

## Interventi di mitigazione del rischio da sinkholes nell'area di Lesina marina (Provincia di Foggia, Italia)

### *Sinkhole Mitigation Risk Intervention in the Lesina Marina Area (Province of Foggia, Italy)*

---

CAPORALE F. (\*), DE VENUTO G. (\*\*),  
LEANDRO G. (\*), SPILOTRO G. (\*<sup>o</sup>)

RIASSUNTO - Tra la foce del F. Fortore e la Laguna di Lesina si colloca un geosito di particolare interesse per l'affioramento, unico su tutto il versante adriatico della penisola italiana, di rocce ignee associate a gessi, a calcari bituminosi e ad argilliti, contrassegnato dai toponimi Pietra Maura e Punta delle Pietre Nere. Questo complesso di rocce, con prevalenza di evaporiti, forma un duomo sepolto sotto terreni continentali e marini di spessore variabile da pochi metri a diverse decine di metri. Una serie di azioni antropiche si è concentrata proprio in quest'area a partire dal 1930, con la costruzione di un canale di collegamento della laguna con il mare e dal 1970 con l'inizio di un ampio insediamento turistico. Alla fine degli anni 1980 si fanno risalire le prime segnalazioni della presenza di sinkholes, caratterizzati da crateri nelle sabbie di copertura proseguiti in profondità fino ai gessi sottostanti. Negli anni successivi, il numero delle segnalazioni è aumentato e l'area è stata oggetto di numerosi studi da privati e pubblici, miranti alla comprensione delle cause dei fenomeni di instabilità e della loro propagazione, alla mappatura della pericolosità, alla definizione del rischio e degli interventi di mitigazione.

Gli studi e le modellazioni sulle fenomenologie in atto nel complesso scenario di Lesina Marina che vedono gli scriventi impegnati da diversi anni, hanno permesso di identificare e classificare i fenomeni di instabilità ed i principali fattori cui correlarli. Un ruolo di particolare rilevanza è svolto dal regime idrodinamico delle acque sotterranee, che si relazionano al complesso e variabile regime del canale Acquarotta.

Numerose, in alcuni casi discutibili, sono state le proposte di mitigazione elaborate, onde risulta particolarmente utile ed importante analizzare l'efficacia di un primo intervento finanziato e in buona parte eseguito.

Tale intervento realizza con tecniche ampiamente sperimentate di grouting l'attenuazione dell'interazione idrodinamica tra canale ed acquifero, agendo simultaneamente sulla permeabilità e la storatività dell'ammasso gessoso in una fascia prospiciente il canale. L'esito dell'intervento è valutabile attraverso almeno tre distinte metodologie: la variazione del comportamento idrodinamico dell'acquifero; la variazione della risposta elastica dell'ammasso; la sequenza della generazione di nuove fenomenologie, di attenuata virulenza ed in zone non trattate e/o marginali.

Il basso costo dell'intervento, in relazione all'elevata efficacia che offre, permette di candidarlo per il necessario completamento nella fascia lineare di bordo canale e quale intervento topico, in corrispondenza degli edifici e delle infrastrutture maggiormente esposte. La mitigazione potrebbe infine ricevere un affidabile contributo da monitoraggi con tecniche avanzate, quali l'interferometria differenziale e il rilevamento dei precursori vibrazionali in campo acustico (AE).

PAROLE CHIAVE: carsismo dei gessi, doline di soffusione, mitigazione del rischio, permeabilità, consolidamento con iniezioni

---

(\*) Dip. di Strutture, Geotecnica, Geologia Applicata – Università degli Studi della Basilicata. Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza – Italy

(\*\*) Politecnico di Bari

(<sup>o</sup>) giuseppe.spilotro@unibas.it

ABSTRACT - Punta delle Pietre Nere, NW of the Gargano promontory and of Lesina lagoon, is considered a particularly interesting geological site, being the only formation of igneous rocks on the entire Adriatic coast (the name actually translates as "black rocks"). About 60 million years ago these rocks came to the surface bringing together a gypsum dome of a diameter of about 2 km. These rocks, normally buried under a variable in thickness layer of continental and marine sands and outcropping only seaside, emerged in 1930, after the cutting of a wide channel, connecting the lagoon with the sea, with the mouth right at the head.

