

## L'utilizzo del monitoraggio satellitare e di superficie per la mitigazione del rischio derivante da sprofondamenti di origine naturale e antropica

*Using satellite and surface monitoring to mitigate the risk deriving from natural and anthropogenic sinkholes*

PARISE M. (\*), CALÒ F. (\*\*), FORNARO G. (\*\*), ZENI G. (\*\*)

**RIASSUNTO** - I fenomeni di sprofondamento rappresentano i pericoli principali in aree carsiche, e risultano collegati alla presenza di cavità naturali e antropiche. Al fine di mitigare i rischi connessi agli sprofondamenti, l'identificazione di eventuali segni premonitori che possano precedere la fase catastrofica di collasso può risultare di estrema importanza. Il monitoraggio da telerilevamento e di superficie può essere utilizzato a tale fine: le tecniche di Interferometria Differenziale con Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR), in particolare, forniscono un valido supporto per investigare in via remota la suscettibilità da sprofondamenti a scala regionale.

In questo lavoro, l'approccio avanzato DInSAR noto come *Small Baseline Subset* (SBAS) è utilizzato per identificare e monitorare fenomeni di deformazioni del suolo nella Puglia meridionale. In particolare, un dataset di immagini SAR ENVISAT acquisite durante il periodo 2003-2010 è stato elaborato, consentendo di cartografare aree attive di deformazione superficiale, e di confrontare tali aree con l'effettiva occorrenza di sprofondamenti, con particolare riferimento a recenti eventi connessi a cave sotterranee.

**PAROLE CHIAVE:** sprofondamenti, DInSAR, pericolosità, monitoraggio, Puglia

**ABSTRACT** - Sinkholes represent the main hazards in karst areas, and are related to presence of natural and anthropogenic cavities. In order to mitigate the risk associated to sinkholes, identification of likely premonitory signs preceding the catastrophic phase of collapse may be extremely important. Remote sensing techniques and surface monitoring can be used at this aim: multi-pass space-borne Differential Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry (DInSAR), in particular, provides a valid support to remotely investigate the sinkhole susceptibility over wide areas.

In this work, the advanced DInSAR approach referred to as *Small Baseline Subset* (SBAS) is used for detecting and monitoring sinkhole deformation in southern Apulia. In particular, ENVISAT SAR data spanning the 2003-2010 period have been processed, allowing to map active areas of surface deformation, and to compare such areas with the real occurrence of sinkholes, with particular reference to some recent events related to underground quarries.

**KEY WORDS:** sinkholes, DInSAR, hazard, monitoring, Apulia

(\*) CNR-IRPI, Via Amendola 122-I, 70126 Bari; m.parise@ba.irpi.cnr.it

(\*\*) CNR-IREA, Napoli

## 1. - INTRODUZIONE

I fenomeni di sprofondamento (*sinkhole*) sono la tipologia di pericolo naturale maggiormente diffusa in ambiente carsico, essendo connessa alla presenza di rocce solubili (carbonati, evaporiti) interessate da fenomeni di dissoluzione (PARISE & GUNN, 2007; PARISE, 2008). A seconda della tipologia di sprofondamento (per le varie categorie si vedano la classifica di WALTHAM *et alii*, 2005, e la traduzione italiana di PARISE & FLOREA, 2008), lo sviluppo di *sinkhole* avviene in maniera lenta, o presenta una fase finale catastrofica (fig. 1), che può risultare estremamente pericolosa in termini di rischio derivante all'ambiente antropizzato (DE WAELE *et alii*, 2011; ZHOU & BECK, 2011). In aggiunta ai *sinkhole* di origine naturale, per presenza di cavità carsiche, vanno poi considerati quelli connessi ai vuoti realizzati dall'uomo nel sottosuolo, nel corso di varie epoche e per molteplici scopi. La notevole diffusione di cavità antropiche nel sottosuolo, specie in alcuni ambiti territoriali caratterizzati da presenza di rocce facilmente scavabili quali tufi vulcanici o calcareniti, fa sì che le aree a potenziale pericolo da *sinkhole* siano notevolmente aumentate, in particolare per quel che riguarda i settori urbani e/o periferici ai centri abitati (fig. 2).

