

Campo di TEA-LAVANDA-ARNICA

Aggiornamento al 31/12/2018

Il campo di Tea, Lavanda e Arnica (acronimo TLA) è ubicato nell'offshore adriatico a una distanza di circa 58 km dalla costa prospiciente Ravenna, in corrispondenza di un fondale marino di circa 40 m. Tale campo ricade nella concessione di coltivazione A.C34.AG, titolarità Eni 100% (Figura 1).

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C34.AG	19/06/24	Eni	Eni	100%	Emilia-Romagna

I livelli mineralizzati a gas dei giacimenti di Tea, di Lavanda e di Arnica sono costituiti da torbiditi sabbiose, della formazione P.to Garibaldi che si sono depositate in corrispondenza di una monoclinale regionale di età pre-pleiocenica immergente verso SW. In tali livelli le sabbie, più o meno siltose e talora con sottili livelli argillosi, di genesi turbiditica, sono riconducibili a una situazione deposizionale tipo "lobo turbiditico prossimale" in brusca chiusura laterale per *onlap* contro la rampa di avanpaese. La successione più alta della serie mineralizzata presenta una significativa variazione di facies, riferibile a una fase di sedimentazione turbiditica a minore efficienza di trasporto conseguente a una diminuzione di volume dei flussi di torbida. La successione inferiore, più marcatamente sabbiosa, presenta banchi amalgamati, talora associati a livelli di ciottoli argillosi (*Clay chips*) imballati in matrice silto-sabbiosa. Tali strutture sono legate a fenomeni di rielaborazione di orizzonti argillosi che erano asportati dalle sovrastanti correnti di torbida, a marcata efficienza.

Il giacimento di Tea è stato scoperto nel novembre 1998 con la perforazione del pozzo esplorativo Tea 1, che è stato in seguito ripreso in *side-track* come Tea 1dirA. Il pozzo è stato poi chiuso minerariamente dopo aver eseguito le prove di produzione.

La struttura mineralizzata di Tea è, di fatto, una trappola mista stratigrafico-strutturale, estesa per circa 7 km², che s'impone su un "naso" del substrato pre-pleiocenico, con chiusura a NW, SE e SW per pendenza e a NE per *pinch-out*. L'estensione dei principali livelli mineralizzati coincide con un evidente fenomeno di anomalia d'ampiezza sismica.

Tali livelli, appartenenti al PL3-H della parte basale della formazione P.to Garibaldi (Figura 2 -), sono stati denominati dall'alto verso il basso: PL3-H, PL3-H1 e PL3-H2: il loro spessore lordo varia dai circa 14 m del livello PL3-H1 ai 4 m del PL3-H.

Il giacimento di Lavanda è stato scoperto nell'ottobre 1999 dopo aver perforato il pozzo esplorativo Lavanda 1 dir, che ha trovato mineralizzato il livello PL3-F1 a una distanza di circa 1600 m in direzione SE dal pozzo Tea 1. Il pozzo è stato poi ripreso in *side-track* come Lavanda 1 dir A con funzione di *appraisal* e, sia pure senza l'esecuzione di prove, ha fornito utili indicazioni sull'andamento strutturale di entrambi i giacimenti. Al termine degli accertamenti minerari il pozzo è stato sospeso con tecnologia *mudline suspension*.

Il giacimento di Arnica è stato scoperto nel gennaio 2000 con la perforazione del pozzo esplorativo Arnica 1, ubicato a circa 4500 m dalla citata *mudline suspension*. Il pozzo è stato chiuso minerariamente al termine delle prove di produzione che hanno interessato il livello PL3-H3. Il campo di Tea-Lavanda-Arnica (TLA) è stato sviluppato nel periodo febbraio 2007 - settembre 2007, perforando dalla piattaforma Tea i seguenti 4 pozzi, completati poi in doppio per un totale di 8 *string*:

- Lavanda 1 dir A e Tea 2dir per la coltivazione del giacimento di Tea;
- Arnica 2 dir per la coltivazione del giacimento di Arnica;
- Lavanda 2 dir per la coltivazione del giacimento di Lavanda.

Tutti i pozzi di sviluppo sono stati completati con tecnologia "*sand control*", del tipo OHGP (*Open Hole Gravel Pack*) nel pozzo Arnica 2 dir, e ICFP (*Inside Casing Frac Pack*) nei pozzi Tea 2 dir, Lavanda 1 dir A e Lavanda 2 dir.

Nel documento SIA del 4/02/02 è riportato il profilo di produzione ottenuto dagli studi statico e dinamico di giacimento (modello *Eclipse 3D* del 10/2000).

La subsidenza massima prevista in relazione a tale profilo e valutata con un modello Geertsma semianalitico (*Eni-GEDA: giacimento di Tea, Lavanda, Arnica - modellizzazione di subsidenza - Nota tecnica - MOGI-RIGE luglio 2001*) è risultata pari a 1,8 cm (in corrispondenza del culmine del giacimento) dopo 7 anni dall'inizio produzione; l'estensione massima del cono di subsidenza è risultata limitata all'area complessiva dei tre giacimenti.

Allo scopo d'accertare l'esistenza d'eventuali interazioni geomeccaniche tra il campo di Tea, Lavanda e Arnica e quello di Naomi e Pandora si sono confrontati i risultati del modello semianalitico di Geertsma (2001) con quelli del modello elasto-plastico a elementi finiti Isam-

geo (2003) realizzato per la previsione della subsidenza di Naomi e Pandora (*Eni-GEDA: campo di Tea, Lavanda, Arnica - nota integrativa del 27/01/03*). Come si rileva dalla Figura 3, tale confronto ha escluso ogni possibilità d'interazione fra i coni di subsidenza dei due campi. Nel marzo del 2003 si è aggiornato il modello *Eclipse* di Tea, Lavanda, Arnica (*Eni-MOGI-RIGE - Campi Lavanda Tea Arnica - Revisione dei modelli di giacimento con caratterizzazione dell'acquifero - marzo 2003*), unificando i modelli dei tre giacimenti - originariamente distinti - sia per le zone mineralizzate che nell'acquifero onde tener conto d'eventuali interazioni idrauliche e, quindi, meglio valutare la propagazione del disturbo di pressione nell'area circostante i giacimenti stessi. La possibile subsidenza indotta dalla coltivazione è stata a sua volta valutata per l'insieme di tali giacimenti con un modello geomeccanico elasto-plastico a elementi finiti (*ISAMGEO: campi a gas di Tea, Lavanda e Arnica-modello predittivo di subsidenza - marzo 2003*).

Nel corso delle simulazioni geomeccaniche si sono altresì eseguiti test di sensitività per valutare in quale misura influiscano sulla previsione di subsidenza le scelte sia dei valori di compressibilità uniassiale C_m dei sedimenti che di permeabilità dell'acquifero, fatte sulla base di modelli statistici e geostatistici.

In particolare, lo studio Isamgeo ha considerato due scenari di compressibilità C_m :

- **caso A**: si è utilizzata la legge di compressibilità proposta in letteratura da *Baù et al.*¹;
- **caso B**: si è utilizzata una stima di compressibilità derivata dall'interpretazione delle misure in situ con marker fatte nel pozzo Naomi 4D.

Per ciascuno scenario di compressibilità (casi A e B) sono stati considerati, inoltre, due possibili scenari di depressurizzazione:

- **scenario "press 1"** nel quale si è assunta la permeabilità dell'acquifero pari a quella del giacimento. Tale scenario corrisponde a una maggiore depressurizzazione delle zone esterne nell'acquifero e a una minore depressurizzazione di quelle interne al giacimento per effetto della maggior spinta d'acqua, il che comporta anche un minor recupero di gas;
- **scenario "press 2"** nel quale si è assunta la permeabilità dell'acquifero pari a 1/10 rispetto a quella di giacimento sulla base di evidenze indirette di possibili fenomeni di

¹ Baù D., Ferronato M., Gambolati G., and Teatini P., Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique, *Géotechnique*, Vol. 52, No. 8, pp. 605-616, 2002.

diagenesi nei livelli ad acqua; fenomeni che nelle zone mineralizzate sarebbero, invece, inibiti dalle alte saturazioni in gas.

Sulla base delle simulazioni fatte e considerata la configurazione più probabile (**caso A** - scenario "press 1"), il valore di subsidenza massimo previsto al termine del periodo di coltivazione dei giacimenti è stato pari a 1.7 cm in corrispondenza della culminazione strutturale del giacimento di Tea. Tale valore si riduce a circa 1 cm a una distanza massima di 4.5 km in direzione SW dal centro del complesso dei giacimenti, ovvero a più di 50 km dalla costa. In seguito a ulteriori approfondimenti, richiesti da MATTM, è stato assegnato al Dipartimento per i Metodi e i Modelli Matematici per le Scienze Applicate (DMMMSA) della Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Padova l'incarico di verificare e validare la previsione di subsidenza eseguita da Isamgeo, per conto di Eni, nel 2003.

A tale scopo DMMMSA ha fatto uno studio previsionale della subsidenza nei giacimenti in oggetto (*DMMMSA-Università di Padova: studio previsionale con modello ad elementi finiti della subsidenza attesa dalla coltivazione dei campi di Tea, Lavanda ed Arnica – novembre 2005*) basandosi sulla già citata revisione dei modelli statico e dinamico di giacimento (*Eni-MOGI-RIGE: campi Lavanda Tea Arnica - Revisione dei modelli di giacimento con caratterizzazione dell'acquifero - marzo 2003*), e prendendo in esame diverse ipotesi in merito al valore del coefficiente di compressibilità C_m dei sedimenti (per maggiori dettagli in merito si rimanda alla relazione DMMMSA).

In sintesi, i risultati ottenuti da DMMMSA sono stati:

- 1) la subsidenza massima attesa si verifica all'interno dell'involuppo delle tracce dei giacimenti ed è dell'ordine di qualche centimetro a seconda della legge di compressibilità adottata. Il valore di subsidenza con lo scenario più probabile (*forecast 1 e compressibilità media*) è di 2 cm, mentre nelle condizioni più cautelative (*forecast 2 e compressibilità all'estremo superiore dell'intervallo di confidenza*) è di 4.6 cm;
- 2) in ogni scenario previsto, l'isolinea di subsidenza 1 cm rimane circoscritta all'involuppo delle tracce dei giacimenti. Nella condizione più sfavorevole (*forecast 2 e compressibilità all'estremo superiore dell'intervallo di confidenza*) la distanza massima raggiunta dall'isolinea 1 cm rispetto al baricentro delle tracce dei giacimenti è di circa 8 km, cioè circa 50 km dalla linea di costa e completamente a sud del parallelo passante per la foce del Po di Goro;

- 3) con lo scenario di *forecast 1*, il massimo della subsidenza attesa si verifica alla fine della produzione con un lieve rebound dopo l'abbandono del campo. Al contrario, con lo scenario di *forecast 2*, il processo di abbassamento prosegue anche in fase post-produttiva con una lieve subsidenza residua stimabile in pochi millimetri.

Lo studio eseguito dal DMMMSA di Padova ha completamente confermato, quindi, i risultati della precedente valutazione di Isamgeo, ovvero che la possibile subsidenza indotta dalla coltivazione dei campi a gas di Tea-Lavanda-Arnica secondo i programmi di produzione previsti da Eni è minima, del tutto trascurabile anche nella zona dei giacimenti e, inoltre, non interessa la fascia costiera a sud del delta del Po e il litorale ravennate.

Nel gennaio del 2010 è stato nuovamente aggiornato lo studio di giacimento di Tea, Lavanda e Arnica con risultati che hanno portato a un aumento del 6% delle riserve a vita intera producibili del campo. Un ulteriore aggiornamento di tale studio è stato poi fatto nell'ottobre del 2013 (*rel. GISE n° 19/13 del 20/10/2013*). I risultati hanno mostrato un incremento del 4% del valore del GOIP (da 2737 MSm³ stimati al 12/2010 a 2839 MSm³ stimati al 10/2013) e una riduzione delle riserve a vita intera dell'8% (da 1751 MSm³ valutati al 12/2010 a 1617 MSm³ valutati al 10/2013).

Nel corso del 2011 sono state a loro volta aggiornate le previsioni di subsidenza per il campo (*rel. TERA n° 10/2011 – Campi di Tea, Lavanda, Arnica – Modello predittivo di subsidenza - Management Summary*) giungendo alle seguenti conclusioni:

- la subsidenza massima prevedibile sulla verticale dei giacimenti è di 7 cm;
- la corrispondente estensione del relativo cono (curva d'iso-subsidenza di 2 cm)² è di circa 5 km dal centro del complesso dei giacimenti verso costa, ossia a più di 50 km dalla costa stessa.

Tale previsione è riferita al caso più cautelativo, mentre nel caso ritenuto più probabile l'impatto della subsidenza è ancora più ridotto (max. 3 cm).

² Nei modelli geomeccanici di Tea, Lavanda e Arnica realizzati nel periodo 2002-2003 da Eni (Geertsma semianalitico del 2001) e da Isamgeo (FEM del 2003), l'estensione del cono di subsidenza è stata fatta corrispondere alla linea d'iso-subsidenza di 1 cm. All'epoca, infatti, non erano ancora disponibili gli studi condotti dalla Commissione Scientifica Internazionale (CSI) nominata da Eni e presieduta dal Prof. E. Boschi che, su tale argomento, ha concluso che la linea d'iso-subsidenza di 2 cm è da considerarsi "*the limit of any physical identification of induced subsidence effects*". Gli studi e le conclusioni della CSI sono stati resi pubblici con il volume "*Land Subsidence – Special Volume*" edito in occasione del *7th International Symposium on Land Subsidence – Shanghai (P.R. China) – 23-38 Oct. 2005*. Pertanto solo a partire da tale data Eni ha considerato nei propri studi la linea d'iso-subsidenza di 2 cm come il contorno esterno che delimita il cono di subsidenza.

In Figura 4 sono riportati gli andamenti storici delle portate di gas, d'acqua e la produzione cumulativa di gas al 31/12/18 pari a 1795 MSm³. Si noti che il volume di gas prodotto a oggi ha già raggiunto il valore previsto a fine vita del campo. Le portate attuali sono, comunque, esigue e in linea con il comportamento di un giacimento nelle fasi produttive terminali. L'attuale andamento del campo sarà ad ogni modo attentamente monitorato e, qualora fosse necessario, si farà un aggiornamento dei modelli fluido-dinamico e geomeccanico.

Nel maggio del 2015 si è ancora aggiornato lo studio di giacimento di Tea, Lavanda e Arnica (*rel. GISE n° 01/2015 Campi di Tea Lavanda Arnica - Aggiornamento studio di giacimento - Scheda riassuntiva del maggio 2015*) con il calcolo di nuovo profilo di produzione che prevede un recupero di gas pari a 1722 MSm³ entro il 2018 (Figura 5, Figura 6 e Figura 7).

In Figura 8, sono presentati i confronti tra i profili di pressione calcolati dal modello *Eclipse* 2015 e le pressioni statiche misurate per i livelli ritenuti più rappresentativi del campo. Tali confronti mostrano come la previsione modellistica sia più conservativa rispetto comportamento reale di detti livelli.

Sulla base dei risultati dello studio di giacimento del maggio 2015 sono state contestualmente aggiornate le previsioni di subsidenza per il campo (*rel. TERA n° 05/2015 – Campi di Tea, Lavanda, Arnica – Modello predittivo di subsidenza-Management Summary*).

Tali previsioni sono state fatte con un modello geomeccanico elasto-plastico a elementi finiti (FEM Isamgeo), considerando il nuovo profilo produzione con uno start up del campo a novembre 2007 e una previsione di fine produzione al 2018. Sia le simulazioni con il modello di giacimento, sia con quello geomeccanico sono state protrate sino al 2047 per valutare gli effetti dell'evoluzione della pressione sia nelle regioni mineralizzate che in acquifero dopo la fine della produzione.

La stima della compressibilità delle rocce serbatoio stata fatta utilizzando una correlazione ottenuta da un'analisi statistica dei valori di compressibilità da misure "in-situ" ottenute nei pozzi di monitoraggio perforati nei campi dell'Adriatico ed equipaggiati con *markers*.

I risultati delle previsioni di subsidenza ottenuti sono riportati nella tabella seguente:

Data	Subsidenza massima [cm]	Estensione massima [km]	Distanza minima dalla costa [km]
2018 (fine produzione)	5	6	52
2047 (fine simulazione)	5	7	51

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza nel campo è previsto essere raggiunto alla fine della produzione e risulta pari a 5 cm;
- nel 2018 la massima estensione della linea d'iso-subsidenza dei 2 cm - calcolata come distanza del punto di massima subsidenza da tale linea - è di circa 6 km. Tale estensione raggiunge i 7 km al 2047, ovvero dopo 30 anni dalla fine della produzione (Figura 9);
- Il fenomeno subsidenziale si esaurisce, quindi, a circa 51 km dalla costa.

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

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

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

La rete di livellazione rilevata nel 2017 (ultimo rilievo eseguito), è stata ampliata con l'aggiunta di uno sbraccio esteso all'area del campo di Agosta.

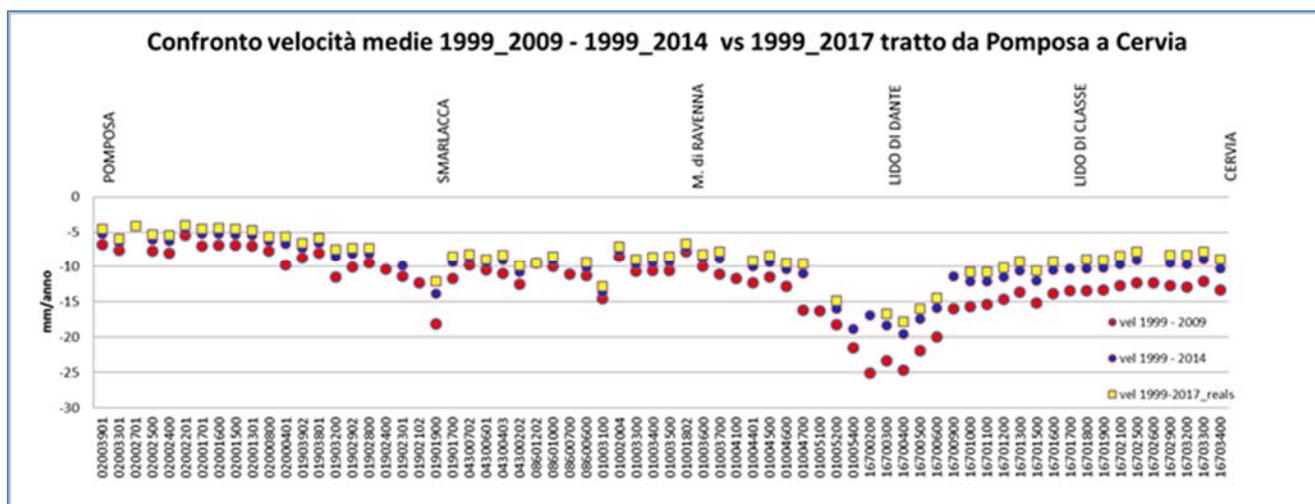
Tale rete è suddivisa nei seguenti tronchi di livellazione:

- dorsale Adriatica, da Treviso fino a Pesaro, compreso lo sviluppo degli sbracci sul delta del Po, per un totale di circa 1200 km di sviluppo lineare;
- tratto da Pesaro a P.to San Giorgio, per un totale di circa 210 km di sviluppo lineare;
- tratto Marche-Abruzzo, da P.to San Giorgio a Pescara, per un totale di circa 220 km di sviluppo lineare.

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

Si ritiene opportuno sottolineare, inoltre, che, sebbene vi siano punti di contatto tra i vari tratti di livellazione afferenti alla rete Eni, allo stato attuale non è possibile utilizzare in modo congiunto i valori di quota ottenuti sulle singole reti a causa della disomogeneità tra i capisaldi origine delle tre reti di livellazione. Per ovviare a tale situazione determinata da fattori ambientali (grandi distanze), su suggerimento dell'ente certificatore è stata realizzata una linea di stazioni permanenti CGPS disposte a distanze regolari tra Pineto e P.to Sant'Elpidio che, con il consolidamento dei dati CGPS, costituiranno una serie di capisaldi origine omogenei, tali da consentire d'ottenere misure di quota fra loro consistenti da Treviso a Pescara. Per il tratto di costa da Pomposa a Cervia - prospiciente i campi di Naomi-Pandora, Guendalina e Tea-Lavanda-Arnica - le livellazioni disponibili non sono completamente omogenee tra loro poiché le quote di alcuni capisaldi sono state misurate solo a partire dal 2003. Di conseguenza si sono stimate con regressione lineare solo le velocità medie d'abbassamento del suolo per quei capisaldi che presentano una serie storica ininterrotta di misure a partire dal 1999. Tali velocità sono riportate in Figura A per i seguenti periodi: 1999-2009, 1999-2014 e 1999-2017. Il loro confronto mostra come negli ultimi anni si sia registrata una generale diminuzione di dette velocità; diminuzione che è mediamente dell'ordine di 2.4 mm/a.

Figura A – Tratto Pomposa-Cervia: velocità medie di subsidenza



Le misurazioni di campagna si sono svolte nel pieno rispetto delle specifiche tecniche, con il controllo periodico dei supervisori e con la verifica di chiusura di tutti i tratti in andata e ritorno, nonché di tutti i poligoni realizzati. I parametri matematici della compensazione rientrano nei canoni previsti, sia per i valori di chiusura, sia per i valori legati alla propagazione

dell'errore. Come programmato in precedenza, l'ente certificatore ha iniziato, da questa campagna, ad introdurre la compensazione sviluppata utilizzando i valori di velocità desunti dalle stazioni CGPS permanenti della rete Eni. A questo proposito, però, è necessario anche segnalare che i valori delle quote dei capisaldi ottenuti con questo procedimento possono differire da quelli che si ottengono con la compensazione classica, che è invece vincolata a un solo caposaldo di riferimento. In effetti, ciò è stato osservato nel caso dei risultati del rilievo 2017, in cui le misure delle quote di alcuni capisaldi sono risultate maggiori dei corrispondenti valori rilevati con la livellazione del 2014. Valori questi ultimi che erano stati ottenuti con la compensazione classica vincolata al solo caposaldo di Treviso.

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

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

Al fine d'ottenere una rappresentazione areale della subsidenza o della velocità media di subsidenza 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. Considerando, infatti, nel tratto di costa da Pomposa a Cervia solo i capisaldi con una serie storica ininterrotta di misure, se ne possono analizzare le relative velocità medie di abbassamento del suolo³ (V_a) - stimate con regressione lineare - raggruppandole nelle seguenti 5 classi:

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

³ Nel presente rapporto di norma le velocità di subsidenza (i.e di abbassamento della superficie del suolo) sono riportate con valori negativi. Per comodità d'interpretazione, però, nell'elenco che segue, le velocità di subsidenza sono state rappresentate con valori positivi.

