

Valutazione della subsidenza nell'area di Ravenna tramite un approccio integrato InSAR/livellazione classica

Massimo Fabris (*), Vladimiro Achilli (*), Sven Borgstrom (**), Mario Floris (***),
Simone Fiaschi (***), Valeria Siniscalchi (**)

(*) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Università degli Studi di Padova, via Marzolo, 9 – 35131 Padova, e-mail: (massimo.fabris)(vladimiro.achilli)@unipd.it

(**) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Osservatorio Vesuviano, via Diocleziano, 328 – 80124 Napoli,
e-mail: (sven.borgstrom)(valeria.siniscalchi)@ov.ingv.it

(***) Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, via Gradenigo, 6 – 35131 Padova,
e-mail: mageo67@me.com, simone.fiaschi@studenti.unipd.it

Riassunto

Nell'ambito di questo lavoro viene stimata l'entità della subsidenza che ha luogo nell'area del comune di Ravenna tramite l'integrazione delle classiche tecniche di livellazione geometrica con quelle, più recenti, di analisi di dati SAR (Radar ad Apertura Sintetica): Small BAseline Subset (SBAS). L'area risulta di particolare interesse per la presenza di giacimenti metaniferi il cui sfruttamento ha provocato in passato rilevanti fenomeni di subsidenza: attualmente le velocità di abbassamento, anche se notevolmente ridotte, risultano ancora superiori a quelle naturali e la connessione con i fenomeni legati all'innalzamento medio dei mari aumenta il rischio idraulico nell'area costiera.

Abstract

In this work, the subsidence in the Ravenna area is estimated by means of the integration between the classical geometric leveling techniques with the more recent SAR (Synthetic Aperture Radar) methodology: Small Baseline Subset (SBAS). This is an interesting area due to the presence of methane reservoirs the exploitation of which has caused in the past an intense subsidence phenomena: at present, the lowering velocities caused by the extraction activity, even if significantly reduced, are still major than the natural ones. The combination of the subsidence and the sea level rise phenomena increases the hydraulic risk of the coastal area.

Introduzione

Il rilievo della subsidenza nelle aree soggette a deformazione può essere effettuato utilizzando diverse metodologie geomatiche: dalla classica livellazione geometrica al GPS, alla fotogrammetria e all'utilizzo dell'interferometria radar. Le differenti metodologie sono caratterizzate da tempi di esecuzione delle misure, costi, risoluzioni e precisioni difficilmente paragonabili. Storicamente, la livellazione geometrica di precisione, che richiede misure in tempi diversi sugli stessi caposaldi partendo da vertici stabili, ha trovato largo impiego nella misura degli spostamenti verticali del terreno. Questa metodologia, seppur con tempi e costi di esecuzione dei rilievi non trascurabili, ha sempre fornito risultati di grande precisione (Berardino et al., 2002; Del Gaudio et al., 2005; 2007; 2009; Fabris et al., 2014). A partire dagli anni '90 l'avvento del SAR ha permesso di ottenere misure degli spostamenti del terreno con costi sempre più ridotti e precisioni che, nei decenni successivi, grazie all'utilizzo di sensori sempre più raffinati, sono via via migliorate, fino ad arrivare a valori paragonabili a quelli della livellazione classica.

Le due metodologie sono state utilizzate per lo studio della subsidenza nell'area del Comune di Ravenna che, a causa anche dell'estrazione di gas metano da giacimenti operativi dagli anni '40, è

stata interessata da importanti abbassamenti del suolo (Baldi et al., 2009; 2011; Gambolati et al., 1999; Macini et al., 2006; Menin et al., 2008; Schrefler et al., 2009a; 2009b; Teatini et al., 2000; 2005; 2006; Tosi et al., 2010). Le misure di livellazione geometrica utilizzate in questo studio sono state effettuate nel 1982, 1986, 1992 e 1998 relativamente all'area del giacimento "Ravenna Terra" (Figura 1); 1999 e 2005 (rilievi eseguiti da Arpa Emilia Romagna – Distart, Università di Bologna) per l'area dell'intero Comune (Arpa, 2006; Bonsignore, 2008).