Sia nel caso di origine naturale che artificiale, i *sinkhole* risultano diffusi in pressochè tutto il mondo, e provocano notevoli danni all'ambiente

antropizzato, talora anche causando vittime. In Italia, al pari di molti altri paesi, ai fenomeni di *sinkhole* spesso non è stata prestata la dovuta attenzione, poiché altri, ben più eclatanti, fenomeni naturali (ad es., frane, terremoti, alluvioni) attraggono l'interesse dell'opinione pubblica e degli enti di gestione del territorio. Ciò nonostante, i frequenti casi di *sinkhole* avvenuti in vari settori del paese nel corso degli ultimi 20 anni hanno suscitato grande attenzione, e un'intensa attività scientifica da parte di numerosi enti di ricerca, testimoniata ad esempio a livello nazionale dai due seminari dedicati all'argomento, organizzati dall'APAT nel 2004 e dall'ISPRA nel 2009 (AA.VV., 2004, 2009).

Nell'ambito dei pericoli naturali, l'Interferometria Differenziale SAR satellitare (DInSAR) rappresenta un utile strumento per la identificazione e il monitoraggio di deformazioni superficiali a differenti scale spaziali. Negli ultimi anni le tecniche interferometriche sono infatti state applicate per l'analisi di una vasta gamma di pericoli naturali (frane, vulcani, terremoti, ecc.). Sono invece estremamente scarse nella letteratura scientifica internazionale le applicazioni che riguardano ambienti carsici. In questa nota si descrivono i risultati preliminari dell'applicazione della tecnica avanzata SBAS-DInSAR al territorio carsico pugliese, al fine di comprendere le potenzialità di queste tecniche di telerilevamento nel rilevare la presenza di movimenti precursori nello stadio finale di fenomeni di *sinkhole*.



Fig. 1 - Esempi di sprofondamenti caratterizzati da diverse velocità di deformazione: a) lenti abbassamenti del suolo hanno prodotto la formazione di una blanda depressione sul terreno (*sinkhole* da dissoluzione, San Basile, Cosenza); b) a partire da dissesti in profondità, la propagazione verso l'alto dei fenomeni di rottura, sino al raggiungimento della superficie, ha determinato il collasso (*sinkhole* da collasso, Barletta).

- Examples of *sinkholes* with different velocity of deformation: a) slow lowering of the ground produced formation of a slight depression at the surface (*solution sinkhole*, San Basile, Cosenza); b) failures at depth, later stopping upward until reaching the ground surface, caused the final collapse (*collapse sinkhole*, Barletta).



Fig. 2 - Diffusi vuoti sotterranei di origine antropica al di sotto delle attuali città possono essere all'origine di pericoli per l'ambiente urbano (Massafra).  
 - The many underground voids excavated by men in different epochs, nowadays located below the present towns, may be at the origin of danger to the urban area (Massafra).

## 2. - EVENTI DI SPROFONDAMENTO NELL'AMBIENTE CARSICO DELLA REGIONE PUGLIA

Come accennato nell'introduzione, i fenomeni di *sinkhole* possono avvenire in relazione a cavità naturali, prodotte dal carsismo in rocce solubili, o antropiche, prodotte dall'uomo con varie finalità (acquedotti sotterranei, miniere e siti di attività estrattiva, cisterne, insediamenti, opifici, ecc.). La mancata conoscenza della distribuzione ed estensione di tali cavità nel sottosuolo, o la perdita di memoria della loro esistenza e localizzazione, rende possibile l'estensione dell'ambiente antropizzato, nonché delle infrastrutture e vie di comunicazione ad esso connesse, al di sopra dei vuoti ipogei, con possibilità di coinvolgimento diretto nel caso dell'occorrenza di eventi di *sinkhole* (fig. 3). Questi, infatti, pur originandosi nel sottosuolo, in genere per il degrado degli ammassi rocciosi e il conseguente sviluppo di superfici di rottura

all'interno degli ambienti ipogei, possono giungere sino in superficie a causa della propagazione dei meccanismi di rottura dal basso verso l'alto, così coinvolgendo direttamente tutto ciò che su di esse insiste in superficie (PARISE & LOLLINO, 2011).