L'elaborazione con questo approccio delle misure di livellazione del periodo 1999-2014 mostra un trend di generale abbassamento di questo tratto di costa. Il 51% dei punti ricade, infatti, nella classe 3, il 47% dei punti ricade nella classe 4 e solo un caposaldo, con una velocità V_a di 4.5 mm/a, ricade nella classe 2.

L'analisi aggiornata con i dati del 2017 conferma, come detto in precedenza, il rallentamento della velocità di subsidenza, che è diffuso per tutto il tratto analizzato. Si collocano, infatti, nella classe 2 il 12% dei punti analizzati, il 69% dei punti ricade nella classe 3 ed è in diminuzione la percentuale dei punti in classe 4 (19%).

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

Per completare il monitoraggio altimetrico del tratto di costa antistante alle piattaforme si è proceduto, inoltre, ad aggiornare la copertura SAR (ottobre 2018) per un'analisi areale altimetrica integrata (Appendice A) con i dati forniti dalle stazioni CGPS (Figura 10).

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

Le serie storiche di misure CGPS acquisite nelle stazioni messe in opera nel periodo 2015 - 2016, sono, però, ancora troppo brevi per consentire valutazioni specifiche.

Il sistema di monitoraggio è stato poi ulteriormente potenziato con la costruzione lungo la costa, nel tratto prospiciente i campi sopracitati, di 3 nuove stazioni altimetriche SSU

(*Satellite Survey Unit*) equipaggiate ciascuna con un CGPS, un caposaldo di livellazione geometrica e 2 bersagli radar solidalmente connessi tra loro tramite una trave di cemento armato. Le 3 stazioni SSU sono state realizzate nelle Centrali Eni di Rubicone, di Fano e di Falconara nel dicembre 2007; negli stessi siti sono stati perforati tra ottobre e dicembre 2008 anche tre pozzi assestometrici per il monitoraggio della compattazione superficiale del terreno. Tali stazioni si sono aggiunte a quelle preesistenti, installate più a Nord lungo la costa ravennate nelle località di Fiumi Uniti, di Smarlacca e di Spinaroni (Appendice B).

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

Allo stato attuale la stazione di Ortona non è più operativa dal 19 aprile 2013 per l'alienazione dell'area.

Nel novembre 2016, infine, è stata messa in opera una nuova postazione CGPS a Migliani-co (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 Tea-Lavanda-Arnica, certificati fino al 2016 e in fase di certificazione per gli anni successivi, sono stati elaborati con il software scientifico Bernese dalla ditta e-GEOS.

Per rappresentare in grafici plano-altimetrici la serie storica più completa di misure, ovvero quella estesa al 31/12/2018 – Figura 11), sono stati utilizzati in questa relazione anche i dati non certificati, vista la generale convergenza di questi ultimi con quelli certificati, come mostrato nella seguente Tabella1.

Tabella 1 - Confronto dati CGPS certificati e non certificati aggiornati al 31/12/2016

Stazione	Dati Non Certificati			Dati Certificati			Delta (Non Cert. - Cert.)		
	Vel-N mm/a	Vel-E mm/a	Vel-H mm/a	Vel-N mm/a	Vel-E mm/a	Vel-H mm/a	D-N mm/a	D-E mm/a	D-H mm/a
TLA	18.0	19.67	-4.31	18.09	19.32	-4.27	-0.09	0.35	-0.04

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

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

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

In generale:

- dataset < 12mesi: solo follow up per monitoraggio dei dati acquisiti
- dataset di 12÷36 mesi e
 - piccoli valori di subsidenza attesi: analisi tendenziale del fenomeno e monitoraggio delle anomalie verso il trend previsionale;
 - grandi valori di subsidenza attesi: analisi tendenziale del fenomeno per calibrazione del modello previsionale;

- dataset > 36 mesi: analisi di trend e calibrazione dei modelli geomeccanici confrontando il dato di velocità di subsidenza misurato (depurato dalla velocità di subsidenza naturale) e i valori dei modelli previsionali.

Le elaborazioni sono state fatte con software scientifico Bernese, strategia OBS-MAX, utilizzando i prodotti finali (effemeridi precise e file del polo) messi a disposizione dall'IGS (International GNSS Service). Come anticipato nella precedente relazione, le elaborazioni dei dati CGPS, sono state effettuate utilizzando il sistema di riferimento ITRF2014 con il software BERNESE 5.2.

Per le nostre elaborazioni il sistema di riferimento è materializzato dalle stazioni appartenenti alla rete EUREF disponibili tra: Bucarest, Genova, Graz, Matera, Medicina, Padova, Penc, Sofia, Torino, Zimmervald. L'eliminazione degli *outliers* delle serie storiche è effettuata mediante test a 3 SIGMA iterativo.

Per il campo di Tea-Lavanda-Arnica, sulla base di una serie storica di misure CGPS di durata superiore a 36 mesi, - anche se parzialmente incompleta a causa di work-over e successivi problemi di malfunzionamento della strumentazione - è possibile stimare una velocità media di subsidenza totale⁴ pari a -4.24 mm/a (Figura 11 e Figura 13), senza variazioni significative rispetto a quanto riportato nella precedente relazione d'aggiornamento (-3.7 mm/a). Si segnala altresì che eventuali piccole differenze nelle stime delle velocità, che si possono verificare rielaborando in epoche successive i dati CGPS, dipendono anche dal fatto che l'aggiornamento delle serie storiche comporta sia l'elaborazione di un modello periodico più attendibile, sia la ridefinizione degli outliers, che sono determinati mediante il test a tre sigma su tutta la serie storica esistente. Le elaborazioni delle nuove serie storiche sono state influenzate sia dal cambio del sistema di riferimento (da ITRF2008lgb08 a ITRF2014) sia dall'utilizzo della nuova release del software scientifico Bernese (da 5.0 a 5.2). Entrambe le condizioni hanno introdotto modeste variazioni nelle velocità medie pregresse, dovute anche al ricalcolo delle serie storiche delle stazioni di riferimento. In particolare, le verifiche effettuate hanno mostrato che tali condizioni possono determinare

⁴ 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.

un aumento della velocità di subsidenza dell'ordine di 0.5 mm/anno, anche sulle serie storiche delle stazioni di riferimento.

Nella distribuzione temporale di misure CGPS, inoltre, si può osservare una variazione di velocità, correlabile con la storia produttiva del campo (Figura 12).

In particolare:

- una velocità media di subsidenza totale di circa -6.27 mm/a nel periodo novembre 2007 (installazione del CGPS) - ottobre 2011;
- una velocità media di subsidenza totale di circa -3.94 mm/a nel periodo ottobre 2011-ottobre 2016;
- una velocità media di subsidenza totale di circa -0.37 mm/a nel periodo ottobre 2016-dicembre 2018.

L'evoluzione temporale del dato CGPS nell'ultimo periodo analizzato, può essere posta in relazione con l'attuale fase di declino della produzione.

Le misure CGPS sono state poi confrontate con i risultati ottenuti dal modello geomeccanico senza depurare tali misure dalla componente di subsidenza naturale. Come evidenziato in Figura 14, sussiste ancora un buon accordo fra le due serie di valori che conferma l'attendibilità dell'attuale modello di subsidenza.

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

Si segnala infine che:

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

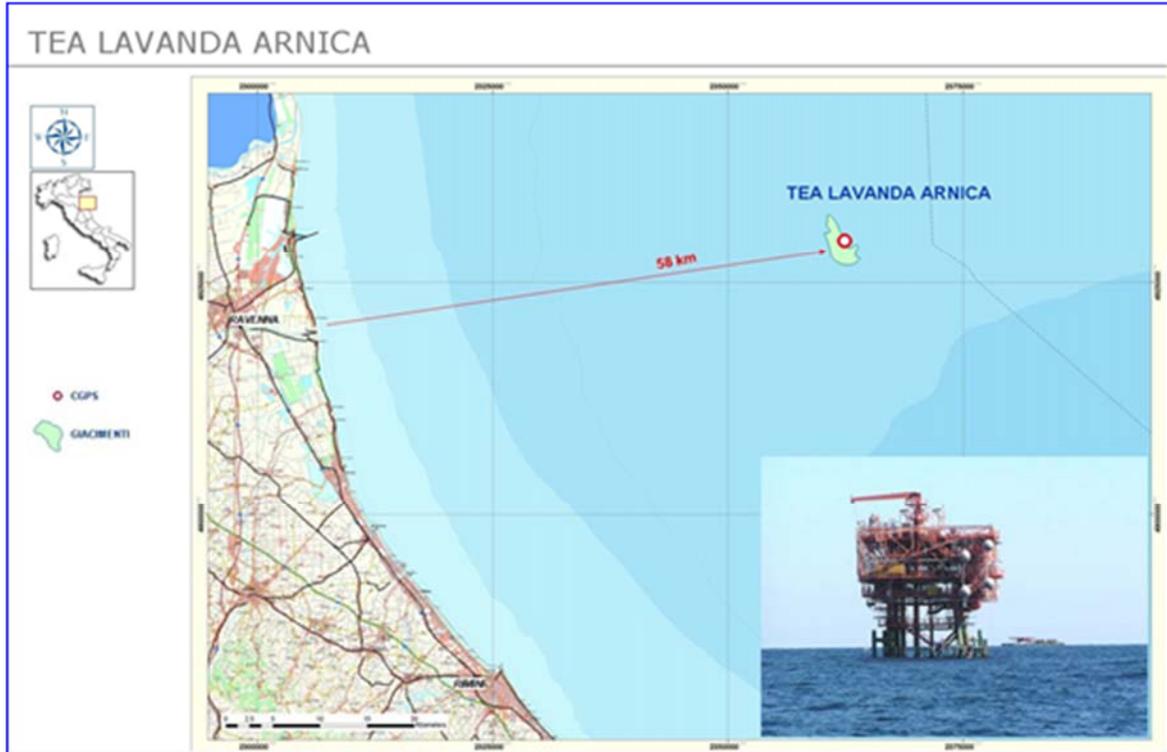


Figura 1 – Ubicazione del campo di TLA

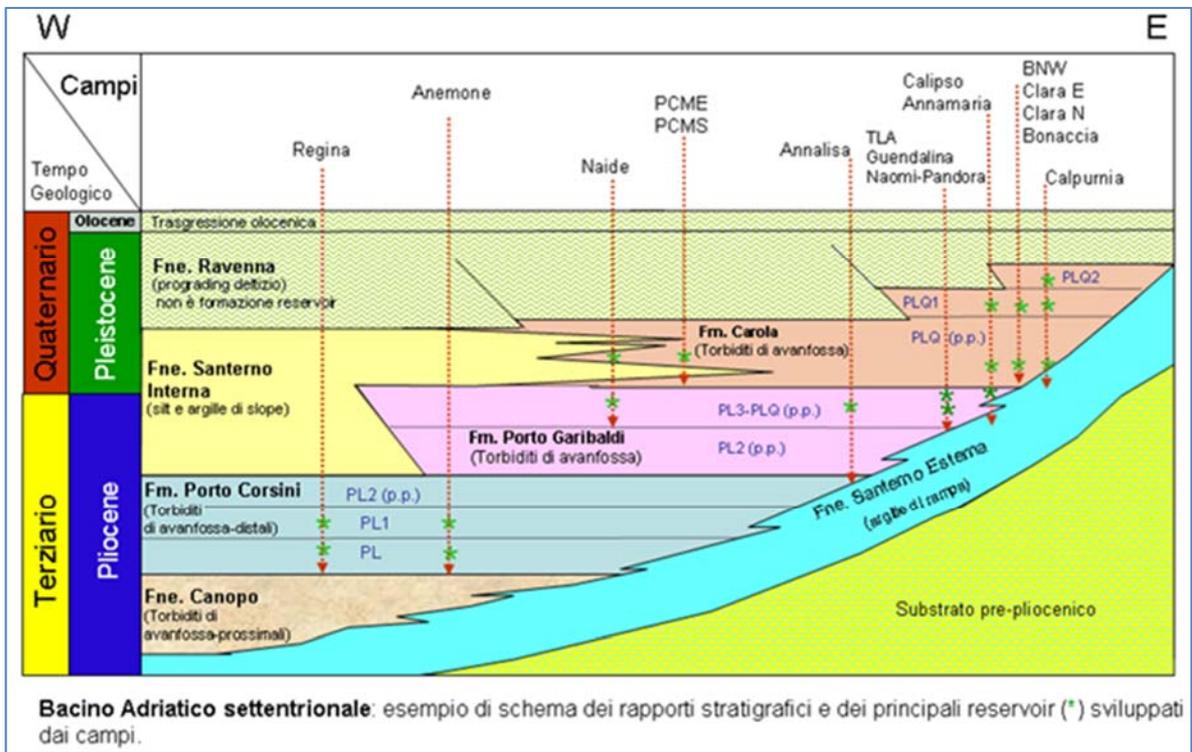


Figura 2 – Schema dei rapporti stratigrafici

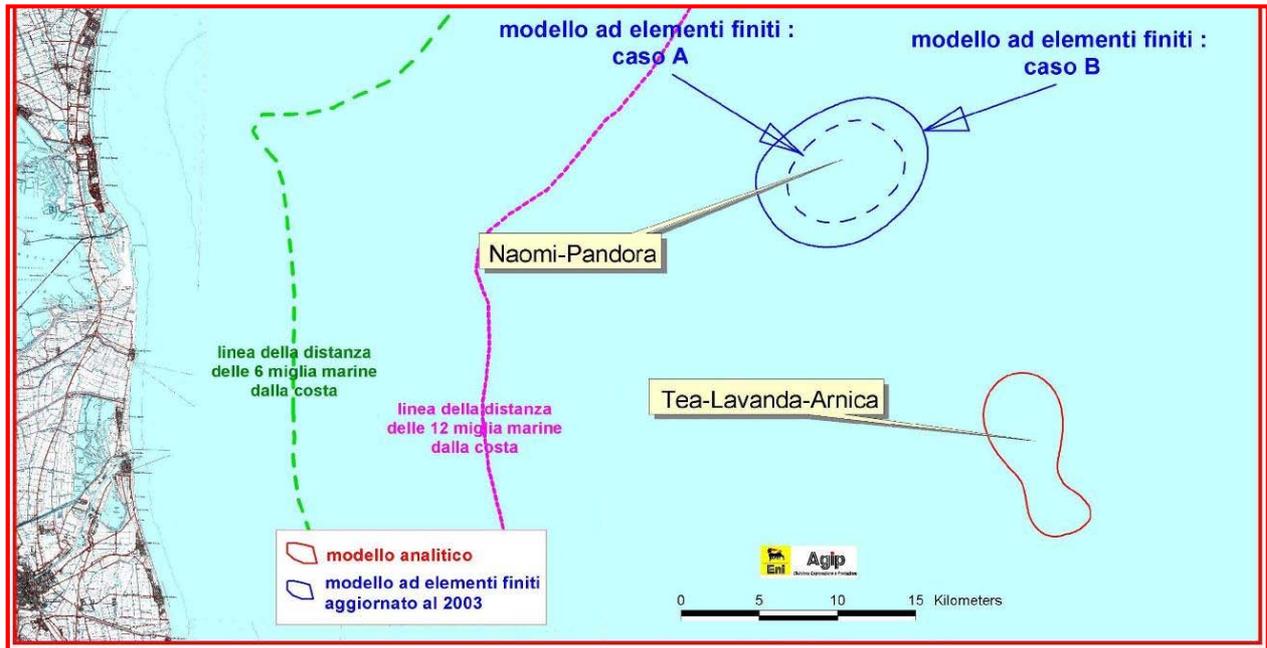


Figura 3 – Verifica dell’interazione geomeccanica fra i campi di TLA e di Naomi-Pandora

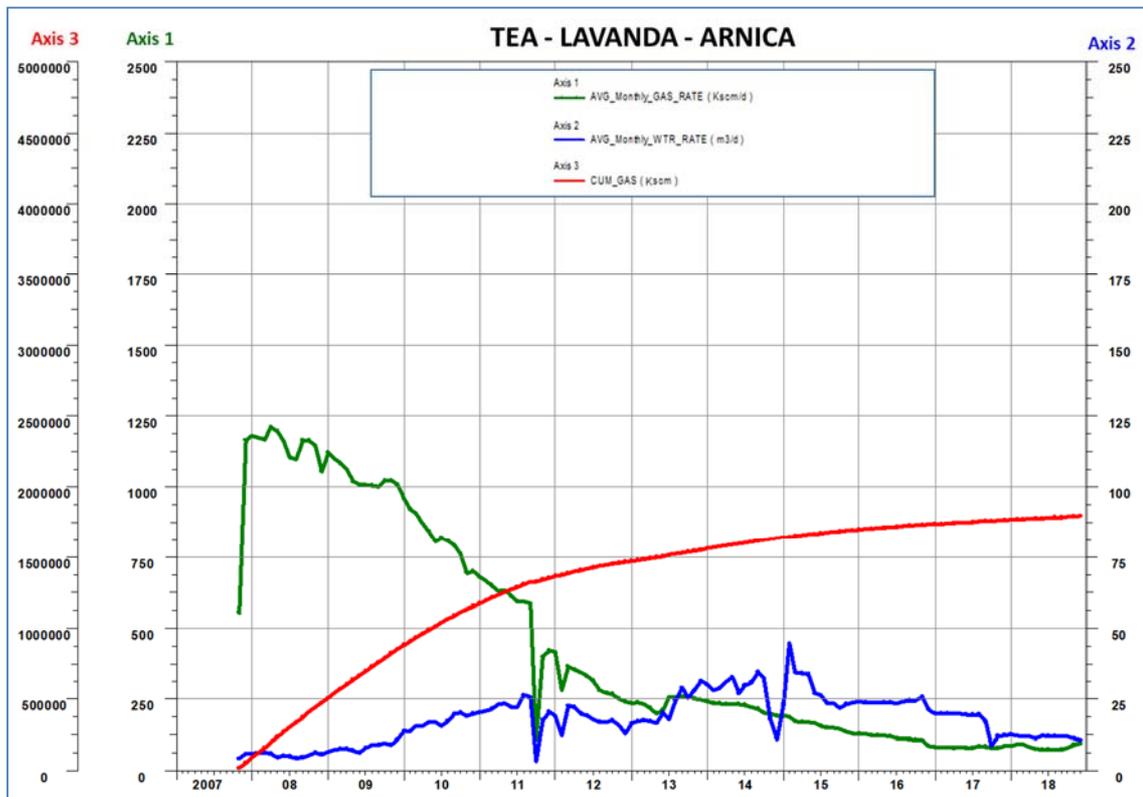
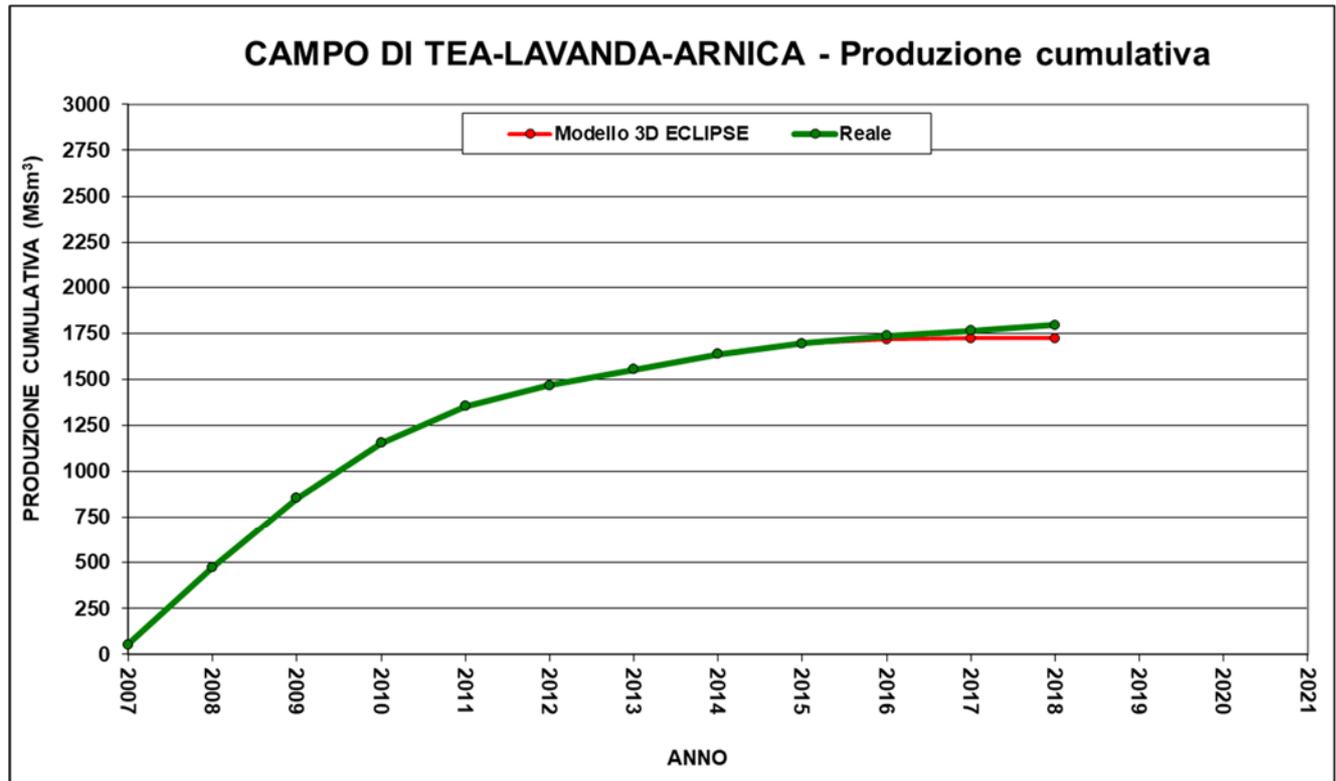


Figura 4 - Campo di TLA: produzione storica



CAMPDI DI TEA-LAVANDA-ARNICA					
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	
2007	53	53	53	53	3%
2008	422	422	474	474	28%
2009	379	379	853	853	50%
2010	300	300	1154	1154	67%
2011	199	199	1353	1353	79%
2012	114	114	1467	1467	85%
2013	87	87	1554	1554	90%
2014	81	81	1635	1635	95%
2015	58	58	1694	1693	98%
2016	42	23	1735	1717	101%
2017	30	4	1765	1721	103%
2018	30	1	1795	1722	104%
2019					
2020					
2021					

