

Campo di BONACCIA

Aggiornamento al 31/12/2016

Il campo di Bonaccia è ubicato nell'offshore adriatico in prossimità della linea mediana a 60 km dalla costa, a Est del promontorio del Monte Conero. Il fondale marino in tale zona è di circa 87 metri. Il campo ricade nella concessione B.C17.TO (scadenza il 18/10/2018) inizialmente rilasciata alla joint venture TMF (Total operatore, Merloni, Foster Wheeler), acquisita poi interamente da Eni nel 1997 (Figura 1).

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
B.C17.TO	18/10/18	Eni	Eni	100%	Marche

Da un punto di vista geologico l'area di Bonaccia-Bonaccia Est si trova sul margine più esterno del bacino di avanfossa appenninica Plio-Pleistocenico che ricopre la parte più esterna della rampa di avanpaese. L'elemento tettonico principale è il fronte del *thrust* Dinamico, con orientazione NW-SE, di età tardo Cretacica-Eocenica. I livelli mineralizzati a gas sono stati rinvenuti a una profondità compresa tra 750 e 1060 m slm e appartengono alla formazione Carola, costituita da depositi torbiditici di età Pleistocenica, in particolare dalle sequenze stratigrafiche denominate PLQ1 e PLQ (Figura 2). La struttura del giacimento è rappresentata da tre culminazioni: la zona centrale, interessata dallo sviluppo dei pozzi della p.ma Bonaccia; la parte orientale che è stata confermata da pozzi Bonaccia Est 1, Est 2dir ed Est 3dir e la parte occidentale, oggetto dello sviluppo del campo del 2015.

Il giacimento è stato scoperto nel periodo 1981-1985 con la perforazione da parte di Total del pozzo esplorativo Bonaccia 1. I successivi tre pozzi appraisal (Bonaccia 2, 3 e 4) hanno confermato la mineralizzazione e delineato l'estensione del campo. Il pozzo Bonaccia Sud 1, perforato nel 1981 per verificare l'estensione della struttura nella zona a SE, è risultato sterile.

Nel 2002 è stato perforato il pozzo esplorativo Bonaccia Est 1 che ha invece confermato l'estensione della mineralizzazione sulla culminazione della struttura di Bonaccia Est. I livelli mineralizzati di Bonaccia Est sono parzialmente separati da quelli di Bonaccia sia a causa

di una sella fra le 2 strutture, sia per la presenza di “slump” o altro tipo di barriera non rilevabile dall’interpretazione sismica.

Il campo di Bonaccia è stato sviluppato da Eni tra il dicembre del 1997 e aprile del 1998 con la perforazione da piattaforma fissa di sette pozzi completati con string doppia ed equipaggiati con dispositivi di “sand control ICGP” (Inside Casing Gravel Pack) per complessive 14 stringhe produttive. La produzione di gas è stata avviata nel febbraio del 1999; attualmente solo 8 stringhe sono in erogazione. Nel 2007 sono stati fatti alcuni interventi per migliorare il recupero di gas dal giacimento perforando dalla piattaforma Bonaccia un nuovo pozzo di in-filling (Bonaccia 12dir) e facendo un side-track del pozzo Bonaccia 11dir.

La culminazione di Bonaccia Est è stata sviluppata nel 2010 con la perforazione dei due pozzi Bonaccia Est 2dir e Bonaccia Est 3dir. Questi ultimi, equipaggiati con croci di produzione sottomarine e collegati all’esistente piattaforma Bonaccia mediante un nuovo sealine da 6”, sono stati posti in produzione nell’ottobre 2010.

Quanto al processo autorizzativo, Eni ha presentato, in data 31/08/05, un’istanza di variazione programma lavori finalizzata al recupero incrementale di riserve certe di gas nell’ambito della concessione di coltivazione idrocarburi B.C17.TO. Nel corso del procedimento, dopo aver fornito integrazioni di progetto al Ministero dello Sviluppo Economico (UNMIG Bologna), Eni ha depositato il SIA per la realizzazione delle opere riguardanti la “*Variazione programma lavori - progetto Bonaccia Est*” chiedendo la pronuncia di compatibilità ambientale. In data 15/06/09, il MATTM ha decretato, con giudizio positivo, la compatibilità ambientale del progetto (DSA-DEC-2009-0000582).

Nel documento SIA, Eni ha presentato i risultati di uno studio modellistico geomeccanico a elementi finiti (*rel. Eni-INPE: Campo di Bonaccia Est - Modello predittivo di subsidenza del settembre 2007*) per valutare la possibile subsidenza indotta dalla produzione di gas dei sopraccitati pozzi Bonaccia Est 2dir e Bonaccia Est 3dir; tale studio è stato basato sui risultati della revisione degli studi statico e dinamico di giacimento (Bonaccia-Bonaccia Est), riportati nella nota integrativa “*Eni-INPE: Relazione Tecnica per perforazione e allacciamento alla produzione - 98/2007 del luglio 2007*”.

Le previsioni del modello geomeccanico hanno stimato, nel caso dello sviluppo di Bonaccia Est, una subsidenza massima pari a 22 cm al 2015 che si assesta a circa 20 cm al 2042 (fi-



ne simulazione). Riguardo all'estensione del cono di subsidenza, la distanza della linea d'isosubsidenza dei 2 cm dalla costa è risultata pari a circa 49 Km.

Il modello dinamico di giacimento (Eclipse 3D) del luglio 2007 era stato esteso a tutta l'area interessata dal complesso dei livelli mineralizzati di Bonaccia-Bonaccia Est e all'acquifero circostante. Il profilo di produzione ottenuto prevedeva il recupero di 3355 MSm³ di riserve residue in 23 anni. Poiché la produzione cumulativa al 31/12/06 era di 2950 MSm³, le riserve totali del campo ammontavano a tale data a 6305 MSm³, di cui 1845 MSm³ di riserve residue producibili dai livelli di Bonaccia e 1510 MSm³ dalla culminazione Bonaccia Est.

Nel 2011 si è stato nuovamente aggiornato il modello Eclipse di giacimento (*rel. GISE 09/2011- Studio di giacimento valutazione potenziale residuo e sviluppo area NW*) allo scopo:

- di progettare lo sviluppo dell'area NW del campo con l'installazione di una nuova piattaforma da cui perforare 4 pozzi: Bonaccia NW 1dir, Bonaccia NW 2dir, Bonaccia NW 3dir e Bonaccia NW 4dir (*rel. GIAC/CS 31-2011 del novembre 2011 Campo di Bonaccia Progetto di sviluppo – Realizzazione dei pozzi - Relazione tecnica di giacimento*);
- di massimizzare i recuperi di gas sia dall'area "principale" che da quella "Est".

La revisione geologico-strutturale del giacimento è stata fatta utilizzando la reinterpretazione sismica dell'area NW del 2010.

Il volume di GOIP stimato dal nuovo studio di giacimento è stato pari a 13280 MSm³ (11655 MSm³ nello studio del luglio 2007); tale cifra include anche il volume di gas in posto nella culminazione NW.

Le riserve totali calcolate con questa revisione sono risultate di 9083 MSm³ recuperabili al 2038, di cui 1999 MSm³ associati allo sviluppo dell'area NW del campo. Il fattore di recupero finale del campo, con riferimento al GOIP 2011, è stato valutato, pertanto, pari al 68%. Tali riserve si sono, quindi, incrementate del 44% rispetto a quelle dello studio del luglio 2007 (6305 MSm³ producibili al 2029) a fronte di un incremento del GOIP pari al 14%.

Nel 2014 è stato nuovamente rivisto il modello Eclipse del giacimento (*rel. GISE 09-14 del luglio 2014 " Aggiornamento studio di giacimento per modello geomeccanico"*) per aggiornarne l'history match sulla base produzioni mensili storiche sino al giugno 2014 e così meglio

riprodurre la storia produttiva, e per poter, inoltre, meglio valutare l'eventuale subsidenza indotta mediante simulazioni con modello geomeccanico.

Il nuovo studio si è proposto, inoltre, di verificare e confermare le valutazioni fatte con lo studio 2011 per lo sviluppo delle aree NW ed Est del campo (sviluppo dell'area NW con la perforazione di 4 pozzi e infilling dell'area Est con la perforazione di un pozzo). Allo scopo, il modello geo-strutturale del campo e la caratterizzazione petrofisica dei layers di tale studio sono stati considerati ancora validi, in quanto non sono stati in seguito acquisiti nuovi dati geologici.

Il GOIP statico non è stato modificato rispetto allo studio 2011, mentre il GOIP dinamico post-history match è risultato incrementato a 13761 MSm³ (studio 2011 pari a 13280 MSm³). Nel caso Do Nothing + Sviluppo Area NW + Infilling Area Est, la produzione di gas per il periodo 01/06/2014 – 01/01/2036 è stata prevista pari a 4018 MSm³, di cui:

- 1127 MSm³ Do Nothing;
- 2409 MSm³ Sviluppo Area NW;
- 482 MSm³ Infilling Area Est.

Complessivamente il nuovo modello di giacimento ha valutato le riserve complessive di tutta l'area in 9160 MSm³ al 2035 (Figura 3).

Nel corso del 2015 è stato avviato il nuovo progetto di sviluppo che ha interessato la culminazione NW del campo di Bonaccia e per cui sono stati perforati 3 pozzi, Bonaccia NW 1dir, Bonaccia NW 2dir e Bonaccia NW 3dir, a partire dalla nuova p.ma di Bonaccia NW, che è stata allacciata alla piattaforma preesistente di Bonaccia e avviata alla produzione a ottobre 2015. Su questa piattaforma è stato installato un CGPS per il monitoraggio della subsidenza in aggiunta a quello già messo in opera nel 2008 sulla p.ma Bonaccia. Il pozzo Bonaccia NW 1dir è stato poi equipaggiato con marker per il controllo in situ della compattazione profonda. Dopo l'installazione dei marker, nel tratto di foro compreso tra 709 m e 1092 m (MD) circa, si è acquisito nell'agosto 2015 il rilievo base.

Nella Figura 4 e Figura 5 sono presentati rispettivamente il grafico della produzione storica e il confronto tra i profili di pressione calcolati da modello Eclipse del luglio 2014 con le pressioni statiche misurate nel livello ritenuto più rappresentativo del campo (livello PQ-B).

Al 31/12/16 il volume di riserve già prodotte è stato pari a 5956 MSm³, ovvero il 65% del totale calcolato con lo studio di giacimento del luglio 2014.

A seguito degli aggiornamenti dei modelli di giacimento del 2011 e 2014 si sono aggiornati anche i relativi modelli geomeccanici.

In particolare, con l'aggiornamento del 2011 (*rel. TERA 11/2011- Campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia NW – Modello Elasto-plastico di subsidenza – Management Summary*), il coefficiente di compressibilità uniassiale della roccia serbatoio è stato calibrato sulla base delle misure CGPS, e nel modello si è tenuto conto nella stima della subsidenza indotta dalla produzione di Bonaccia e di Bonaccia Est anche delle possibili interferenze - idraulica e meccanica - derivanti dalla futura produzione di gas dell'area NW.

In questo aggiornamento si sono considerati 2 possibili scenari produttivi:

- **caso DN** (Do Nothing) relativo alla produzione di Bonaccia+Bonaccia Est con fine produzione al 2030 e simulazione protratta al dicembre 2060 per considerare l'effetto di propagazione del disturbo di pressione in giacimento e in acquifero dopo la chiusura dei pozzi. Per questo scenario la produzione cumulativa di gas al 2030 è stata prevista in circa 7 GSm³;
- **caso 3P** relativo alla produzione di Bonaccia+Bonaccia Est e allo sviluppo di Bonaccia NW con fine produzione al 2040 e simulazione protratta al dicembre 2070 per considerare l'effetto di propagazione del disturbo di pressione in giacimento e in acquifero dopo la chiusura dei pozzi. Per questo scenario la produzione cumulativa di gas 2040 è stata prevista in circa 9 GSm³.

•
Per lo scenario relativo al caso **3P** (Bonaccia + Bonaccia Est + Bonaccia NW) la subsidenza massima al termine della simulazione (2070) è stata valutata raggiungere 245 cm. In particolare, sulla culminazione NW la subsidenza è stata stimata in 237 cm. La distanza minima del bordo del cono di subsidenza (linea d'isosubsidenza di 2 cm) dalla costa è risultata, invece, di circa 51 km.

Con il successivo aggiornamento del modello geomeccanico del 2014 (*rel. TERA 11/2014- Campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia NW – Modello Elasto-plastico di subsidenza –*

Management Summary), le simulazioni fatte hanno preso in esame due diversi scenari produttivi: uno scenario “Do Nothing” e uno scenario “Do Nothing + sviluppo area NW + Infilling Area Est”. Per entrambi gli scenari le simulazioni sono state protrate per oltre 30 anni dopo la chiusura del campo in modo da considerare l’effetto dell’evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

I risultati per i due scenari esaminati sono riassunti nelle seguenti tabelle:

Tabella 1 – Risultati finali: massima subsidenza (espressa in cm) ed estensione del fenomeno per il caso “Do Nothing”

Date	Massima Subsidenza (cm)	Massima Estensione A (km)	Massima Estensione B (km)
1-giu-2014	181	12	3
1-gen-2018	193	12	4
1-gen-2033	191	13	4
1-gen-2069	187	14	5

Tabella 2 – Risultati finali: massima subsidenza (espressa in cm) ed estensione del fenomeno per il caso “Do Nothing + Sviluppo Area NW+Infilling Area Est”

Date	Massima Subsidenza (cm)	Massima Estensione A (km)	Massima Estensione B (km)
1-giu-2014	181	12	3
1-gen-2033	423	13	4
1-gen-2036	421	13	4
1-gen-2069	398	14	5

L’analisi di tali risultati consente di concludere che:

- nel caso “Do Nothing” il valore massimo di subsidenza è pari a 193 cm. Tale valore è raggiunto nel 2018 e diminuisce leggermente a 187 cm alla fine della simulazione (2069);



- nel caso “Do Nothing + Sviluppo Area NW+Infilling Area Est”, il valore massimo di subsidenza è pari a 423 cm. Tale valore è raggiunto nel 2033 e si riduce a 398 cm alla fine della simulazione (2069).

Anche in questo nuovo aggiornamento del modello geomeccanico la linea d'isosubsidenza dei 2 cm si mantiene per tutti gli scenari considerati a una distanza dalla costa sempre superiore a 52 km (Figura 6). In Figura 7 è mostrata l'evoluzione della subsidenza nel tempo per il campo di Bonaccia.

Il fatto che tutti gli studi geomeccanici, sino a ora eseguiti tenendo conto dei possibili fenomeni 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 52 km), ha una spiegazione nel particolare assetto geologico dell'area stessa. Tale assetto è ricostruito nella sezione stratigrafico-strutturale di Figura 8, che è stata interpretata su base sismica e controllata con dati di pozzo e nella quale sono evidenziati i rapporti verticali e laterali tra le formazioni (reservoir e copertura) e il substrato.

Lungo la direttrice esaminata (WSW – ENE) in direzione della costa, i livelli mineralizzati si chiudono per limite deposizionale in onlap sui livelli argillosi della F.ne Santerno, che è un'importante barriera idraulica verso costa. La successione terrigena di copertura è, inoltre, relativa a intervalli stratigrafici differenti dalle zone reservoir di Bonaccia-Bonaccia NW.

Tutto ciò esclude la possibilità di un'eventuale depressurizzazione e, quindi, compattazione dei sedimenti sia sulla costa sia nelle fasce antistanti al litorale.

Il modello geomeccanico tiene conto della presenza di tale barriera idraulica di tipo sedimentologico-strutturale e, coerentemente, prevede l'esaurimento del fenomeno subsidenziale a grande distanza (circa 52 km) dalla costa.

Inoltre, come analizzato in uno studio del Prof. Colantoni allegato al SIA di Bonaccia NW (11/2011- *Impatti ambientali sulla costa e sui fondali marini dovuti alla subsidenza indotta dalla estrazione di gas dei campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia NW (Adriatico Centrale) – Prof. P. Colantoni*), sono da escludersi anche possibili effetti trappola e di richiamo dei sedimenti per effetto della formazione di un cono di subsidenza quale quello previsto dal modello geomeccanico per l'area di Bonaccia. Ciò a causa di una dinamica costiera debole, incapace di trasportare il materiale detritico grossolano di spiaggia tipico dell'area costiera

antistante al campo. Sono, pure, da escludersi interferenze nella dinamica deposizionale del fondale, essendo l'area in esame caratterizzata da scarsa sedimentazione. In sintesi, lo studio del Prof. Colantoni evidenzia come la possibile subsidenza indotta dall'estrazione di gas prevista nel progetto di Bonaccia NW, e più in generale dal campo di Bonaccia+Bonaccia Est, non possa alterare sensibilmente i processi naturali di trasporto di materiale solido e di sedimentazione dell'area esaminata.

In ottemperanza alle prescrizioni contenute nel DEC/VIA 2009-0000582 del 15/06/2009 è stato acquisito un rilievo batimetrico nell'area di Bonaccia-Bonaccia Est tra il 29 Novembre 2009 e il 2 Marzo 2010.

L'area investigata è situata nel Mare Adriatico Centrale a circa 65 Km a Est da Ancona (Figura 9a). Il rilievo batimetrico di precisione è stato eseguito mediante ecoscandaglio multi-beam su un'ampia area di 410 Km² comprendente i campi di Bonaccia, Bonaccia Est e l'area di Bonaccia NW. La carta batimetrica che ne deriva evidenzia una topografia alquanto accidentata, caratterizzata da una sorta di depressione centrale (profondità massima rilevata - 91.4 m) limitata verso NW e verso SE da due superfici più alte e regolari in lieve pendenza (profondità minima di circa -79.3 m nella parte nord). La rappresentazione 3D (Figura 9b) mostra chiaramente l'andamento generale e le strutture sedimentarie dei fondali, mentre il dettaglio delle isobate è riportato in Figura 9c.