Since 1970 just this area was interested by an intense building program, with the development of a touristic settlement.

Since 1990, sinkhole phenomena have been noted on the sides of the canal; their marks on the surface evolve in clusters along well defined directions, ending close to the new building area.

Further studies have clarified the context and the causes of this instability phenomenon. It can be associated with the structure of the evaporitic rocks, a widespread presence of discontinuity and voids for violent tectonic shifts and the superimposition of a paleocarsism at different depths, corresponding to the different levels of the sea standing, the reactivation of karst phenomena and of suffusion processes triggered by the movement of groundwater, following the presence of the new channel.

More specifically, the groundwater regime is strictly connected to the complex sea-channel-lagoon system, defined by an inland flow towards the channel modulated by the tide with a variable width according the rules of a variable density coastal aquifer.

The channel has thus enhanced a new very complex hydraulic regime condition at the core of the area of maximum emersion of gypsum mass, characterized by velocity and direction of the water flow changing in every point and in the time.

Appropriate action in mitigating sinkhole risks in the area must first address the approach of the hydro-geological regime to its previous state before the digging of the channel.

The simple elimination of the channel cannot be effective, as 80 years of the new hydro-geological regime have seriously and irreversibly modified the rock mass structure, adding new enlargement of the fractures and of the palaeo cavities, thus modifying the permeability and the storage qualities of the evaporitic bedrock mass.

Therefore the contrast of the new karst evolution and of the suffusion phenomena have been taken into account by modifying the permeability and the storage capacity on the left side of the canal with the systematic filling-in of underground voids. As a result, a barrier has been established with a reduced permeability towards the channel.

Along the border of the area affected by sinkholes, close to the built-up zone, the voids have been filled through small diameter drillings to a depth of 28 m and with an average spacing of 6 m. Subsequently, the filling phase of the voids

and of the underground hollows was carried out by grouting in two stages, with rising pressure of specific mixtures. The filling phase was completed by grouting in a further series of borings arranged in staggered rows with respect to those of the first group.

The effects of the action carried out on the rock mass, previously evaluated by numerical models, have been verified through specific surveys in two significant areas; they have highlighted different hydraulic behavior in the aquifer and a notable reduction in underground voids, with a general decrease in gypsum mass permeability. The main consequence of the first attempt of mitigation of sinkhole risk has been the lack of new sinkholes in the protected area until now (February 2012).

KEY WORDS: Gypsum karst, suffusion sinkholes, risk mitigation, permeability, grouting

## 1. - INTRODUZIONE

L'area di interesse è situata a NW del promontorio del Gargano, tra la foce del F. Fortore e la Laguna di Lesina (fig. 1). Essa costituisce un geosito di particolare interesse per l'affioramento, unico su tutto il versante adriatico della penisola italiana, di rocce ignee associate a gessi, a calcari bituminosi e ad argilliti. Questo complesso di rocce, con la prevalenza delle evaporiti, forma un duomo sepolto sotto terreni continentali e marini di spessore variabile da pochi metri ad alcune decine di metri. Il duomo ha un'estensione per la parte indagata di circa 2 km<sup>2</sup> circostante l'affioramento.

Una serie di azioni antropiche si è concentrata proprio in quest'area a partire dal 1930, con la costruzione di un canale di collegamento della laguna con il mare (fig. 2), e intorno al 1970 con l'inizio di un ampio insediamento turistico (fig. 3).

Alla fine degli anni 1980 si fanno risalire le prime segnalazioni agli enti territoriali pubblici della presenza di sinkholes, caratterizzati da crateri nelle sabbie di copertura proseguiti in profondità fino ai gessi sottostanti. Negli anni successivi, le segnalazioni sono aumentate, ed è stato possibile monitorare l'evoluzione di alcuni dissesti.

L'area è stata oggetto di numerosi studi di privati e pubblici; si citano in particolare le indagini eseguite dal Genio Civile di Foggia (SPILOTRO & COVIELLO, 2000), dal Laboratorio di Geologia Applicata ed Ambientale dell'Università della Basili-



Fig. 1 - Localizzazione geografica dell'area di interesse da satellite (Google Earth). In giallo l'attuale connessione della laguna con il mare; in rosso il vecchio tracciato del canale Acquarotta; in verde i centri abitati di Lesina e di Lesina Marina.