La regione Puglia si presta particolarmente bene all'analisi dei *sinkhole*, per una serie di motivi:

- la prevalenza sul territorio regionale di rocce solubili, quindi interessate da fenomeni carsici, con sviluppo di cavità naturali (ne sono censite oltre 2000 nel Catasto Regionale a cura della Federazione Speleologica Pugliese);
- la notevole diffusione, per motivi storico-archeologici, nonché per caratteristiche geologiche, di cavità artificiali (attualmente ne sono catastate 1000, ma una stima più attendibile ne indicherebbe in regione almeno il triplo).

D'altra parte, analizzando nel dettaglio la successione cronologica di eventi documentati, si osserva un impressionante aumento di *sinkhole* in Puglia nel corso degli ultimi anni (FIORE & PARISE,



Fig. 3 - Il crollo della zona di accesso a una cava sotterranea presso Ginosa di Puglia ha tranciato parte della sede stradale e minacciato la palazzina visibile al margine destro della fotografia.

- Collapse of the access to an underground quarry at the outskirts of Ginosa di Puglia has destroyed a stretch of the province road, at the same time threatening the building visible at the right margin of the picture.

2013), il che evidenzia, da un lato, l'importanza del fenomeno e, dall'altra, la necessità di migliorare il livello di conoscenza, sia per quel che riguarda i meccanismi di formazione dei *sinkhole* nel sottosuolo e la successiva propagazione verso la superficie, che per quanto concerne le interazioni con l'antropizzato.

In particolare, dal 2006 ad oggi sono avvenuti circa una quindicina di casi di *sinkhole*, in gran parte connessi a cave sotterranee (PARISE, 2011 a). Tra questi, l'evento di Gallipoli del 29 marzo 2007 è certamente quello che ha suscitato maggiore preoccupazione, data la presenza di reti caveali ipogee direttamente al di sotto di un'area urbana. Analogamente, ad Altamura una serie di *sinkhole* avvenuti a partire dal 2006 ha evidenziato la presenza di una intricata e complessa rete di cave sotterranee al di sotto di una zona di espansione edilizia (MARTIMUCCI *et alii*, 2010; SPILOTRO *et alii*, 2010; PEPE *et alii*, 2013).

In Puglia, a tali situazioni si aggiungono le numerose grotte naturali, ad accesso verticale, originatesi per eventi di *sinkhole*, prevalentemente di tipo crollo, che sono denominate con termini diversi nelle varie aree della regione: da *pulo* a *gurgo* e *grave* nel Gargano e nelle Murge, a *vora*, *àviso* nel Salento (PARISE *et alii*, 2003).

È evidente che, in contesti territoriali così fortemente caratterizzati dalla presenza di vuoti sotterranei, appare prioritaria l'azione di ricerca ed esplorazione diretta da parte di esperti speleologi, al fine di individuare e cartografare le cavità sotterranee, allo stesso tempo evidenziandone i caratteri di eventuale instabilità. Nei casi in cui situazioni di pericolo, derivanti da rotture in atto o imminenti, siano acclerate, sarebbe poi necessario procedere a specifici monitoraggi per la comprensione dell'evoluzione dei fenomeni. Allo stesso tempo, è chiaro che costi e tempi richiesti da tali operazioni non sono di poco conto. Affiancare a

rilievi diretti, ed al monitoraggio nel sottosuolo e in superficie (fig. 4), ulteriori strumenti e tecniche risulta quindi indispensabile, anche al fine di ottimizzare i costi e garantire la massima risposta possibile in termini di risultati.