L'area del rilievo si può idealmente dividere in tre zone, separate all'incirca dalle batimetriche di -83/-84 m: due zone laterali, una a nord-ovest e l'altra a sud-est dell'area, dal fondale piuttosto regolare con basse pendenze e una zona centrale più profonda e articolata. In particolare, si può notare come questa zona centrale sia la più irregolare e presenti diffuse emanazioni di gas, accompagnate da ampie depressioni, affioramenti di rocce e qualche vulcano di fango.

Canali e molte strutture tipo pockmark, buchi e depressioni accompagnate da qualche concrezione sono, tuttavia, presenti anche nella zona di Nord-Ovest. Più regolare appare invece il dolce pendio della zona di Sud-Est, il quale è tuttavia interrotto verso Est da una netta rottura di pendenza, con un gradino da 83 a 87 m di profondità, causato dalla nicchia di distacco di una frana sottomarina.

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 del Fenomeni di Subsidenza nell'Ambito dei Progetti di Sviluppo Sostenibile di Campi ad Olio e Gas"* emesse dal Dip. DMMMSA dell'Università di Padova nel 2007.

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

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

La rete di livellazione, rilevata nel 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 degli esperti 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 Bonaccia, 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) 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 ¹ 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;

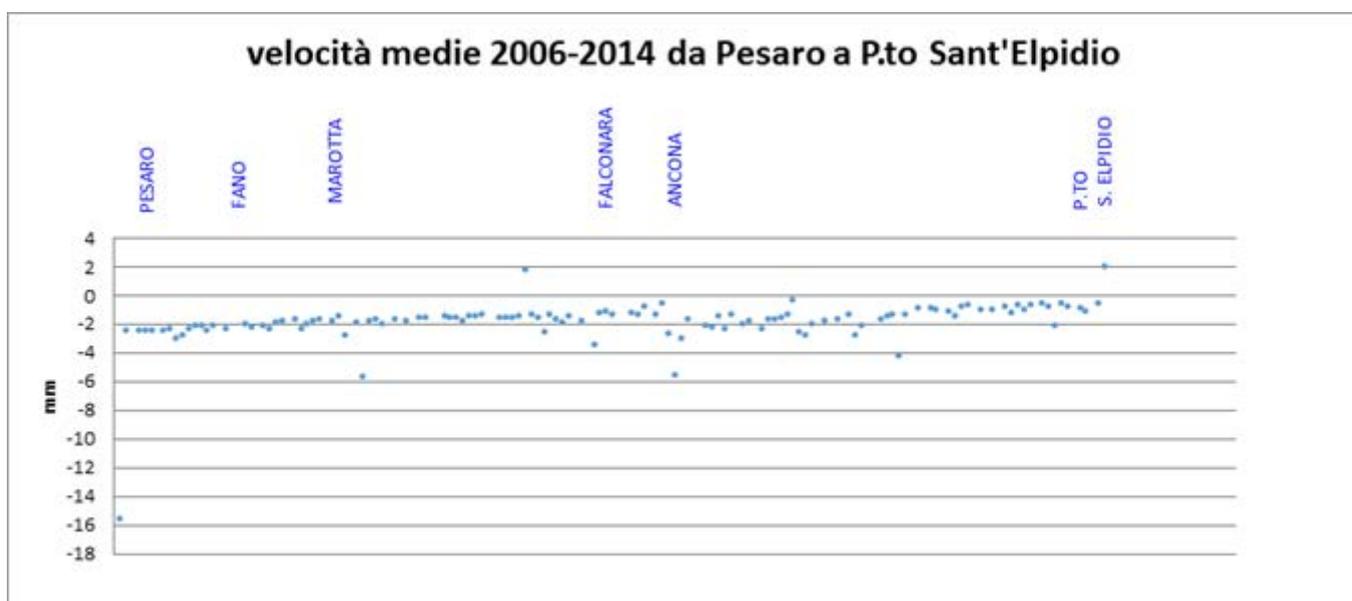
¹ Nel presente rapporto di norma le velocità di subsidenza (i.e di abbassamento della superficie) sono riportate con valori negativi. Per comodità d'interpretazione, però, nell'elenco che segue le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.

- 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 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 (Figura10).

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 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 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 Bonaccia, 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 3.

Tabella 3 - 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
Bonaccia	5,58	14,96	-87,19	5,67	14,79	-87,76	-0,09	0,17	-0,57

A questo proposito è opportuno precisare che l'analisi e l'interpretazione degli andamenti nel tempo delle misure altimetriche CGPS, da utilizzarsi per una verifica/taratura dei modelli previsionali di subsidenza, non possono essere considerate sufficientemente attendibili per dataset relativi a periodi di osservazione inferiori ai 36 mesi, come indicato dall'Ente che certifica tali dati con cadenza biennale.

L'Ente certificatore, infatti, verifica e valida i dati registrati al fine d'avere un numero sufficiente d'osservazioni per il corretto inquadramento delle componenti periodiche, della loro incidenza sulle misure e 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 cal-

colati 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 Bonaccia, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale² pari a -76,2 mm/a (Figura 11 e Figura 12), in calo rispetto al valore riportato nella precedente relazione di aggiornamento (-79,3 mm/a al 2015). Su Bonaccia NW, invece, il CGPS è stato installato nel

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

settembre 2015 (Figura 11A e Figura 12); si è, quindi, acquisita una serie storica di misure per soli 15 mesi, il che non consente ancora una stima completamente attendibile della velocità media di subsidenza totale.

I valori di subsidenza previsti dal modello geomeccanico del 2014 sono stati confrontati con quelli acquisiti dalla stazione CGPS senza che questi ultimi siano stati depurati dalla componente di subsidenza naturale. Come si vede da Figura 14 e Figura 14A, l'andamento delle misure CGPS è del tutto in linea con il trend delle previsioni modellistiche.

Al fine di monitorare la compattazione profonda del giacimento, si è proceduto per il 2016, con la sonda FSMT (Formation Subsidence Monitoring Tool), al rilievo dei marker che sono stati installati nel pozzo di Bonaccia NW 1dir in ottemperanza alle prescrizioni ministeriali del progetto di sviluppo di Bonaccia NW. Come già detto in precedenza, il rilievo base è stato acquistato nell'agosto 2015, mentre il survey di controllo, inizialmente programmato per la fine del 2016, in realtà è stato posticipato ai primi giorni del 2017 a causa di condizioni meteo avverse.

Per il periodo 2015-2016 le misure eseguite registrano una compattazione totale di circa 61 mm (Figura 13) dell'intervallo monitorato (709 m – 1092 m MD),. La spaziatura dei marker non è regolare (per alcuni è di 10,5 m mentre per altri è di 5,25 m): di ciò si è tenuto conto nel calcolo della compattazione totale pesando diversamente il contributo dei singoli spacing. La compattazione totale misurata per questo primo intervallo di tempo è risultata in sostanziale accordo con la previsione del modello geomeccanico del 2014, che per lo scenario "Do Nothing" stima tale compattazione in 59 mm, mentre lo scenario "Do Nothing + Sviluppo Area NW + Infilling Area Est" prevede un valore di 790 mm.

In sintesi, le indicazioni del modello previsionale di subsidenza, la notevole distanza del campo dalla costa (60 km) e i monitoraggi fatti da Eni consentono di escludere che l'eventuale subsidenza indotta dalla produzione di gas dal campo di Bonaccia possa avere qualche impatto sull'andamento altimetrico del tratto di litorale monitorato.

Si segnala infine che:

- a) in Figura 15 viene presentata una scheda riassuntiva con i dati di campo e lo status dei monitoraggi;
- b) in Figura 16 viene presentato un particolare della rete di monitoraggio Eni.

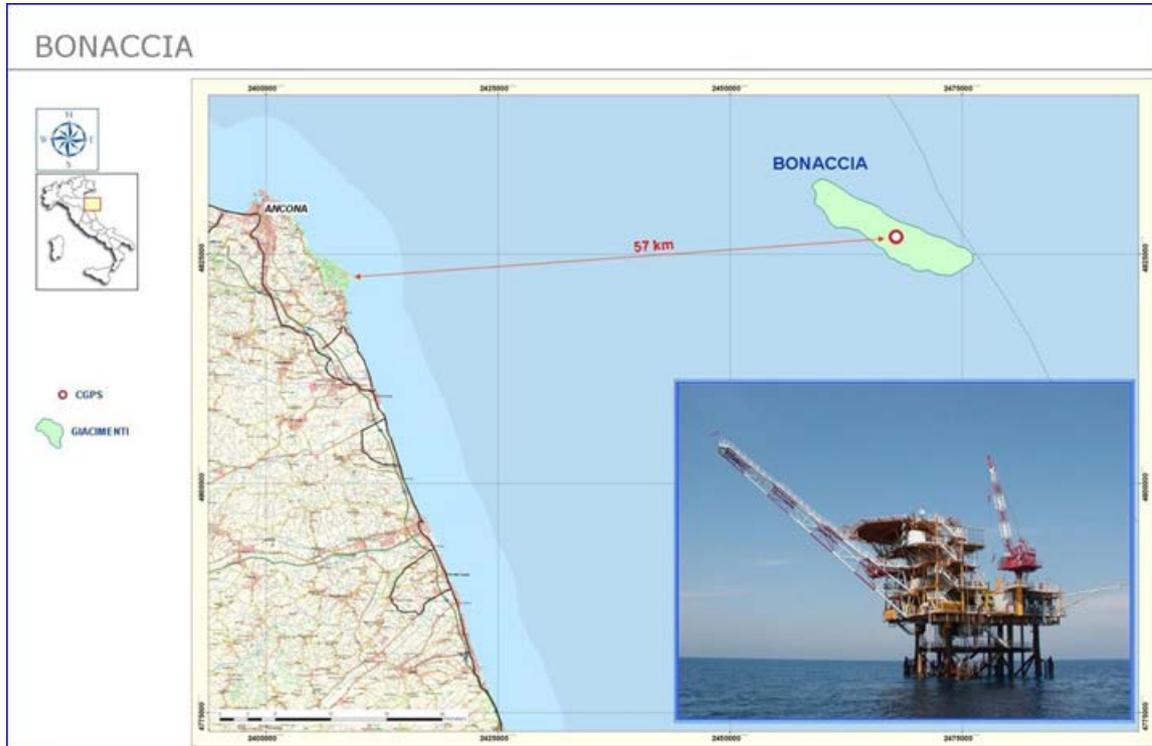


Figura 1 - Posizione del campo di Bonaccia

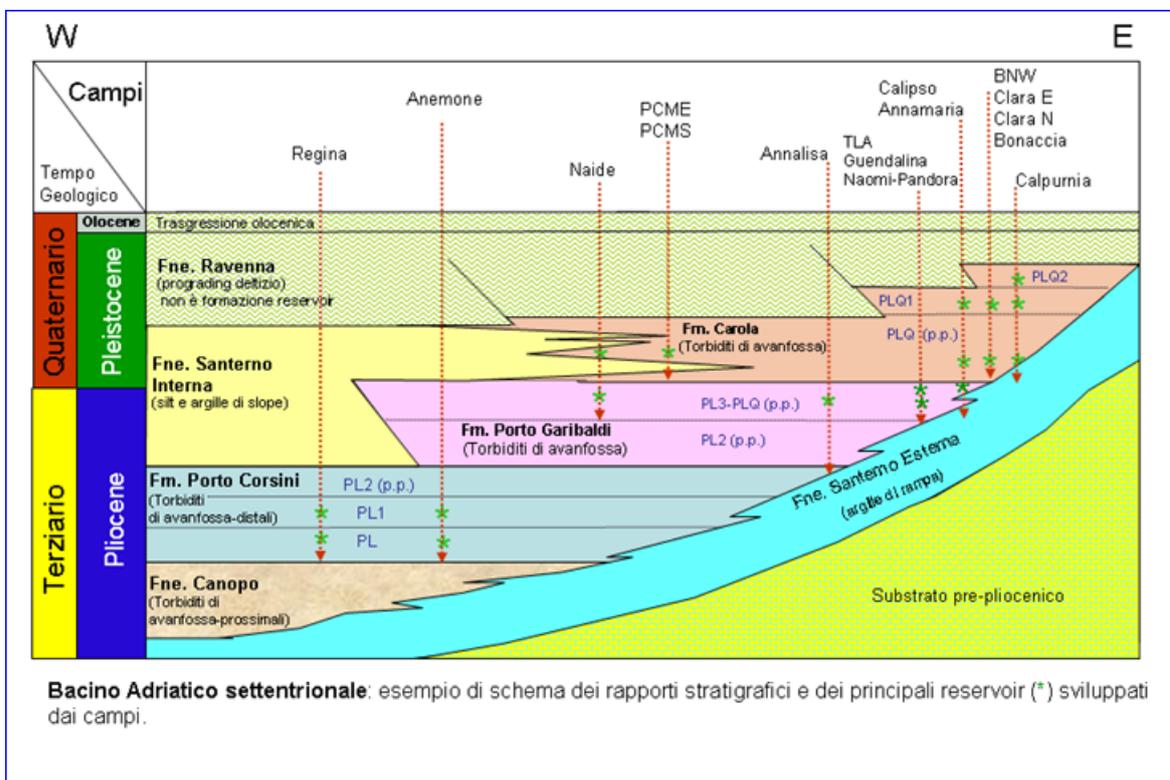


Figura 2 - Schema dei rapporti stratigrafici



CAMPO DI BONACCIA					
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	
1999	348	348	348	348	4%
2000	477	477	825	825	9%
2001	472	472	1297	1297	14%
2002	408	408	1704	1704	19%
2003	353	353	2058	2058	22%
2004	346	346	2404	2404	26%
2005	297	297	2700	2700	29%
2006	250	250	2950	2950	32%
2007	233	233	3183	3183	35%
2008	380	380	3563	3563	39%
2009	298	298	3861	3861	42%
2010	298	298	4159	4159	45%
2011	374	374	4533	4533	49%
2012	309	309	4842	4842	53%
2013	258	258	5100	5100	56%
2014	222	224	5322	5324	58%
2015	229	409	5551	5732	61%
2016	405	581	5956	6313	65%
2017		538		6851	
2018		441		7293	
2019		340		7633	
2020		266		7899	
2021		220		8119	
2022		197		8316	
2023		158		8473	
2024		131		8605	
2025		105		8710	
2026		86		8796	
2027		69		8866	
2028		61		8926	
2029		45		8971	
2030		49		9020	
2031		41		9061	
2032		33		9093	
2033		29		9123	
2034		27		9149	
2035		10		9160	
2036					
2037					

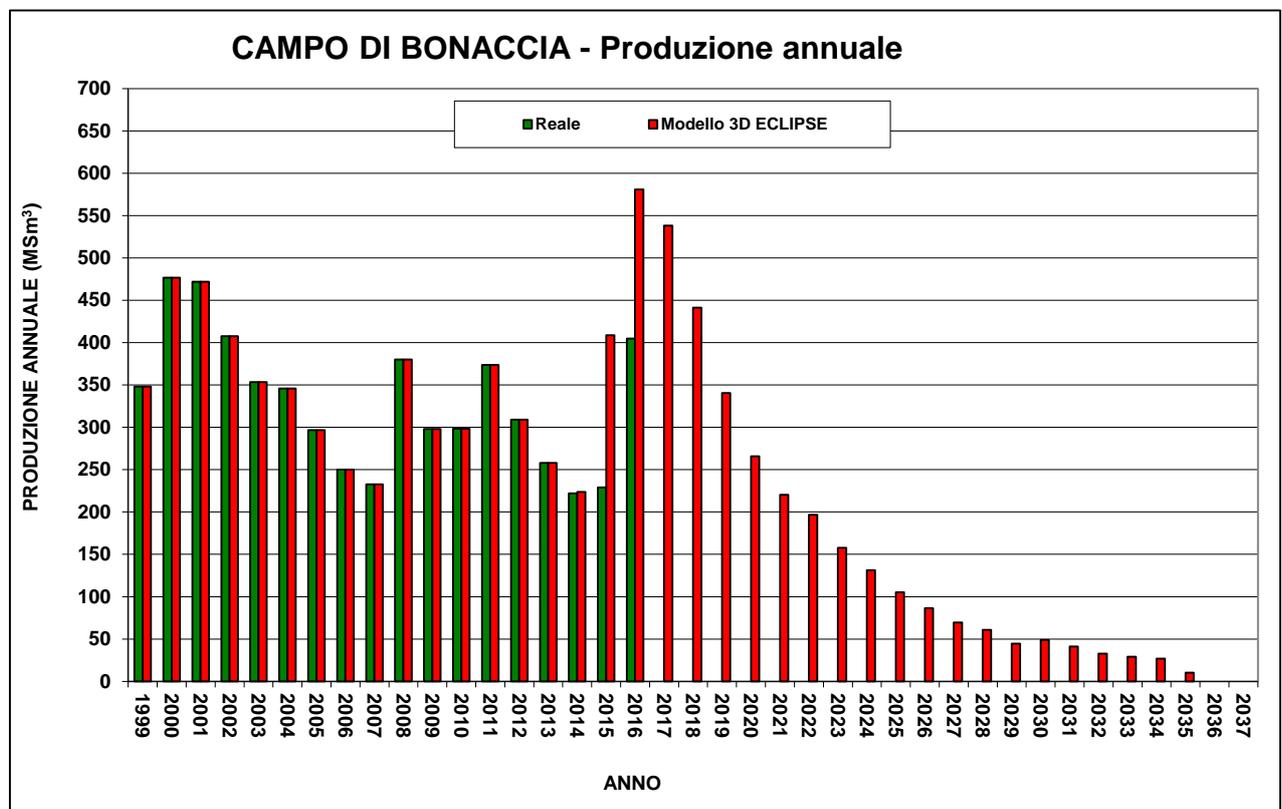
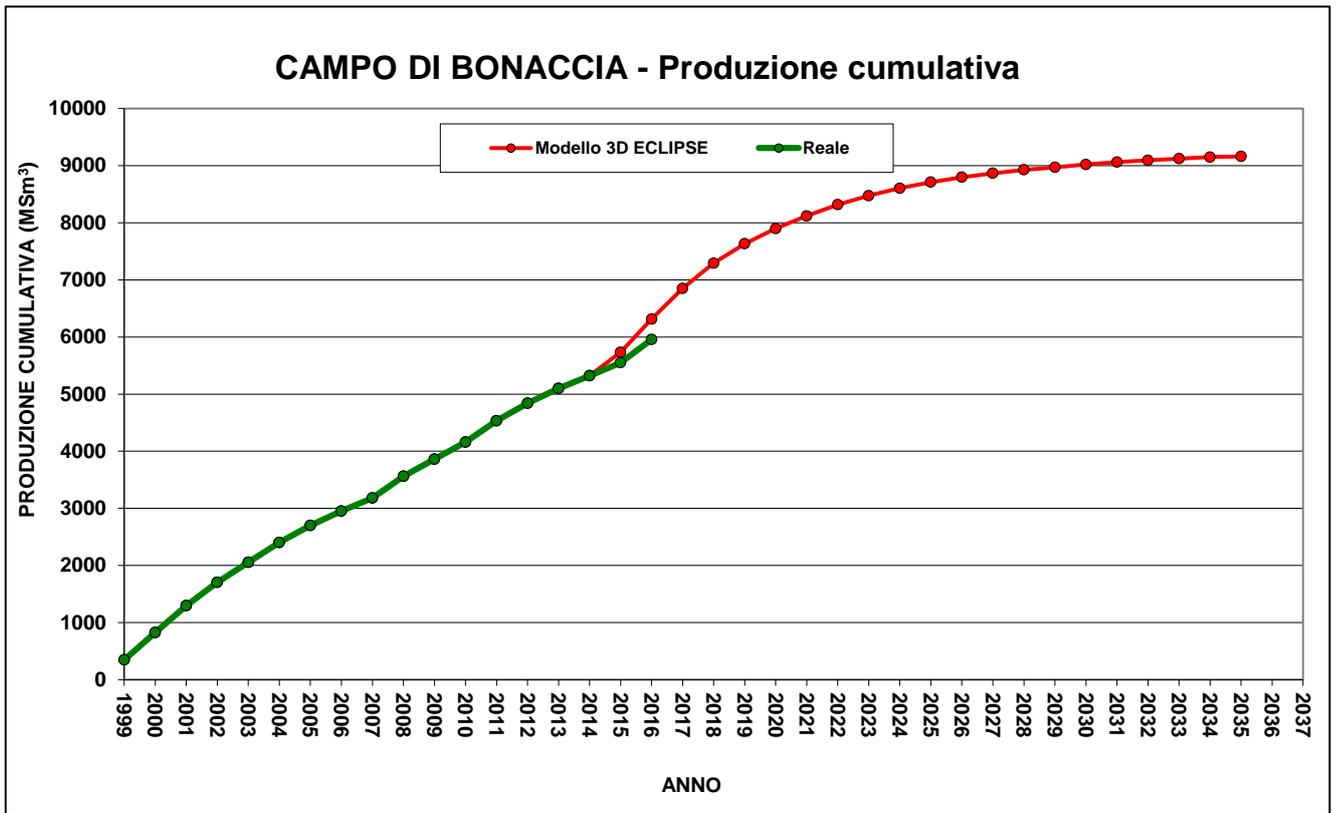