Figura 5 - Campo di TLA: produzione reale e da modello *Eclipse* 2015Figura 6 - Campo di TLA: grafico di produzione reale e da modello *Eclipse* 2015

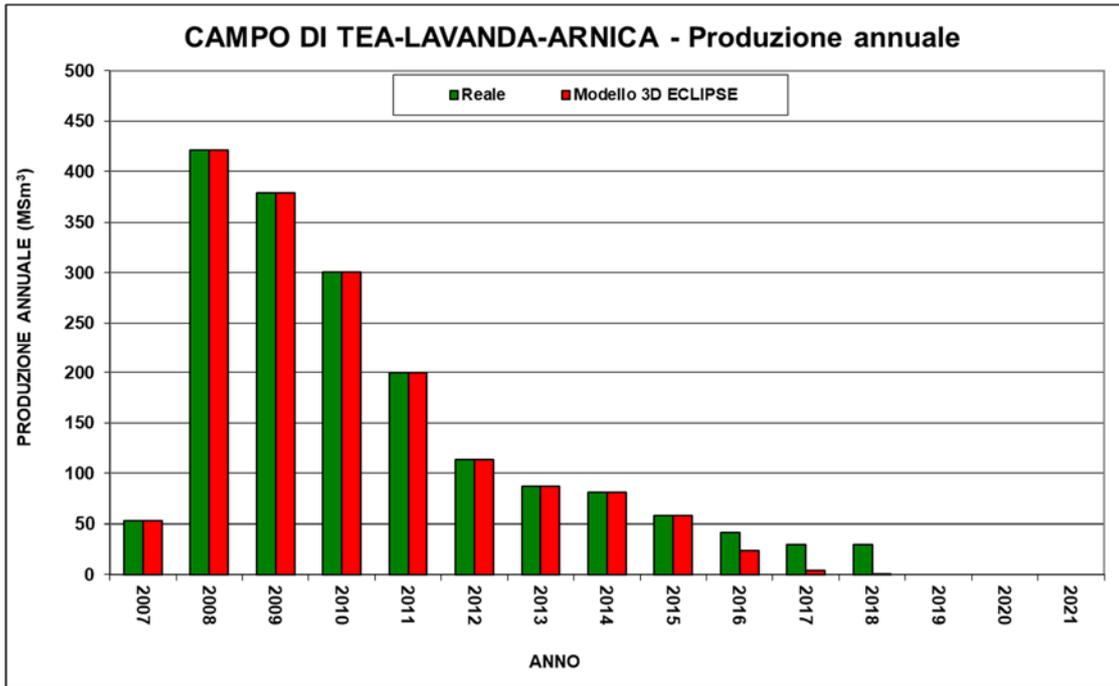


Figura 7 - Campo di TLA: produzioni (annuale) reale e da modello *Eclipse* 2015



CAMPI DI TEA-LAVANDA-ARNICA									
Data	Livello PL3-H			Livelli PL3-H+H1			Livello PL3-F1		
	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string	Pressione (bara)	RFT in pozzo	Profilo in string
19/10/1999	304	Lav 1 Dir		305	Lav 1 Dir		300	Lav 1 Dir	
29/07/2008	255		Lav 1 C/L	264		Tea 2 C	233		Lav 2 C/L
02/05/2009	220		Lav 1 C/L	235		Tea 2 C	195		Lav 2 C/L
09/06/2011	166		Lav 1 C/L				159		Lav 2 C/L
17/10/2011	167		Lav 1 C/L	183		Tea 2 C	174		Lav 2 C/L
13/12/2013	145		Lav 1 C/L						
16/10/2014	140		Lav 1 C/L				195		Lav 2 C/L
24/07/2015	134		Lav 1 C/L				235		Lav 2 C/L
08/12/2016	134		Lav 1 C/L				256		Lav 2 C/L
30/12/2017	169		Lav 1 C/L				265		Lav 2 C/L
02/12/2018	181		Lav 1 C/L				272		Lav 2 C/L

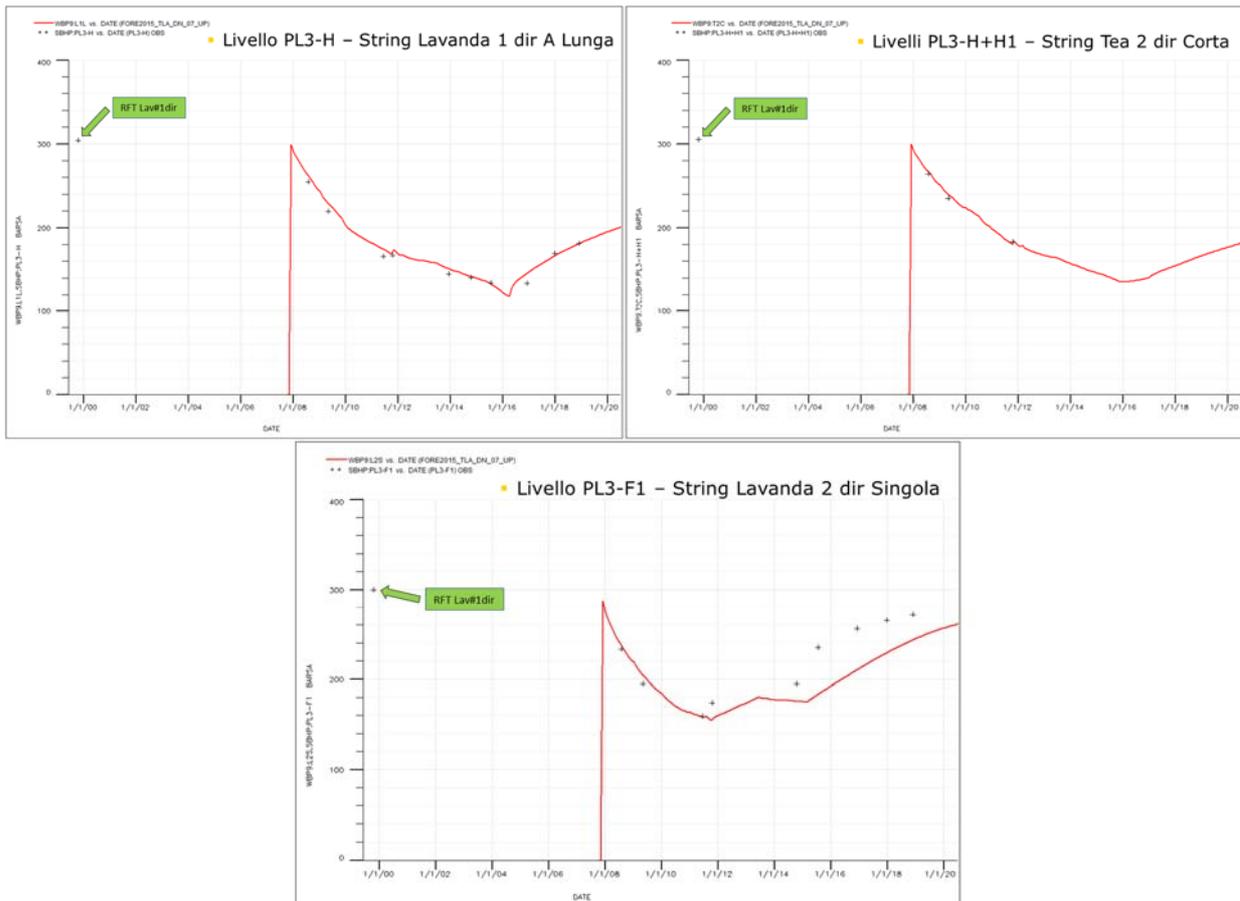


Figura 8 – Campo di TLA: confronto tra dati di pressione da profili statici e modello *Eclipse* 2015

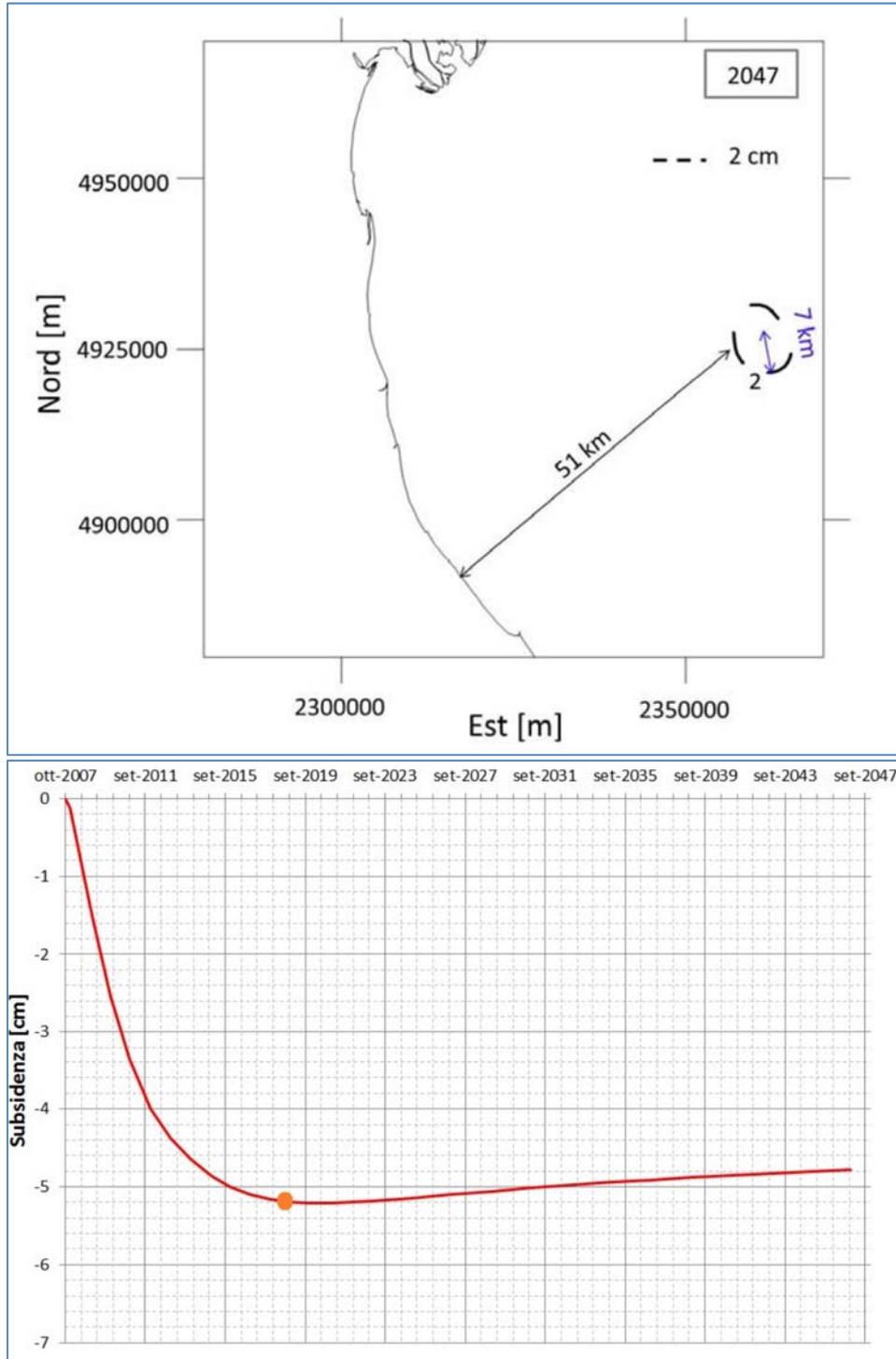


Figura 9 - Campo di TLA: curve di iso-subsidenza (in alto) a fine simulazione (2047) ed evoluzione nel tempo della subsidenza massima (in basso). Il cerchio arancione indica l'abbassamento atteso al termine della produzione (settembre2018)

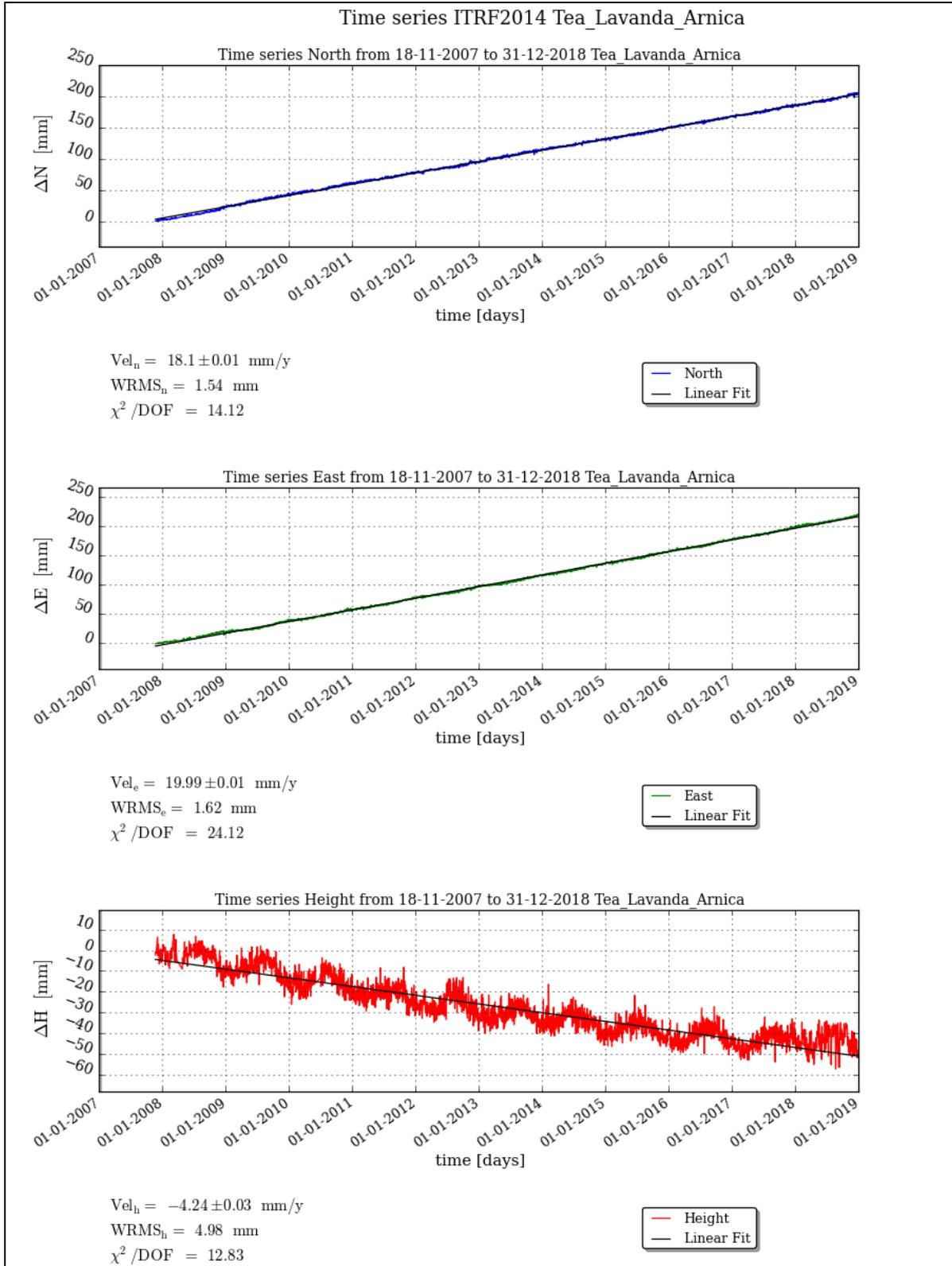
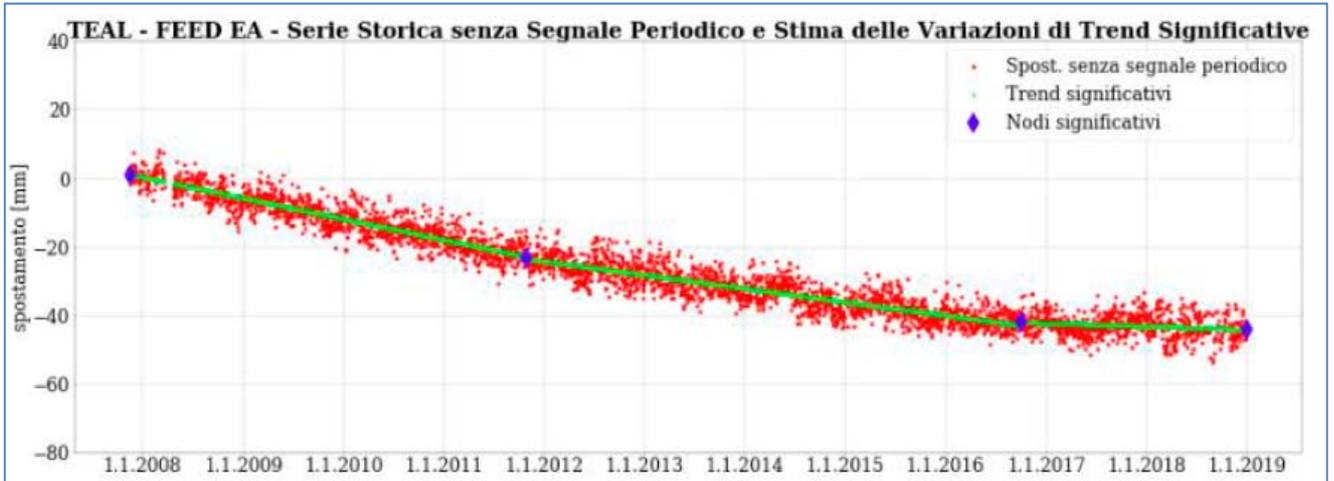


Figura 11 - Campo di TLA: serie storiche di misure CGPS



FEED PP - MODELLO EMPIRICO			
Periodo	velocità [mm/y]	sigma [mm/y]	
18/11/2007 - 28/10/2011	-6.27	0.06	
28/10/2011 - 1/10/2016	-3.94	0.04	
1/10/2016 - 31/12/2018	-0.37	0.13	

Figura 12 - Campo di TLA: analisi della serie storica di misure CGPS

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

Figura 13 - Velocità medie di "subsidenza totale" calcolate per tutta la serie storica di misure CGPS vs. modelli

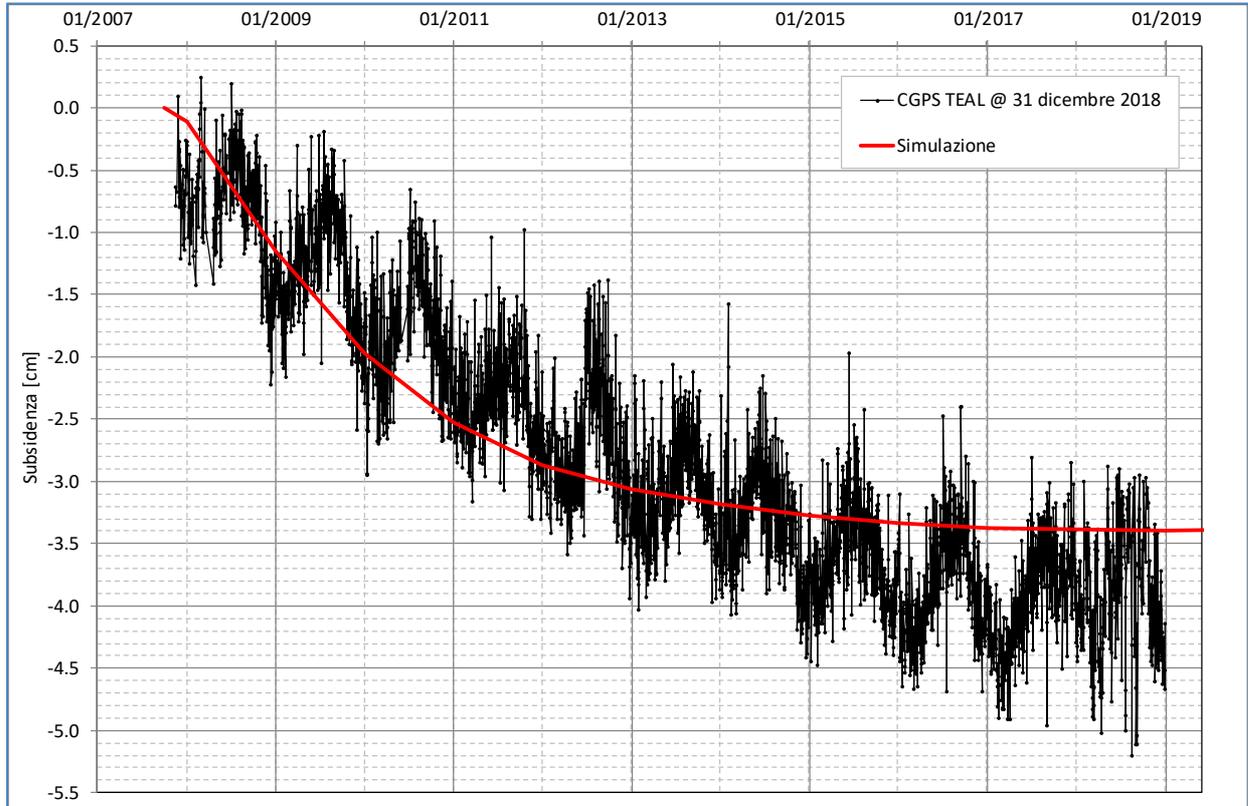


Figura 14 - Campo di TLA: confronto tra spostamento simulato (linea rossa) da modello e spostamento misurato (linea nera), in corrispondenza della stazione CGPS di Tea

campo TEA-LAVANDA-ARNICA (Eni 100%)			
DATI DI CAMPO		DECRETO VIA n. 00149 del 02 marzo 2004 (notifica DSA n. 0010973 del 13 aprile 2006)	
UBICAZIONE	offshore - 58 km E Marina di Ravenna	AGGIORNAMENTO MODELLO DI GIACIMENTO E SUBSIDENZA (TEA-LAVANDA ARNICA)	
PROFONDITA' FONDALE	40 m		
LITOLOGIA	terreni pioceni sabbioso/argillosi	SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO
FORMAZIONE RESERVOIR	Porto Garibaldi	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "ottobre '00"	Agg. studio di giac. - Scheda riassuntiva, Ref. GISE-01/2015 (maggio 2015)
ZONA MINERARIA	PL3	RISERVE (MSm ³)	1722
PROFONDITA' RESERVOIR	2700 - 2840 (TVDSS)	MOD. GEOMECCANICO	GEERTSMA SEMANALITICO (luglio 2001)
TIPO DI PIATTAFORMA	fissa - standard	MAX SUBS. AL CENTRO (cm)	1,8 (dopo 7 anni)
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	torbidi sottili	DISTANZA DALLA COSTA (km)	#
		STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI	
CONCESSIONE	A.C34.AG	D.M @marzo '04 @ 31 dic 2018	
DATA SCADENZA CONCESSIONE	19/06/2024	LIVELLAZIONI	ACQUISITI I DATI DI LIVELLAZIONE SUL TRATTO DI COSTA (DORSALE ADRIATICA) ANTISTANTE IL CAMPO NEL PERIODO 1998-2009, 2011, 2014 e 2017. I DATI FINO AL 2017 SONO STATI CERTIFICATI DALL'UNIVERSITA' DI BOLOGNA - DICAM. IL PROSSIMO RILEVIO DELLA RETE DI LIVELLAZIONE (DORSALE ADRIATICA) SARA' EFFETTUATO NEL CORSO DEL 2020 NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO
N. POZZI	4	MARKERS	NON PRESCRITTI
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm ³)	1536	CGPS	OPERATIVO DAL 2007
START UP PRODUZIONE	ott-07	SAR	ACQUISITO AGGIORNAMENTO COPERTURA SAR @ OTT 2018 DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DEI CAMPI DI TLA NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA. ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2017		
GAS PRODOTTO (MSm ³)			1795
% RISERVE PRODOTTE			104%