In particolare, per quel che riguarda la mitigazione del rischio da *sinkhole*, è certamente di interesse esplorare la possibilità di riconoscere e misurare segni premonitori della fase finale di collasso di *sinkhole* da crollo. A questo scopo, l'applicazione di tecniche DInSAR per l'analisi da remoto e il monitoraggio di tali fenomeni può risultare utile e produttivo, e probabilmente più efficace che per altri pericoli naturali. L'utilizzo dell'Interferometria Differenziale SAR a fenomeni di instabilità dei pendii, ad esempio, è reso particolarmente difficoltoso a causa di una serie di fattori, dalla presenza di copertura boschiva o di vegetazione, a pendenze elevate, a complessità

geomorfologica. Nel caso dei *sinkhole*, la situazione appare meno complicata, dato che tali fenomeni avvengono in genere in aree sub-pianeggianti o a debole pendenza, spesso su terreno nudo o in zone abitate. Tutti questi elementi dovrebbero concorrere a rendere più fattibile che in altri casi l'applicazione delle tecniche DInSAR.

### 3. - INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR (DInSAR)

L'Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) è una tecnica di telerilevamento a microonde, basata sulla elaborazione di dati acquisiti da sensori radar. A differenza di gran parte dei sistemi ottici, tali sensori sono di tipo attivo, quindi trasmettono un segnale elettromagnetico alla frequenza delle



Fig. 4 - Monitoraggio topografico (a) e all'interno di ambienti ipogei (b, c) per la verifica di una eventuale evoluzione dello sprofondamento e delle discontinuità nell'ammasso roccioso.

- Topographic (a) and underground (b, c) monitoring to verify the likely evolution of the sinkhole and the discontinuities in the rock mass.

microonde e ne ricevono il segnale retro diffuso, registrandone sia l'ampiezza sia la fase. La tecnica DInSAR si basa sull'analisi dell'informazione di fase; in particolare, nel suo approccio standard, essa sfrutta la differenza di fase tra due immagini SAR relative alla stessa area ma acquisite in tempi differenti durante passaggi ripetuti del satellite. Dalla valutazione di questa differenza di fase è possibile ottenere una stima accurata della deformazione della porzione di superficie terrestre oggetto di studio.

Le tecniche DInSAR multi-temporali si basano sull'elaborazione di datasets di immagini SAR, permettendo così di ottenere serie storiche di deformazione e, quindi, di seguire l'evoluzione temporale dei fenomeni analizzati. In particolare, la tecnica SBAS (*Small Baseline Subsets*, BERARDINO *et alii*, 2002) consiste nell'utilizzo di combinazioni opportune di interferogrammi, caratterizzati da piccola *baseline* spaziale e temporale, al fine di mitigare i possibili errori di decorrelazione e ottenere misure di deformazione con elevata accuratezza. La tecnica SBAS è stata applicata con successo a dati SAR a media risoluzione (i.e., quelli acquisiti dai sensori ERS e ENVISAT dell'Agenzia Spaziale Europea; LANARI *et alii*, 2004a; TIZZANI *et alii*, 2007), consentendo di produrre mappe di deformazione alla scala regionale (copertura areale di 100 km x 100 km e risoluzione spaziale di circa 100 m x 100 m), e serie temporali degli spostamenti. Sviluppi successivi della tecnica hanno consentito di effettuare analisi alla scala locale, producendo mappe di deformazione caratterizzate da elevate risoluzioni spaziali (circa 5 m x 20 m nel caso di immagini ERS ed ENVISAT) grazie alle quali è possibile investigare fenomeni defomativi localizzati che interessano il singolo edificio o la singola struttura antropica (LANARI *et alii*, 2004b). In questo lavoro, tuttavia, applichiamo la tecnica SBAS per l'analisi a scala regionale (i.e., a bassa risoluzione) e la tecnica di focalizzazione 4-D (spazio-velocità) per l'analisi a scala locale (i.e., ad alta risoluzione; FORNARO *et alii*, 2009). Tale tecnica, sfruttando sia l'ampiezza sia la fase del segnale SAR, consente di ottenere una robusta identificazione dei punti monitorabili ed elevate accuratezze nella localizzazione dei punti di misura.