Figura 3 – Campo di Bonaccia: produzione e riserve da modello Eclipse

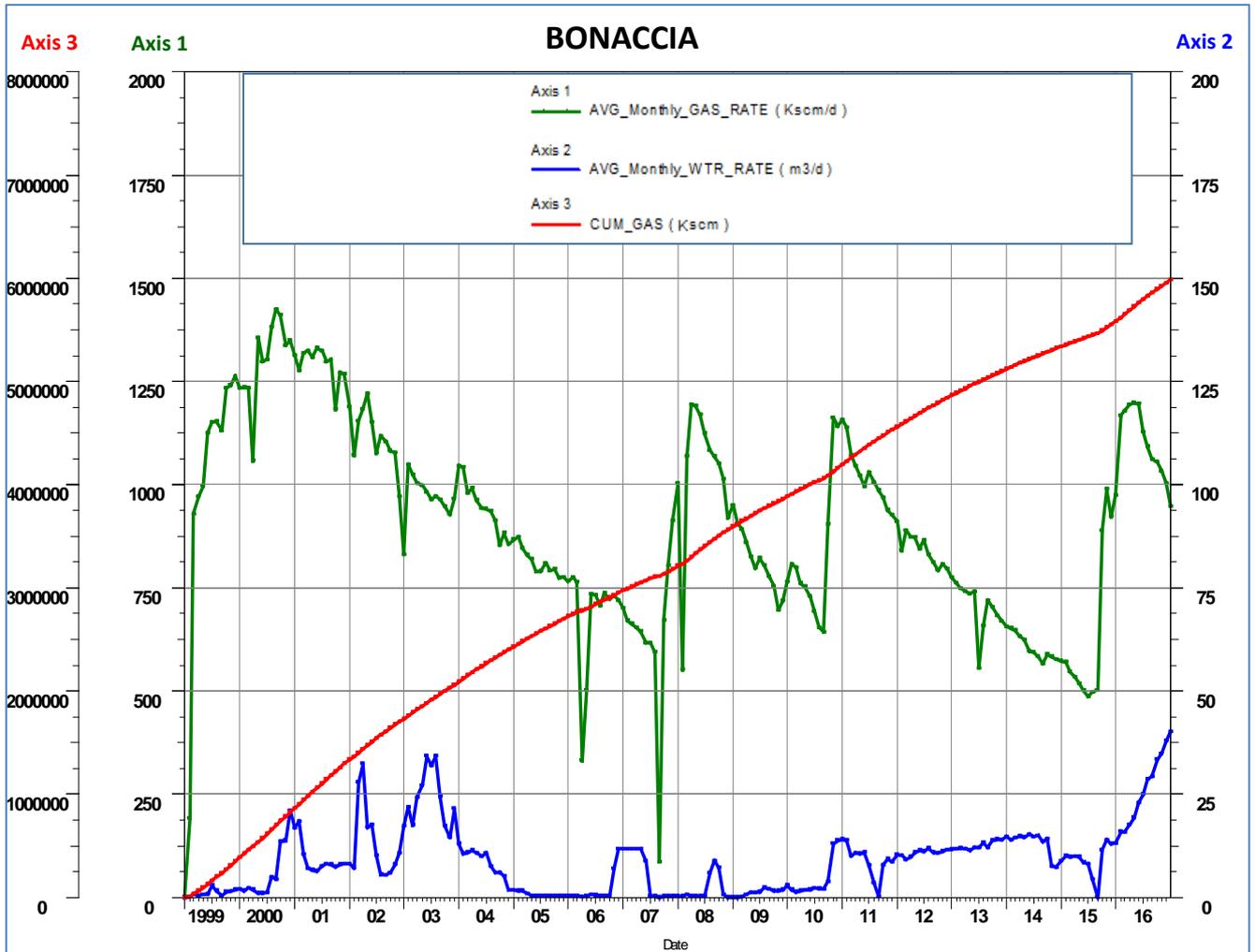


Figura 4 – Campo di Bonaccia: grafico della produzione storica



CAMPO DI BONACCIA						
Data	Livello PLQ-B			Livello PLQ2-Ca2 sup.		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
01/01/1998	104		7 L			
01/02/2000	98		7 L			
06/10/2007	67	12 Dir				
26/12/2007	64	11 Dir A				
01/05/2004	77		8 L			
01/04/2011	39		8 L			
21/05/2011	36		7 L			
14/12/2013	32		7 L			
06/12/2014	36		7 L			
27/05/2015				74	NW 1 Dir	
11/07/2015	30	NW 3 Dir				
24/04/2016	37		7 L			
22/01/2017				69		NW 2 C

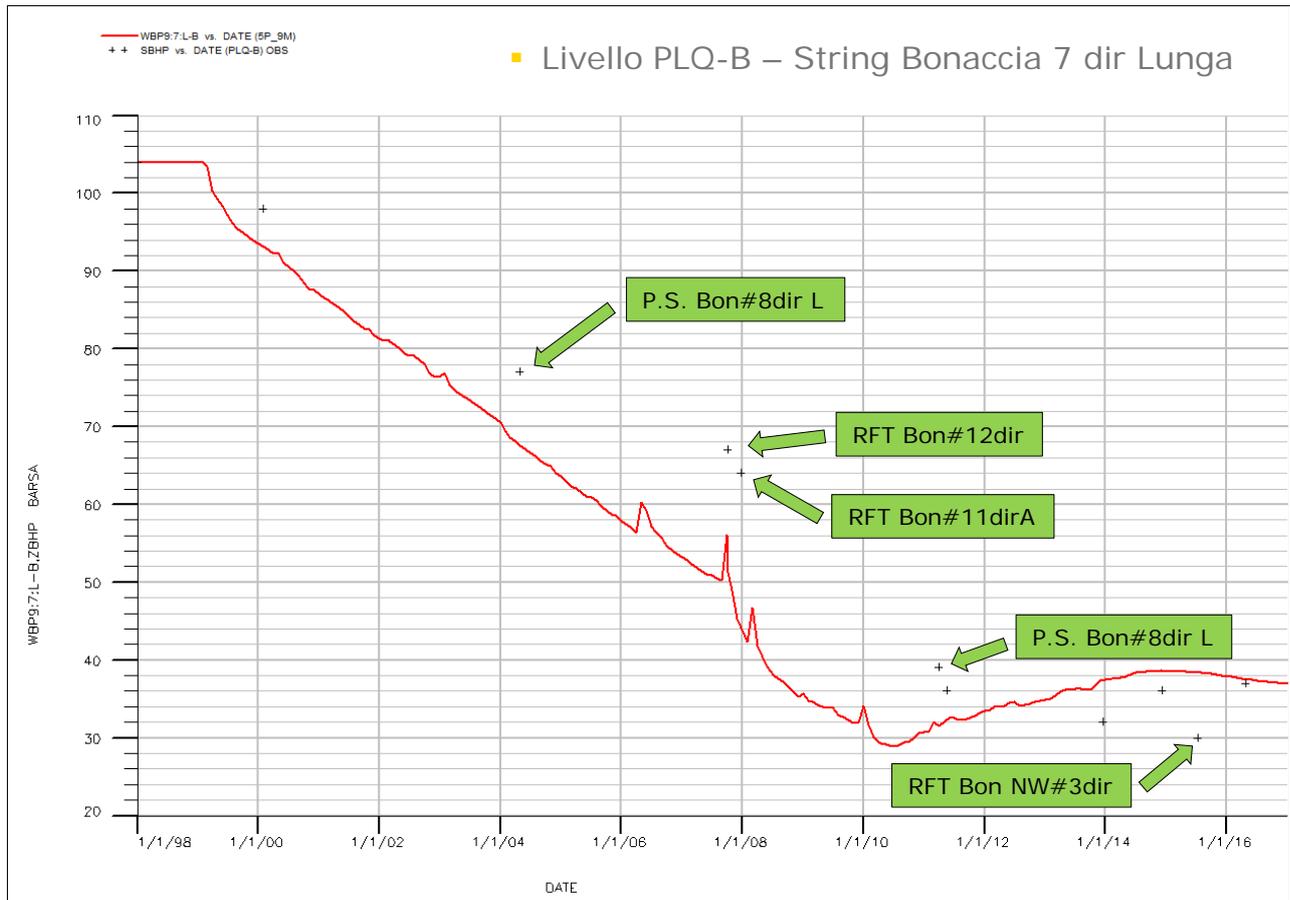


Figura 5 – Campo di Bonaccia: confronto tra i dati di pressione da profili statici e modello Eclipse 2014

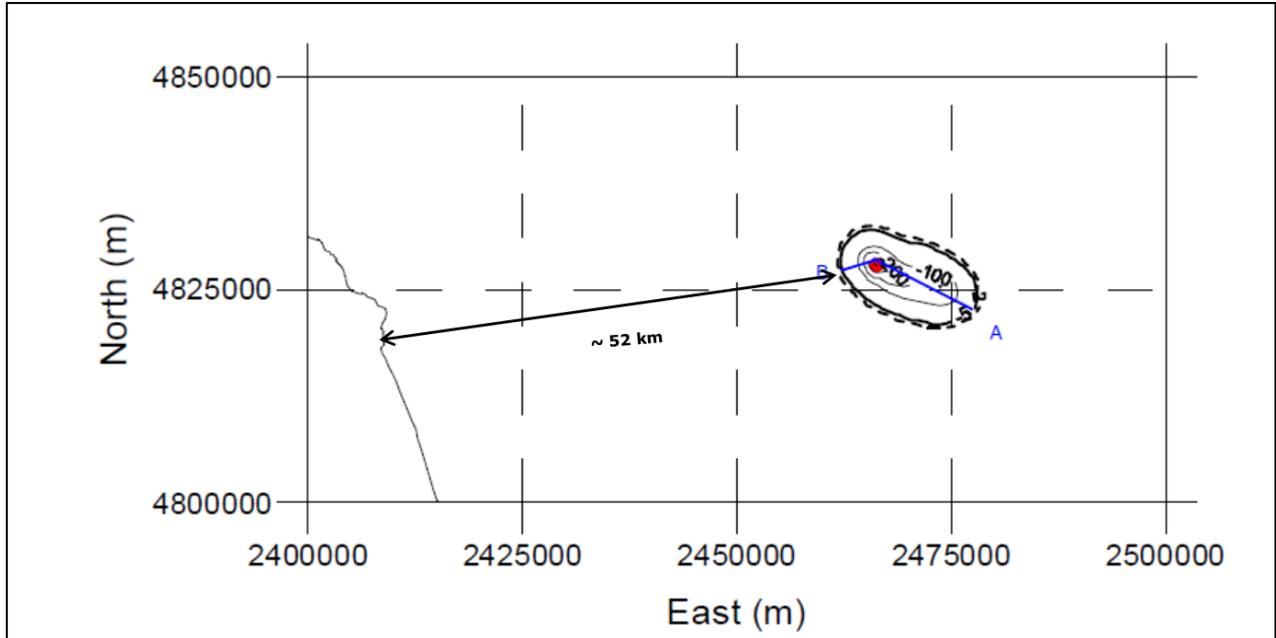


Figura 6 – Campo di Bonaccia: curve di isosubsidenza a fine produzione (2036)
caso “Do Nothing + Sviluppo + Infilling area Est”

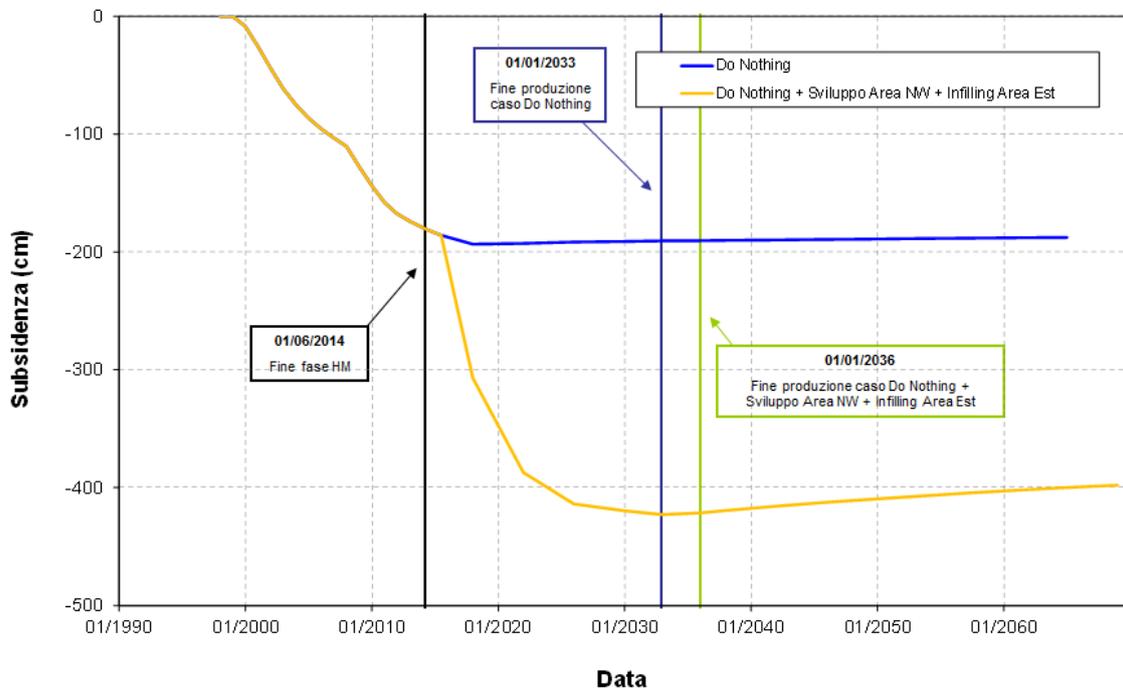
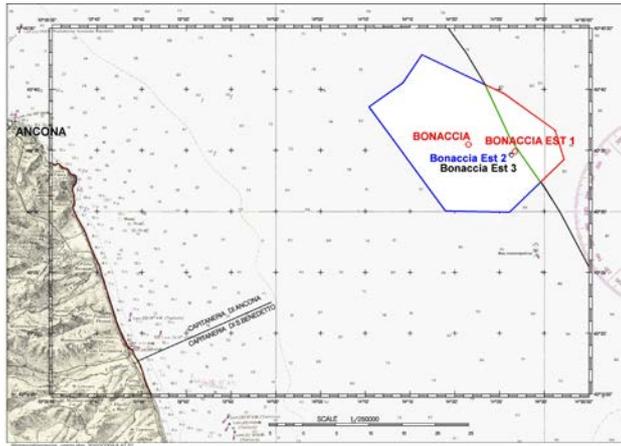
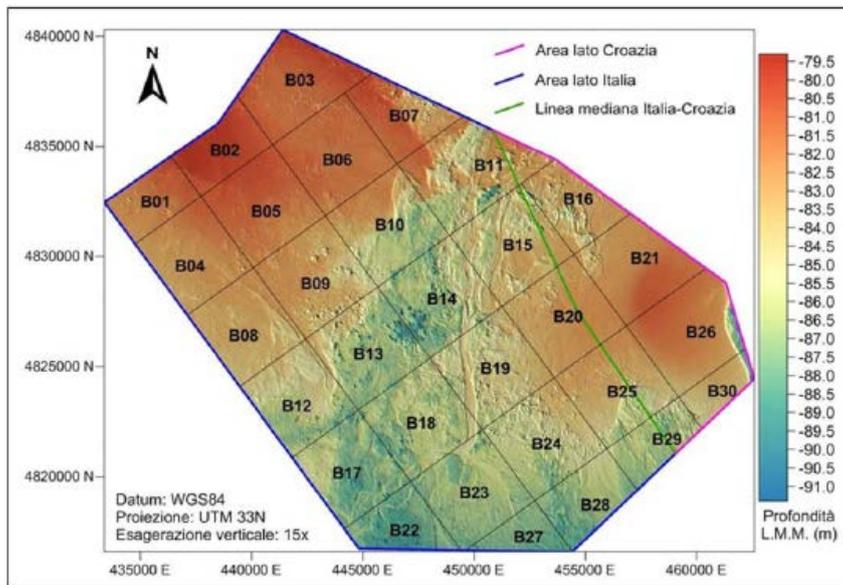