Figura 15 - Campo di TLA: Scheda di sintesi dei dati del campo

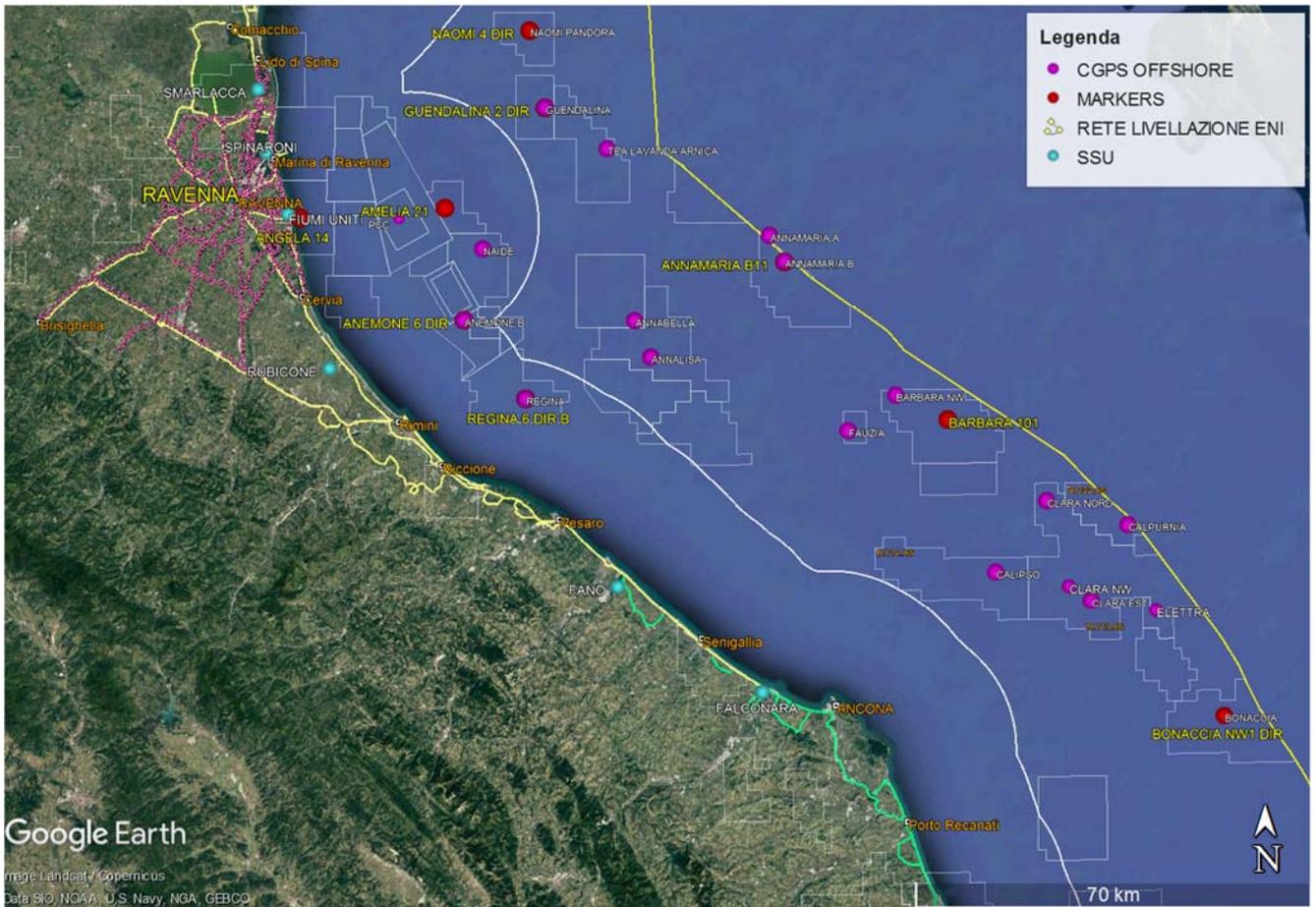


Figura 16 - Particolare della rete di monitoraggio Eni

Appendice A: aggiornamento dati SAR 2003-2018

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

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

Analisi dati InSAR 2003 – 2018

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

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

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

	CGPS	V_{vert_CGPS} [mm/yr]	sqm_CGPS [mm/yr]	$Media_V_SAR$ [mm/yr]	sqm_SAR [mm/yr]	$Diff_VEL$ $CGPS-SAR$ [mm/yr]	sqm_diff [mm/yr]
RAVENNA	MANARA	-3.00	0.01	-0.43	0.60	-2.57	0.61
	SMARLACCA	-6.33	0.01	-3.41	1.09	-2.92	1.10
	SPINARONI	-7.50	0.01	-4.34	0.97	-3.16	0.98
	FIUMI UNITI	-14.13	0.02	-11.51	2.47	-2.62	2.49
FANO-ANCONA	RUBICONE	-2.54	0.04	-3.13	2.01	0.59	2.05
	FANO	0.13	0.02	0.17	0.69	-0.04	0.71
	FALCONARA	-0.28	0.03	-0.23	1.43	-0.05	1.46
	ITALGAS	-0.06	0.03	0.41	1.35	-0.47	1.38

Tab. 1. Taratura dato InSAR con misure CGPS

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

- Area di Ravenna
- Area di Fano-Ancona

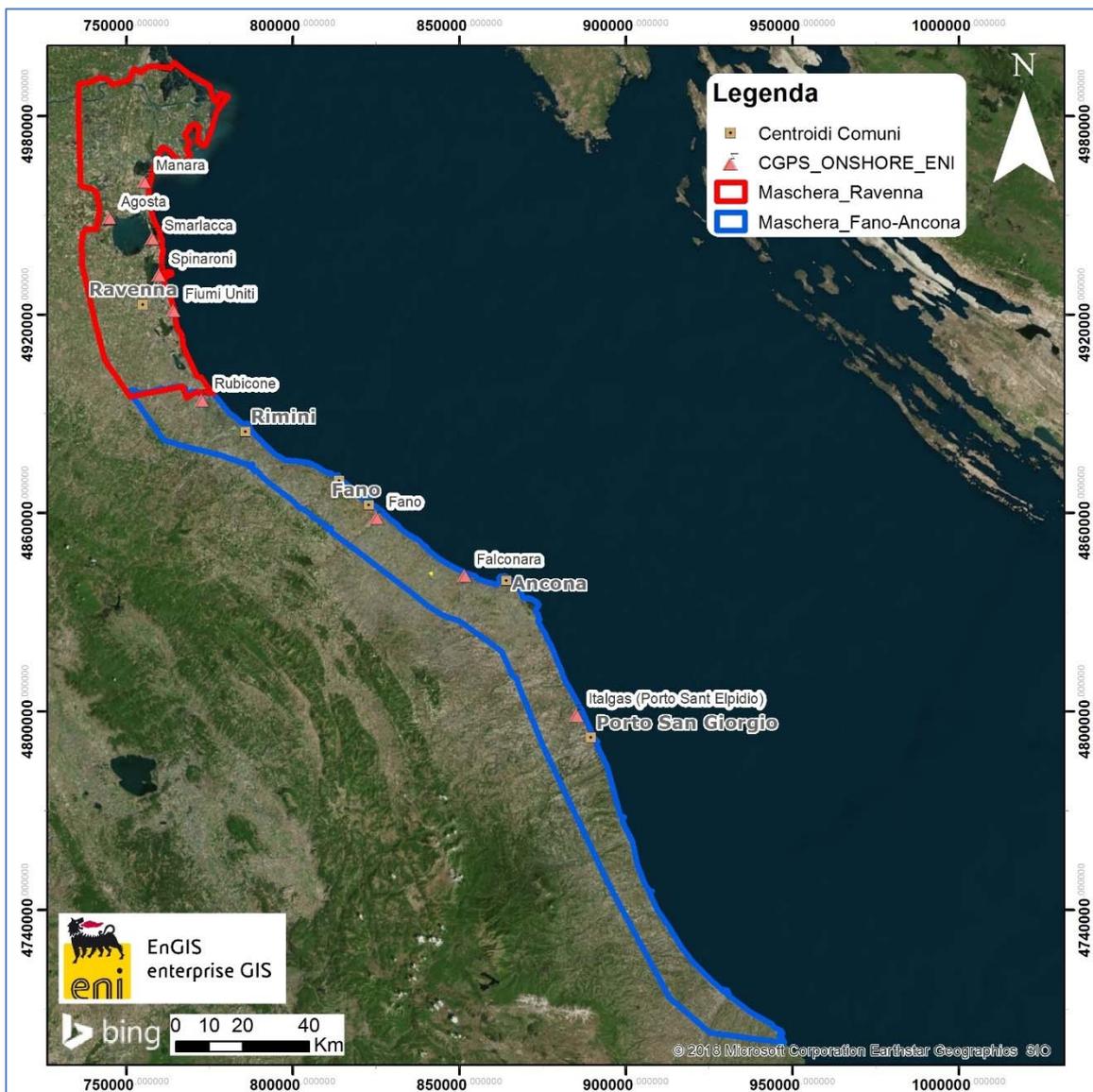


Fig. 1 – Mappa mosaicata dati InSAR

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

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

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

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

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

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

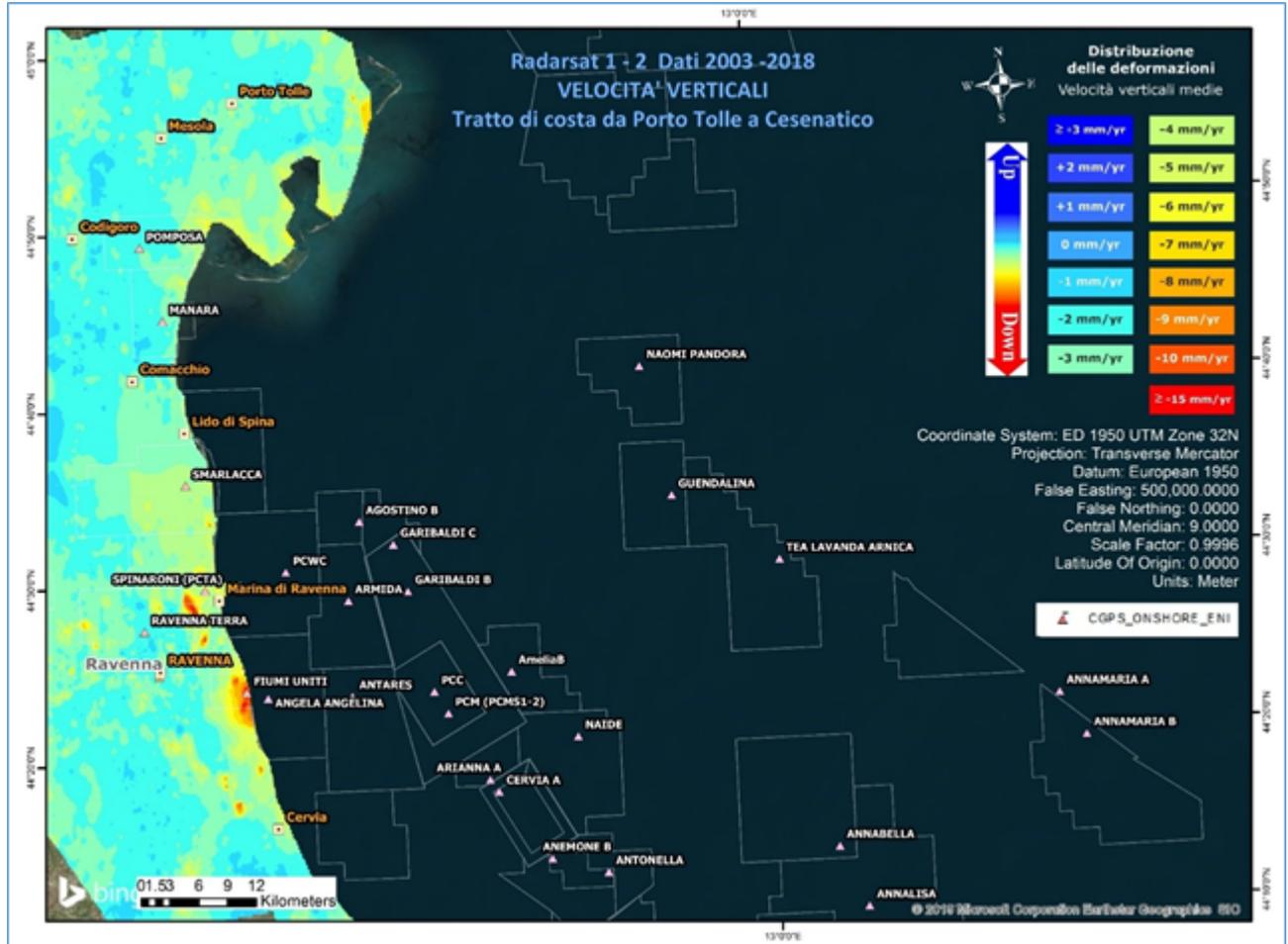


Fig. 2 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

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

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

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

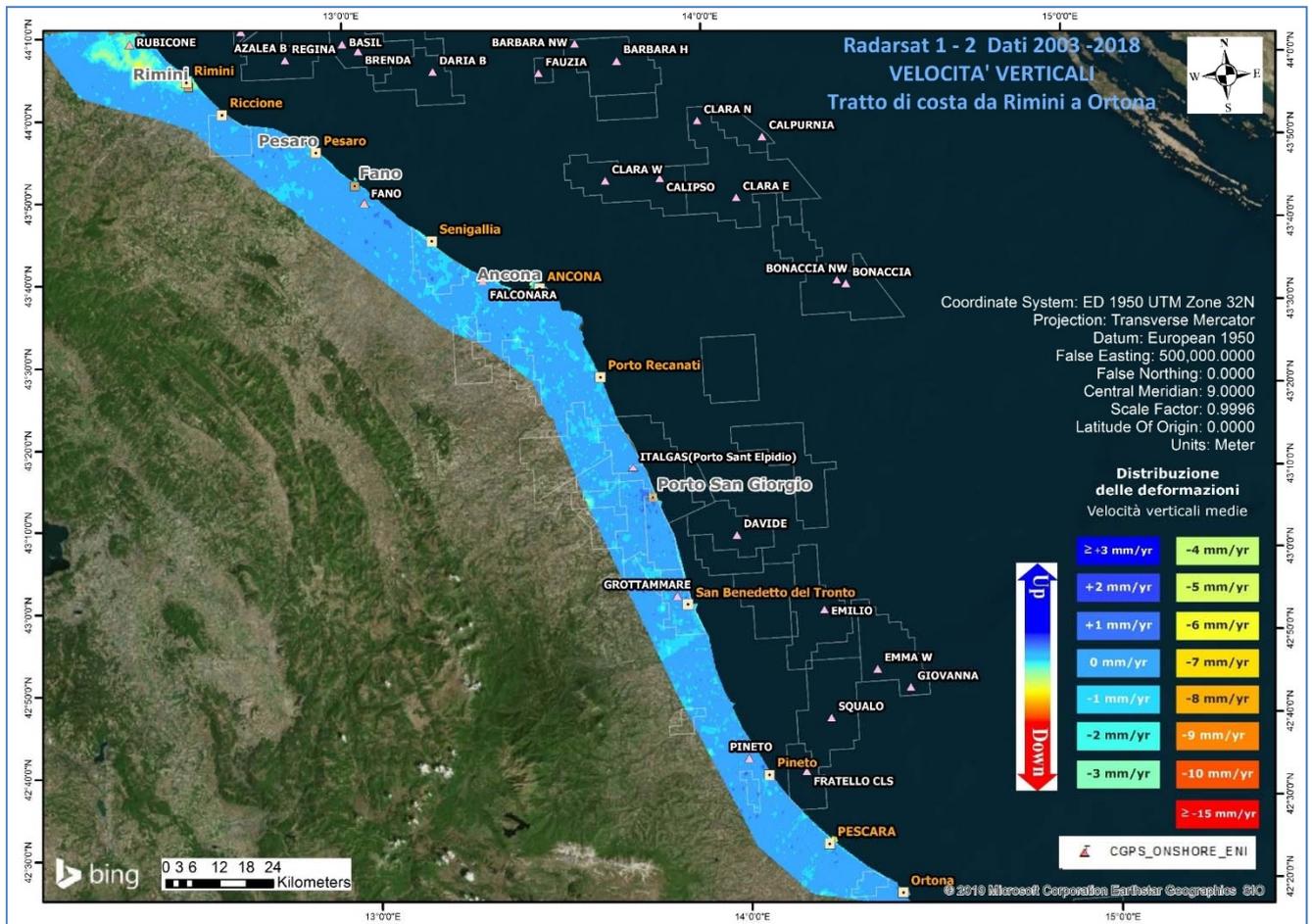


Fig. 3 - Interpolazione IDW (Inverse Distance Weighted) dei dati Radarsat 1 -2, per il periodo 2003 – 2018, con Tool ArcGis Spatial Analyst®. Tratto di costa da Rimini ad Ortona.

Confronto dati SAR 2003 – 2017 vs 2003 – 2018

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

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

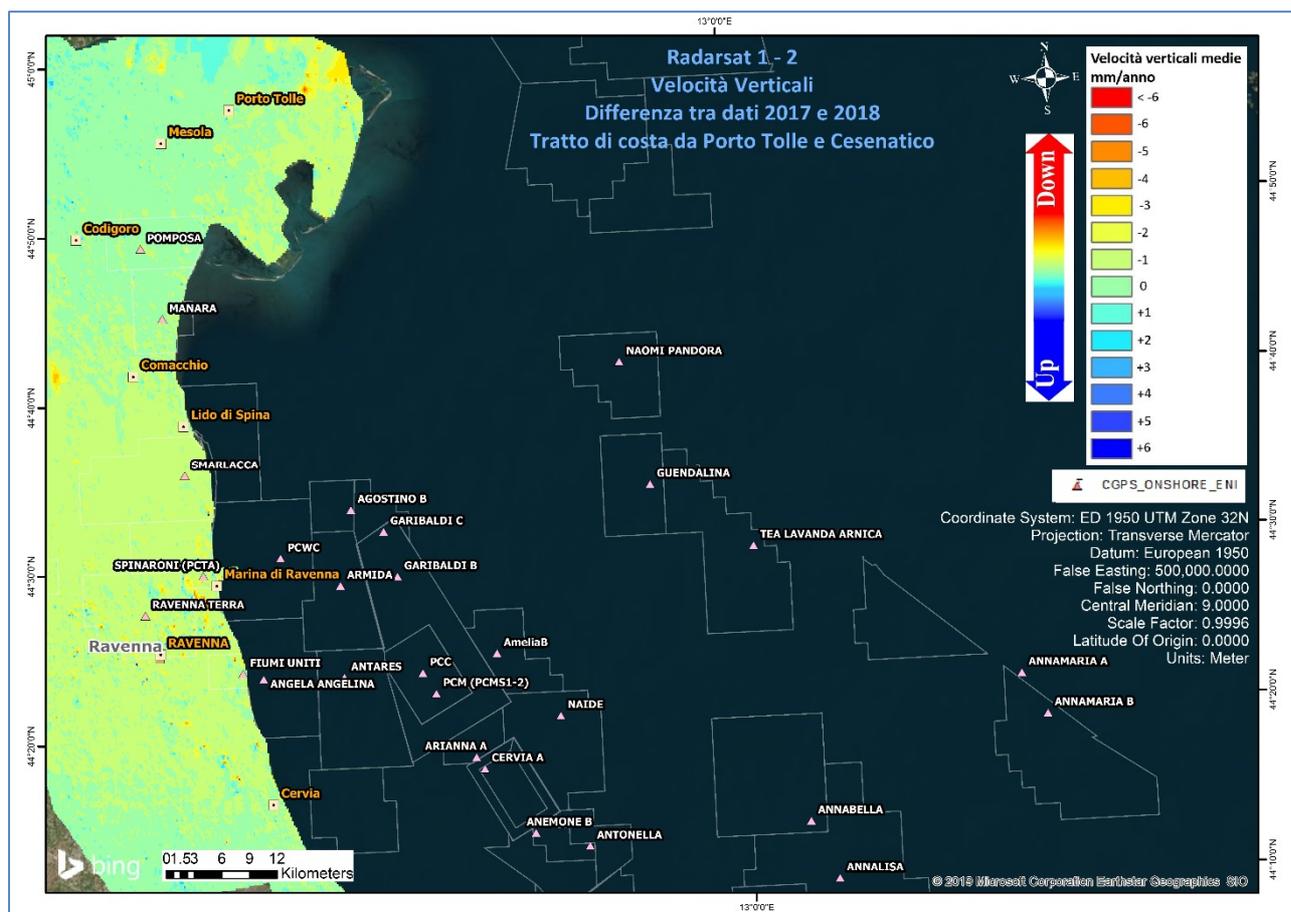


Fig. 4 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Porto Tolle a Cesenatico.