- Localization on satellite image (Google Earth) of the study area. The current connection line between the lagoon and the sea is in yellow; the old track of the Acquarotta channel is in red; the urban areas of Lesina and Lesina Marina are in green.

cata (dal 2008 ad oggi), dall'AdB Puglia, e nell'ambito di un lotto di lavori per la mitigazione del rischio eseguiti a partire dal 2008.

Si dispone in particolare delle stratigrafie di oltre 50 sondaggi geognostici eseguiti con carotaggio continuo e successivamente attrezzati a piezometri, che hanno permesso la mappatura del bedrock evaporitico, e di indagini idrogeologiche e geofisiche. Le variazioni di estensione superficiale dei collassi carsici sono state rilevate con ordinari metodi topografici.

## 2. - I LUOGHI: L'AREA DI LESINA MARINA

Gli elementi caratterizzanti il sito in relazione alla sua evoluzione geologica e geomorfologica sono costituiti dal duomo salino di Punta delle Pietre Nere, messo in affioramento dallo scavo del ca-

nale Acquarotta, dalla piana alluvionale del F. Fortore a W, e dalla laguna di Lesina a Sud.

Le evaporiti del Gargano affiorano principalmente sotto forma di gessi. Ad essi sono associati calcari e rocce magmatiche. Tale materiale è ricoperto da depositi sabbiosi di alcuni metri dell'Olocene di ambiente marino e fluviolacustre (BONI *et alii*, 1969; MILONE, 2012).

Le rocce ignee intrusive sono inglobate nei gessi in diversi corpi e frammenti. Si tratta di melagabbri con subordinate porzioni ultramafiche (affioramento ad est del canale; età 59 My) e corpi melasienitici (affioramento ad W del canale, età 62 My). I calcari nerastrati sono intercalati a marne bituminose e calcari marnosi grigiastri, sottilmente stratificati, con fossili in ottimo stato di conservazione o piritizzati. Le rocce calcareo marnose vengono attribuite al Trias superiore, che è la stessa età dei gessi (BIGAZZI *et alii*, 1996; BONI, 1969;

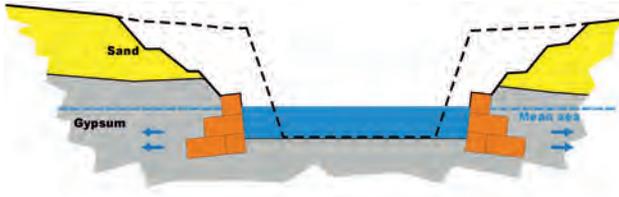


Fig. 2 - Sezione del canale Acquarotta nel tratto di attraversamento del duomo evaporitico, dopo i lavori di risagomatura del 1993.  
- Section of the Acquarotta channel in the evaporites, after the reshaping works in 1993.

MARTINIS & PIERI, 1964; POSENATO *et alii*, 1994).

I gessi si presentano con struttura microcristallina o in grossi cristalli, spesso geminati a forma di lancia. Talvolta la struttura è fluidale o zonata o listata a fasce diversamente colorate dal bianco al nerastro di spessore millimetrico o centimetrico, con intercalazioni argillose nerastre (RUSSO, 2008). L'ammasso è molto disturbato; la stratificazione è leggibile in alcuni punti di affioramento lungo il canale e definisce un assetto con immersione verso SW (215 – 265 N). L'affioramento lungo il canale Acquarotta ed il carotaggio dei sondaggi permettono di verificare la presenza di vuoti dell'ammasso gessoso determinati principalmente da deformazioni e distorsioni tettoniche dell'ammasso (fig. 4), o da paleo-carsismo, talora sovrapposto alle precedenti fenomenologie. Le cavità intercettate dai sondaggi o in affioramento lungo le sponde del canale appaiono spesso riempite totalmente o parzialmente da materiali provenienti dalle coperture incoerenti (fig. 5).