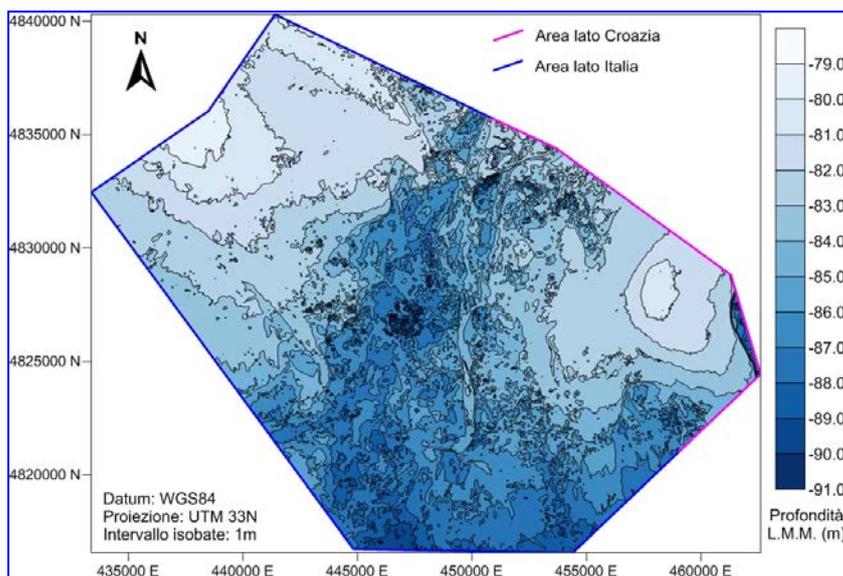
Figura 7- Campo di Bonaccia: evoluzione nel tempo della subsidenza



a) Ubicazione dell'area indagata con ecoscandaglio e localizzazione dei campi a gas



b) Carta batimetrica 3D dell'area rilevata



c) Carta batimetrica dell'area rilevata - mappa-

Figura 9: Campo di Bonaccia: rilievo batimetrico

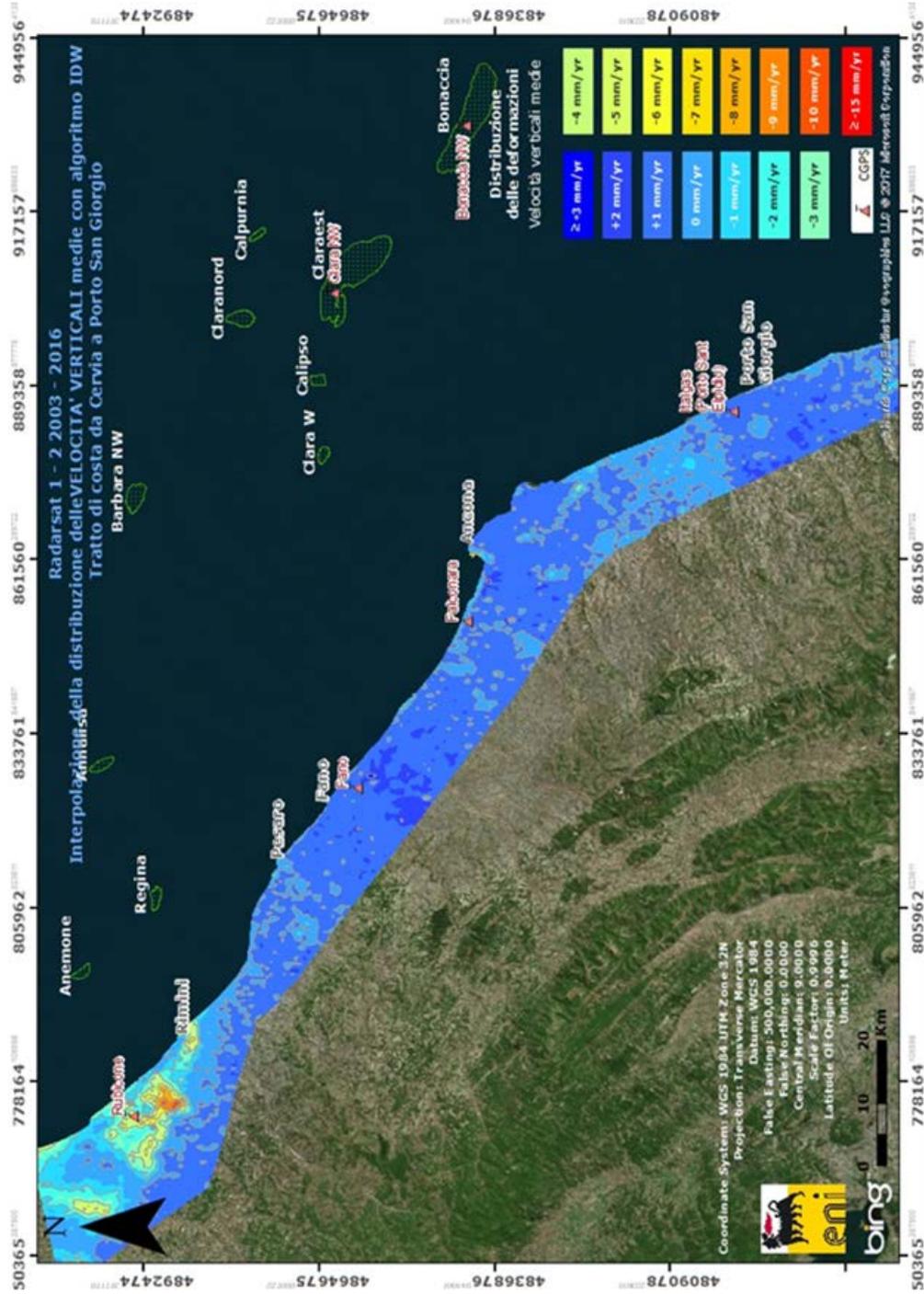
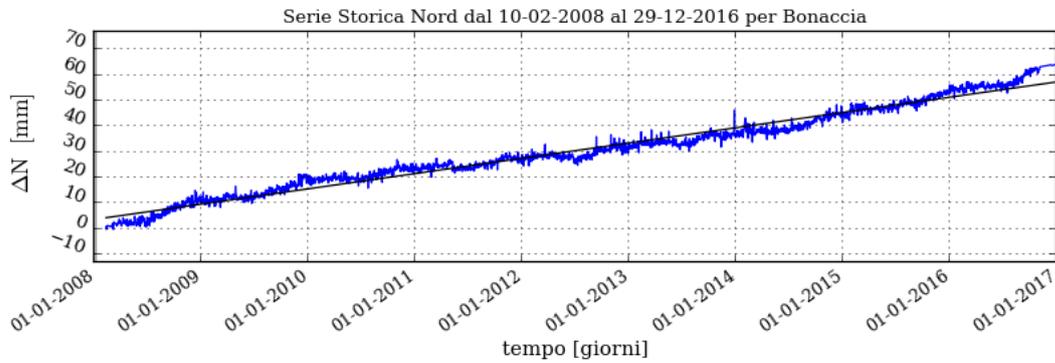


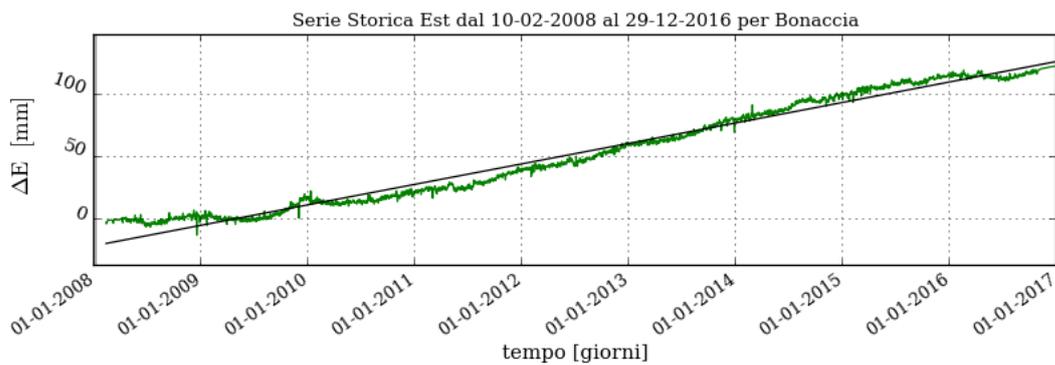
Figura 10 – Campo di Bonaccia: analisi dei dati SAR dal 2003 al 2016



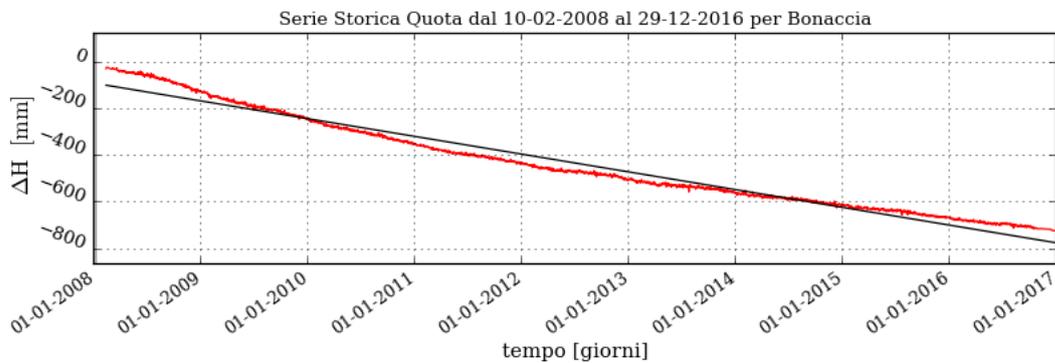
Serie storica spostamenti IGB08 RETE Bonaccia



$Vel_n = 5.92 \pm 0.02$ mm/y
 $WRMS_n = 2.29$ mm
 $\chi^2 / DOF = 39.59$



$Vel_e = 16.21 \pm 0.04$ mm/y
 $WRMS_e = 6.03$ mm
 $\chi^2 / DOF = 414.98$



$Vel_h = -76.24 \pm 0.24$ mm/y
 $WRMS_h = 33.57$ mm
 $\chi^2 / DOF = 709.87$

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



Serie storica spostamenti IGb08 RETE Bonaccia_NW

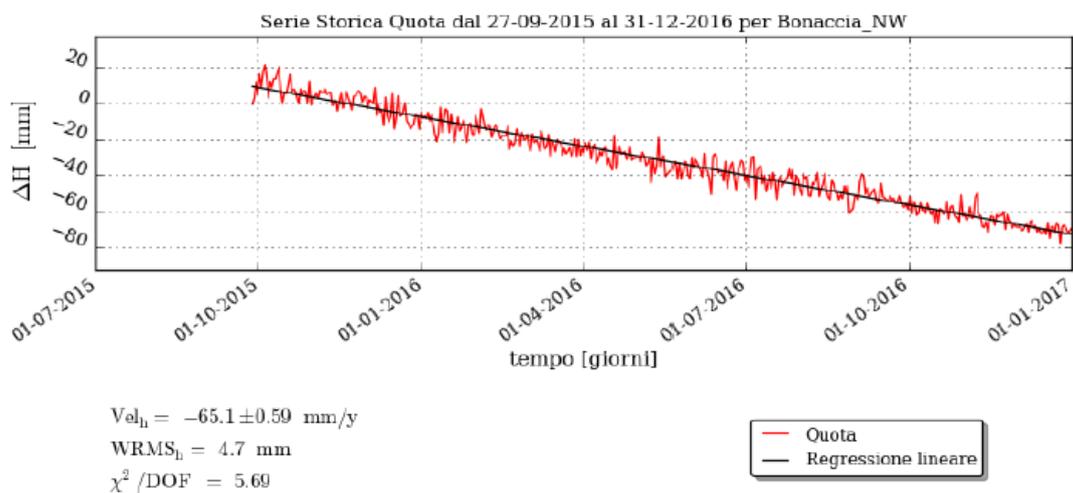
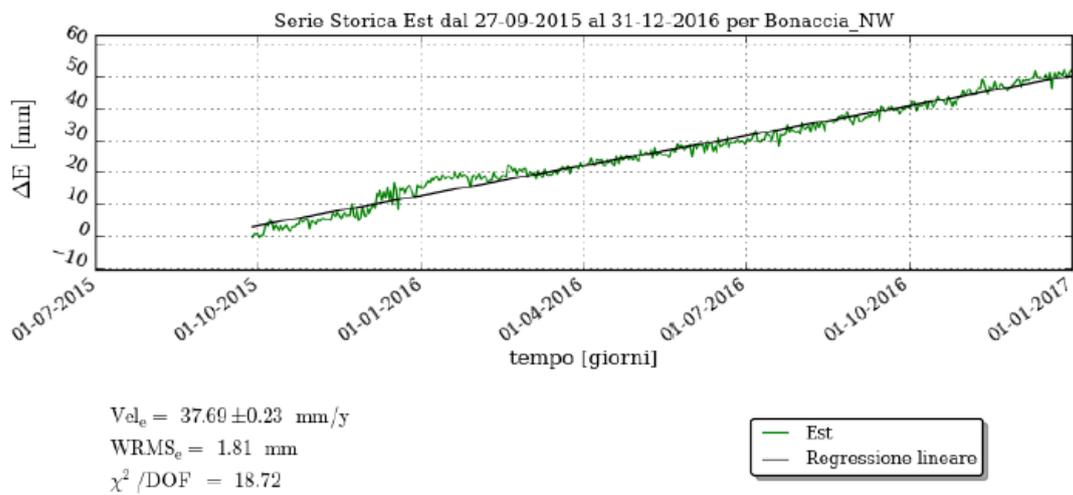
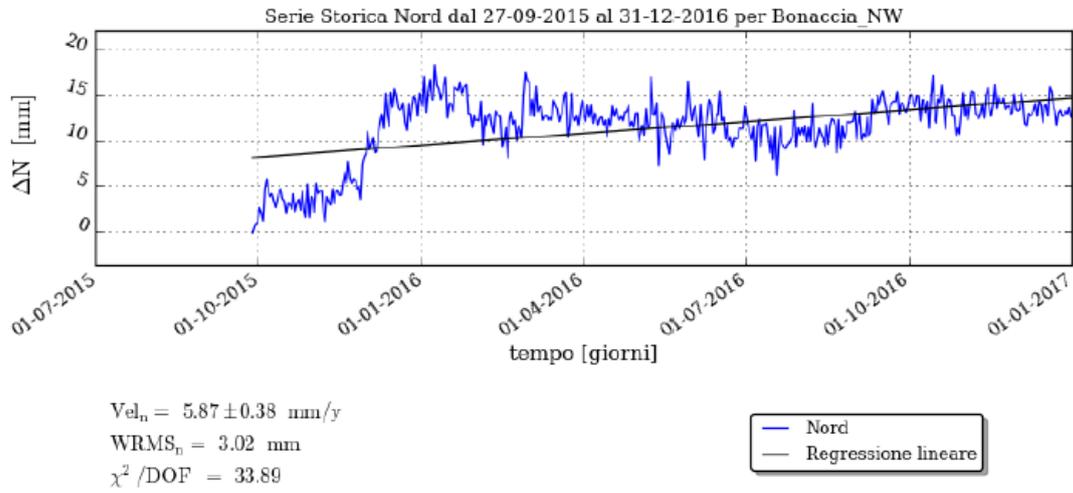


Figura 11A – Campo di Bonaccia: serie storiche di misure plano-altimetriche registrate dal CGPS installato sulla p.ma Bonaccia NW



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

Compattazione Bonaccia NW1

spacing	ref depth	Aug 2015
	MD	Jan 2017
#	(m)	(mm)
45	709.44	-1
44	719.78	-1
43	730.28	0
42	740.78	0
41	751.28	-1
40	761.79	-3
39	772.22	3
38	782.69	0
37	793.22	-4
36	803.70	-1
35	814.25	5
34	829.94	12
33	840.48	0
32	845.73	0
31	850.89	-3
30	856.00	-1
29	861.41	-2
28	866.69	0
27	871.94	-1
26	877.21	-3
25	882.47	-3
24	887.74	-3
23	898.25	0
22	913.97	-3
21	924.40	-2
20	929.61	-5
19	940.14	-3
18	950.63	-4
17	955.88	-1
16	961.11	-4
15	966.40	1
14	971.64	-1
13	976.88	-2
12	982.12	-2
11	987.37	-10
10	997.91	-8
9	1008.08	-5
8	1018.62	-15
7	1029.06	5
6	1039.58	-6
5	1050.09	-3
4	1060.58	3
3	1071.14	-14
2	1081.75	-2
1	1092.22	2

Figura 13 – Campo di Bonaccia: compattazione da marker (pozzo Bonaccia NW 1dir)

