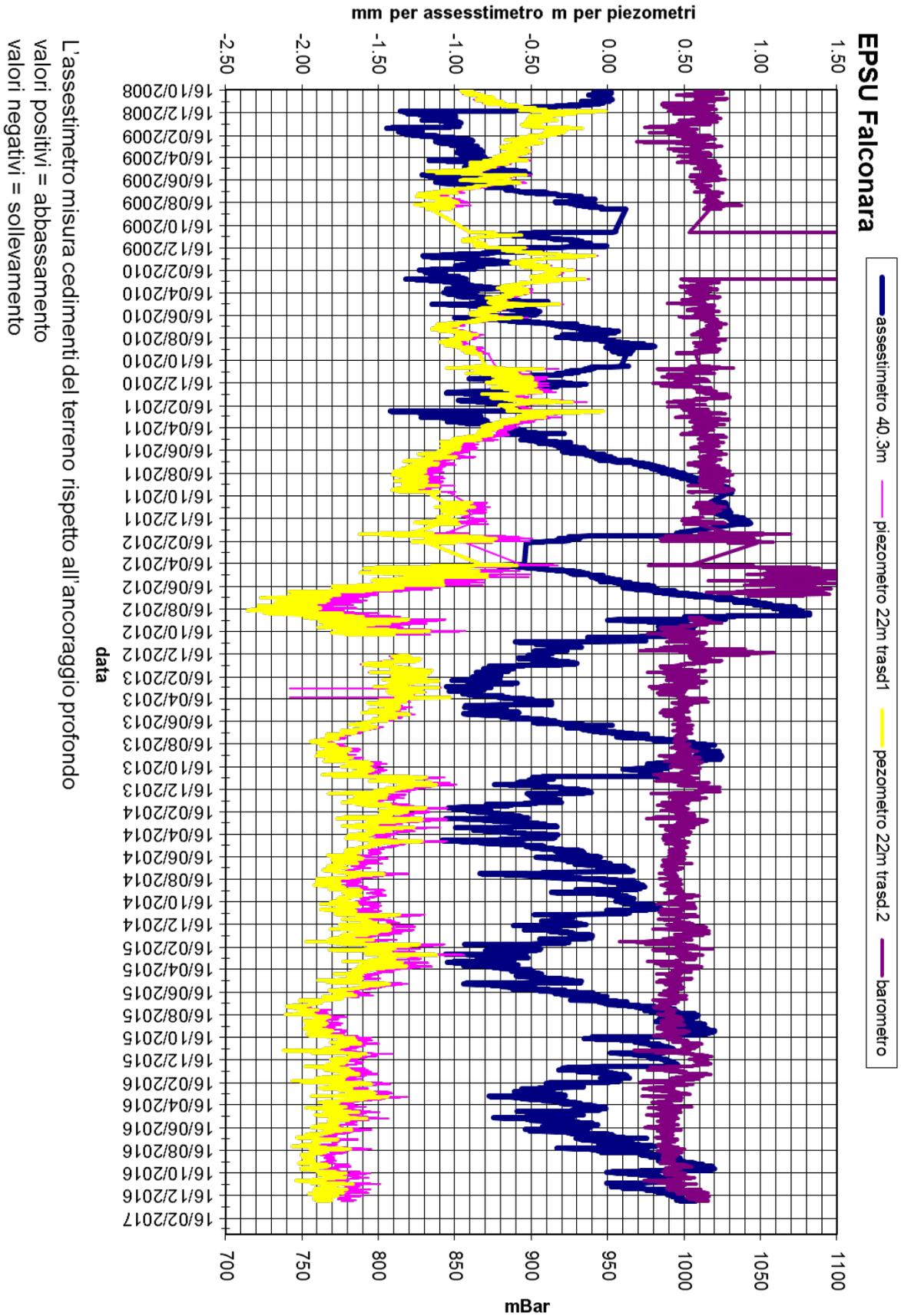
Nello stesso grafico dei dati assestimetrici si è riportata la piezometria (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico è riportato anche il valore della pressione barometrica.

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 2016 si è fatta la manutenzione dei piezometri. In tale occasione si è misurato manualmente con un freatometro 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.