I gessi sono ricoperti a Nord da sabbie marine, interdigitale parzialmente verso SE con prevalenti depositi alluvionali e palustri. Questi ultimi affiorano decisamente sul tracciato dei vecchi rami del fiume Fortore, divaganti verso Est e sfocianti nel mar Adriatico o nella laguna, passando intorno al duomo salino.

La laguna è alimentata da oltre 20 piccoli corsi d'acqua che operano il drenaggio di superficie del settore NW del promontorio del Gargano, e da diverse sorgenti che drenano l'acquifero carbonatico del Gargano, con una portata complessiva di circa  $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nel 1927 cominciarono i lavori per realizzare tre connessioni stabili tra la laguna e il mare in corrispondenza del canale Acquarotta, della foce S. Andrea e della foce Schiapparo (S.A.I.M., 1930). Il canale Acquarotta, terminato nel 1930, rettificava un precedente tracciato quasi ad angolo retto (fig. 1), puntando per la foce in Adriatico sullo sperone roccioso di Punta delle Pietre Nere, con il dichiarato obiettivo di minimizzare i problemi dell'insabbiamento invernale della foce. In tal modo il canale attraversava diametralmente il duomo evaporitico, ma inseriva al suo interno dal punto di vista idrodinamico una linea a potenziale oscillante in prossimità del valore zero, secondo una complicatissima funzione della marea, del bilancio di massa nella laguna e nell'acquifero intersecato.

A partire dal 1970 si è attivata nell'area di interesse una forte pressione urbanistica a finalità tu-



Fig. 3 - Foto aeree multi temporali (1954, 2009) dell'area di Punta delle Pietre Nere con il nuovo insediamento di Lesina Marina.  
- Multi-temporal aerial photographs (1954, 2009) of "Punta delle Pietre Nere" area with the new built-up area of Lesina Marina.



Fig. 4 - Scompaginamento tettonico dei gessi sulla sponda destra del canale Acquarotta con formazione di ampie cavità.  
- *Tectonic disruption of gypsum rocks on the right side of the Acquarotta channel, shaping large cavities.*



Fig. 5 - Affioramento di gessi sulla sponda sinistra del canale Acquarotta. Intorno ai gessi prodotti sabbiosi di suffusione.  
- *Gypsum outcrop on the left side of the Acquarotta channel. Sandy products of suffusion are present around the gypsum rock.*

ristica, con la creazione di un denso tessuto residenziale esattamente al di sopra dell'area a più ridotta soggiacenza del bedrock evaporitico.

Le cattive condizioni di stabilità delle sponde del canale nel tratto di affioramento dei gessi portarono nel 1993 all'esecuzione di lavori di addolcimento delle scarpate e di inserimento di gabbioni quali rivestimento del bordo del canale (fig. 2).

### 3. - I PROBLEMI : IL CARSIAMO DEI GESSI E I SINKHOLES

L'ampia esposizione dei gessi sui fianchi del canale scavato a partire dal 1927 evidenzia unitamente ai caratteri strutturali degli stessi, anche la presenza di vuoti di ampie dimensioni, che si collocano tra le strutture geologiche dislocate, fortemente deformate e distorte. Tali cavità appaiono sia completamente aperte (fig. 4), sia riempite da materiali a granulometria eterogenea e prevalentemente sabbiosa (fig. 5), ma anche da argille e pacchetti di argilliti e materiali genericamente detritici. Anche i numerosi sondaggi eseguiti prevalentemente in corrispondenza delle aree urbanizzate o da urbanizzare hanno evidenziato, oltre che la morfologia del duomo salino (fig. 6), la presenza di cavità totalmente o parzialmente vuote, o intasate da prodotti di suffosione prevalentemente sabbiosi.

La distribuzione planimetrica delle cavità nell'ammasso apparentemente ha caratteri di sostanziale omogeneità, riconducibile alla pressoché omogenea distribuzione del disturbo tettonico ed a fasi paleo carsiche, correlabili con i diversi livelli di stazionamento del mare (LAMBECK *et alii*, 2004, CANORA *et alii*, 2010b, 2012b).