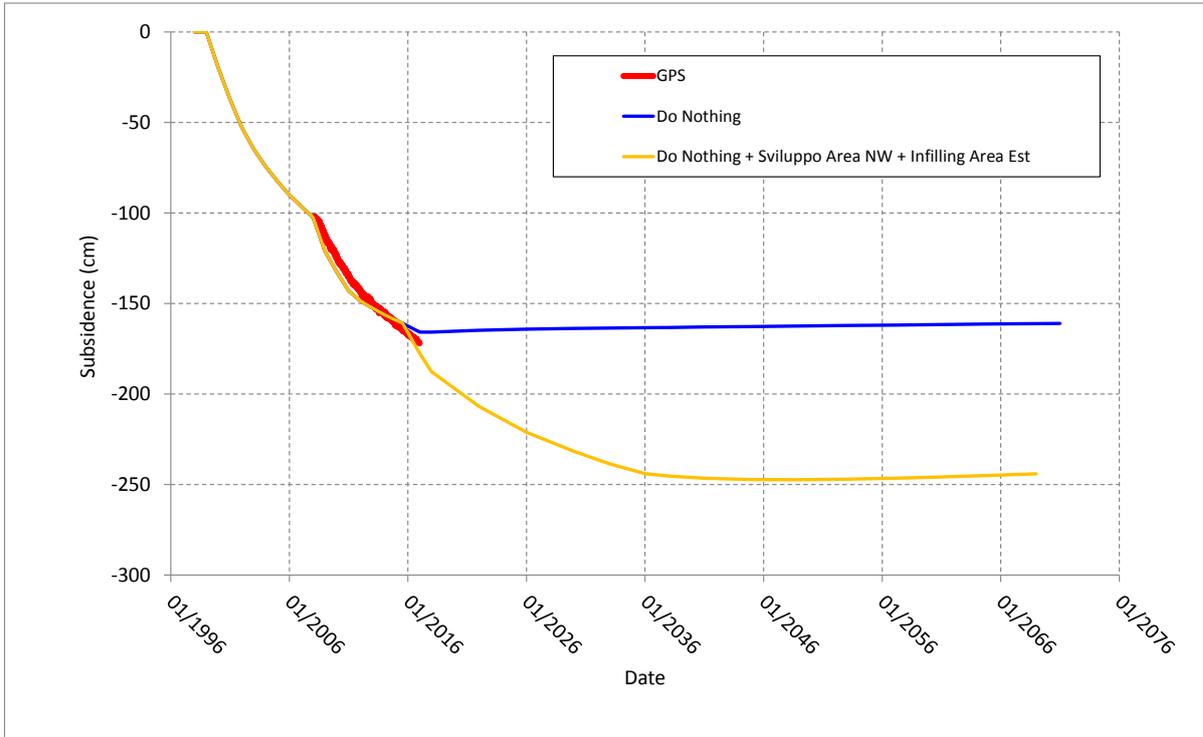


Figura 14 - Campo di Bonaccia: abbassamento misurato e calcolato in corrispondenza del CGPS della p.ma di Bonaccia

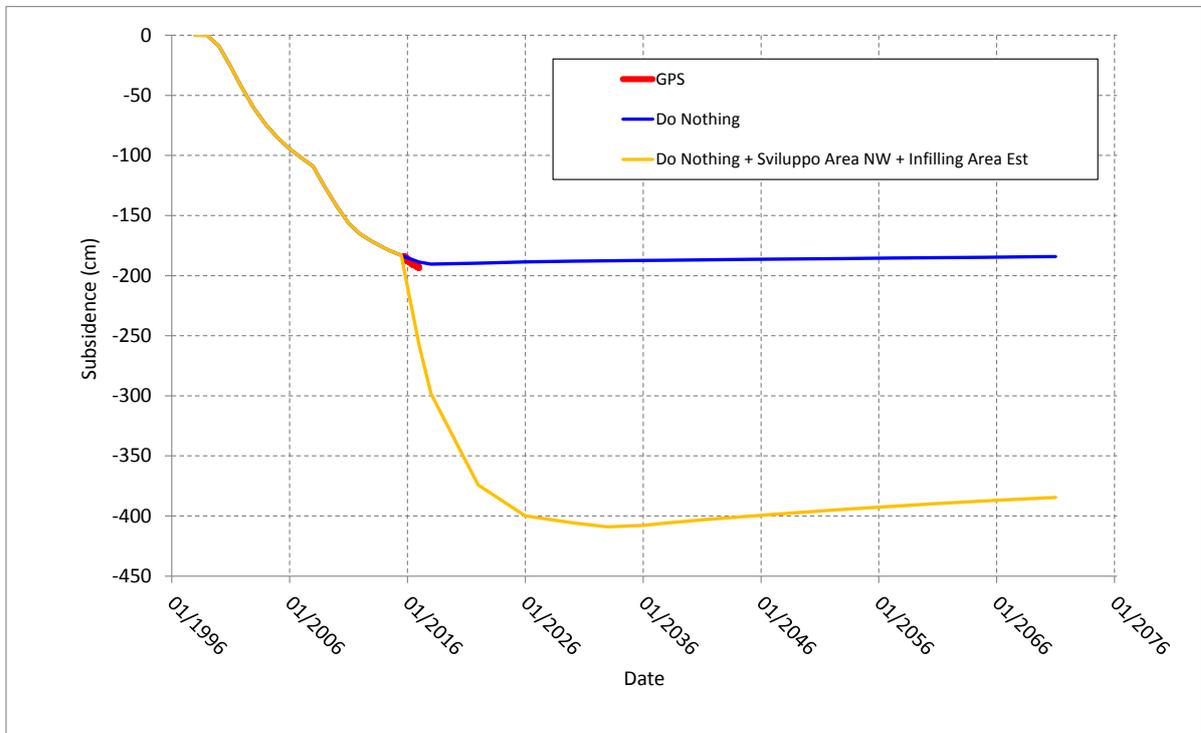


Figura 14 A - Campo di Bonaccia: abbassamento misurato e calcolato in corrispondenza del CGPS della p.ma di Bonaccia NW



campo BONACCIA (BONACCIA - BONACCIA EST - BONACCIA NW) - (Eni 100%)			
DATI DI CAMPO		DECVIA n.582 del 15 giugno 2009 (Bonaccia Est) / DECVIA n.222 del 9 settembre 2014 (Bonaccia NW)	
UBICAZIONE		AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA	
PROFONDITA' FONDALE	offshore - 57 Km a E Monte Conero 82 m	SIA (BONACCIA-BONACCIA EST) ULTIMO AGGIORNAMENTO (con BONACCIA NW)	
LITOLOGIA	silt-sabbie fini in livelli sottili	STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "luglio '07"
FORMAZIONE RESERVOIR	Ravenna - Carola	RISERVE (MSm3)	6305 Agg. studio di giac. per mod. geomec., Rel. GISE-09/14 (luglio 2014)
ZONA MINERARIA	PLQ1 - PLQ	MOD. GEOMECCANCO	ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ settembre 2007 ELEMENTI FINITI (F.E.M.) @ novembre 2014
PROFONDITA' RESERVOIR	750 - 1060 (TVDS)	MAX SUBS AL CENTRO (cm)	22 (@ 2015) 423 (@ 2040)
TIPO DI PIATTAFORMA	fissa (Bonaccia)	MAX DIST. DAL CULMINE (Km)	8 (@ 2042) 5 @ 2069
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	torbiditi sottili	STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI	
CONCESSIONE		LIVELLAZIONI	
	B.C17.TO	DAL 2006 SONO OPERATIVE NUOVE LINEE DI LIVELLAZIONE IN ALTA PRECISIONE (DORSALE PESARO-PT.S.GIORGIO)	
DATA SCADENZA CONCESSIONE	18/10/2018	NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO	
N. POZZI		ACQUISITI I DATI DI LIVELLAZIONE, CERTIFICATI UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM, RELATIVI AGLI ANNI: # 2008-2009, 2011 e 2014	
Bonaccia	8	IL PROSSIMO RILIEVO DELLA " DORSALE PESARO-PT.S.GIORGIO" SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2017	
Bonaccia Est	0	NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO	
Bonaccia NW	0	MARKERS	
RISERVE TECNICHE (campo)		MARKERS SU BONACCIA NW 1Dr: ULTIMO SURVEY @ novembre 2016.	
A VITA INTERA (MSm3)	6305	Survey eseguiti: agosto 2015 (rilievo base)	
START UP PRODUZIONE		CGPS	
Bonaccia	feb-99	Nel corso del 2007 è stato installato un CGPS in piattaforma di Bonaccia. Nel settembre 2015 è stato installato un CGPS sulla nuova	
Bonaccia Est	ott-10	piattaforma di Bonaccia NW. Nel tratto di costa antistante il campo è stato installato nel corso del 2009 un CGPS (centrale ENI di P.to	
Bonaccia NW	ott-15	SAR	
FINE PRODUZIONE PREVISTA		ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR. @ SETT.2016 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA	
GAS PRODOTTO (CAMPO) (MSm3)	2029	PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.MA BONACCIA NEL PROGRAMMA DI	
Bonaccia	5956	MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	
Bonaccia Est	4702	BATIMETRIE	
Bonaccia NW	978	ESEGUITO RILIEVO BATIMETRICO. DATA RILIEVO NOV.2009-MARZO 2010	
% RISERVE PRODOTTE	65%		

Figura 15 - Scheda di sintesi dati campo



Figura 16 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

Appendice 1: aggiornamento dati SAR 2003-2016

L'analisi dei dati SAR ha interessato complessivamente 3 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 ($< 1 \text{ mm/a}$) 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 $-3,22 \pm 0,42 \text{ mm/a}$. Dato che la corrispondente velocità media ottenuta dalle misure del CGPS di Smarlacca è di $-6,37 \pm 0,01 \text{ mm/a}$, si ha uno scostamento fra le due misure di $-3,15 \pm 0,43 \text{ mm/a}$. Ai valori di velocità media della componente verticale, determinata con il monitoraggio SAR, si è applicata, pertanto, una correzione pari a $-3,15 \pm 0,43 \text{ mm/a}$. 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 calibrations "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.

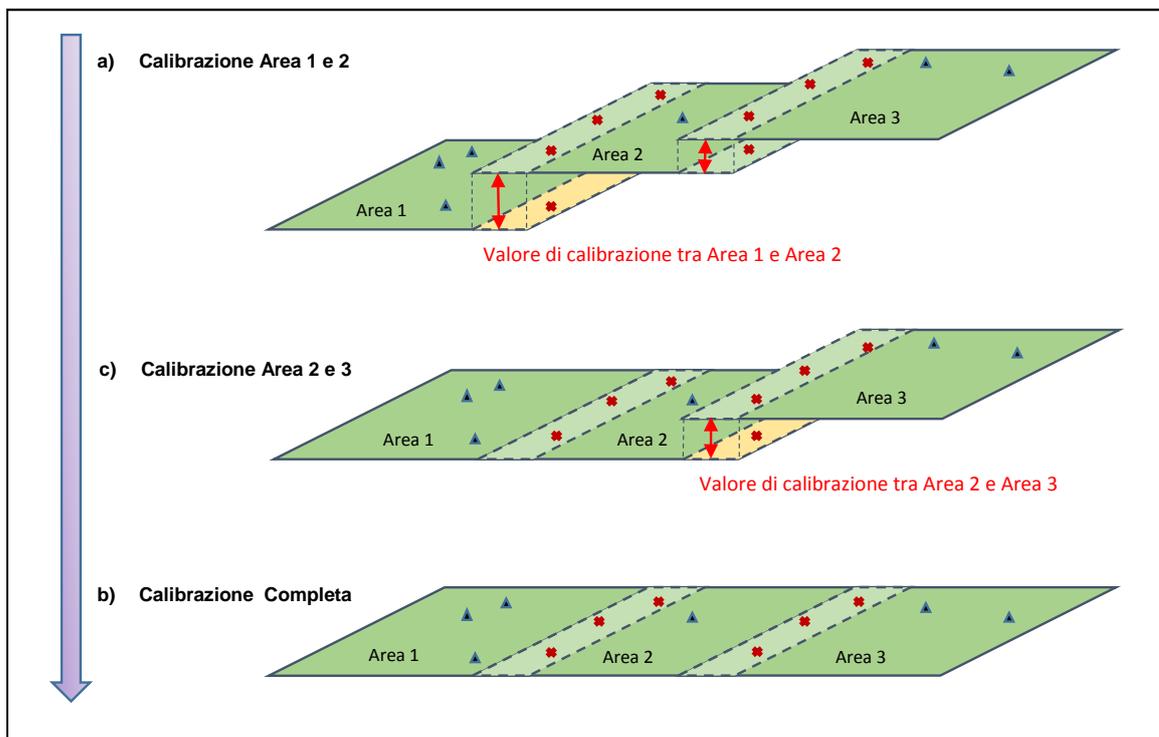


Fig. 3A – Schema illustrativo del processo di calibrazione delle immagini SAR con misure CGPS



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®.

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.

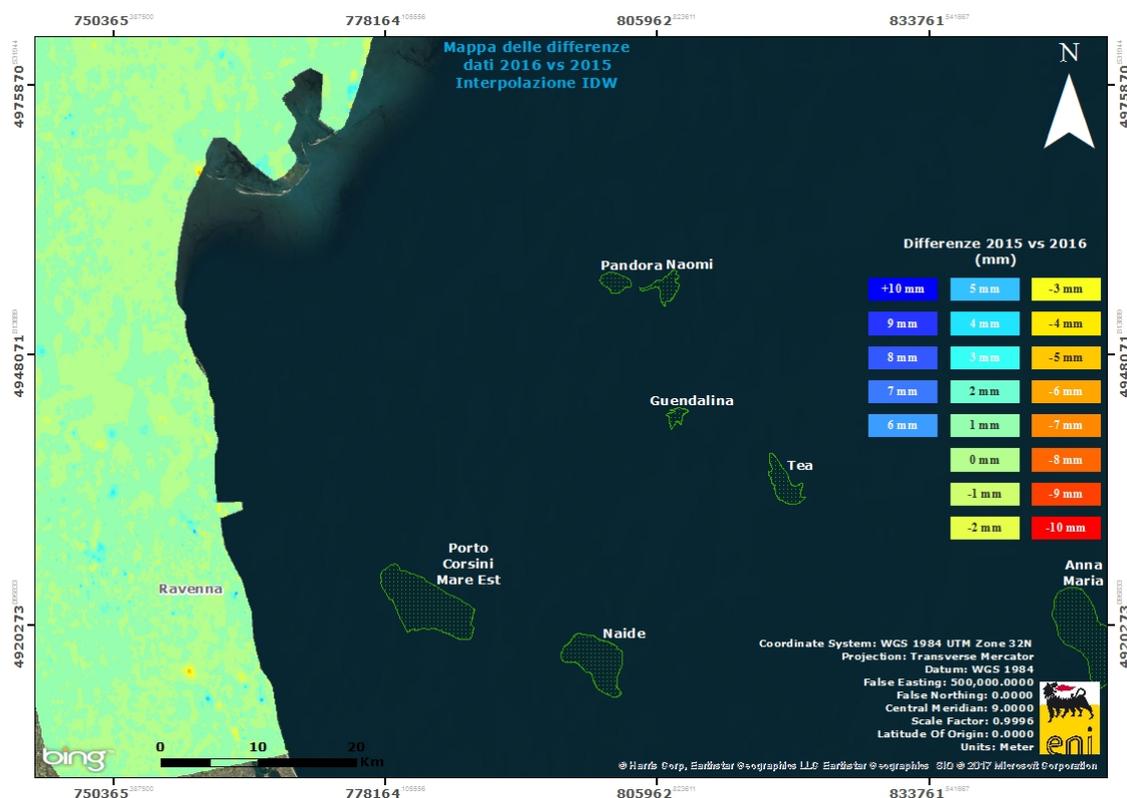


Fig. 5A – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2015 e il 2003-2016, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Comacchio a Cervia

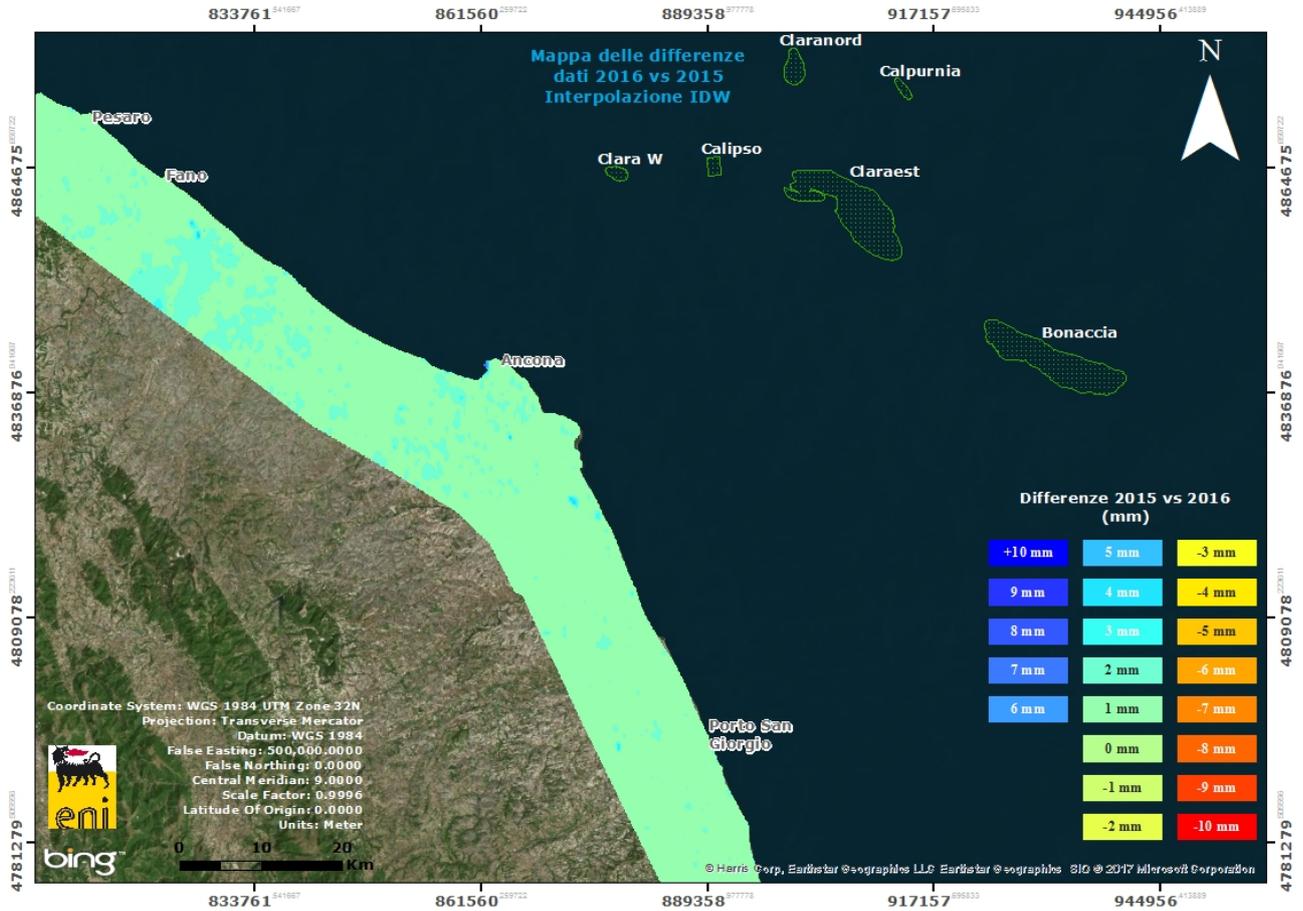


Fig. 6A - Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2015 e il 2003-2016, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Fano a Porto San Giorgio

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.