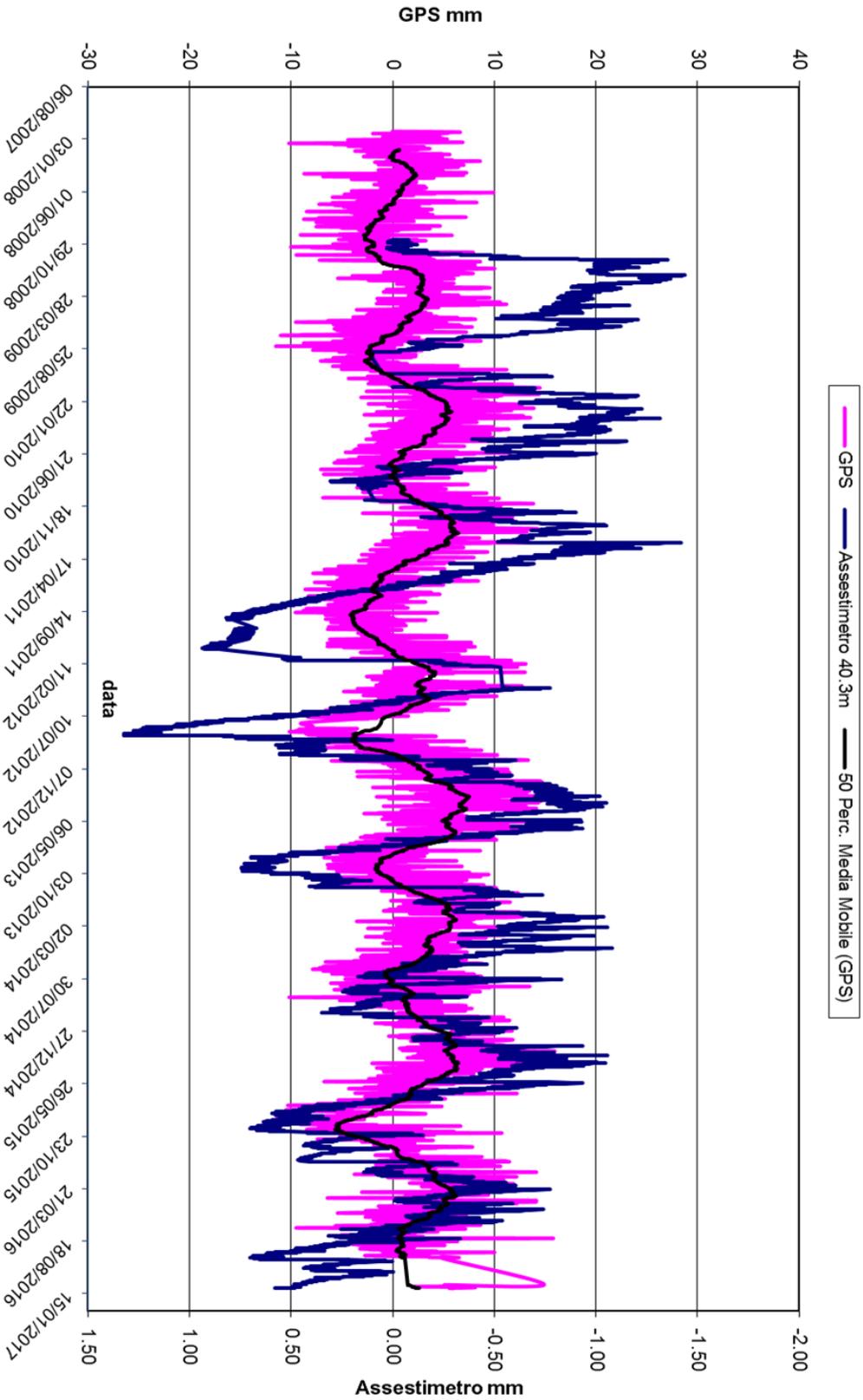








FALCONARA - Confronto GPS ed assestimetro superficiale



Nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva GPS 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 GPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa)



Stazione EPSU di FANO (installata ottobre 2008)

Strumentazione:

- assestimetro - quota bottom: 40,8 m da p.c.
- piezometro a cella singola: quota cella 6,1 m da p.c.

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 – 12/2016) 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 2016.

Analisi dei dati assestimetrici

L’assestimetro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra la superficie (p.c.) e il punto più profondo d’ancoraggio dello strumento (40,8 m da p.c.).

Nei grafici allegati sono riportati per un confronto, sia i dati piezometrici sia quelli assestimetrici. I dati relativi all’assestimetro sono espressi in millimetri e riportano gli spostamenti misurati rispetto a un valore base iniziale (“misura di zero”). Tale misura è quella del 16 ottobre 2008, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell’assestimetro indicano, quindi, una compattazione e, viceversa, valori 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. Tali escursioni - cicliche stagionali - sono dell’ordine di ± 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 a 6 m dal piano campagna, anche se con uno sfasamento temporale (ritardo) di qualche mese.