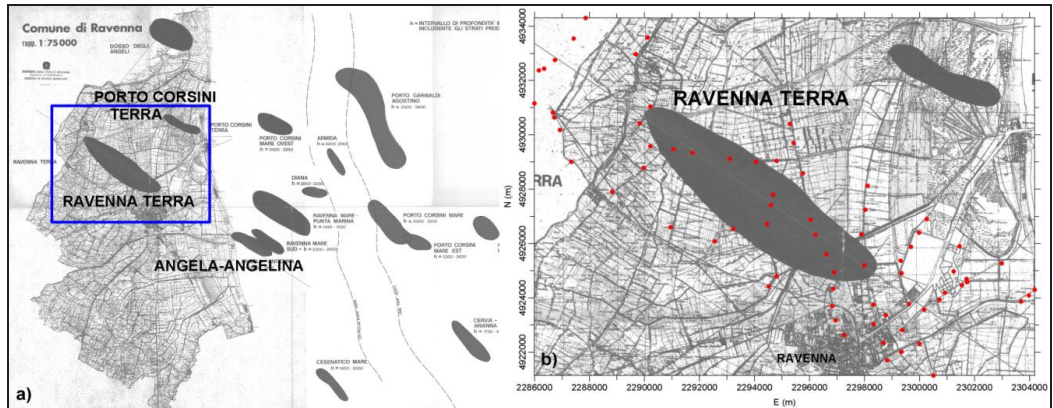


Figura 1 □a) Localizzazione dei giacimenti metaniferi nell'area del comune di Ravenna; b) Il giacimento □Ravenna Terra□ con la distribuzione dei caposaldi utilizzati nello studio della subsidenza (periodo 1982-1998).

Per lo studio della subsidenza in atto sono stati elaborati dati interferometrici dei satelliti ERS ed ENVISAT tramite la tecnica SBAS per l'arco temporale che, nel complesso, va dal 1992 al 2010.

La subsidenza da misure di livellazione geometrica

L'analisi degli spostamenti meno recenti è stata effettuata sulla base di dati di livellazione ottenuti da misure realizzate in tempi diversi sugli stessi caposaldi; in corrispondenza del giacimento "Ravenna Terra" (in cui l'attività di estrazione è iniziata nel 1950 e terminata nel 1982 con una produzione totale di 21.77×10^9 Nm⁵ o SCM), l'entità maggiore della subsidenza è stata rilevata nel periodo 1972-1977 con valori di abbassamento medio del suolo dell'ordine di 45÷50 mm/anno (Teatini et al., 2005). Dopo la dismissione del giacimento, l'interpolazione dei valori misurati sui caposaldi di riferimento dal 1982 al 1998 ha fornito la rappresentazione di Figura 2.

Si nota come i valori maggiori degli abbassamenti si verificano ai margini del giacimento, mentre nella parte centrale le velocità sono molto più contenute: questo effetto "anomalo" richiede probabilmente uno studio più approfondito per valutare gli effetti del comportamento del suolo in corrispondenza di giacimenti dismessi, problema non ancora affrontato compiutamente.

Dall'analisi dell'interpolazione dei dati di livellazione, integrati da misure SAR, eseguiti da Arpa Emilia Romagna – Distart, Università di Bologna nel 1999 e 2005 (Figura 3, dove sono state enfatizzate le differenze in quota), si notano valori di subsidenza più elevati in prossimità dei giacimenti di "Porto Corsini Terra" e "Angela-Angelina" (Figura 1), oltre che in corrispondenza dell'area industriale di Ravenna, storicamente caratterizzata dai valori più elevati di velocità di abbassamento del suolo per l'area dell'intero Comune.

Anche in corrispondenza della fascia costiera si notano velocità di abbassamento maggiori rispetto alle porzioni più interne, fenomeno che può causare numerosi problemi legati all'arretramento della linea di costa (Carbognin, Tosi, 2002).