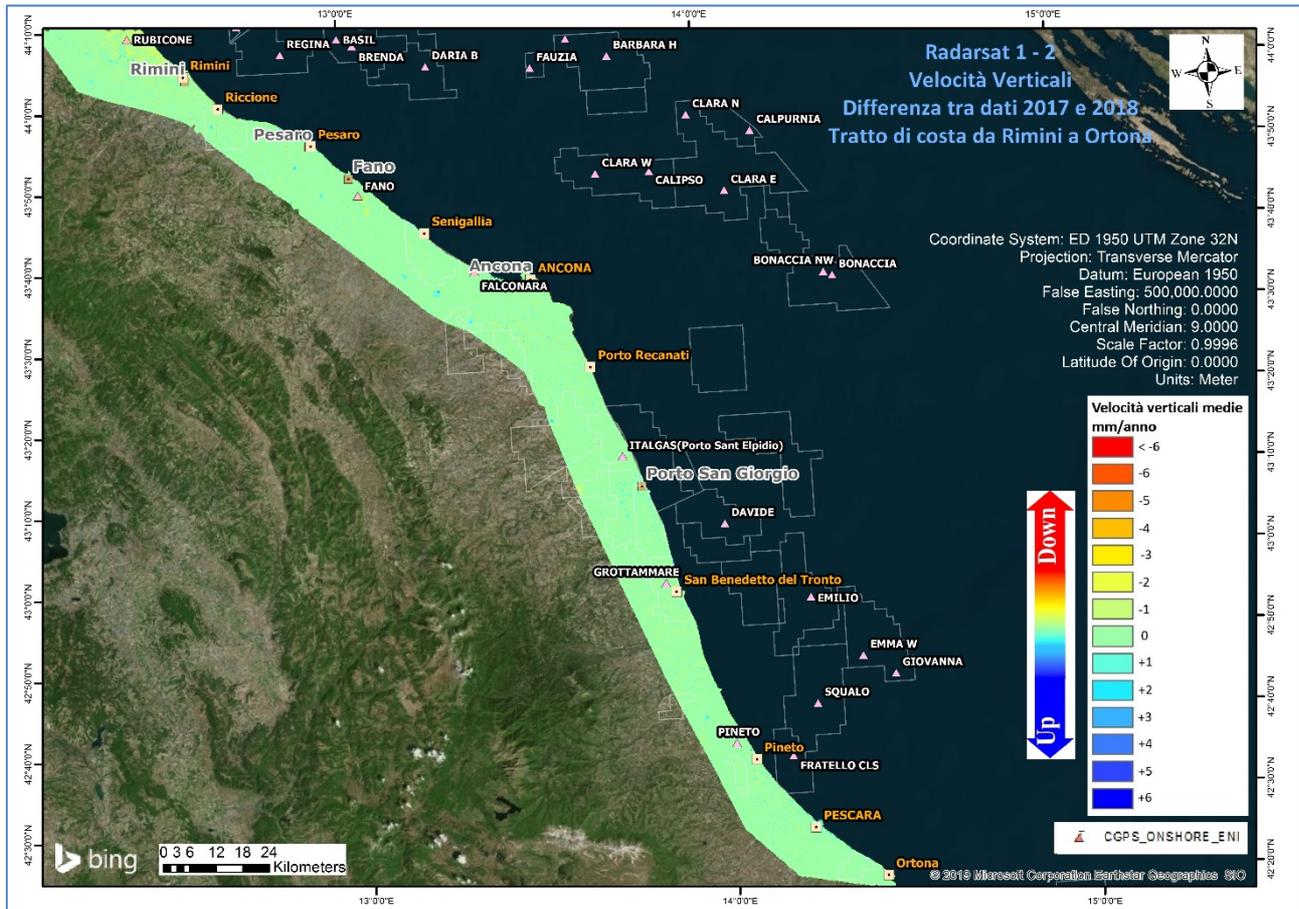


Fig. 5 – Mappa delle differenze prodotta tra il database 2003-2017 e il 2003-2018, utilizzando il Tool Math – Spatial Analyst® di ArcGIS™. Tratto di costa da Rimini a Ortona.

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

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

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

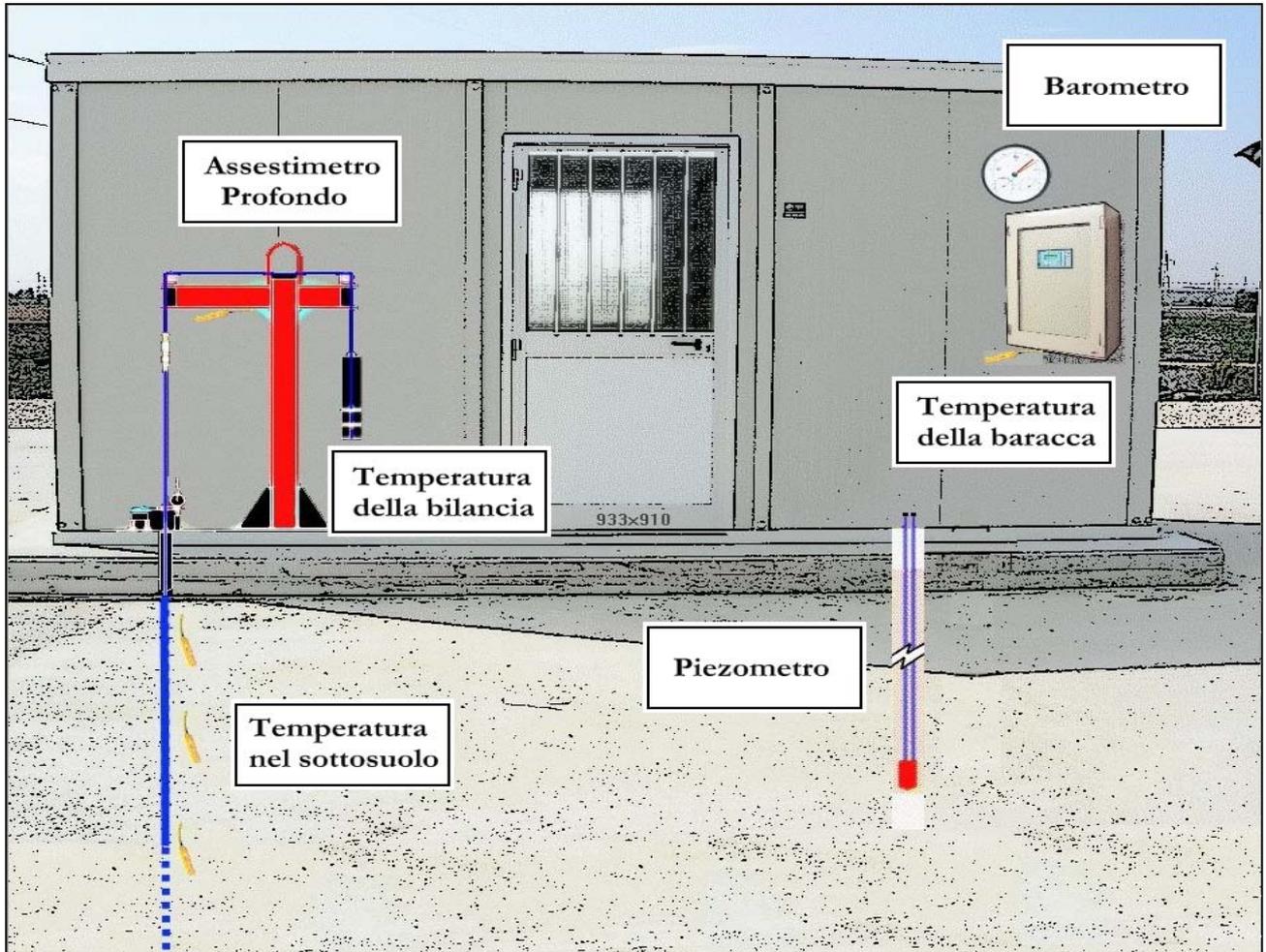


Figura 2B - Rappresentazione schematica di una stazione EPSU

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

Località'	Pozzo	Strumentazione	Profondità' (da P.C.)	Data d'installazione
Smarlacca		Assestometro profondo	336 m	Nov.1997
		Assestometro superficiale	30 m	Nov.1997
		Piezometro profondo	150.8 m	Nov.1997
Spinaroni		Assestometro profondo	336 m	Nov.1997
		Piezometro profondo	150.8 m	Nov.1997
Fiumi Uniti		Assestometro profondo	372.85 m	Set. 1994
		Assestometro superficiale	224.2 m	Set. 1994
		Piezometro profondo	360 m (disattivato)	Set. 1994
		Piezometro intermedio	243 m (disattivato)	Set. 1994
		Piezometro superficiale	148 m (disattivato)	Set. 1994
	PS-1	Piezometro tubo aperto	10.5 m	Dic. 2011
	PS-2	Piezometro tubo aperto	30.5 m	Dic. 2011
	PP-1	Piezometro tubo aperto	373.5 m	Dic. 2011
	PP-2	Piezometro tubo aperto	257 m	Dic. 2011
	PP-3	Piezometro tubo aperto	163 m	Dic. 2011

Per ciascuna stazione *EPSU* vengono di seguito presentati:

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

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

Stazione **EPSU** di Smarlacca (installata novembre 1997)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°35'40.00"N e 12°14'49.44"E.

La strumentazione è costituita da:

- assestimetro profondo - quota bottom 336 m da p.c.
- assestimetro superficiale – quota bottom 30 m da p.c.
- piezometro- quota cella 150.8 m da p.c.

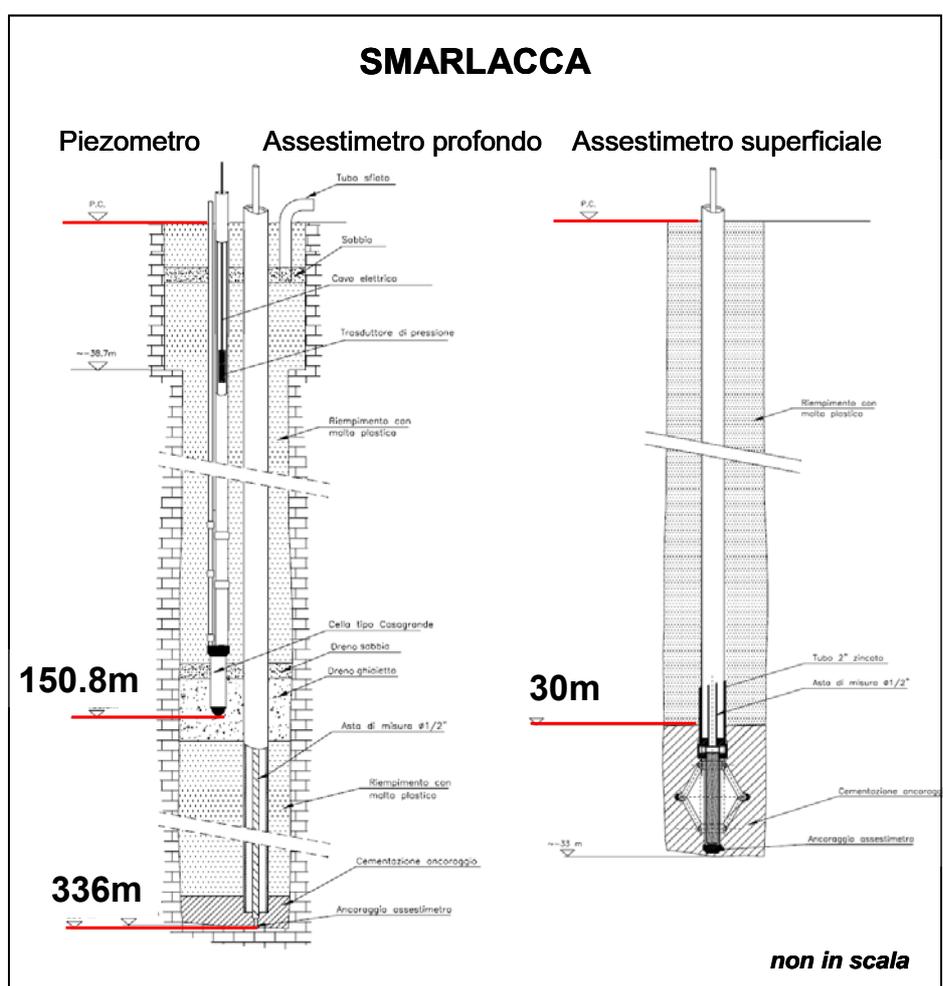


Figura 3B - Schema della stazione EPSU di Smarlacca

Le attrezzature installate (Figura 3B) sono costituite principalmente da una doppia verticale assestimetrica, ovvero un assestimetro profondo (334.15 metri d'asta di misura) e uno superficiale (29.5 metri d'asta di misura). La loro messa in opera è stata fatta nel periodo 15 luglio 1997 - 20 ottobre 1997; il sistema è poi stato completato nel novembre 1997 e collau-

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA novembre 2019	Page - 38 - of 64
--	---	-------------------

dato in data 8 aprile 1998 con la calibratura di tutti i sensori di misura (“misura di zero”).

All’interno del pozzetto assestometrico è stato installato anche un piezometro Casagrande con la cella porosa posta alla profondità di 150.80 m dal piano campagna (p.c.).

L’unità d’acquisizione dati è stata impostata con la frequenza di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura ogni 6 ore. Nel periodo settembre 2003 – ottobre 2003 si sono persi dei dati per un guasto all’apparecchiatura di misura. A fine agosto del 2008 si è spurgato il piezometro che dopo l’intervento è stato ritenuto funzionante. Nell’ottobre del 2012, perdurando le registrazioni di valori anomali nei due tubi della cella Casagrande, si è fatto un nuovo intervento di pulizia al termine del quale lo strumento è stato giudicato non più in grado di fornire misure attendibili e, pertanto, non più funzionante.

Da inizio agosto 2017 e fino a inizio luglio 2018 l’acquisizione dati si è interrotta a causa di infiltrazioni nella copertura della struttura di ricovero delle apparecchiature di registrazione e raccolta dati, che sono state danneggiate. L’apparecchiatura è stata sostituita e la registrazione dei dati è ripresa il 10 luglio 2018.

L’ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali e taratura di tutti i sensori è stata fatta in luglio e ottobre 2018.

Analisi dei dati assestometrici

L’assestometro più profondo (336 m) misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 334.15 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna (p.c.); quello più superficiale (30 m) a sua volta misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 29.5 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati 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 dell’8 aprile 1998, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell’assestometro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

Nel periodo luglio - settembre 2003, si osserva nell’andamento del grafico dell’assestometro profondo un salto (corrispondente a una compattazione) di 2.7 mm in un intervallo di 72 giorni; tale evento compare, anche se in misura minore, nel grafico dell’assestometro super-

ficiale (Figura 4B). Anche se per tale periodo mancano i dati registrati per un guasto al sistema d'acquisizione, tale salto è confermato anche dalle misure effettuate con il comparatore meccanico durante i sopralluoghi per le manutenzioni ordinarie. Si tratta di un comportamento anomalo se rapportato con gli andamenti precedenti e successivi a detto periodo di osservazione. Il grafico storico mostra, infatti, una compattazione a velocità più o meno costante in tutti i periodi dell'anno, tranne che nel luglio-settembre 2003 in cui il fenomeno ha avuto un'accelerazione. Una compattazione nello stesso periodo è comunque vista anche dal CGPS: nel grafico di confronto (Figura 6B) le due curve mostrano le medesime modulazioni nello stesso arco di tempo. L'estate del 2003 è stata caratterizzata da temperature atmosferiche molto elevate e assenza di precipitazioni piovose, condizioni che potrebbero aver favorito una compattazione superficiale maggiore.

Dopo questo periodo gli assestimetri sono tornati a registrare il solito trend a velocità costanti. Per quanto riguarda i termometri installati lungo la verticale assestimetrica, si segnala un guasto al sensore posto a quota -4 metri con interruzione delle misure da marzo 2013.

Le registrazioni di entrambi gli assestimetri (superficiale e profondo) mostrano lo stesso trend di compattazione ed espansione del terreno con una correlazione molto elevata fra i rispettivi andamenti anche se, le velocità medie di compattazione (Figura 4B) sono risultate rispettivamente di circa 0.25 mm/a (foro superficiale) e circa 1 mm/a (foro profondo).

In particolare, per quanto riguarda la curva di compattazione registrata dall'assestometro profondo, si può osservare che, anche se la relativa velocità media calcolata tutta la serie temporale è di circa 1 mm/a, essa presenta un andamento più articolato nel tempo. Infatti, verso l'inizio del 2012 tale velocità di compattazione si dimezza, portandosi a circa 0.5 mm/a (Figura 5B), forse per effetto di un minor emungimento delle falde più profonde. Quest'ultima ipotesi è supportata dalla constatazione che la maggior parte della compattazione misurata si verifica in una porzione di terreno compresa tra la base dell'assestometro superficiale e la base di quello profondo per uno spessore complessivo di circa 300 m (l'assestometro superficiale registra una compattazione minima, pari a poco più di 6 mm totali in oltre 20 anni: 0,3mm/a). In prossimità della stazione assestimetrica è stato installato 4 anni più tardi anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare in quella zona una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo pari a circa -6.3 mm/a.

Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestimetrica), che si riferiscono

però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi di quelli monitorati con la stazione assestimetrica (> 336 m). Il CGPS infatti nei quasi 18 anni di acquisizione ha registrato un abbassamento totale di circa 11 cm mentre invece l'assestimetro nello stesso periodo ha registrato una compattazione totale di circa 2cm.

In Figura 6B è riportato il confronto fra le misure assestimetriche (sono riportate solo quelle registrate dalla strumentazione più profonda) e quelle CGPS. Il grafico allegato mostra una buona correlazione tra entrambe le curve, che riflettono bene gli eventi stagionali.

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 con quello della curva CGPS (spostamenti delle curve verso l'alto indicano sollevamenti del terreno e viceversa).

Analisi dei dati piezometrici

Degli interventi fatti sul piezometro e della sua affidabilità si è detto in precedenza. L'estrema variabilità, anche giornaliera, dei dati registrati dalla strumentazione piezometrica, ha fatto ritenere tale informazione non attendibile e pertanto di scarsa utilità. Si è pertanto scelto di non mostrare la traccia dell'andamento del dato piezometrico nei grafici di confronto con l'assestimetro, sino al nuovo rifacimento della strumentazione.

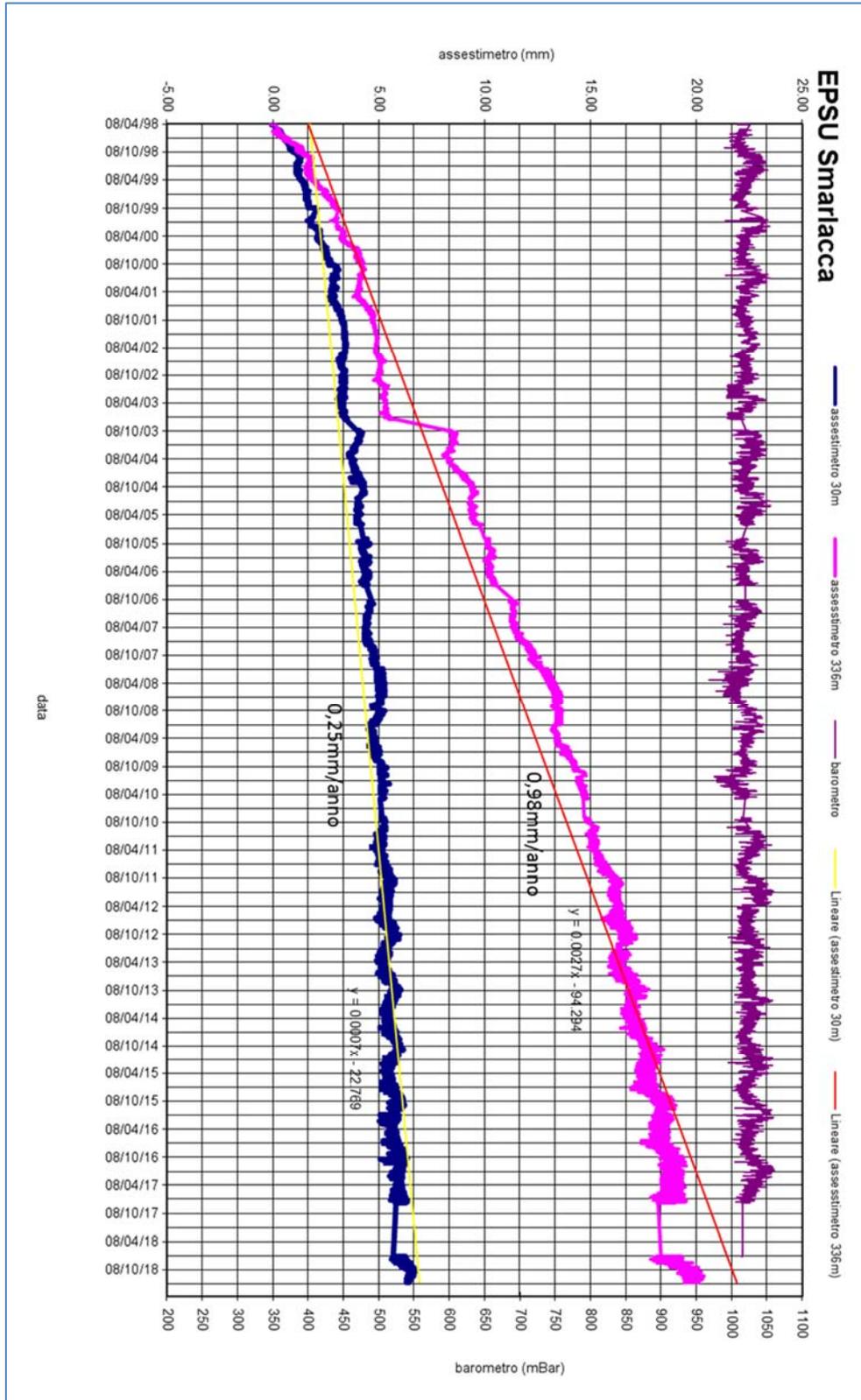


Figura 4B - Serie storica delle misure assestimentriche e barometriche nella stazione EPSU di Smarlacca