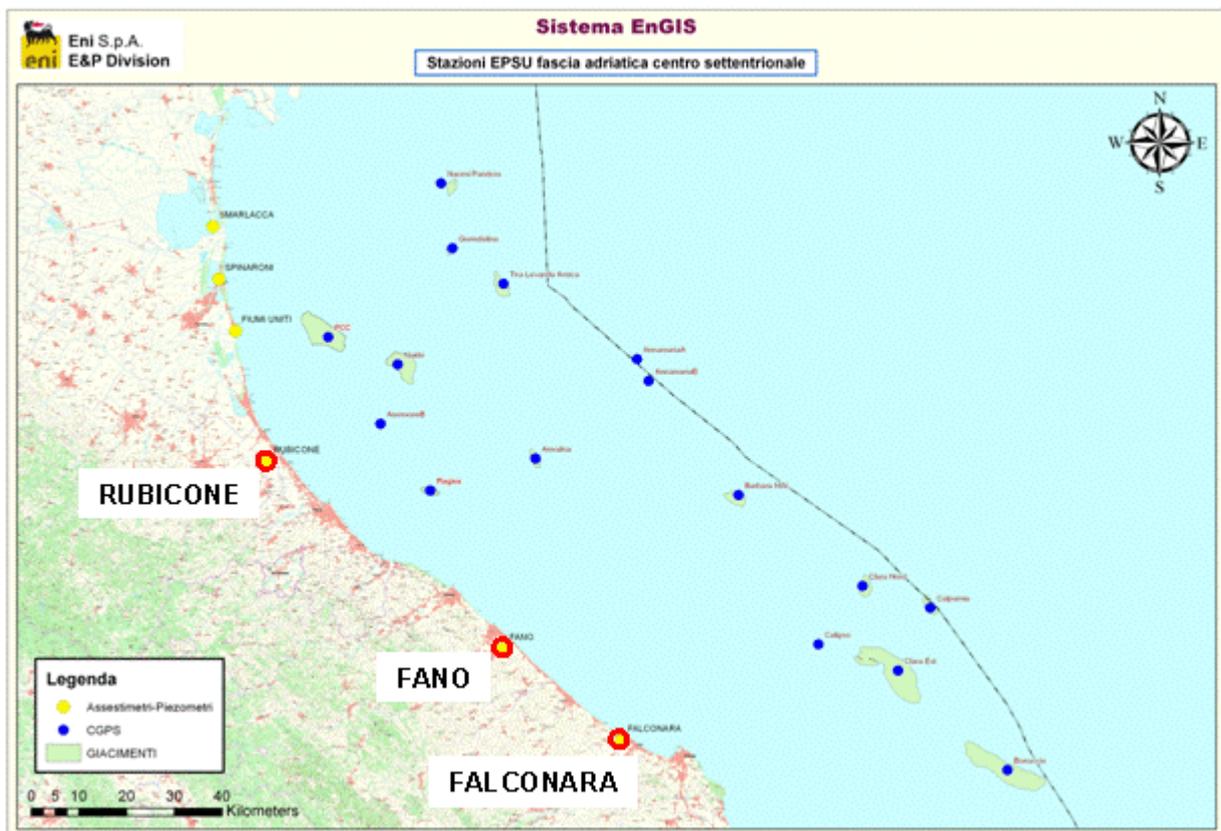


Figura 2A - Ubicazione delle stazioni EPSU

In generale una stazione EPSU è costituita da un assestmetro, 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 assestmetriche per le variazioni della temperatura e pressione atmosferica) come schematicamente rappresentato in figura 2B.

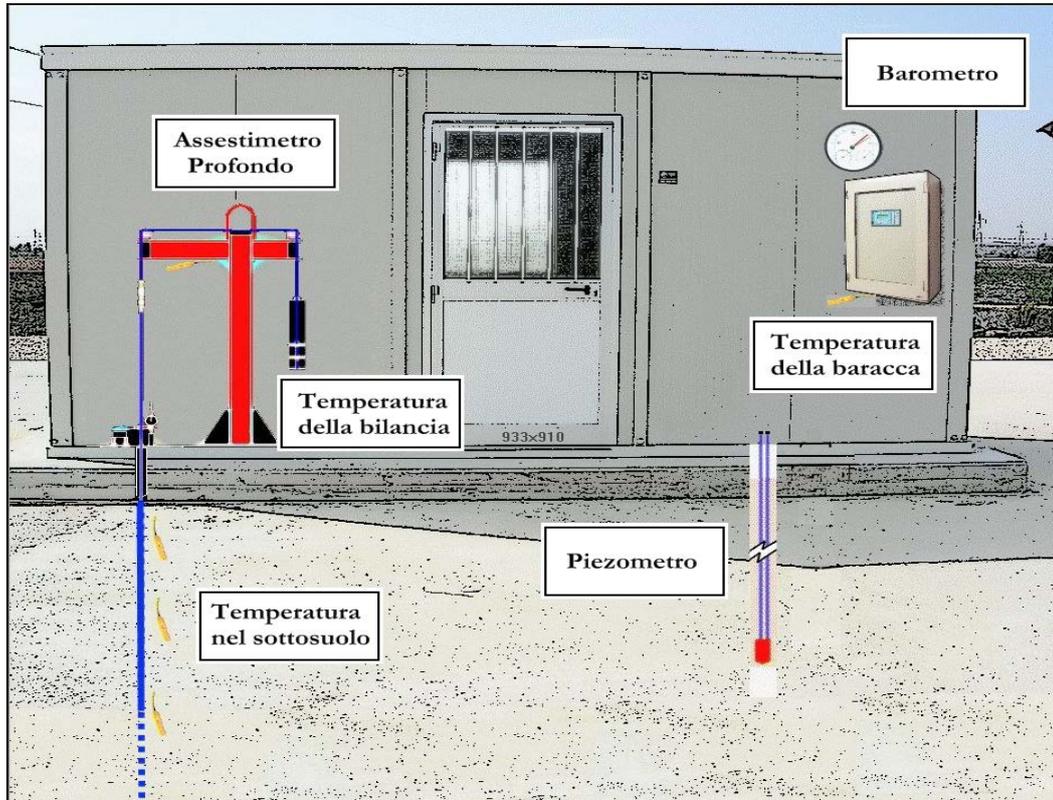


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

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 (l'espansione (compattazione) registrata dall'assestometro).

Nella stessa area della stazione assestometrica 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 assestometriche. 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 assestometriche 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 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

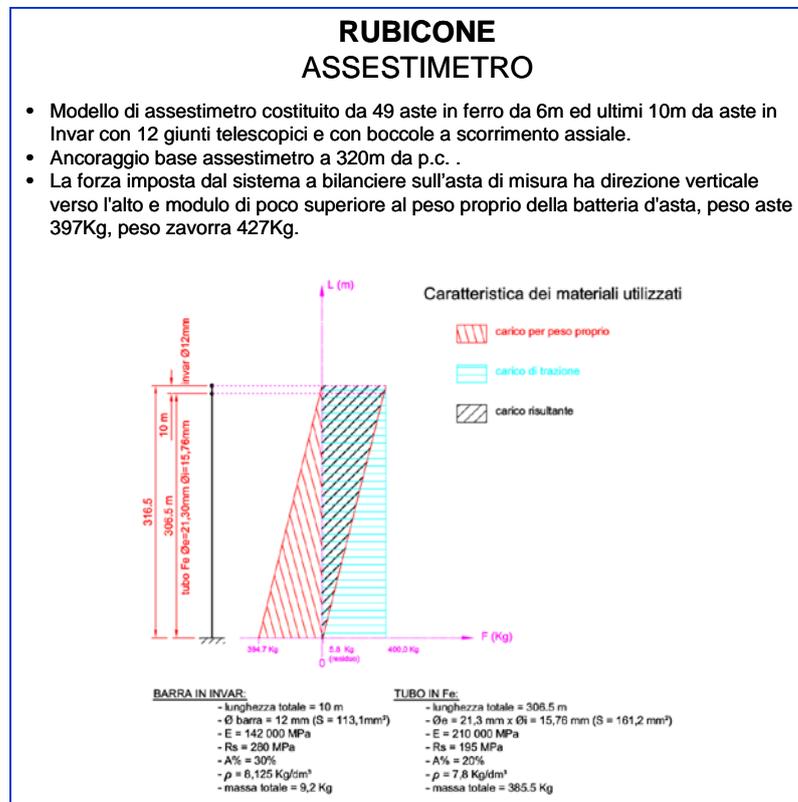
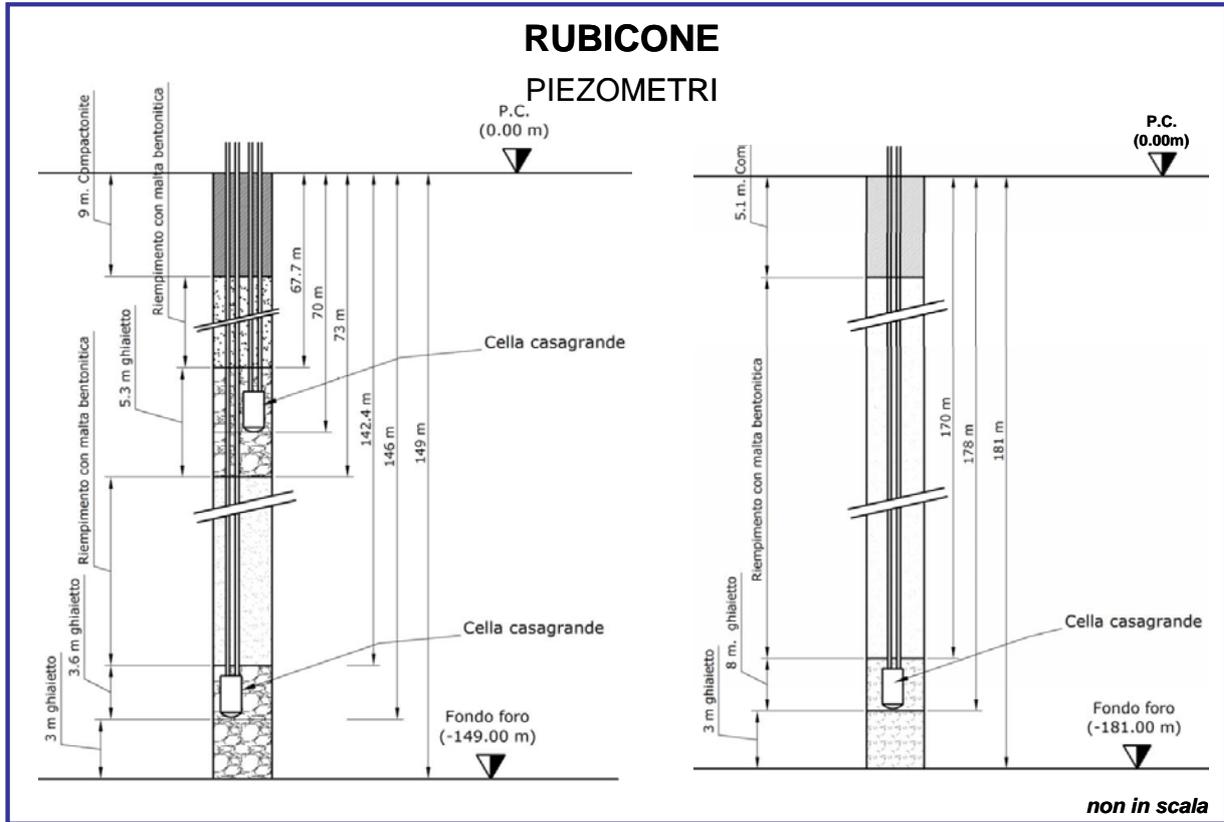
Nei grafici dei piezometri l'ordinata è la quota piezometrica (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico (come seconda ordinata) è riportato il valore della pressione barometrica.

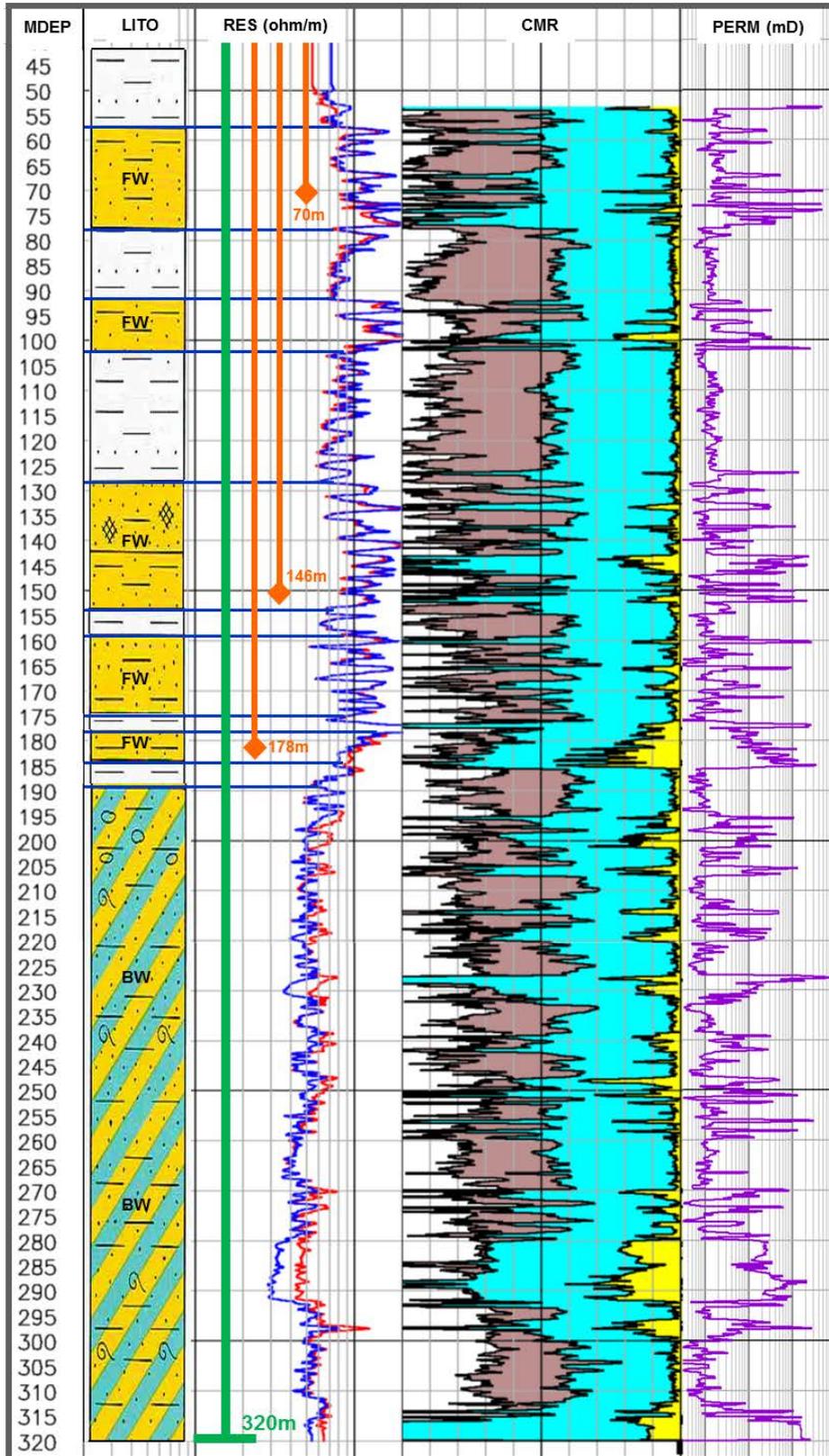
Nel caso di Rubicone si notano delle effervescenze gassose nei tubi piezometrici causate dalla presenza di piccole quantità di gas nell'acqua; il fenomeno del resto era già osservato durante le operazioni di messa in opera dell'attrezzatura. Queste piccole effervescenze causano differenze di misura dei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