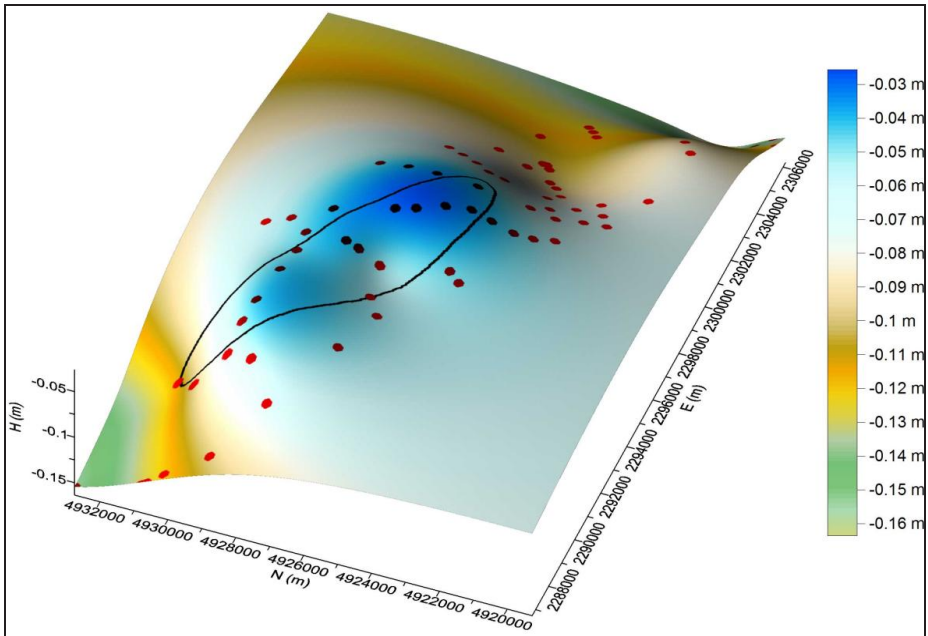


Figura 2 □ Visualizzazione 3D dell'interpolazione degli abbassamenti misurati sugli stessi caposaldi (in rosso) dal 1982 al 1998 in corrispondenza del giacimento □ Ravenna Terra □.

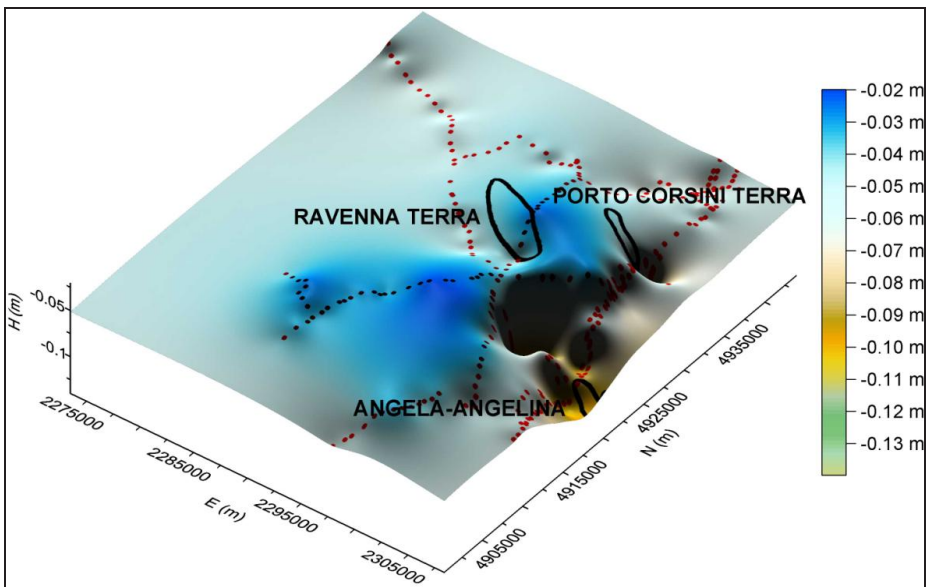


Figura 3 □ Visualizzazione 3D dell'interpolazione degli abbassamenti misurati sugli stessi caposaldi (in rosso) nel periodo 1999-2005 (dati Arpa Emilia Romagna □ Distart, Università di Bologna) e sovrapposizione dell'ingombro planimetrico dei giacimenti di Figura 1.

Elaborazione dei dati SAR

Le analisi dei dati interferometrici disponibili per il territorio del Comune di Ravenna hanno permesso di estendere lo studio della subsidenza anche ad aree non coperte dalle livellazioni, fornendo al tempo stesso nuove misure utili al confronto con i risultati ottenuti fino ad ora tramite le tecniche classiche. Per lo studio degli spostamenti in atto, sono state processate, tramite tecnica SBAS (Berardino et al., 2002), 84 immagini ERS e 96 immagini ENVISAT che nel complesso coprono l'intervallo temporale che va da 1992 al 2010. L'analisi dei dati è stata effettuata considerando diverse tracks e geometrie di acquisizione (Tabella 1), operazione ritenuta necessaria per fornire maggiore validità ai risultati ottenuti.