Il problema della fruibilità in sicurezza dell'area residenziale di Lesina Marina, evidenziatosi a partire almeno dagli anni '90, è tuttavia costituito dall'apertura di sinkholes, di diametro iniziale di pochi decimetri, ed evolventi successivamente sia per incremento del diametro (fino ad alcuni metri, fig. 7a), sia per la loro clusterizzazione (fig. 7b).

La fenomenologia si correla con la presenza di cavità sotterranee; tuttavia, mentre le cavità sotterranee sono distribuite in tutta l'area di rinvenimento dei gessi ed entro tutte le profondità investigate, lo

sviluppo dei sinkholes è strettamente limitato ad una fascia parallela al canale Acquarotta e sulle due sponde. In un solo caso un sinkhole è stato segnalato esternamente a quest'area; esso è tuttavia associato a una ben specifica problematica locale.

La ricerca delle cavità sotterranee, ritenute la causa dei fenomeni di sinkholes e della loro evoluzione è stata oggetto in più fasi di diversi tipi di indagini geofisiche, con risultati generalmente deludenti, in accordo con le scarse possibilità assegnate dalla letteratura a tali metodi, quando le cavità sono di modesta dimensione e riempite.

Risultati interessanti sono stati ottenuti da profili geoelettrici lungo il bordo del canale, eseguiti in bassa e alta marea, che hanno permesso di mappare la diversa penetrazione dell'acqua salata dal canale verso l'interno dell'ammasso.

L'anisotropia meccanica, confermata da rilievi strutturali, ha permesso di identificare le direzioni di massima permeabilità dell'ammasso, che sono quelle lungo le quali nella zona di indagine si allineano e clusterizzano i sinkholes.

Le segnalazioni di varia fonte e il monitoraggio dell'evoluzione di alcuni di questi sinkholes ha consentito di mappare la loro presenza ed evoluzione a partire dal 1999 (fig. 7); sulla base di tali dati si è potuto evidenziare una progressione di tipo esponenziale dell'evoluzione in superficie dei fenomeni almeno fino al 2009 (FIDELIBUS *et alii*, 2011).

### 4. - LE CAUSE: STATO DELLE CONOSCENZE

#### 4.1. - INDAGINI E STUDI

Numerose indagini sono state effettuate da privati interessati nell'attività edilizia e da enti pubblici, finalizzate alla individuazione di elementi utili alla identificazione, comprensione e soluzione del problema della generazione dei sinkholes nell'area. Premettendo che nella cultura locale il fenomeno risultava e risulta sconosciuto e genericamente attribuito a carsismo dei gessi, un decisivo passo avanti nella identificazione del problema avviene solo a fine 2009, con il contributo di alcuni esperti europei, che ricollocano nei rispettivi ambiti il car-



Fig. 6 - Isovalori del tetto del bedrock locale evaporitico.  
 - Isovalues of the top of the local evaporitic bedrock.

sismo dei gessi e il processo di formazione dei sinkholes (FIDELIBUS *et alii*, 2009, 2011). Numerose e costose indagini sono state ulteriormente indirizzate alla ricerca dei vuoti dei gessi, senza successo metodologico. Tra gli studi dedicati al problema di Lesina Marina, in considerazione dell'enorme interesse scientifico scaturente dalle peculiarità del-

l'area e della stretta interconnessione di aspetti diversi, si segnala una tesi dottorale (MILONE, 2012) ed una nel Dottorato in Scienze della Terra presso il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università della Basilicata, dedicate rispettivamente all'evoluzione sedimentaria dell'area ed alla mappatura della pericolosità da sinkholes. I fenomeni di insta-



Fig. 7 - Foto di sinkhole singolo (a) e di un sistema evoluto di sinkholes clusterizzati (b). - *Photograph of a single sinkhole (a) and of evolved clustered sinkholes (b).*

bilità dell'area costituiscono inoltre uno degli argomenti di ricerca delle UO del Progetto a Rilevanza Nazionale (PRIN) 2008 svolto in tre Università meridionali e presso il CNR ISSIA di Bari.

#### 4.2. - VARIAZIONI INDOTTE NEL SISTEMA IDROGEOLOGICO

Il sistema idrogeologico dell'area di interesse è quanto mai complesso per l'intersezione e sovrapposizione alla scala dei tempi geologici di ambienti di sedimentazione costiero, lagunare e di quello fluviale del F. Fortore, con attuale foce ad W del canale Acquarotta, ma che con divagazioni di piena generava due rami paralleli all'attuale linea di costa, a N ed a S dell'area di massima elevazione dei gessi, evidentemente separati dalla stessa.