Nel corso del 2016 si è assistito a un ciclo simile agli anni precedenti, senza significative variazioni; una compattazione di circa 1 mm a inizio anno è stata quasi del tutto recuperata da una successiva espansione estiva, per attestarsi poi intorno a circa 1 mm (nuova compattazione) a fine anno.

In questi primi cicli, quindi, le misure di questa stazione, analogamente a quelle di Falconara, mostrano una situazione del terreno sostanzialmente stabile, con una compattazione complessiva pressochè nulla: si è registrato, infatti, circa di 1 mm di compattazione in poco più di 8 anni di osservazione.

Un comportamento del terreno pressoché identico è registrato dal CGPS ubicato in prossimità della stazione EPSU. Tali misure danno, infatti, la superficie del suolo in leggero innalzamento con velocità media di ca. 0,45 mm/a. A sua volta la velocità media di compattazione stimata con regressione lineare dei dati della serie assestimetrica è praticamente nulla. L'esame comparato delle due serie di misure (assestimetriche e geodetiche CGPS) 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 certa correlazione con gli andamenti stagionali della falda. La curva assestimetrica si presenta, però, sfasata anche rispetto a quella piezometrica, raggiungendo il minimo circa tre 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 assestimetrico.

La curva dei dati CGPS sembra invece più in fase con le 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:

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

Analisi dei dati piezometrici

Nello stesso grafico dei dati assestimetrici si è riportata la piezometria (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico è riportato il valore della pressione barometrica.

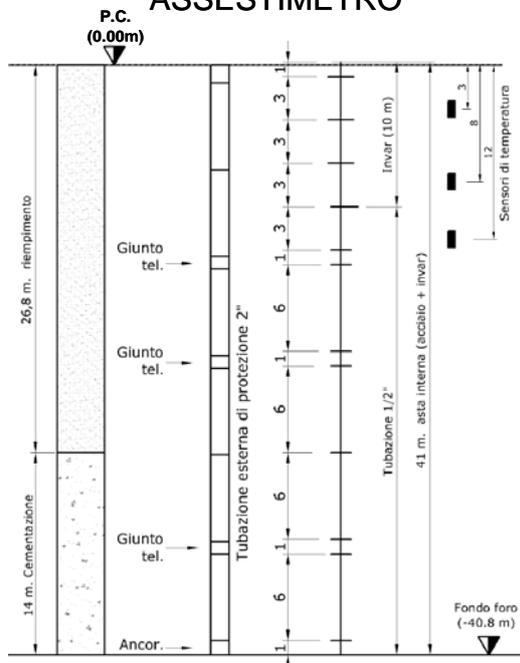
L'installazione di due trasduttori di pressione, uno per ogni canna del piezometro Casagrande, rende possibile controllare il grado di affidabilità del piezometro stesso. In questo caso la differenza di misura tra i due sensori è stata di circa ± 8 cm, il che rientra nella normale tolleranza dello strumento.

L'ultimo controllo generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori, è stato fatto nel dicembre 2016.