SATELLITE	TRACK/GEOMETRIA	NUMERO IMMAGINI	PERIODO DI ACQUISIZIONE
ENVISAT	122/discendente	47	24/09/2003 22/09/2010
ENVISAT	172/ascendente	29	01/03/2003 17/07/2010
ENVISAT	401/ascendente	20	30/06/2003 11/10/2010
ERS	122/discendente	60	10/05/1992 13/12/2000
ERS	401/ascendente	24	03/07/1992 23/10/2000

Tabella 1 □ Principali caratteristiche dei dati interferometrici processati per questo lavoro: nome del satellite, numero della track, geometria di acquisizione, numero di immagini utilizzate, periodo di acquisizione.

La qualità delle misure effettuate tramite la tecnica SBAS è fortemente condizionata dalla tipologia di territorio che si va ad analizzare. L'accuratezza e la copertura spaziale ottenute da un processamento, infatti, sono legate alle caratteristiche di coerenza che i bersagli a terra presentano nel corso del tempo: maggiore è la costanza della coerenza nel tempo, migliore sarà la risposta, in termini di qualità del risultato, data dai processamenti. Le porzioni di territorio che maggiormente mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche di coerenza sono le aree urbanizzate (case, strade, porti, infrastrutture...) e gli affioramenti rocciosi privi di copertura; aree fortemente vegetate come, boschi, prati e coltivazioni di vario genere e le aree palustri, d'altro canto, perdono molto rapidamente questa caratteristica e risultano, perciò, poco sfruttabili tramite tecniche SBAS.

Nonostante la maggior parte del territorio studiato sia poco favorevole da questo punto di vista, grazie all'elevato numero di immagini radar a disposizione e all'ottimizzazione dei parametri impiegati nelle elaborazioni, è stato possibile ottenere una buona copertura spaziale, anche se quest'ultima risulta comunque concentrata principalmente nei centri abitati e lungo le zone costiere. Il confronto con le misure degli spostamenti ricavate tramite livellazione a terra ha dato ottimi riscontri: gran parte della zona costiera è soggetta a subsidenza, con forti spostamenti nei pressi del giacimento "Porto Corsini Terra" (-11 mm/anno). I valori di subsidenza massimi si hanno nella zona occupata del giacimento "Angela-Angelina", nei pressi del "Lido Dante" (circolo rosso, Figura 4) con velocità che raggiungono i -19 mm/anno. Questa è l'area che presenta il tasso di subsidenza più elevato di tutta la costa romagnola ed è la zona che ha subito, nel corso degli anni, i maggiori danni a causa dell'arretramento della linea di costa (Antonioli, Silenzi, 2007; Stocchi et al., 2009). Per contrastare questo fenomeno sono state realizzate opere rigide e sono stati eseguiti interventi di ripascimento, ma questi sono risultati essere solo dei palliativi temporanei.

La tecnica SBAS può essere utilizzata in maniera efficace per il monitoraggio di fenomeni a lenta evoluzione come la subsidenza e integrata nella realizzazione di mappe di pericolosità e rischio, così da contribuire in maniera efficace a progetti di gestione e mitigazione di tale rischio a costi piuttosto ridotti.

Il confronto fra i risultati ottenuti dai dati ERS ed ENVISAT (Figura 4) mostra chiaramente una forte corrispondenza fra le velocità dei movimenti presenti nei due periodi di tempo considerati, 1992-2000 e 2003-2010. Unica eccezione è la zona di "Punta marina" (circolo viola, in figura) che

presenta una diminuzione della subsidenza da circa -3 mm/anno (in verde chiaro) a circa 0 mm/anno (in giallo). Come è possibile notare dalla Figura 4, la tipologia di parametri utilizzati durante l'elaborazione dei dati influenza notevolmente il risultato, soprattutto per quanto riguarda la copertura spaziale. Nel caso dei dati ENVISAT sono stati utilizzati parametri meno restrittivi che hanno permesso di ampliare la zona coperta dai dati.