### 3.1. - RISULTATI

L'analisi a doppia scala spaziale è stata condotta elaborando un dataset di 41 dati SAR ENVISAT (*track* 272, *frame* 801) acquisiti lungo l'orbita ascendente del satellite (da Sud verso Nord), in un intervallo temporale compreso tra marzo 2003 e maggio 2010. È stata prodotta, a scala regionale, una mappa di velocità e relative serie storiche di deformazione, da cui si evince che l'area in esame (il Salento) non è interessata da pattern regionali di deformazione superficiale (fig. 5). Successivamente, l'analisi ad alta risoluzione è stata eseguita su aree selezionate, al fine di ricavare maggiori dettagli sul comportamento spazio-temporale di fenomeni defomativi molto localizzati (fig. 6). In particolare, ci si è concentrati sulla zona meridionale della Puglia, la Penisola Salentina, dove sono ubicate due aree che, nel corso degli ultimi 15-20 anni, sono state interessate da eventi di *sinkhole*. Esse comprendono la città di Gallipoli, sede del su citato evento del 29 marzo 2007 in Via Firenze, e la zona a sud di Cutrofiano, fortemente interessata da *sinkhole* per la presenza di sistemi caveali sotterranei particolarmente estesi, che coprono lunghezze totali pari a diverse decine di chilometri, a profondità variabili tra un minimo di 7-10 metri nei pressi del centro abitato e un massimo di 40-45 metri nella zona più a sud (TONI, 1990; PARISE *et alii*, 2008; DE PASCALIS *et alii*, 2010). Si tratta di cave in materiale calcarenitico, il cui sviluppo è avvenuto essenzialmente al fine di sfruttare la risorsa lapidea come materiale da costruzione, allo stesso tempo salva-

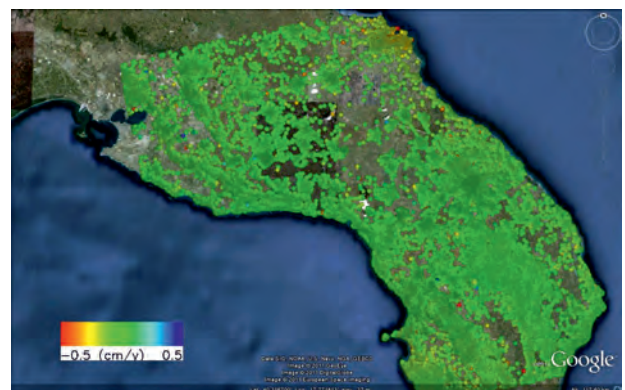


Fig. 5 - Mappa di velocità di deformazione a scala regionale relativa all'area del Salento, Puglia meridionale, ottenuta mediante elaborazione di immagini SAR ENVISAT acquisite in orbita ascendente (intervallo temporale: 2003-2010).  
- Ground deformation velocity map at regional scale relevant to the Salento area, Apulia region (ENVISAT ascending dataset, time interval 2003-2010).



Fig. 6 - Mappa di velocità di deformazione a scala locale relativa alla città di Gallipoli (LE), ottenuta mediante elaborazione di immagini SAR ENVISAT acquisite in orbita ascendente (intervallo temporale: 2003-2010).  
- Ground deformation velocity map at local scale relevant to the urbanized area of Gallipoli (ENVISAT ascending dataset, time interval 2003-2010).

guardando il suolo agricolo da coltivare (PARISE, 2011b). Una volta abbandonate, tali cave sono diventate luoghi in cui scaricare illegalmente rifiuti; ciò, congiuntamente allo sviluppo di fenomeni di degrado nell'ammasso roccioso calcarenitico, ha certamente contribuito alla formazione di superfici di rottura, con crolli e distacchi dalle volte e dalle pareti degli ambienti ipogei (PARISE & LOLLINO, 2011). In molti casi, l'evoluzione di questi fenomeni si è propagata verso l'alto sino a raggiungere la superficie, così determinando la formazione di *sinkhole* (fig. 7).