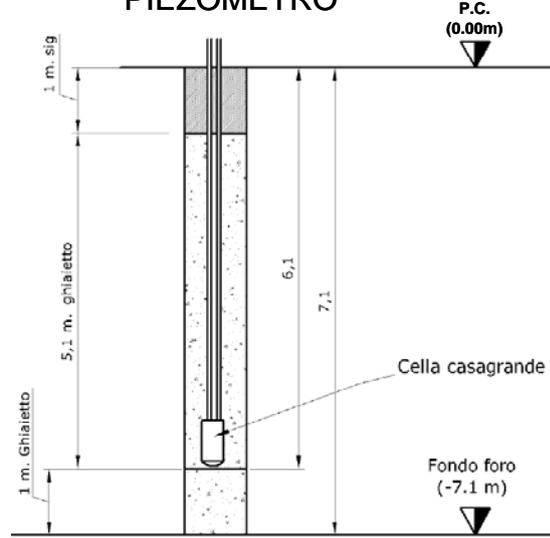


FANO

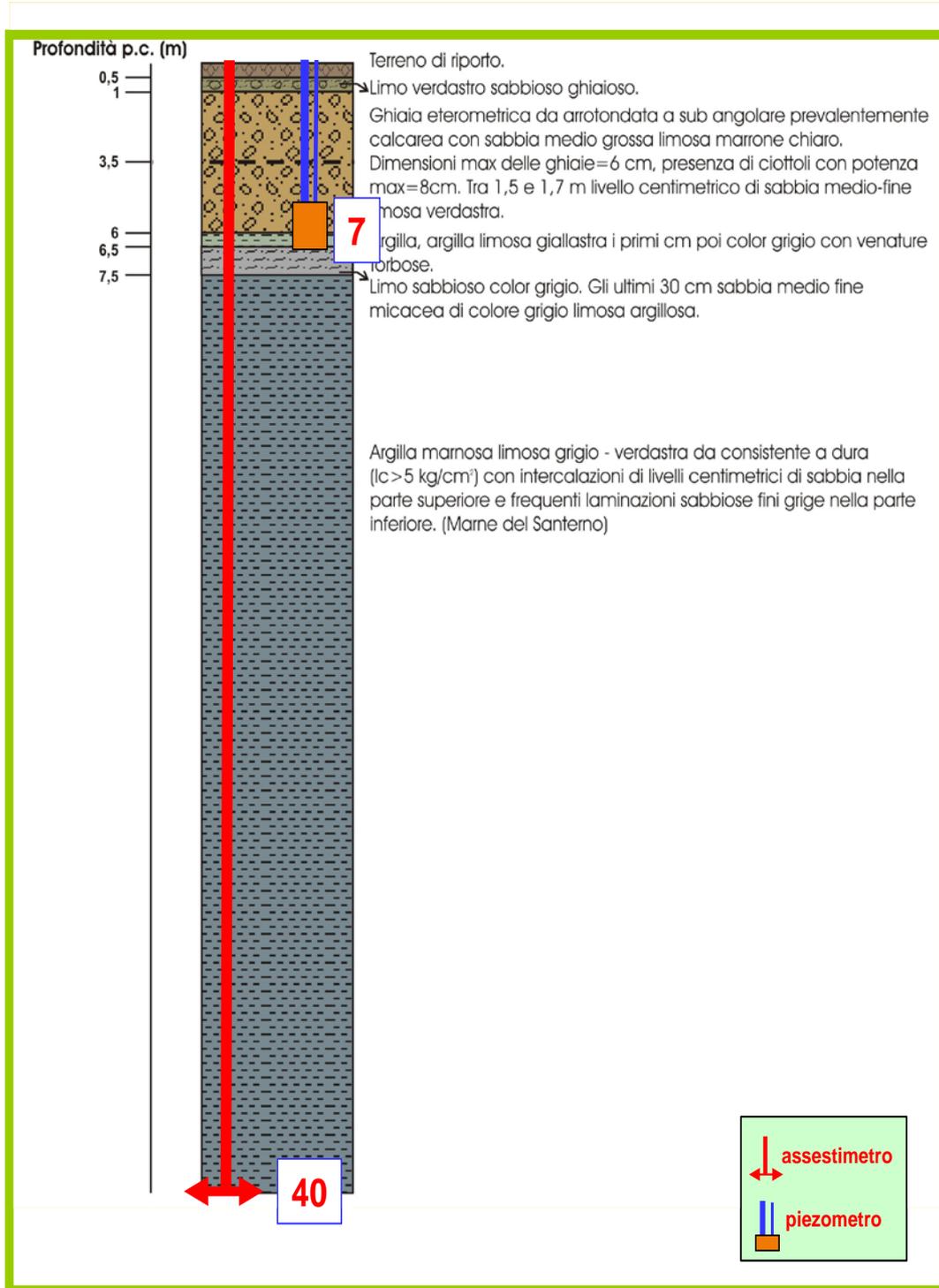
ASSESTIMETRO

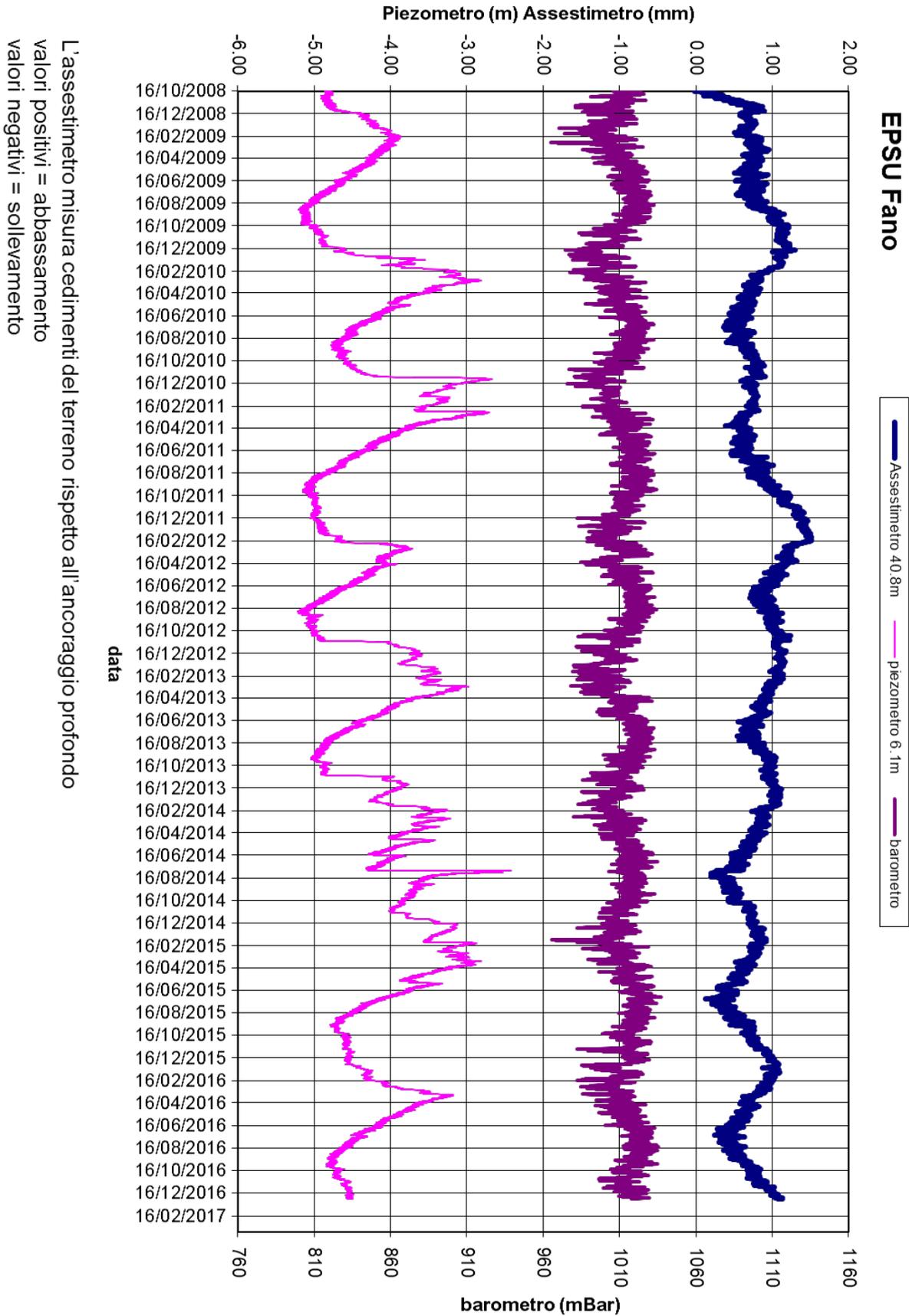


PIEZOMETRO



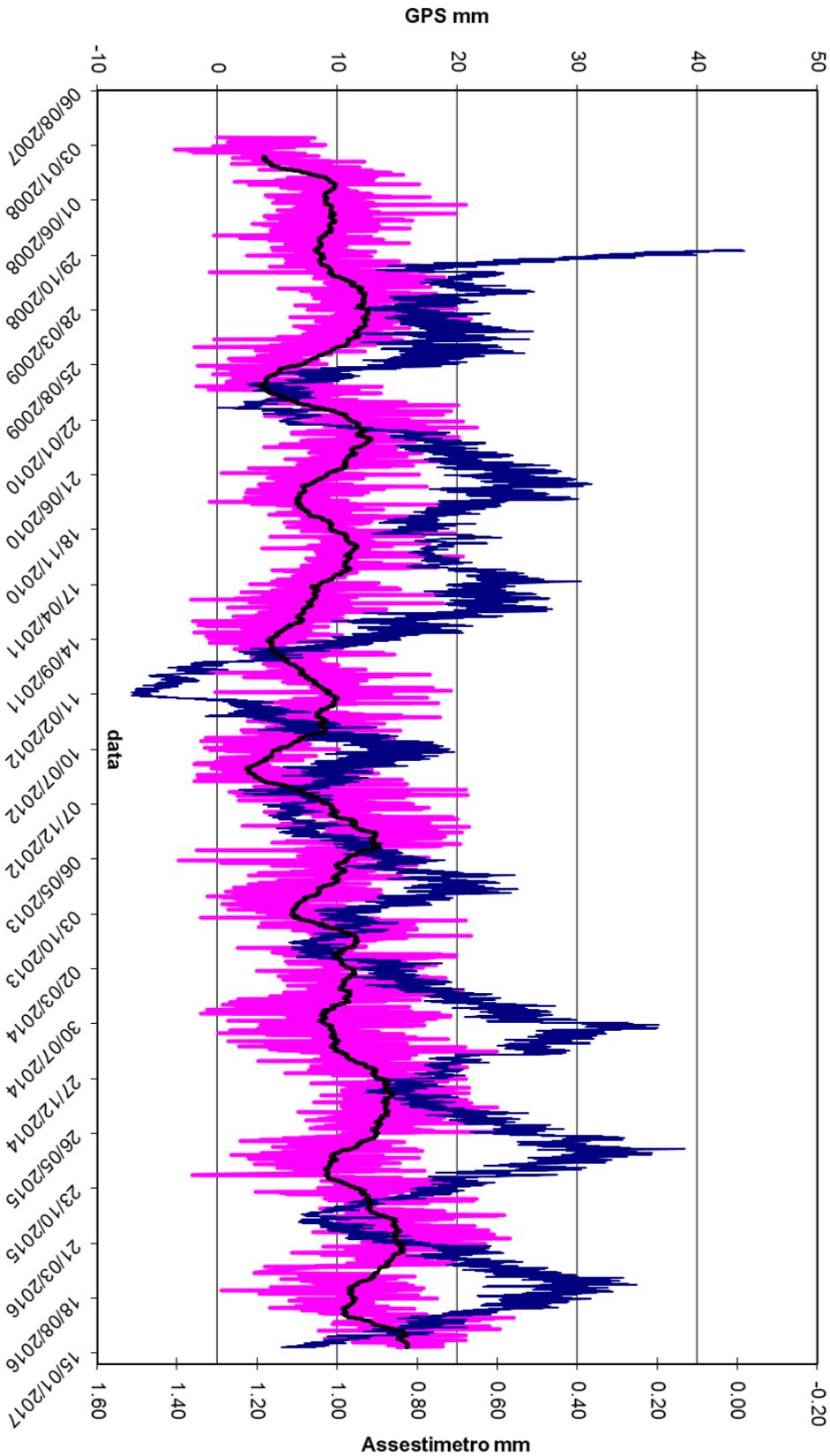
non in scala







FANO - Confronto GPS ed assestimetro superficiale



Nel grafico per meglio apprezzare le modulazioni della curva GPS 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 GPS (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 tra l'andamento stagionale della piezometrica e la compattazione del terreno misurata 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.