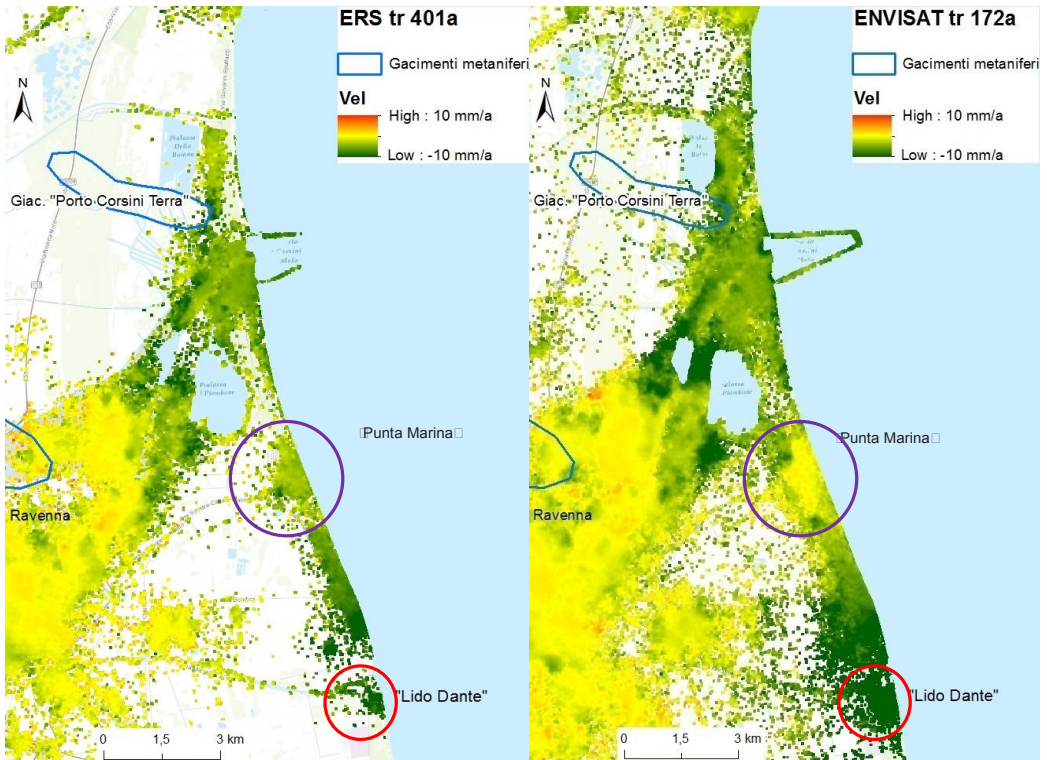


Figura 4 □ Confronto fra i risultati ottenuti da dati provenienti da sensori differenti: ERS a sinistra ed ENVISAT sulla destra. In evidenza la differente copertura spaziale ottenibile modificando i parametri di elaborazione.

Il territorio compreso nel perimetro del giacimento “Ravenna Terra” è coperto in maniera limitata da dati ottenuti tramite SBAS, ma questi sono sufficienti per un ulteriore confronto. La subsidenza residua presenta i valori più elevati nella porzione Nord-Occidentale del giacimento (-11 mm/anno), mentre avvicinandosi a Ravenna tendono a diminuire progressivamente fino al raggiungimento di una situazione di stabilità (Figura 5).

Al fine di integrare le elaborazioni interferometriche in grado di generare serie temporali della deformazione del suolo su *pixel* coerenti, sono state effettuate anche delle elaborazioni classiche (coppie interferometriche) per valutare l'eventuale presenza di deformazioni del suolo apprezzabili anche con questa modalità di processamento.

A tal proposito sono stati prodotti circa 40 interferogrammi (orbite discendenti, track 122) per un periodo compreso tra il 2004 e il 2010.

In considerazione del ridotto tasso di deformazione tipico dell'area in esame in relazione alla lunghezza d'onda con cui opera il sensore ASAR-ENVISAT (banda C, $\lambda = 5.6$ cm), non è stato possibile evidenziare alcuna deformazione del suolo, anche per coppie con *baseline* temporali di oltre un anno; ciò senza tener conto dell'eventuale contributo in fase dell'artefatto atmosferico,

tipicamente presente su singoli interferogrammi e che verosimilmente può corrompere il risultato finale.