La figura 8 riporta un ingrandimento della mappa delle velocità di deformazione ad alta risoluzione per l'area di Gallipoli: si osservano fenomeni di subsidenza che interessano singoli edifici localizzati nella parte meridionale della città, il cui andamento nel tempo è stato analizzato attraverso la generazione di serie storiche di deformazione.

I risultati preliminari dimostrano l'efficacia delle tecniche interferometriche da satellite per l'analisi in remoto della distribuzione spaziale e della evoluzione temporale di fenomeni di deformazione superficiale.

Inoltre, la disponibilità di archivi di dati SAR acquisiti dai diversi sensori dell'Agenzia Spaziale Europea (ERS-1/2 e ENVISAT) dal 1992 al 2011 permette di analizzare fenomeni deformativi su ampi intervalli temporali, rendendo le tecniche DInSAR avanzate uno strumento potenzialmente utile al monitoraggio di *sinkhole*, alla comprensione della loro cinematica e alla identificazione di eventuali movimenti precursori che possono precedere il collasso catastrofico finale (almeno per ciò che riguarda i *sinkhole* da crollo; WALTHAM *et alii*, 2005).

#### 4. - PROSPETTIVE FUTURE

La ricerca descritta nel presente lavoro costituisce parte delle attività di un progetto indirizzato alla valutazione della pericolosità connessa a fenomeni di *sinkhole*, sia di origine naturale che antropica. Tra i principali obiettivi del progetto, vi è l'identificazione di eventuali segni premonitori che si verificano prima dell'occorrenza dei *sinkhole*, e il confronto tra le deformazioni superficiali osservate al terreno (fino al collasso finale) e nel sottosuolo con quelle misurate dal satellite.

L'analisi è consistita sino a questo momento nella produzione di mappe e serie temporali di deformazioni e nelle aree prese in esame. Tali cartografie sono al momento valutate criticamente, sulla base della conoscenza della distribuzione spaziale



Fig. 7 - Recenti eventi di sprofondamenti a Cutrofiano, a causa della presenza di cave sotterranee in calcarenite: a) 15 luglio 2008; b) Marzo 2010; c) Ottobre 2010 (foto G. Quarta).

- Recent events of *sinkholes* at Cutrofiano, due to presence of underground calcarenite quarries: a) July 15, 2008; b) March 2010; c) October 2010 (photo G. Quarta).

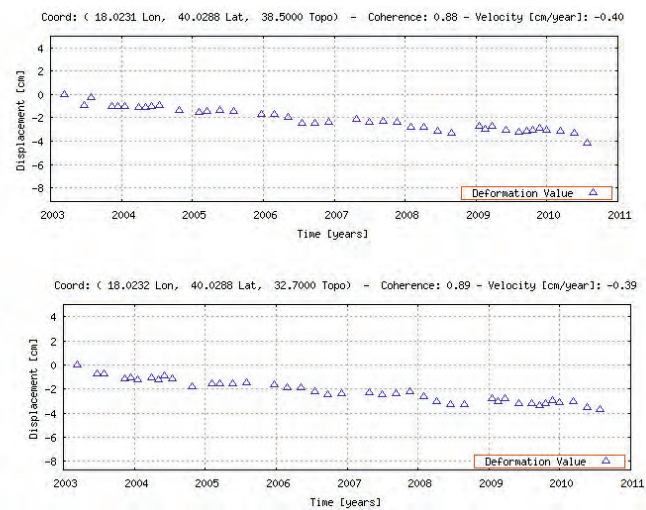


Fig. 8 - Mappa di velocità di deformazione a alta risoluzione relativa ad edifici affetti da subsidenza ubicati a sud della città di Gallipoli (LE), ed esempi di serie storiche di spostamento associate a due punti di misura.