Nel caso di Rubicone le variazioni stagionali sembrano essere monitorate solo dai 2 piezometri più superficiali (CGRP-2), mentre quello più profondo (CGRP-1) registra solo deboli variazioni di livello della falda, temporalmente sfasate rispetto all'andamento stagionale delle falde superiori. L'assestimetro di questa stazione, essendo il più profondo delle 3 EPSU, è anche quello che mostra una tendenza crescente nell'insieme delle misure di compattazione, registrando complessivamente 23,3 mm d'abbassamento totale del terreno in oltre 7 anni di funzionamento.

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 8 e più anni di funzionamento ha misurato una compattazione complessiva quasi nulla (1 mm circa).

La tabella che segue riporta per ciascuna stazione la compattazione complessiva del terreno e la relativa velocità media annua, valutate semplicemente sulla base della misura assestimetrica al 31/12/2016 e degli anni complessivi di monitoraggio. In questo caso non si è fatta alcuna regressione lineare dei valori della serie storica assestimetrica. Questo procedimento potrebbe dare, pertanto, 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.

Stazione	Anni d'osservazione	Assestometro profondo		Assestometro superficiale	
		Compattazione complessiva (mm)	Velocità (mm/a)	Compattazione complessiva (mm)	Velocità (mm/a)
Rubicone	7,75	23,3	3,0	-	-
Fano	8,21	-	-	1,1	-
Falconara	8,21	-	-	0,4	-