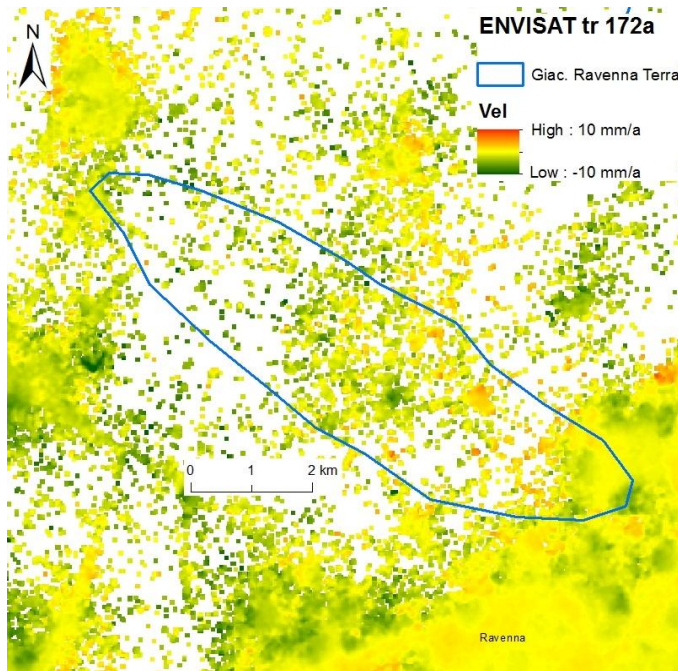


Figura 5 Velocità degli spostamenti e copertura spaziale per il giacimento "Ravenna Terra" ottenuti da dati ENVISAT track 172 ascendente (periodo 01/03/2003 - 17/07/2010).

Conclusioni

Dalle analisi effettuate, l'area del ravennate risulta particolarmente interessata da un fenomeno di subsidenza piuttosto esteso. I risultati hanno evidenziato una buona congruenza tra i differenti metodi di elaborazione, con velocità medie di abbassamento dei punti dello stesso ordine. Gran parte del litorale adriatico presenta valori di subsidenza elevati, soprattutto nei pressi del giacimento "Porta Corsini Terra", dove la componente antropica legata all'estrazione del gas probabilmente ha un effetto importante. L'area più critica risulta però quella del "Lido Dante", situato nei pressi del giacimento "Angela-Angelina", dove le velocità di abbassamento sfiorano i -2 cm/anno. Nel territorio del giacimento "Ravenna Terra", i valori degli abbassamenti riscontrati sono inferiori rispetto a quelli costieri ma la disomogeneità negli andamenti risulta di sicuro interesse per ulteriori approfondimenti.

La tecnica SBAS si è rivelata molto efficace nel monitoraggio della subsidenza su ampie porzioni di territorio con tempi e costi ridotti. I limiti sono rappresentati principalmente dalla difficoltà nell'ottenere risultati in aree scarsamente urbanizzate. Nonostante l'elevato grado di affidabilità dei risultati ottenuti tramite questa tecnica, risulta comunque necessaria una verifica a terra ottenibile tramite le classiche tecniche di livellazione.

L'integrazione di metodologie a terra e satellitari risulta, quindi, un approccio vincente, grazie al quale è possibile sopperire ai limiti di una tecnica con i punti di forza dell'altra. L'approccio utilizzato, ha permesso inoltre di affinare e migliorare le tecniche di elaborazione dei dati radar, fornendo al tempo stesso i mezzi per poter sviluppare in futuro nuove tecniche di indagine.

Sviluppi futuri

In seguito alla recente approvazione di un proposal sottomesso all'Agenzia Spaziale Tedesca (DLR, German Aerospace Center), si sono resi disponibili anche i dati in banda X ($\lambda = 3$ cm) dei sensori TerraSAR-X e TanDEM-X (acquisizioni monostatiche) sia in modalità classica (StripMap Mode) che nella nuova modalità ad altissima risoluzione spaziale (Staring SpotLight Mode), fino a 0.25 m ed un'elevata qualità radiometrica, che consentiranno di osservare eventuali deformazioni del suolo in atto con una scala di maggior dettaglio rispetto ai dati ERS/ENVISAT fin qui analizzati.