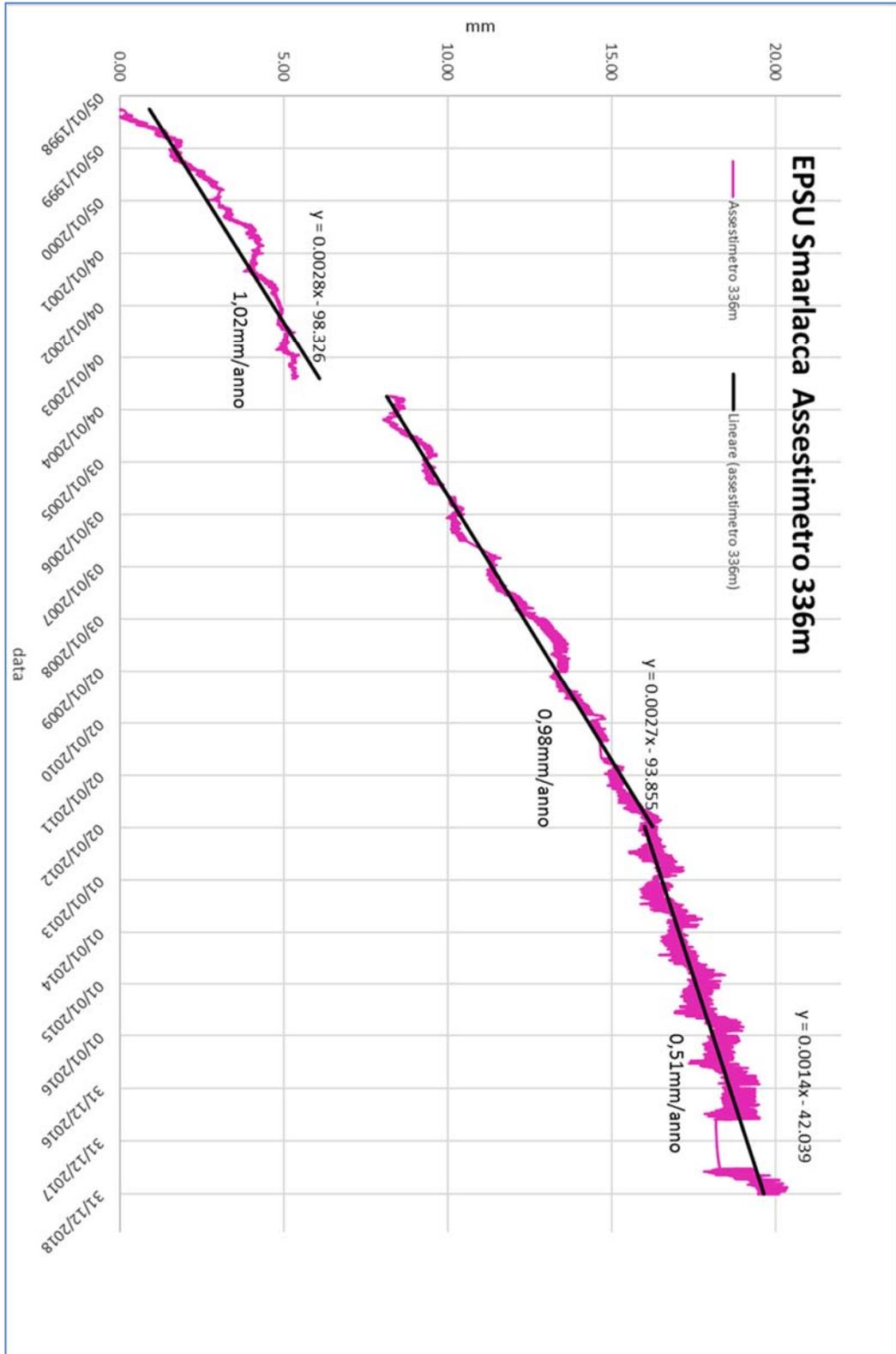


Figura 5B - Curva di compattazione dell'assestimetro profondo della stazione EPSU di Smarlacca

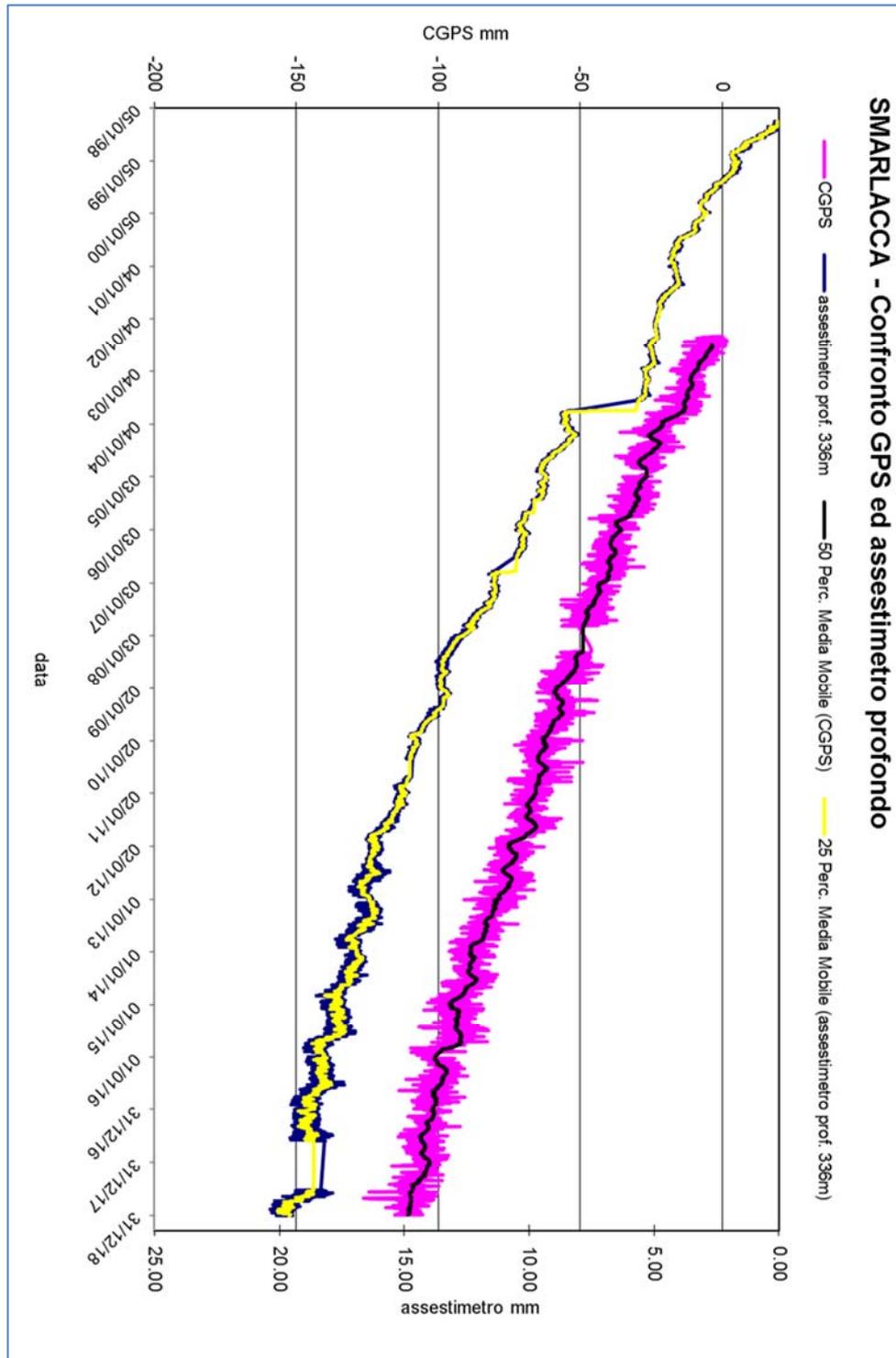


Figura 6B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (assestimetro profondo della stazione EPSU di Smarlacca)

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

Stazione *EPSU* di Spinaroni - (installata novembre 1997)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°29'41.27"N e 12°16'01.27"E. La strumentazione è costituita da:

- assestimetro - quota bottom 336 m da p.c.
- piezometro a cella singola - quota cella 150.8 m da p.c.

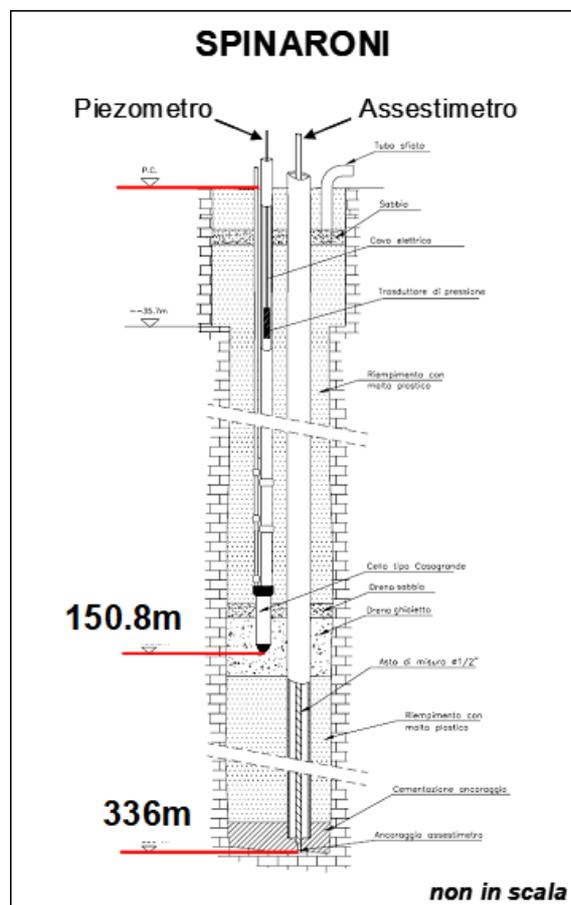


Figura 7B - Schema della stazione EPSU di Spinaroni

Le attrezzature installate (Figura 7B) sono costituite principalmente da una verticale assestimetrica e un piezometro, che sono stati messi in opera nel periodo 15 luglio 1997 - 20 settembre 1997. Il relativo sistema di misura è stato poi completato nel novembre 1997 e collaudato in data 8 aprile 1998 con la calibratura di tutti i sensori ("misura di zero").

L'unità d'acquisizione dati è stata impostata con una frequenza di registrazione di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura

ogni 6 ore. Di questa stazione si sono persi alcuni mesi di dati (da settembre 2001 ad aprile 2002) a causa del furto del pannello solare installato per l'alimentazione del sistema. Il ripristino è stato fatto nel mese di aprile 2002. Nel periodo gennaio 2003 – marzo 2003 si è avuto un blackout per un guasto all'apparecchiatura d'acquisizione dati. Nell'agosto 2007 si è di nuovo verificato il furto del pannello solare con la conseguente perdita delle misure nel periodo 14 agosto - 5 ottobre 2007.

Dall'inizio di dicembre 2005 il sensore di pressione del piezometro ha iniziato a fornire valori anomali per cui si è deciso d'eseguire misure dirette del livello della falda. A tale scopo si è impiegato un freatimetro con il quale si è accertato che la quota raggiunta dall'acqua all'interno del tubo piezometrico era pari a -5.22 m dal piano campagna (p.c.).

In data 31 gennaio 2006 è stato sostituito definitivamente il trasduttore di pressione nel tubo piezometrico, ponendolo alla profondità di 20 metri rispetto al piano campagna.

A fine agosto 2008 si è spurgato il piezometro e al 30 settembre è stata fatta una videoispezione. A seguito di tale controllo lo strumento è stato considerato non attendibile per una probabile rottura del tubo di diametro più piccolo ($\varnothing \frac{1}{2}$ "). Gli interventi sul piezometro hanno causato la perdita di 14 giorni di misure assestimetriche (dal 30 settembre al 14 ottobre 2008). Il giorno 14 ottobre si è ritarato il trasduttore di spostamento, posizionandolo a 1.8 mm rispetto alla misura del 30 settembre. Di questo riposizionamento si è tenuto conto nell'elaborazione dei dati.

A fine 2014 e nel periodo marzo - maggio 2015 si sono verificate diverse mancate registrazioni di dati per guasti dell'unità d'acquisizione, che è stata definitivamente sostituita nel maggio 2015. Si è, però, accertato che questa perdita di dati non ha avuto influenza sulla significatività della serie storica registrata. Nel 2018 la registrazione dei dati è stata regolare. L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta in luglio e ottobre 2018.

Analisi dei dati assestimetrici

L'assestimetro misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 336 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati 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 quel-

la dell'8 aprile 1998, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestometro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

In data 28 luglio 2004 è stata ripresa di 25,0 mm la corsa del trasduttore di spostamento, poiché il sensore era troppo vicino al fondo scala. Nell'elaborazione delle misure è stato tenuto conto di tale variazione aggiungendo un offset della stessa entità alle misure. Come già detto, analogo intervento è stato poi fatto in data 14 ottobre 2008.

Nel grafico allegato (Figura 8B) si nota un comportamento alquanto anomalo dello strumento se rapportato alla sua storia precedente che ha sempre avuto un trend in crescita. Nell'ottobre 2003, infatti, l'assestometro ha registrato un repentino sollevamento del piano campagna rispetto al punto profondo (4 mm in 5 giorni), in concomitanza con un abbassamento della falda di circa 40 – 50 cm. Dopo tale periodo (ca. fine ottobre 2003) è ripresa la compattazione del terreno, anche se, per circa 6 mesi, con un trend più veloce di quello del periodo precedente l'anomalia sopracitata. Dopo la metà del 2004 il trend di compattazione è tornato ad avere lo stesso andamento registrato nel periodo antecedente al 10/2003. Non sono state chiarite le ragioni di tale anomalia.

Per questa stazione si hanno a disposizione poco più di 21 anni di osservazioni (21.13 anni). In questo periodo si è registrata una compattazione totale di 49 mm corrispondente a una velocità di media annua di 2.3 mm (valore ottenuto con regressione lineare su tutta la serie temporale di registrazioni - Figura 8B). Anche in questo caso, però, come per la stazione di Smarlacca, la curva dell'assestometro mostra un andamento più articolato nel tempo di quanto sia semplicemente espresso dal sopracitato valore medio. Si passa, infatti, da una velocità di circa 4.1 mm/a, registrata dall'inizio sino alla fine del 2007, a un valore che tra il 2008 e 2009 diminuisce sino a circa 0.8 mm/a (Figura 9B), Analogamente al caso di Smarlacca, tale diminuzione potrebbe essere correlata ad un minor emungimento delle falde acquifere. Nella stazione *EPSU* di Spinaroni è stato installato nel 2002 anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo di circa -7.5 mm/a. Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestimetrica), che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi (> 336 m). Il GPS infatti nei 16.66 anni di acquisizione ha regi-

strato un abbassamento totale di circa 12.5 cm mentre invece l'assestometro nello stesso periodo ha registrato una compattazione totale di circa 3.8cm.

La correlazione nel tempo dell'andamento delle due curve (geodetica CGPS e assestimetrica) non è molto elevata come mostrato nel grafico allegato (Figura 10B); le misure CGPS presentano un andamento più regolare con una dinamica legata alla stagionalità. Nel periodo tra inizio ottobre 2003 sino a oltre la metà del 2004, la curva CGPS mostra, però, oscillazioni molto simili a quelle registrate dell'assestometro nello stesso periodo, avvalorando l'ipotesi che possano essere reali e non "artefatti strumentali" i movimenti "anomali" cui si è detto in precedenza.

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

Degli interventi fatti sul piezometro e della sua affidabilità si è detto in precedenza. L'estrema variabilità, anche giornaliera, dei dati registrati dalla strumentazione piezometrica, ha fatto ritenere tale informazione non attendibile e pertanto di scarsa utilità. Anche per questa stazione, analogamente a quella di Smarlacca, si è pertanto scelto di non mostrare la traccia dell'andamento del dato piezometrico nei grafici di confronto con l'assestometro, sino al nuovo rifacimento della strumentazione.

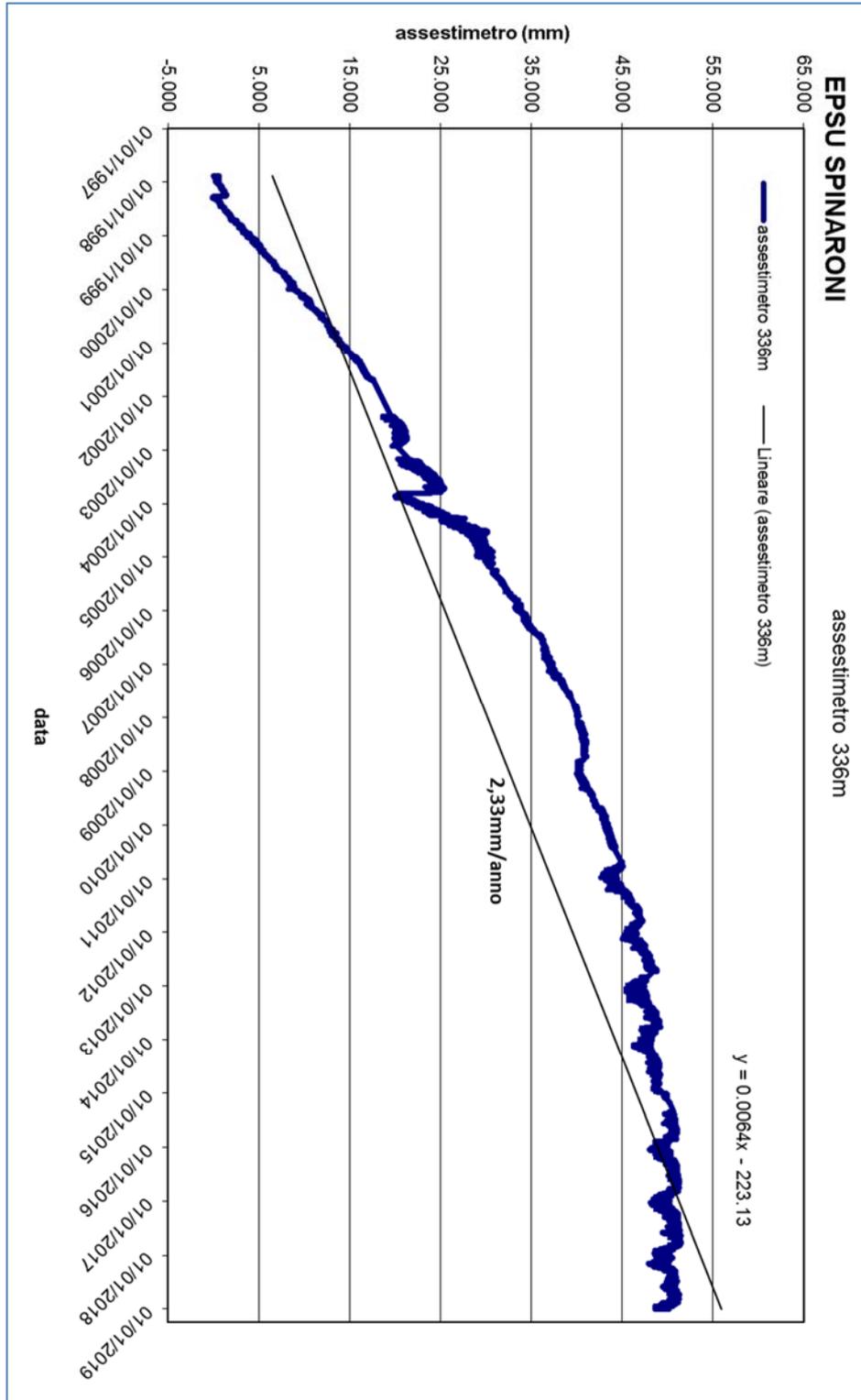


Figura 8B - Serie storica delle misure assestimetriche nella stazione EPSU di Spinaroni

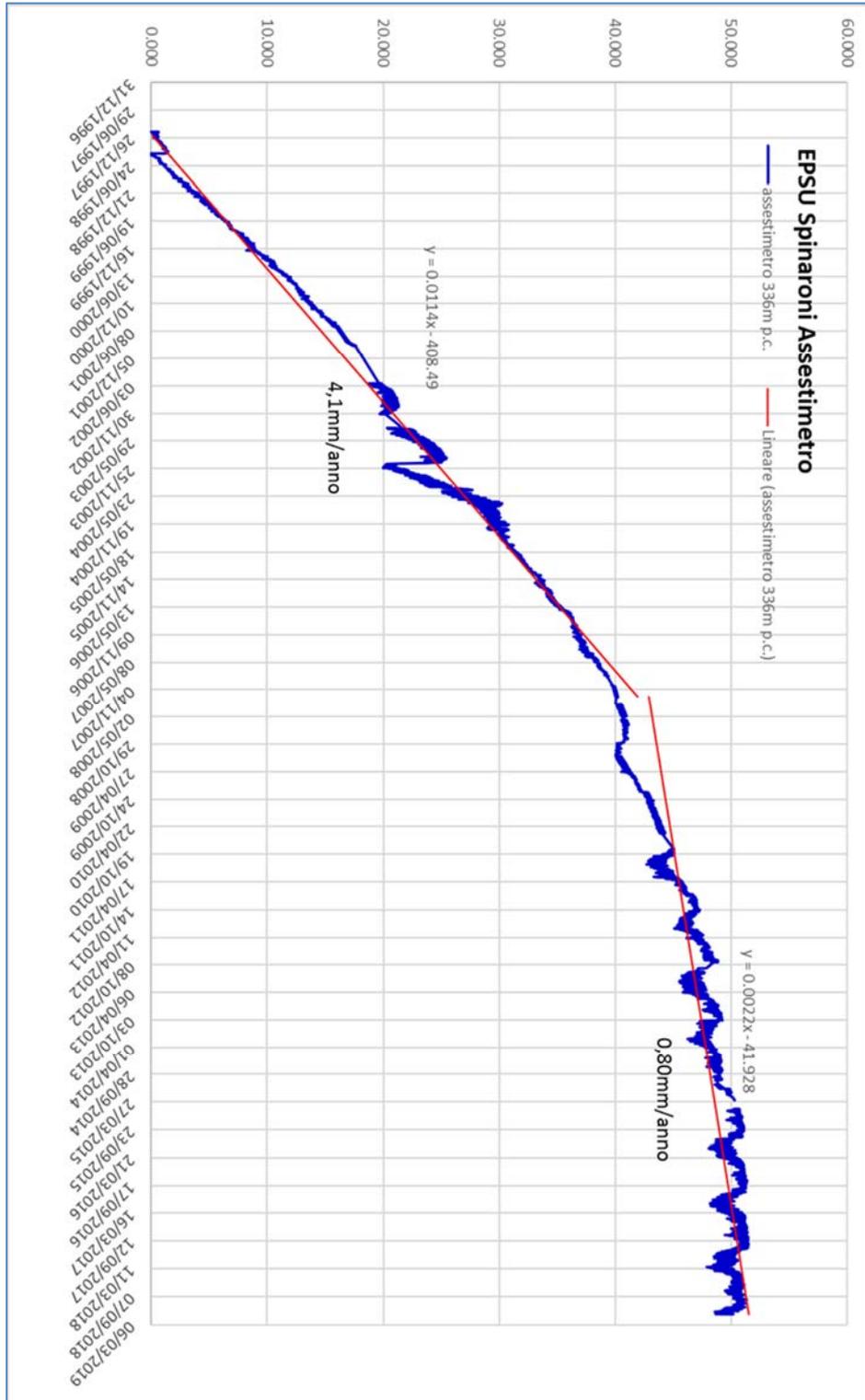


Figura 9B – Analisi di dettaglio della curva assestimetrica della stazione EPSU di Spinaroni