- Zoomed view of the ground deformation velocity map at full spatial resolution, relevant to buildings located in the south of Gallipoli urban centre and displacement time-series relevant to two points significantly affected by deformation.

delle cavità sotterranee, e delle date di occorrenza dei fenomeni di *sinkhole*. A seguire questa prima valutazione, sarà possibile trarre alcune conclusioni sulla cinematica dei fenomeni. Allo stesso tempo, le ricerche sulla identificazione dei meccanismi di rottura, e della loro propagazione verso la superficie, sono in corso, anche per mezzo di modellazioni numeriche (LOLLINO *et alii*, 2004; PARISE & LOLLINO, 2011). Questa parte della ricerca verrà quindi combinata con i risultati delle analisi interferometriche, al fine di comprendere le capacità delle tecniche DInSAR avanzate per la predizione della fase catastrofica fase di evoluzione dei *sinkhole*, e quindi di valutare il loro utilizzo come strumento effettivo di Protezione Civile, sviluppando sistemi integrati di monitoraggio in aree a pericolosità di *sinkhole*, comprendenti dati di superficie, di sottosuolo e satellitari.

I risultati attesi forniranno utili indicazioni per lo sviluppo di procedure finalizzate all'utilizzo di dati telerilevati per la valutazione dei pericoli naturali e antropici, e la mitigazione dei rischi relativi.

#### RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato svolto nell'ambito delle attività del progetto "Application of interferometric techniques to the hazard assessment of *sinkholes*", all'interno del programma *Category-1 Project* della *European Space Agency* (Responsabile Scientifico: M. PARISE).

#### BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2004) – *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio*. Atti 1° Seminario, 20-21 maggio 2004, Roma, APAT.
- AA.VV. (2009) – *I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato*. Atti 2° Workshop Internazionale, 3-4 dicembre 2009, Roma, ISPRA.
- BERARDINO P., FORNARO G., LANARI R. & SANSOSTI E. (2002) - *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., **40** (11): 2375–2383.
- DELLE ROSE M., FEDERICO A. & PARISE M. (2004) - *Sinkhole genesis and evolution in Apulia, and their interrelations with the anthropogenic environment*. Natural Hazards and Earth System Sciences **4**: 747-755.
- DE PASCALIS A., DE PASCALIS F. & PARISE M. (2010) - *Genesi ed evoluzione di un sinkhole connesso a cavità antropiche sotterranee nel distretto estrattivo di Cutrofiano (prov. Lecce, Puglia)*. Atti 2° Workshop Int.: "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", Roma, 3-4 dicembre 2009: 703-718.
- DE WAELE J., GUTIERREZ F., PARISE M. & PLAN L. (2011) - *Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review*. Geomorphology, **134** (1-2): 1-8.
- FIORE A. & PARISE M. (2013) – *Cronologia degli eventi di sprofondamento in Puglia, con particolare riferimento alle interazioni con l'ambiente antropizzato*. Presente volume.
- FORNARO G., REALE D. & SERAFINO F. (2009) - *Four-Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., **47**: 224 – 237.
- LANARI R., LUNDGREN P., MANZO M. & CASU F. (2004a) -