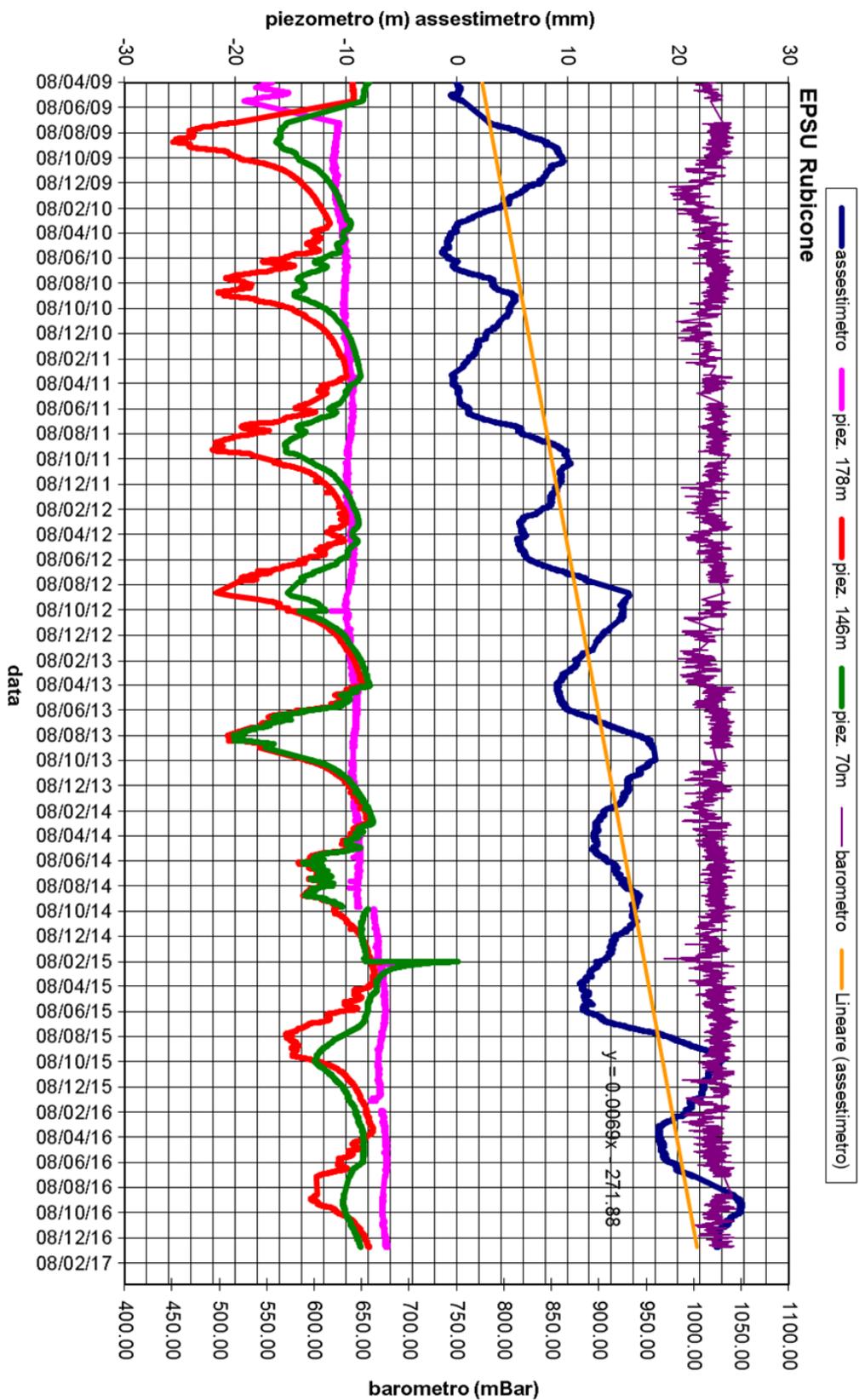
Un nuovo spurgo è stato fatto a fine settembre 2014, controllando accuratamente piezometri e trasduttori. L'affidabilità di questi ultimi, in particolare, è stata accertata facendo alcune misure manuali con freatimetro. Queste sono risultate del tutto in linea con le misure automatiche, consentendo di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





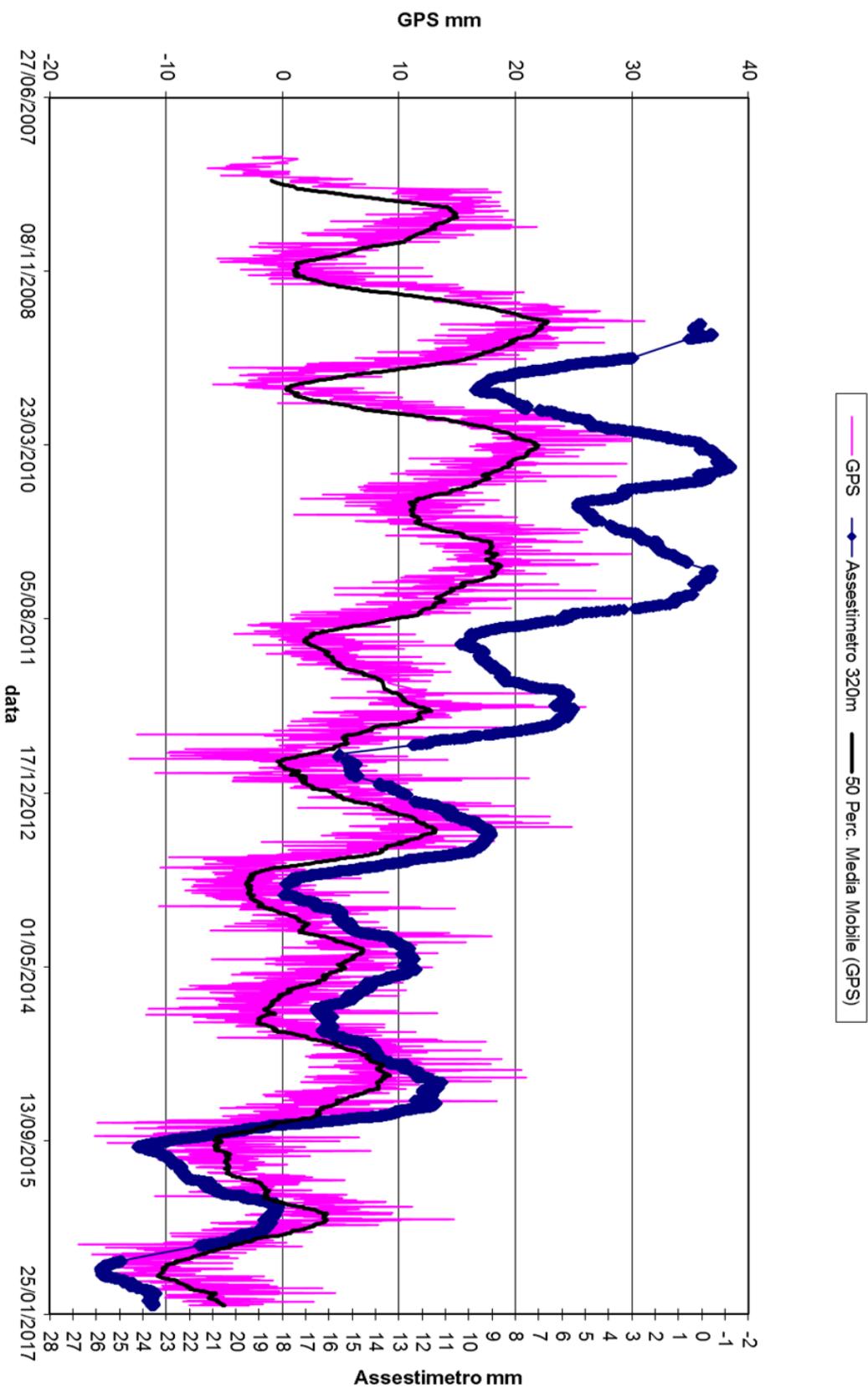
Stazione EPSU Rubicone. Le curve rappresentano i logs litologico-petrofisici tramite cui è stata ricostruita la serie stratigrafica del suolo attraversato.



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, invece, una velocità media annua di compattazione di circa 0,1 mm/a.

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

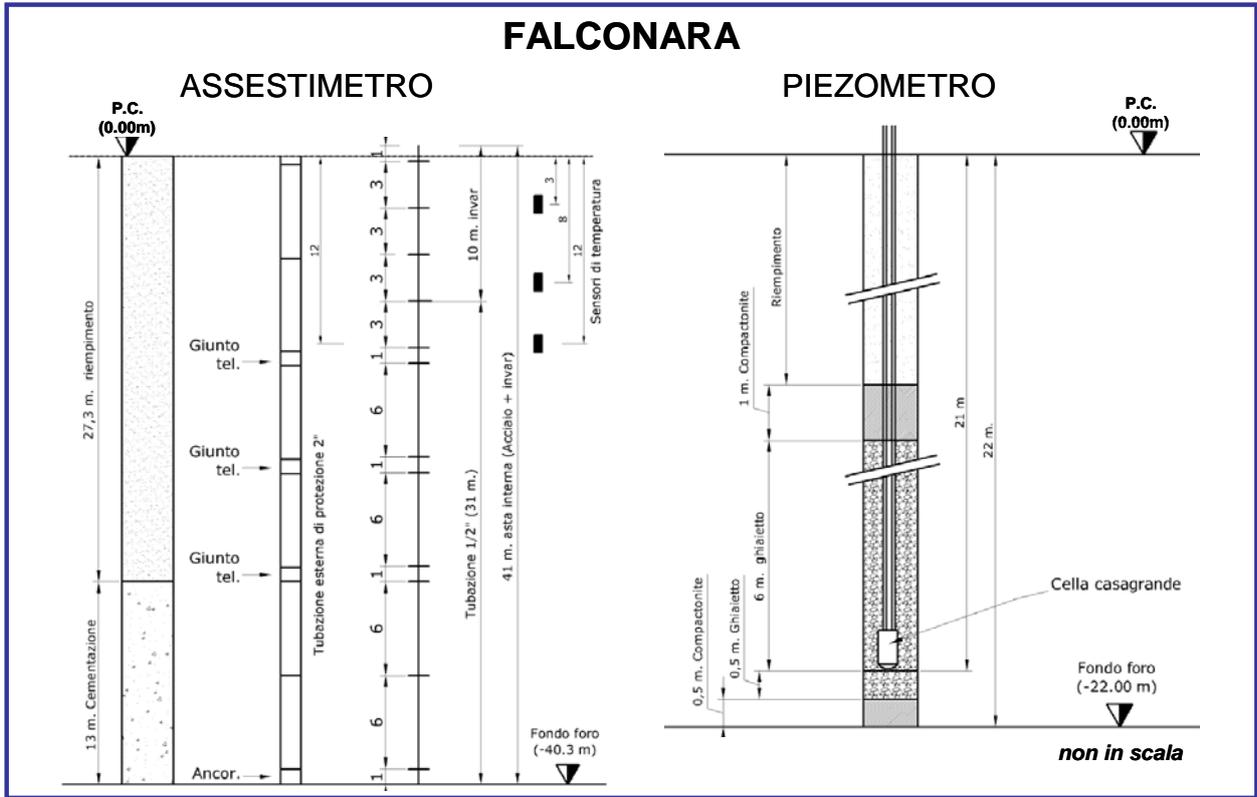
- le misure del CGPS sono state filtrate con una media mobile su 50 campioni per meglio evidenziarne l'andamento;
- i valori della curva assestimetrica sono stati riportati in ordine inverso, così da renderne l'andamento coerente quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano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

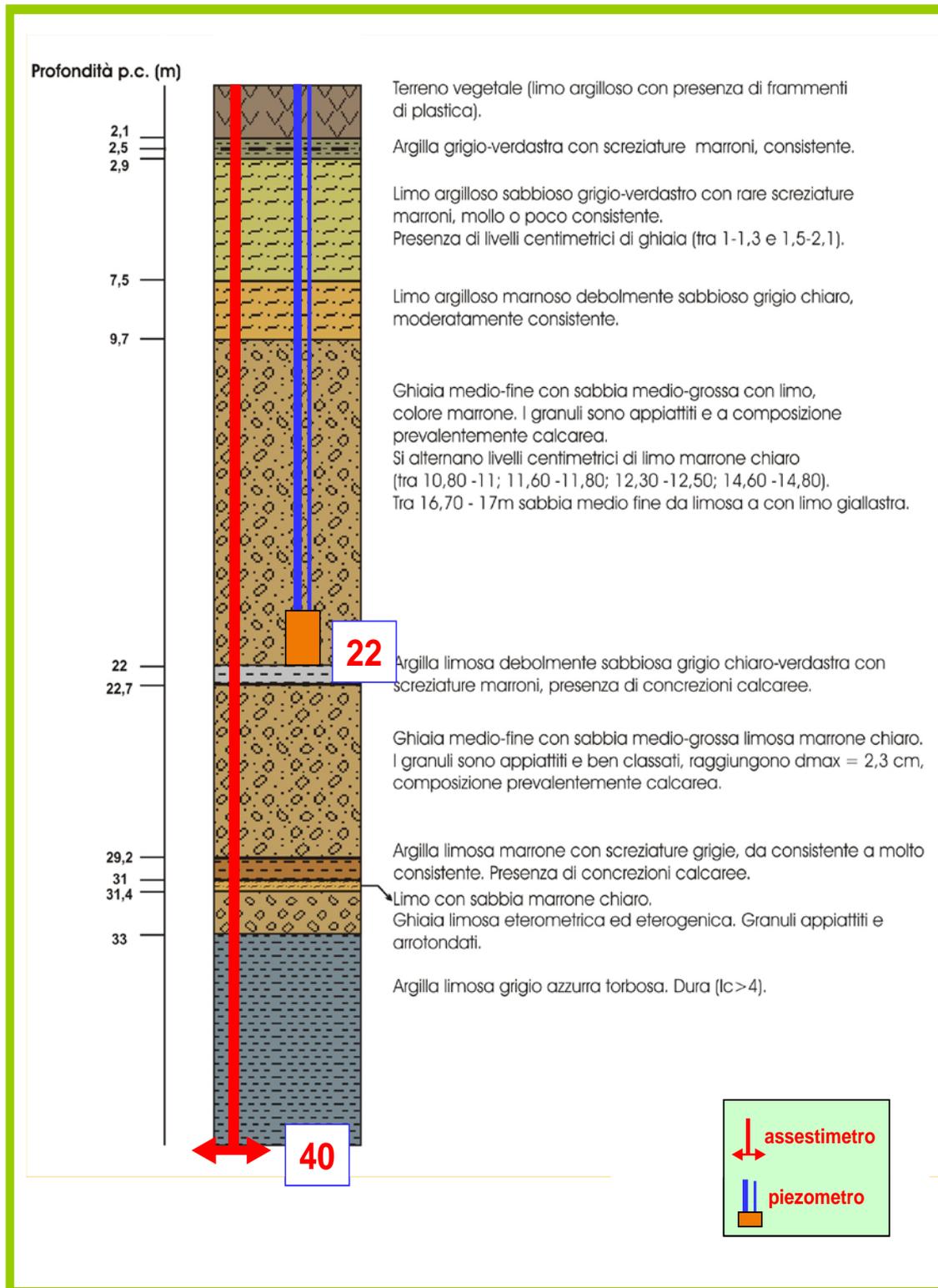
Analisi dei dati piezometrici

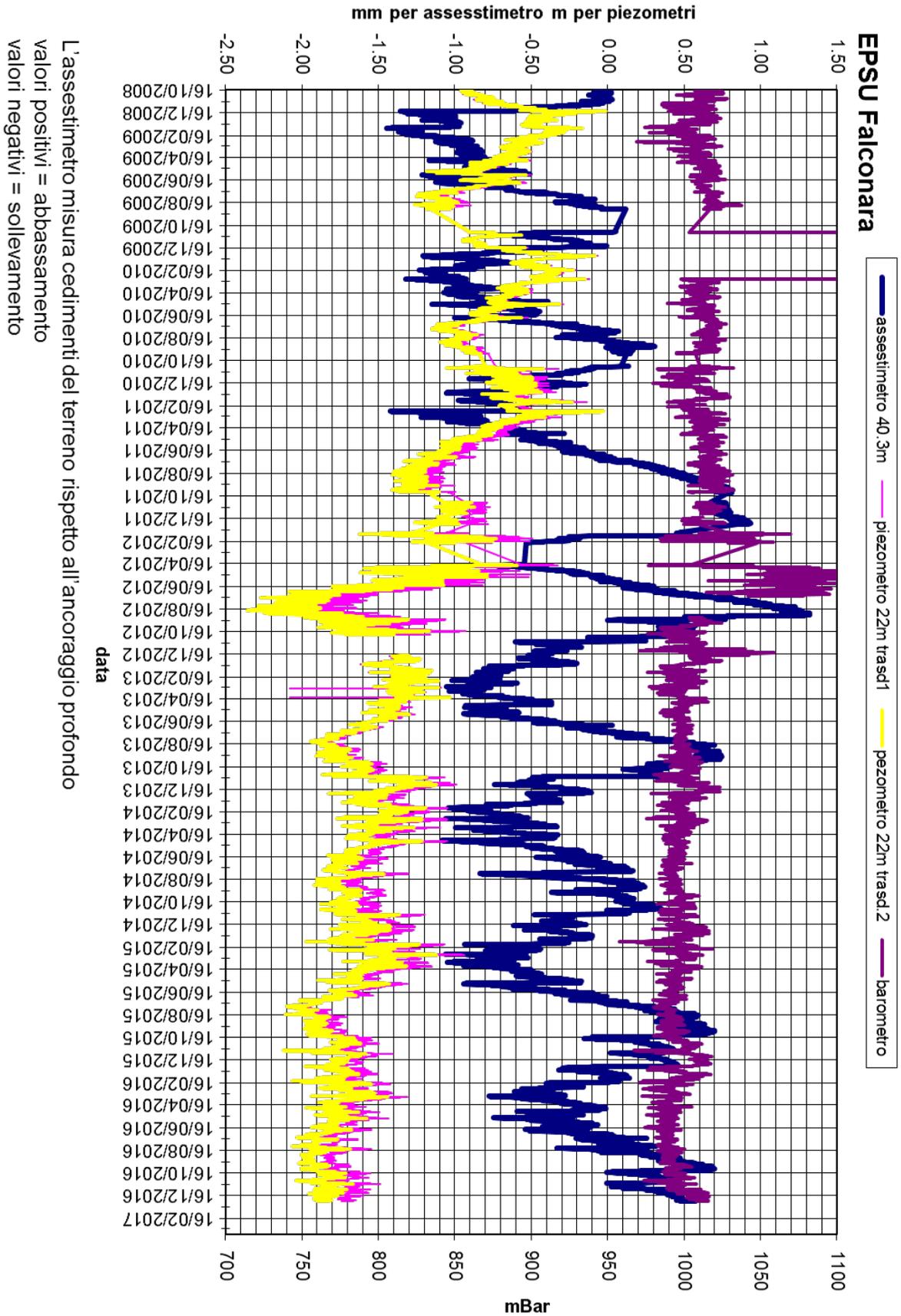
Nello stesso grafico dei dati assestimetrici si è riportata la piezometria (in m), ovvero la profondità del livello dell'acqua all'interno del tubo piezometrico riferita al piano campagna. Nello stesso grafico è riportato anche il valore della pressione barometrica.