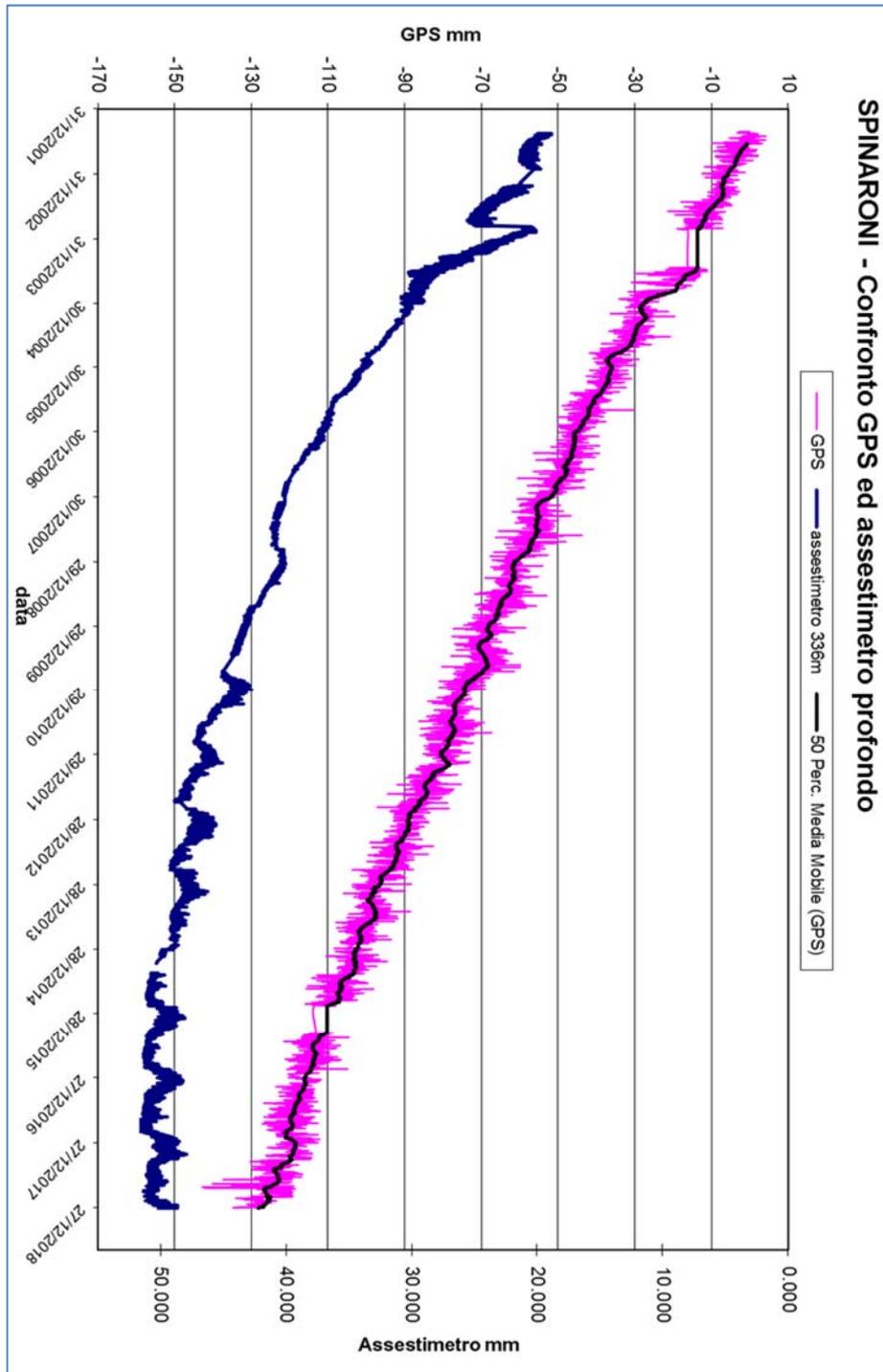


Figura 10B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (assestimetro della stazione EPSU di Spinaroni)

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

Stazione **EPSU** di Fiumi Uniti (installata settembre 1994)

Le coordinate WGS84 della stazione sono: 44°23'50.09"N e 12°18'57.44"E. La strumentazione è costituita da:

- assestimetro profondo - quota bottom 372.85 m da p.c.
- assestimetro superficiale – quota bottom 224.2 m da p.c.
- Piezometro profondo a 360 m p.c. (disattivato da agosto/2011)
- Piezometro intermedio a 243 m p.c. (disattivato da agosto/2011)
- Piezometro superficiale a 148 m p.c. (disattivato da agosto/2011)

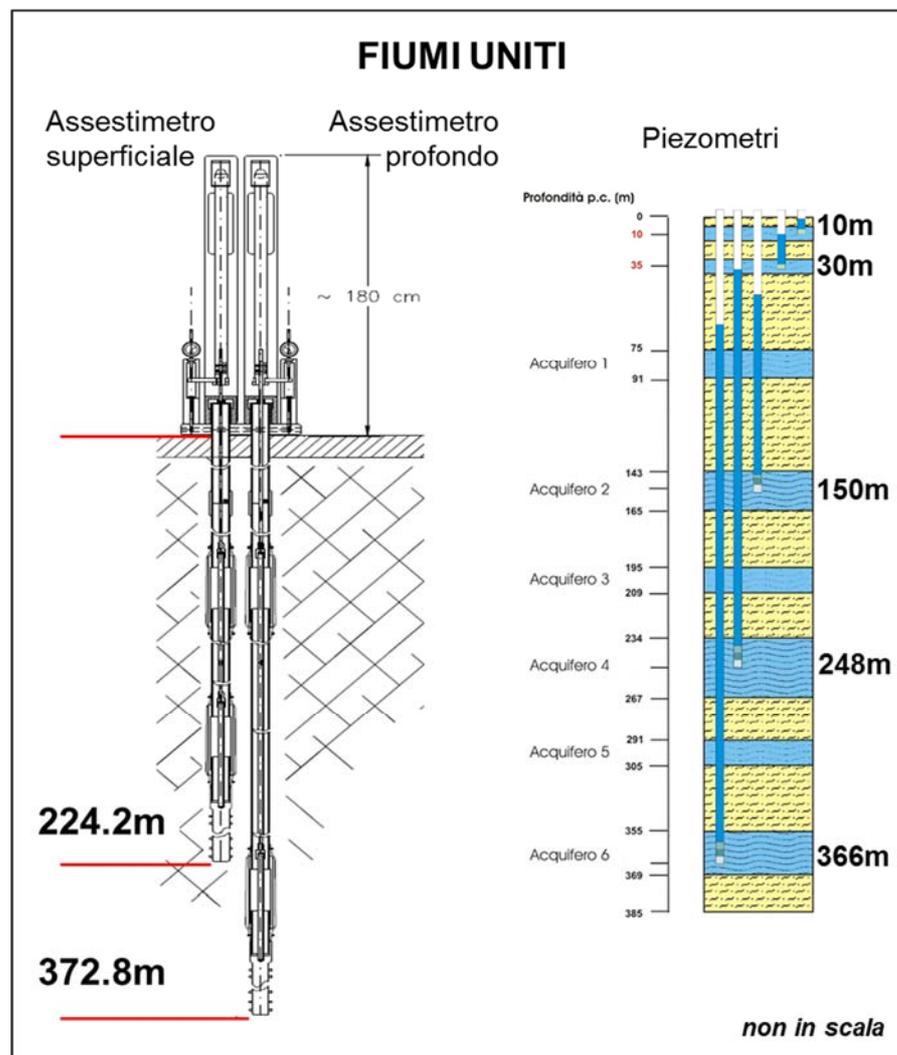


Figura 11B - Schema della stazione EPSU di Fiumi Uniti. Le profondità dei piezometri sono riferite alla quota centrale del tratto filtrante

Le principali caratteristiche della strumentazione (Figura 11B) sono attualmente costituite da una coppia di assestimetri (superficiale e profondo) messi in opera nel settembre 1994 e dai seguenti nuovi piezometri installati nel dicembre 2011:

Sigla	Profondità fondo foro (da p.c.)	Tipo Piezometro	Tratto Filtrante
PS-1	10.50	Tubo aperto	da 6.40 a 9.50 m da p.c.
PS-2	30.50	Tubo aperto	da 25.40 a 29.50 m da p.c.
PP-1	373.50	Tubo aperto	da 361.00 a 365.00 m da p.c. da 366.50 a 372.50 m da p.c.
PP-2	257.00	Tubo aperto	da 241.00 a 245.00 m da p.c. da 250.00 a 256.00 m da p.c.
PP-3	163.00	Tubo aperto	da 141.10 a 153.20 m da p.c. da 156.00 a 162.00 m da p.c.

L'unità d'acquisizione dati è stata impostata con una frequenza di registrazione di una misura ogni due ore. In seguito, dal 17 aprile 1999, tale frequenza è stata ridotta a una misura ogni 6 ore. Nel luglio 2003 si è avuto il furto dei pannelli solari installati per l'alimentazione del sistema di misura, con conseguente perdita di 2 mesi di registrazioni (7 agosto 2003 - 2 ottobre 2003). Nel giugno 2004 è stata sostituita integralmente la baracca di protezione del sistema; in tale occasione è stato fatto l'allacciamento alla rete elettrica, eliminando, così, il ricorso ai pannelli solari. Nel marzo 2008 sono stati spurgati i 3 piezometri. L'operazione ha consentito d'accertare che il piezometro superficiale e quello intermedio non erano di fatto funzionanti, poiché in comunicazione idraulica tra di loro e con i filtri intasati.

Molto dubbio era anche il funzionamento del piezometro profondo.

Nel periodo 9 agosto 2010 - 8 settembre 2010 si sono perse le misure per un guasto alle apparecchiature. Analogo problema si è verificato nell'ottobre 2010. A seguito dei lavori di ripristino dei pozzetti piezometrici, a partire da metà luglio 2011, sono stati definitivamente sigillati i tre vecchi tubi piezometrici (Figura 12B). Nel dicembre 2011 sono entrati in funzione i cinque nuovi pozzi piezometrici descritti nella precedente tabella.

Da circa fine giugno 2012 sino a fine febbraio 2013 il trasduttore di pressione del piezometro superficiale a 30 m non ha funzionato correttamente registrando valori non attendibili; detto sensore è stato poi correttamente riscaldato dopo il ripristino dell'alimentazione elettrica a ottobre 2013. Si segnala la mancanza di dati di questa stazione dal 28 febbraio 2013 al 17 ot-

tobre 2013 per un guasto alle apparecchiature di alimentazione elettrica del sistema d'acquisizione. Fino a fine luglio 2017 la registrazione dei dati è stata poi regolare. Ad agosto del 2017 si è verificato un nuovo guasto elettrico alle apparecchiature d'acquisizione, per cui sino a dicembre 2017 si sono fatte letture manuali della strumentazione piezometrica ed assestimetrica anche se con frequenza ridotta. A dicembre 2017 si sono spurgati/lavati tutti e 5 i piezometri della stazione. A tale scopo si è fatta circolare acqua a pressione e portata costanti attraverso una linea di spurgo dal basso verso l'alto, per favorire il deflusso dei sedimenti depositatisi sia nel tratto cieco che in colonna attraverso le microfessurazioni dei filtri e nei boccafori. Dopo il lavaggio di ogni singolo piezometro, sono state fatte prove di dissipazione d'energia dell'acqua immessa per la verifica del funzionamento dei tratti filtranti, seguite da prove di emungimento della falda. Tutti i piezometri sottoposti a manutenzione sono risultati integri e perfettamente funzionanti. L'avaria alle apparecchiature di acquisizione è perdurata anche nei primi tre mesi del 2018: dal mese di aprile l'acquisizione dei dati è stata, invece, regolare. L'ultima verifica generale della strumentazione, con controlli manuali dei livelli piezometrici e taratura di tutti i sensori è stata fatta in giugno, ottobre e dicembre 2018.

Analisi dei dati assestimetrici

L'assestimetro più profondo misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 372.85 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna (p.c.); quello più superficiale a sua volta misura la compattazione degli strati di terreno compresi tra 224.2 m (punto di ancoraggio) e il piano di campagna.

Nei grafici allegati (Figura 15B e Figura 16B) 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 1998, data di collaudo del sistema. Valori positivi degli spostamenti nel grafico dell'assestimetro indicano una compattazione e, viceversa, quelli negativi un incremento dello spessore (i.e. espansione) degli strati di terreno monitorati.

L'assenza delle misure nel periodo compreso fra settembre 1997 e aprile 1998 è da collegare al fatto che inizialmente non era ancora in funzione il sistema di teletrasmissione dei dati. Le misure sono state fatte con continuità a partire dall'8 aprile 1998.

In data 17/10/2006 è stata ripresa la corsa dei trasduttori di spostamento, precisamente di

16.3 mm per l'assestimetro profondo e di 14.4 mm per quello più superficiale. Nell'elaborazione dei dati si è tenuto in conto di queste variazioni, così da non rappresentare il "salto" nelle misure per effetto di un cambiamento di fondo scala e non di una reale variazione assestimetrica.

Per tutti circa i 24 anni di misure fatte, le due curve assestimetriche (Figura 13B e Figura 14B) mostrano andamenti molto simili, con minimi scostamenti tra loro e con un trend costante di compattazione del terreno. Ciò sembrerebbe indicare una compattazione prevalentemente superficiale, che interessa grosso modo i primi 220 m di terreno. La velocità di compattazione è di circa 2 mm/anno per entrambi gli assestimetri e per tutto l'intervallo di tempo considerato. Presso la stazione *EPSU* è stato installato nel 2002 anche un CGPS, le cui misure hanno consentito di stimare una velocità media d'abbassamento della superficie del suolo pari a -14.1 mm/anno. Un confronto fra i valori differenti di tali velocità (CGPS e assestimetrica), che si riferiscono però a fenomeni fisici diversi anche se collegati fra loro, porta a ipotizzare che nell'area siano in atto anche fenomeni di compattazione che interessano i sedimenti più profondi (> 220 m). Il CGPS infatti nei 16.8 anni di acquisizione ha registrato un abbassamento totale di circa 23.7 cm mentre invece l'assestimetro nello stesso periodo ha registrato una compattazione totale di circa 3.4 cm.

Inoltre, l'esame delle curve CGPS e assestimetrica profonda non mostra particolari tratti di somiglianza, come si può osservare nel grafico allegato (Figura 17B).

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

- il confronto delle due curve è stato fatto per lo stesso periodo di osservazione (2002-2017), pur essendo la durata del monitoraggio con l'assestimetro di circa 8 anni più lunga;
- 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).

 Eni spa	Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA novembre 2019	Page - 55 - of 64
--	---	-------------------

Analisi dei dati piezometrici

Come spiegato in precedenza, nella stazione sono stati posti inizialmente in opera tre piezometri verticali che, però, nel corso del tempo si sono guastati. Per un lungo periodo di tempo, le misure piezometriche utilizzate sono state solo quelle relative al piezometro più profondo, ritenuto più attendibile.

In Figura 12B è illustrato l'andamento delle curve piezometriche sino al 2011.

Da metà luglio 2011 tutti i vecchi tubi piezometrici sono stati poi definitivamente sigillati e dal 22 dicembre 2011 ad oggi si sono resi disponibili i dati dei nuovi tubi piezometrici (Figura 15B e Figura 16B). A dicembre 2017 tutti e 5 i piezometri della stazione sono stati sottoposti ad una manutenzione straordinaria consistita in spurgo e lavaggio degli stessi. Tutti i piezometri sottoposti a manutenzione hanno risposto in modo positivo durante l'attività di spurgo/lavaggio, risultando integri e perfettamente funzionanti. Da segnalare che, dalla sua installazione, il piezometro profondo (PP1 a 360 m di profondità) è risultato sempre in pressione, con una altezza della falda al di sopra del piano campagna, variabile tra 0.5 e 4 m.

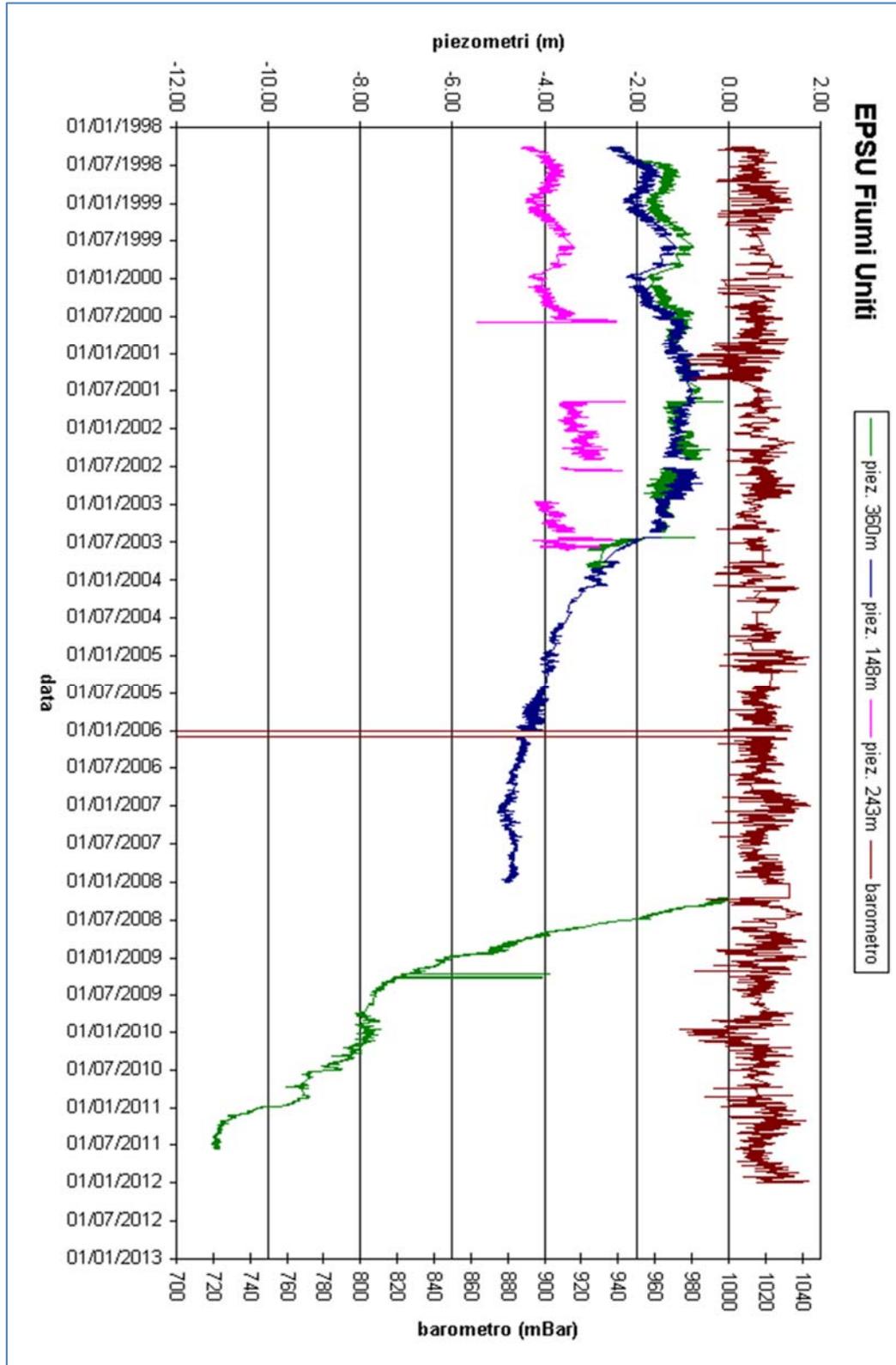


Figura 12B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure della strumentazione piezometrica-barometrica attiva sino al 2011

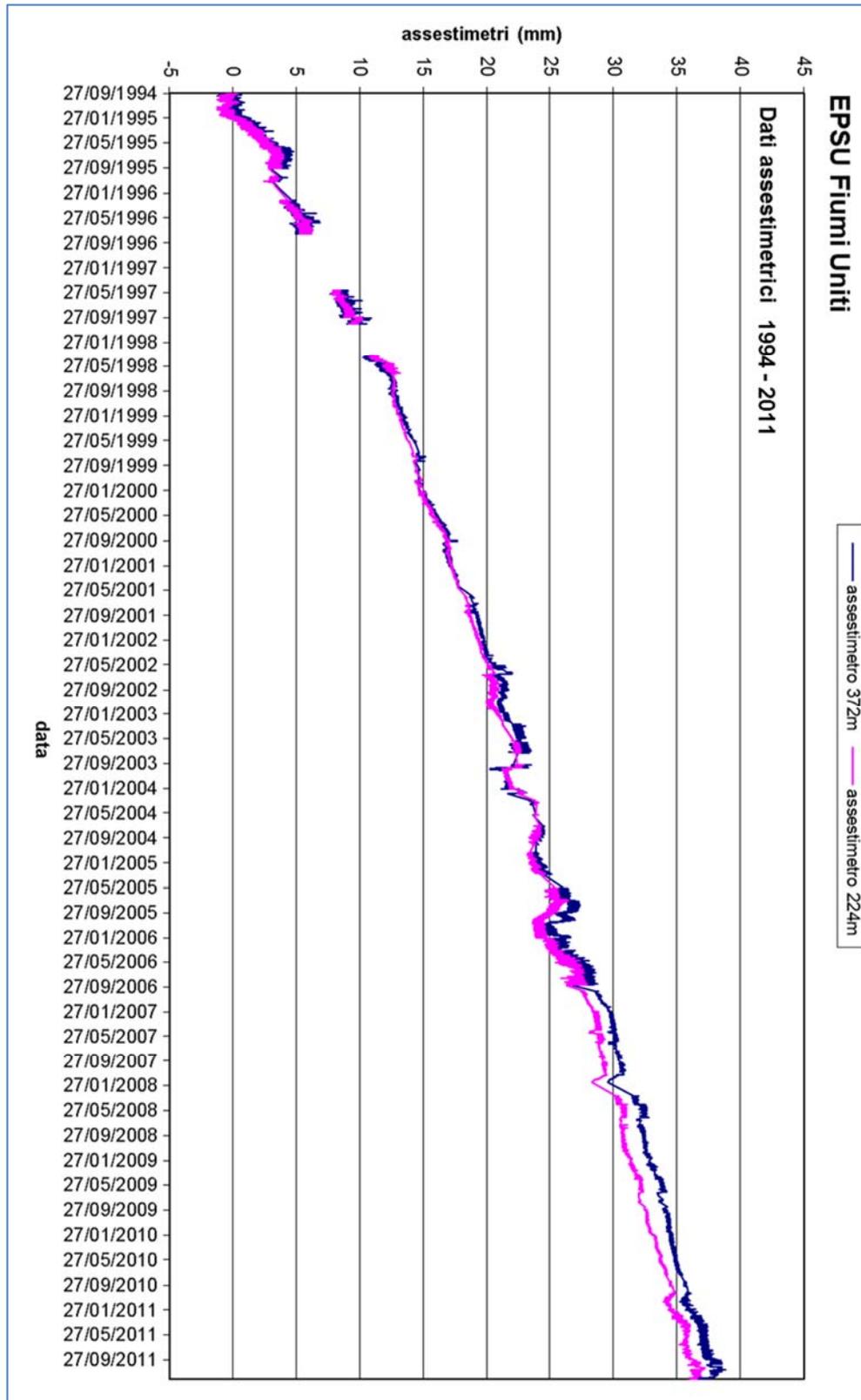


Figura 13B - Curva di compattazione degli assestimetri della stazione EPSU di Fiumi Uniti (dati 1994-2011)