- Satellite Radar Interferometry time series analysis of surface deformation for Los Angeles, California*. Geophysical Research Letters, **31**: L23613, doi:10.1029/2004GL021294.
- LANARI R., MORA O., MANUNTA M., MALLORQUÍ J., BERARDINO P. & SANSOSTI E. (2004b) - *A Small Baseline Approach for Investigating Deformations on Full resolution Differential SAR Interferograms*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **42**: 1377-1386.
- LOLLINO P., PARISE M. & REINA A. (2004) - *Numerical analysis of the behavior of a karst cavern at Castellana-Grotte, Italy*. Proc. 1<sup>st</sup> Int. UDEC/3DEC Symp., Bochum (Germany): 49-55, Baalkema.
- MARTIMUCCI V., RAGONE G., DENORA A. & CRISTALLO F. (2010) - *Le cave di tufo di Altamura – Prime relazioni e notizie sulle esplorazioni*. Atti XII Incontro Regionale di Speleologia: “Spelaion 07”, Altamura, 7-9 dicembre 2007: 91-102.
- PARISE M. (2008) - *Rock failures in karst*. In: Z. CHENG, J. ZHANG, Z. LI, F. WU & K. HO (Eds.), “*Landslides and Engineered Slopes*”. Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides, **1**: 275-280.
- PARISE M. (2010) - *Hazards in karst*. In: O. BONACCI (Ed.) “*Sustainability of the karst environment. Dinaric karst and other karst regions*”. IHP-UNESCO, Series on Groundwater no. 2: 155-162.
- PARISE M. (2011a) - *Sinkholes caused by underground quarries in Apulia, southern Italy*. 12<sup>th</sup> Multidisc. Conf. on Sinkholes and Engng. and Environ. Impacts of Karst, Saint Louis (Missouri, USA), Program with Abstracts: 23.
- PARISE M. (2011b) - *Alcune considerazioni sulle cave sotterranee in Puglia e sulle relative problematiche*. Opera Ipogea, **1/2**: 217-224.
- PARISE M. & GUNN J. (Eds.) (2007) - *Natural and anthropogenic hazards in karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation*, pp. 202, Geological Society, London, Special Publ. 279.
- PARISE M. & FLOREA L.J. (2008) - *I sinkholes nella letteratura scientifica internazionale: una breve rassegna, con particolare riferimento agli Stati Uniti d’America*. In: S. NISIO (Ed.) “*I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*”. Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **85**: 427-450.
- PARISE M. & LOLLINO P. (2011) - *A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy*. Geomorphology, **134** (1-2): 132-143.
- PARISE M., FEDERICO A., DELLE ROSE M. & SAMMARCO M. (2003) - *Karst terminology in Apulia (southern Italy)*. Acta Carsologica, **32** (2): 65-82.
- PARISE M., DE PASCALIS A., DE PASCALIS F., DONNO G. & INGUSCIO S. (2008) - *Cavit  sotterranee a fini estrattivi, e loro connessione con fenomeni di sprofondamento e subsidenza in agro di Cutrofiano (Lecce)*. Atti: “*Spelaion 2006*”, Borgo Celano: 55-69.
- PEPE P., GARZIANO G. & PARISE M. (2013) - *L’utilizzo delle tecniche GIS per la valutazione della suscettibilit  a sprofondamenti: il caso di studio di Altamura (BA)*. Presente volume.
- SPILOTRO G., SPECCHIO V., PEPE P. (2010) - *L’evento del 07.05.2007 di Via Barcellona, Altamura. Il contributo del CARS alle strategie d’intervento di valutazione del rischio connesso (Provincia di Bari, Puglia)*. Atti XII Incontro Regionale di Speleologia “Spelaion 07”, Altamura, 7-9 dicembre 2007: 103-107.
- TIZZANI P., BERARDINO P., CASU F., EUILLADES P., MANZO M., RICCIARDI G.P., ZENI G. & LANARI R. (2007) - *Surface deformation of Long Valley Caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach*. Remote Sensing of Environment, **108** (3): 277-289.
- TONI L. (1990) - *Le cave in sotterraneo di Cutrofiano*, pp. 125, Edizioni Del Grifo.
- WALTHAM T., BELL F. & CULSHAW M. (2005) - *Sinkholes and subsidence. Karst and cavernous rocks in engineering and construction*, pp. 382, Springer Praxis.
- ZHOU W. & BECK B.F. (2011) - *Engineering issues in karst*. In: P. VAN BEYNEN (Ed.), “*Karst Management*”. Springer: 9-45.