Bibliografia

- Antonioli F, Silenzi F. (2007), "Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere italiane", *Quaderni della Società Geologica Italiana*, 2: 1-29
- Arpa (2006), "Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola", In: *II° stralcio di attività finalizzate alla misura di una rete di livellazione a supporto dell'analisi interferometrica. Relazione finale*, Arpa – Ingegneria Ambientale, Regione Emilia-Romagna, eds., Bologna.
- Baldi P, Casula G, Cenni N, Loddo F, Pesci A. (2009), "GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy)", *Earth and Planetary Science Letters*, 288: 204-212
- Baldi P, Casula G, Cenni N, Loddo F, Pesci A, Bacchetti M. (2011), "Vertical and horizontal crustal movements in Central and Northern Italy", *Bollettino della Società Geologica Italiana (Italian Journal of Geosciences)*, 52(4): 667-685
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. (2002), "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383
- Berardino P, Borgstrom S, Cecere G, Del Gaudio C, De Martino P, Fornaro G, Lanari R, Ricciardi GP, Ricco C, Sansosti E, Sepe V, Siniscalchi V. (2002), "Un approccio multimetodologico per il controllo delle deformazioni nell'area flegrea", *Atti della 6ª Conferenza Nazionale ASITA*, Perugia 5-8 Novembre 2002, 1: 409-416
- Bonsignore F. (2008), "Il monitoraggio della subsidenza a scala regionale in Emilia-Romagna", *Arpa Rivista*, 1: 16-17
- Carbognin L, Tosi L. (2002), "Interaction between climate changes, eustasy and land subsidence in the North Adriatic Region, Italy", *Marine Ecology*, 23(1): 38-50
- Del Gaudio C, Ricco C, Aquino I, Brandi G, Serio C, Siniscalchi V. (2005), "Misure di livellazione di precisione e dati tiltmetrici per il controllo delle deformazioni del suolo ai Campi Flegrei", *Open File Report, n.4, Osservatorio Vesuviano □INGV*
- Del Gaudio C, Aquino I, Ricco C, Serio C. (2007), "Movimenti verticali del suolo ai Campi Flegrei: risultati della livellazione geometrica di precisione eseguita nel periodo Dicembre 2006-Gennaio 2007", *Open File Report, n.3, Osservatorio Vesuviano □INGV*
- Del Gaudio C, Aquino I, Ricco C, Serio C. (2009), "Monitoraggio geodetico dell'area vulcanica napoletana: risultati della livellazione geometrica di precisione eseguita ai Campi Flegrei a settembre 2008", *Quaderni di Geofisica*, 66, Febbraio 2009.
- Fabris M, Achilli V, Menin A. (2014), "Estimation of Subsidence in Po Delta Area (Northern Italy) by Integration of GPS Data, High-Precision Leveling and Archival Orthometric Elevations", *International Journal of Geosciences*, 5: 571-585. doi:10.4236/ijg.2014.56052
- Gambolati G, Teatini P, Tomasi L, Gonella M. (1999), "Coastline regression of the Romagna region, Italy, due to natural and anthropogenic land subsidence and sea level rise", *Water Resources Research*, 35(1): 163-184
- Macini P, Mesini E, Salomoni VA, Schrefler B.A. (2006), "Casing influence while measuring in situ reservoir compaction", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 50(1/16): 40-54
- Menin A, Salomoni VA, Santagiuliana R, Simoni L, Gens A, Schrefler B. (2008), "A mechanism contributing to subsidence above gas reservoirs and its application to a case study", *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 9: 270-287
- Schrefler BA, Ricceri G, Achilli V, Menin A, Salomoni VA. (2009a), "Ground displacement data

- around the city of Ravenna do not support uplifting Venice by water injection”, *Terra Nova*, 21(2): 144-150
- Schrefler BA, Ricceri G, Achilli V, Fabris M, Laloui L. (2009b), “Actual problems in the study of soil dynamics of the Upper Adriatic sea”, *Rendiconti online della Società Geologica Italiana*, 9: 63-66
- Stocchi P, Girometti L, Spada G, Anzidei M, Colleoni F. (2009), “Post glacial readjustment, sea level variations, subsidence and erosion along the Italian coasts”, *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, 50(2): 129-144
- Teatini P, Baù D, Gambolati G. (2000), “Water-gas Dynamics and Coastal Land Subsidence over Chioggia Mare Field, Northern Adriatic Sea”, *Hydrogeology Journal*, 8: 462-479
- Teatini P, Ferronato M, Gambolati G, Bertoni W, Gonella M. (2005), “A century of land subsidence in Ravenna Italy”, *Environmental Geology*, 47: 831-846
- Teatini P, Ferronato M, Gambolati G, Gonella M. (2006), “Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia–Romagna coastland, Italy: modeling the past occurrence and the future trend”, *Water Resources Research*, 42: W01406
- Tosi L, Teatini P, Strozzi T, Carbognin L, Brancolini G., Rizzetto F. (2010), “Ground surface dynamics in the northern Adriatic coastland over the last two decades”, *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 21(1): S115-S129