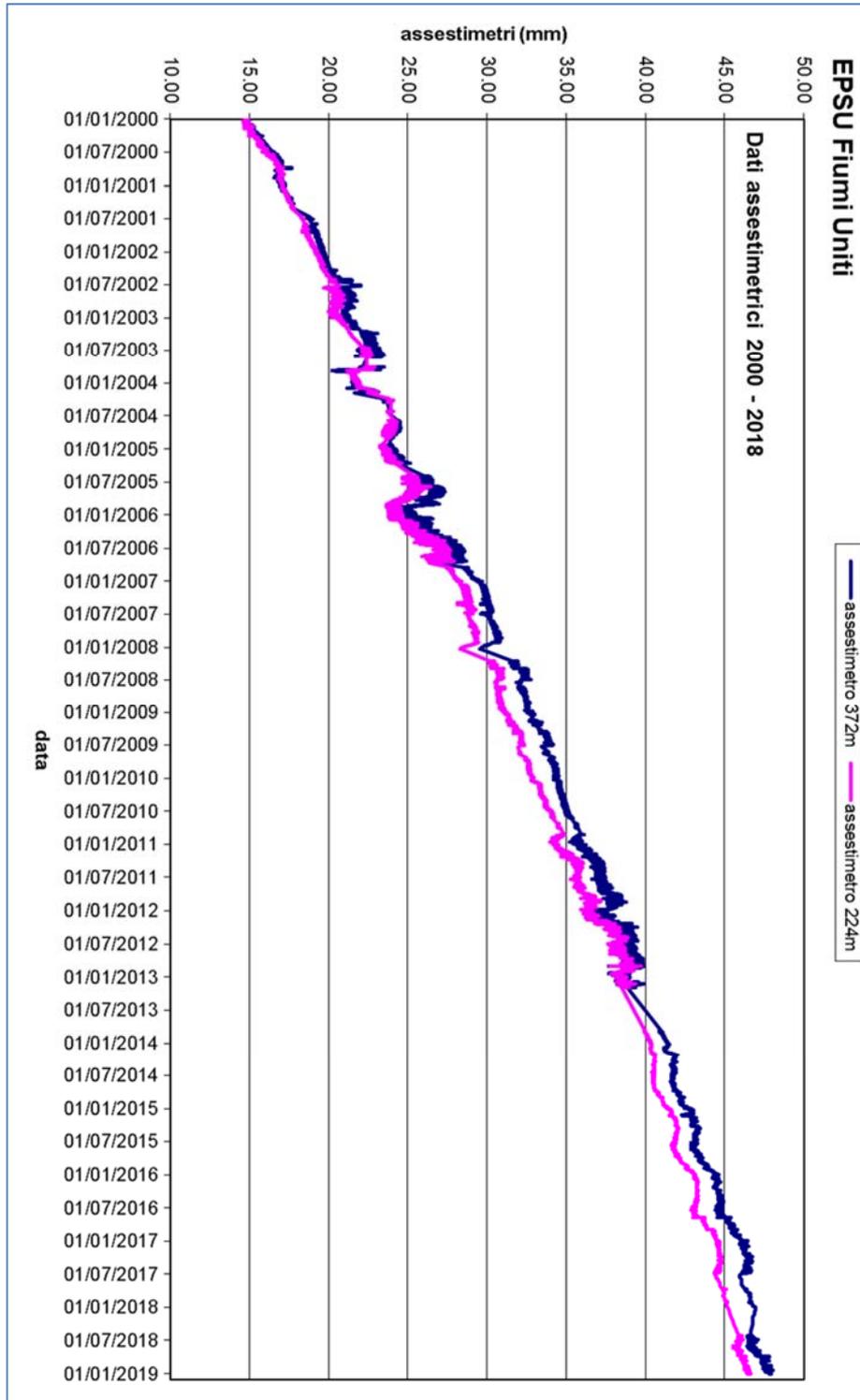


Figura 14B - Curva di compattazione degli assestimetri della stazione EPSU di Fiumi Uniti (dati 2000-2018)

Valori positivi = abbassamento; Valori negativi = sollevamento

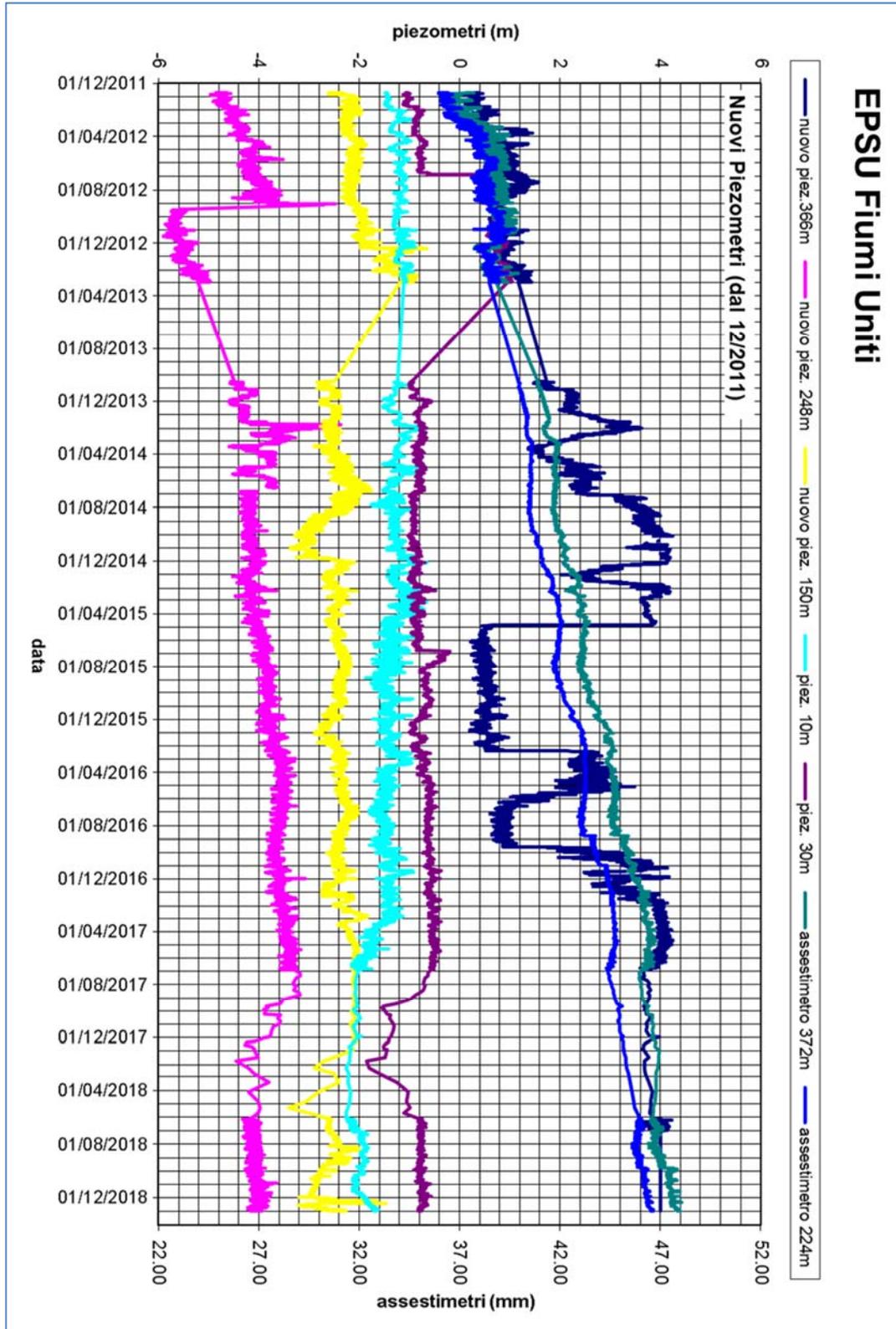


Figura 15B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure piezometriche e assestometriche dal 2011 al 2018

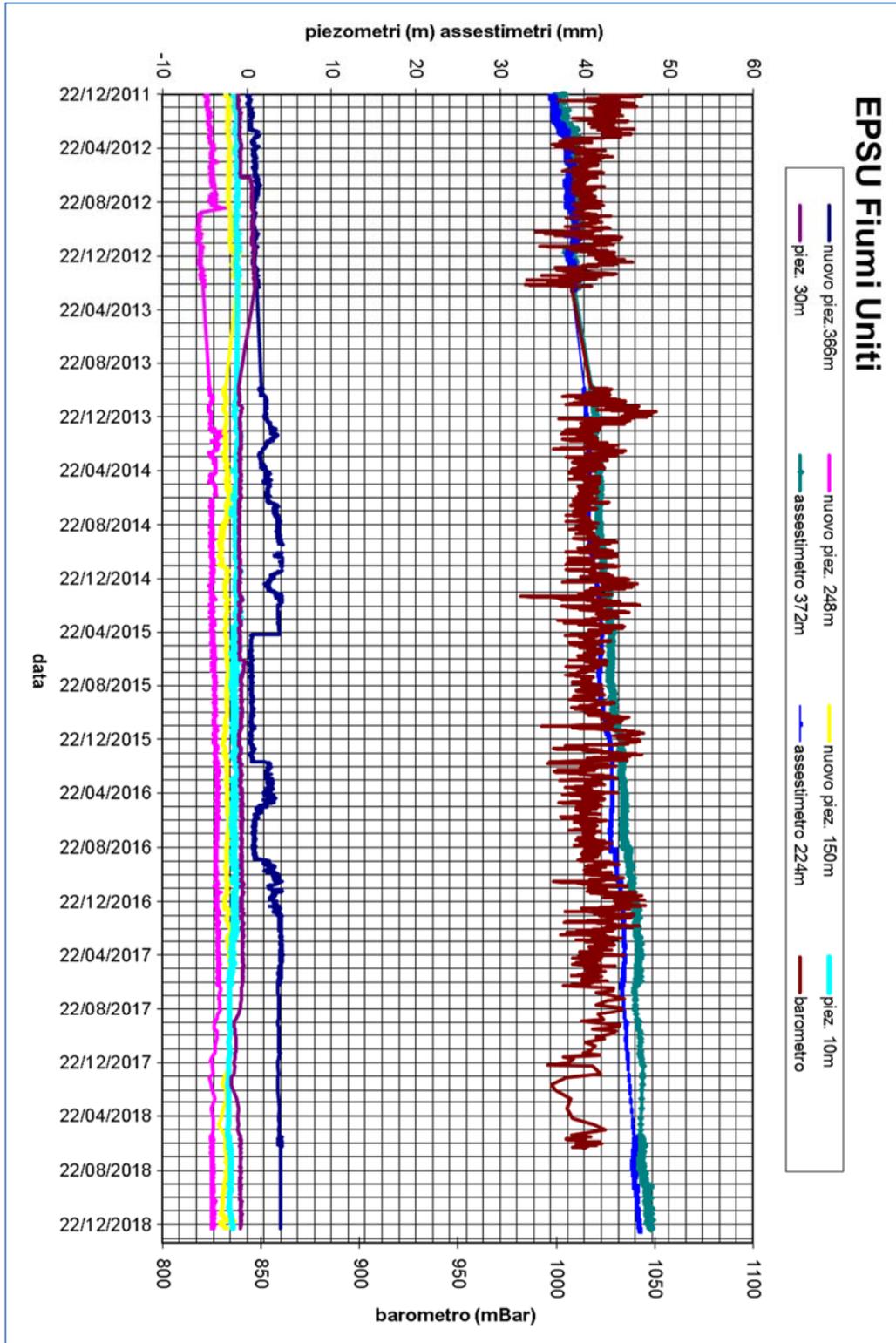


Figura 16B – Stazione EPSU Fiumi Uniti: misure piezometriche e barometriche dal 2011 al 2018

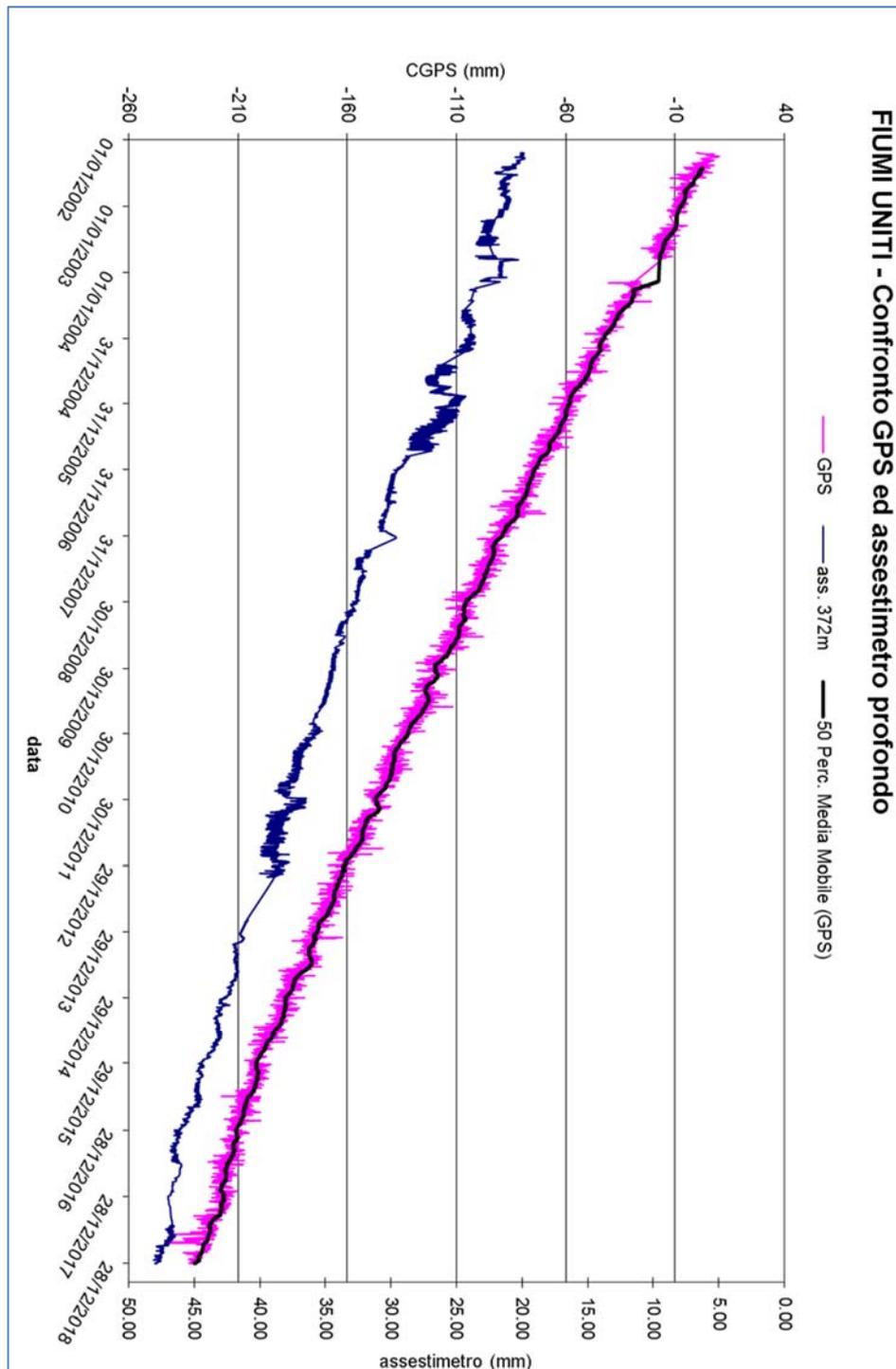


Figura 17B - Confronto fra misure da CGPS vs. misure di compattazione (Assestimetro profondo della stazione EPSU di Fiumi Uniti)

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

Conclusioni

In generale, i grafici allegati mostrano come per tutte e tre le stazioni *EPSU* si siano ottenuti dati di buona qualità, pur tenendo conto delle difficoltà operative incontrate in fase d'acquisizione. La lunghezza delle serie storiche registrate, la sensibilità e la qualità dei sensori utilizzati, infatti, sono tali da consentire di valutare con buona precisione l'abbassamento del piano campagna rispetto al punto di ancoraggio degli strumenti (compattazione superficiale). Anche se le misure assestimetriche risentono delle escursioni - giornaliere e stagionali - di temperatura, tale fenomeno si attenua e praticamente scompare per lunghi periodi di osservazione quali quelli disponibili per le 3 *EPSU* considerate. Nell'arco degli anni di osservazione non si nota alcun effetto della variazione stagionale della temperatura. Una considerazione generale valida per le tre stazioni considerate è che la compattazione dei terreni superficiali sembra assumere un andamento costante nel tempo con una tendenza all'attenuazione. Negli ultimi 4 anni, infatti, si sono registrati valori in leggera diminuzione (da 0.1 a 0.5 mm/a) per tutti gli assestimetri, sino ad arrivare ad i valori del 31/12/2018, riportati nella tabella riassuntiva più avanti.

Smarlacca

Per la stazione di Smarlacca il periodo di osservazione è di oltre 20 anni, durante i quali l'assestimetro più profondo ha registrato una compattazione media regolare anche se meno marcata rispetto a quanto misurato nelle stazioni di Spinaroni e di Fiumi Uniti. L'andamento delle misure è stato, infatti, più o meno costante nel tempo, tranne che per l'abbassamento registrato nel periodo luglio-settembre 2003; la compattazione totale è stata pari a 19.8 mm per una velocità media di abbassamento di circa 0.95 mm/a (velocità da regressione lineare 0.98 mm/a). Un analogo *trend* nelle misure si rileva anche per l'assestimetro più superficiale, che, però, ha registrato una compattazione totale nettamente più ridotta: 6.4 mm complessivi, corrispondenti a circa 0.3 mm/a (0.25 mm/a da regressione lineare). L'andamento della velocità di compattazione dell'assestimetro profondo mostra un andamento più modulato da quanto si potrebbe evincere dalla sola regressione lineare su tutta la serie. Si evidenziano infatti due trend di velocità distinti: uno iniziale sino alla fine del 2011 di circa 1 mm/anno ed uno degli ultimi 5 anni, con un valore di velocità di circa 0.5 mm/anno. Buona è la correla-

 <p>Eni spa</p>	<p>Campi di TEA-LAVANDA-ARNICA novembre 2019</p>	<p>Page - 63 - of 64</p>
---	--	--------------------------

zione tra la curva assestimetrica e quella del CGPS. I dati piezometrici non sono da considerarsi attendibili.

Spinaroni

Per la stazione di Spinaroni si hanno a disposizione più di 21 anni di osservazioni durante i quali si è registrata una compattazione di 49 mm (circa 2.3 mm/a, stesso valore sia con regressione lineare, sia dividendo spostamento totale per anni di osservazione) con un andamento, dopo il primo periodo di assestamento, piuttosto regolare, tranne che per la brusca variazione (sollevamento del piano campagna) dell'ottobre 2003 di cui si è detto in precedenza.

Anche in questo caso però, come per la stazione di Smarlacca, la curva dell'assestimetro mostra due andamenti di velocità di compattazione. Il primo sino alla fine del 2007 di circa 4.1 mm/anno; il secondo a partire approssimativamente dal 2008 ad oggi, caratterizzato da una velocità di 0.8 mm/a. La correlazione dell'andamento nel tempo delle curve CGPS e assestimetrica non è molto elevata; il CGPS sembra mostrare un trend d'abbassamento abbastanza regolare anche se influenzato dalla stagionalità. I dati piezometrici non sono da considerarsi attendibili.

Fiumi Uniti

Per la stazione Fiumi Uniti si hanno a disposizione dati fin dal settembre 1994; è, quindi, possibile seguire l'evolversi della compattazione per un arco di tempo più lungo (più di 24 anni) che non nelle due stazioni sopracitate. Il valore attuale – dicembre 2018 – della compattazione totale misurata in tutti questi anni dall'assestimetro più profondo è di 47.9 mm, mentre per quello superficiale detto valore è di 46.6 mm. Ciò significa che, assumendo un trend di compattazione del terreno costante nell'arco di circa 24 anni d'osservazione, entrambi gli strumenti hanno registrato velocità media di compattazione simile e dell'ordine di circa 2 mm/anno. La compattazione però è per la maggior parte localizzata nella porzione di terreno indagata dallo strumento più superficiale (0-220 m circa).

Le registrazioni delle curve CGPS e assestimetrica profonda mostrano poi andamenti dei cicli di compattazione ed espansione del terreno non molto simili tra loro; la correlazione tra le due curve sembra essere più elevata negli ultimi anni di registrazione.

Nella tabella che segue sia la compattazione complessiva del terreno, sia la relativa velocità media annua sono state valutate sulla base della misura assestimetrica fatta al 31/12/2018 e di tutto il periodo (i.e. anni) di monitoraggio. In questo caso non si è fatta, quindi, alcuna regressione dei valori della curva assestimetrica. Tale procedimento potrebbe dare, pertanto, risultati molto simili ma non perfettamente uguali a quelli riportati nelle precedenti analisi dei dati assestimetrici.

Sito	Anni di osservazione	Assestimetro profondo		Assestimetro superficiale	
		Spostamento complessivo (mm)	Velocità (mm/a)	Spostamento complessivo (mm)	Velocità (mm/a)
Smarlacca	20.74	19.8	0.9	6.4	0.3
Spinaroni	21.13	49.00	2.3	n.i.	-
Fiumi Uniti	24.3	47.92	1.97	46.6	1.91

n.i. = non installato