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.

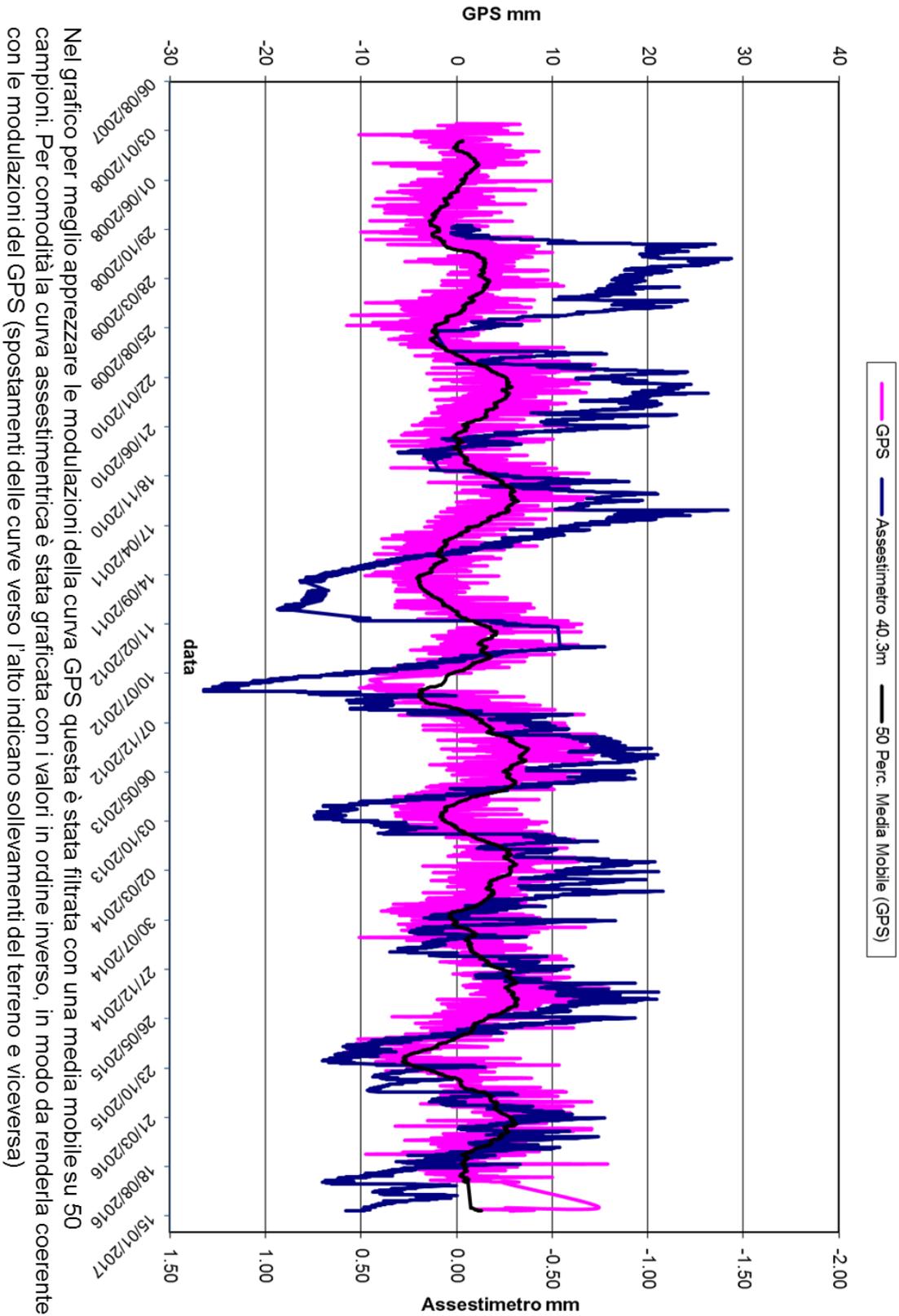








FALCONARA - Confronto GPS ed assestimetro superficiale



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.

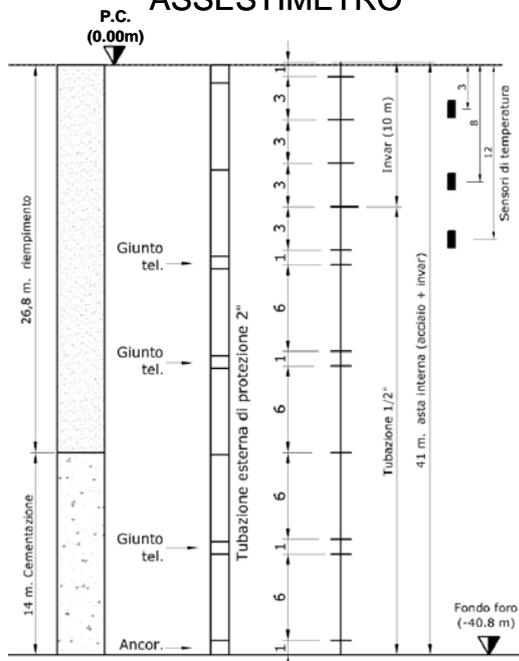
L'installazione di due trasduttori di pressione, uno per ogni canna del piezometro Casagrande, rende possibile controllare il grado di affidabilità del piezometro stesso. In questo caso la differenza di misura tra i due sensori è stata di circa ± 8 cm, il che rientra nella normale tolleranza dello strumento.

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

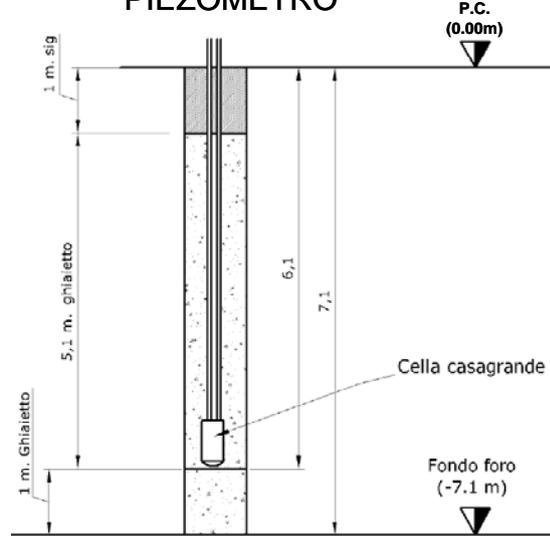


FANO

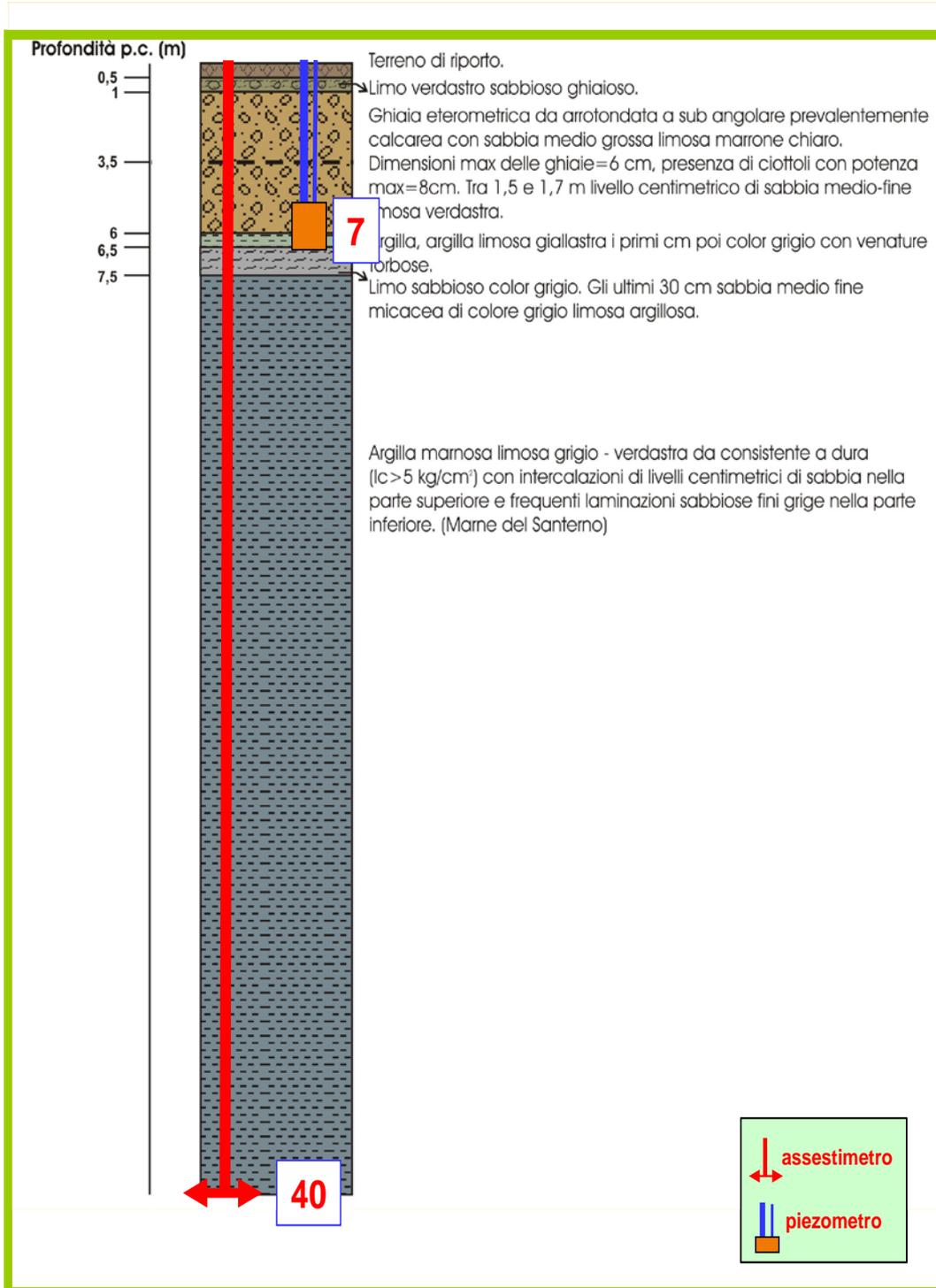
ASSESTIMETRO

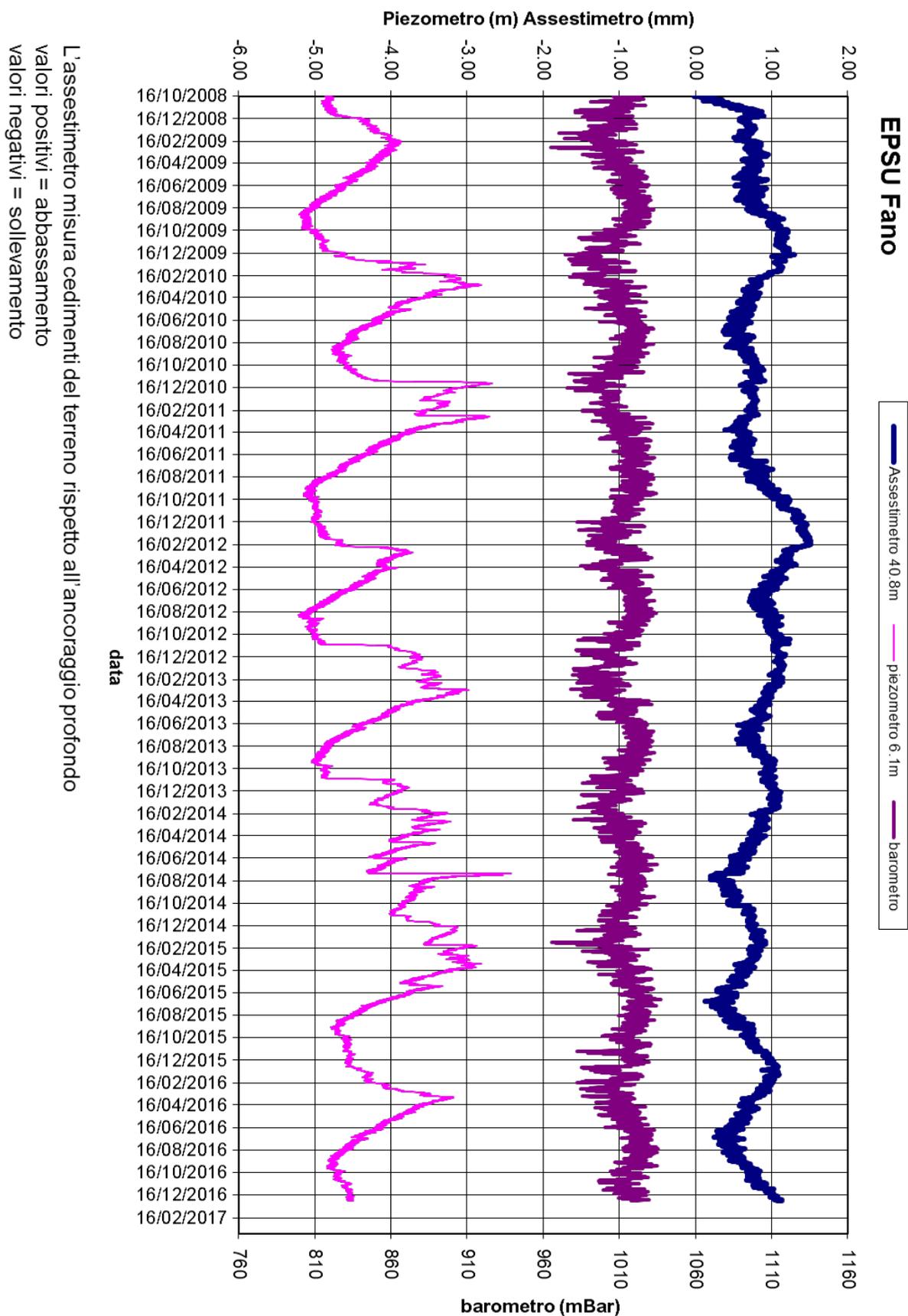


PIEZOMETRO



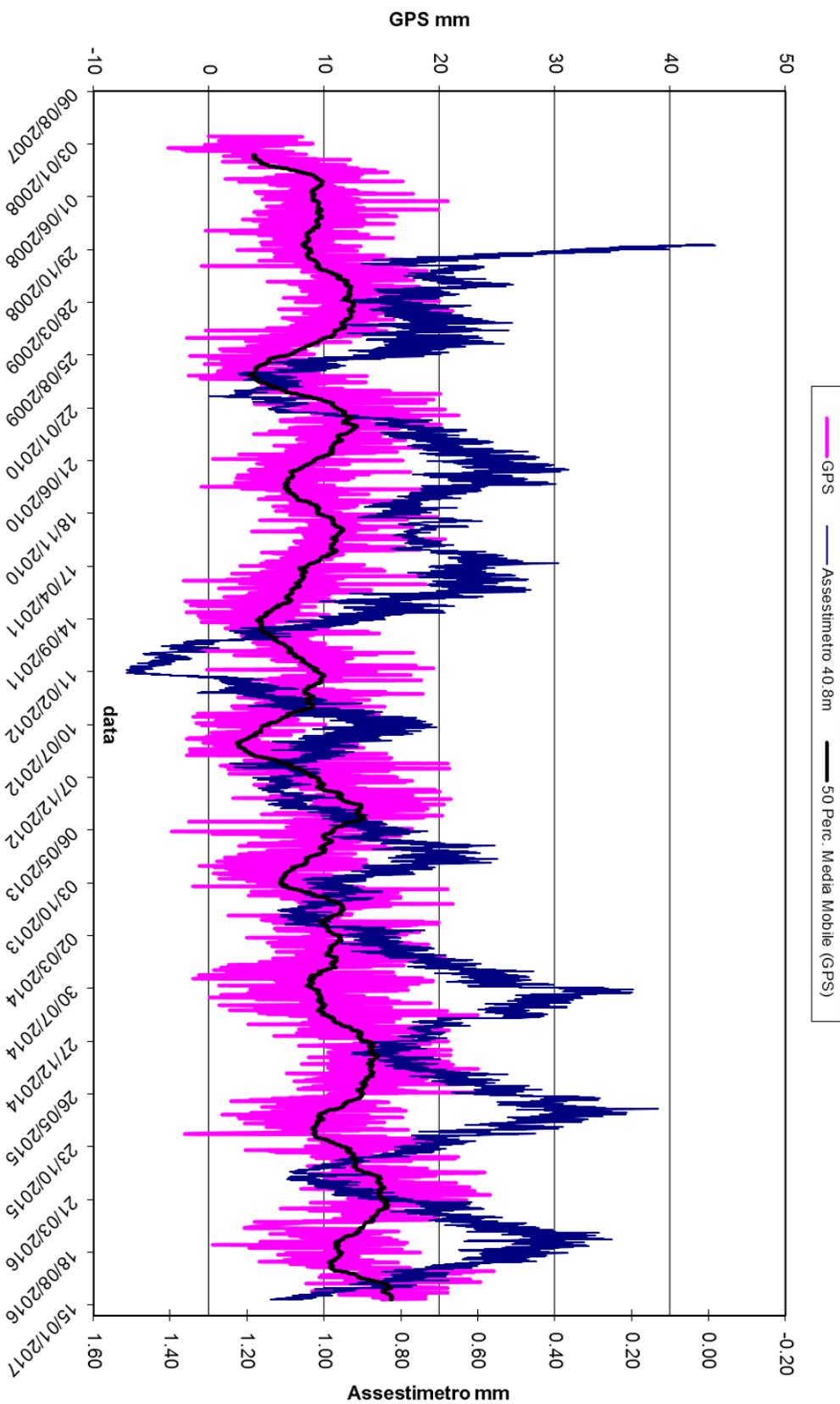
non in scala







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	-