Una modesta falda idrica di alimentazione meteorica defluiva verso la costa, intersecando quindi l'ammasso gessoso ed i termini di copertura e confinanti, di ambiente marino, alluvionale e lagunare.

Le ampie variazioni del sistema mare-laguna apportate con la realizzazione del canale Acquarotta hanno comportato profonde alterazioni del regime idrogeologico della falda, valutate e valutabili attraverso i risultati del monitoraggio idrogeologico e geochemico ed opportune modellazioni.

Le alterazioni del regime idrogeologico nell'area interessata dalla massima emergenza del duomo evaporitico sono relazionate al nuovo canale finito di costruire nel 1930, che lo attraversa in posizione quasi diametrica e che ha generato dal punto di vista idrodinamico: a - l'accorciamento dei percorsi di drenaggio, modificando direzione e velocità del flusso; b - ha introdotto un contorno oscillante a marea all'interno dell'ammasso evaporitico, producendo cicli giornalieri di variazione di velocità e persino di direzione di flusso all'interno dell'ammasso; c - come conseguenza dei primi due punti, l'acquifero stesso oscilla a marea, con variazioni di carico ulteriormente complicate dalla variazione di densità nei flussi di alta e bassa marea.

Le fluttuazioni periodiche del livello piezometrico indotte da un contorno oscillante in acquiferi confinati e non confinati sono state espresse attraverso un efficiente modello mono-dimensionale, definito modello tidale (JACOB, 1950; FERRIS, 1951;

TODD, 1980), il quale consente, nelle ipotesi assunte, la determinazione dei parametri idrologici dell'acquifero, trasmissività e storatività, attraverso l'oscillazione del livello della falda che varia di ampiezza e di fase con la distanza dal bordo oscillante (ERSKINE, 1991; TREFRY & BEKELE, 2004). Nel caso in esame, il problema è ulteriormente complicato dalla circostanza che il dominio delle acque sotterranee è occupato da liquidi a densità variabile nello spazio e nel tempo, in funzione della stessa variazione tidale, come peraltro è tipico negli acquiferi costieri.

Una discussione di maggiore dettaglio sull'impostazione e i risultati degli studi effettuati sul sistema idrogeologico di Lesina Marina e sulle sue variazioni a seguito dell'apertura del canale Acquarotta è riportato in CANORA *et alii*, 2010a.

Nella figura 9 è riportata una mappa della superficie piezometrica, da rilievi antecedenti all'esecuzione dei lavori di mitigazione; in figura 10 sono riportate le misure del livello del mare e di quello della laguna con le oscillazioni giornaliere, relative al periodo tra luglio 2010 e agosto 2011 e il diagramma della variazione tidale istantanea nell'arco di un mese (fig. 11). Le elaborazioni, stante la complessità della decodifica dei carichi per effetto della variazione di densità associata con l'oscillazione tidale, è riferita ai valori strumentali istantanei.

Nei precedenti lavori citati (CANORA *et alii*, 2010a; FIDELIBUS *et alii*, 2011) è stato ampiamente evidenziato il risultato di dati sperimentali e delle modellazioni relativo all'oscillazione impressa dal bordo oscillante alle acque sotterranee, in funzione della distanza dalla forzante e di parametri idrodinamici. In particolare, il plot dell'efficienza tidale  $T_e$  in funzione della distanza dal canale Acquarotta posiziona la forzante esattamente in corrispondenza del canale (fig. 12). Modellazioni hanno permesso, inoltre, di verificare come la presenza del canale abbia amplificato l'oscillazione di marea di 62 volte a 30 m, di 46 volte a 120 m e di 14 volte a ben 370 m dal canale stesso.

Le variazioni risultano invece da modello e da indagini poco rilevanti o irrilevanti in altre aree, nelle quali i gessi sono a maggiori profondità e le coperture sono costituite da terreni alluvionali o palustri a permeabilità minori di quelle delle sabbie marine.

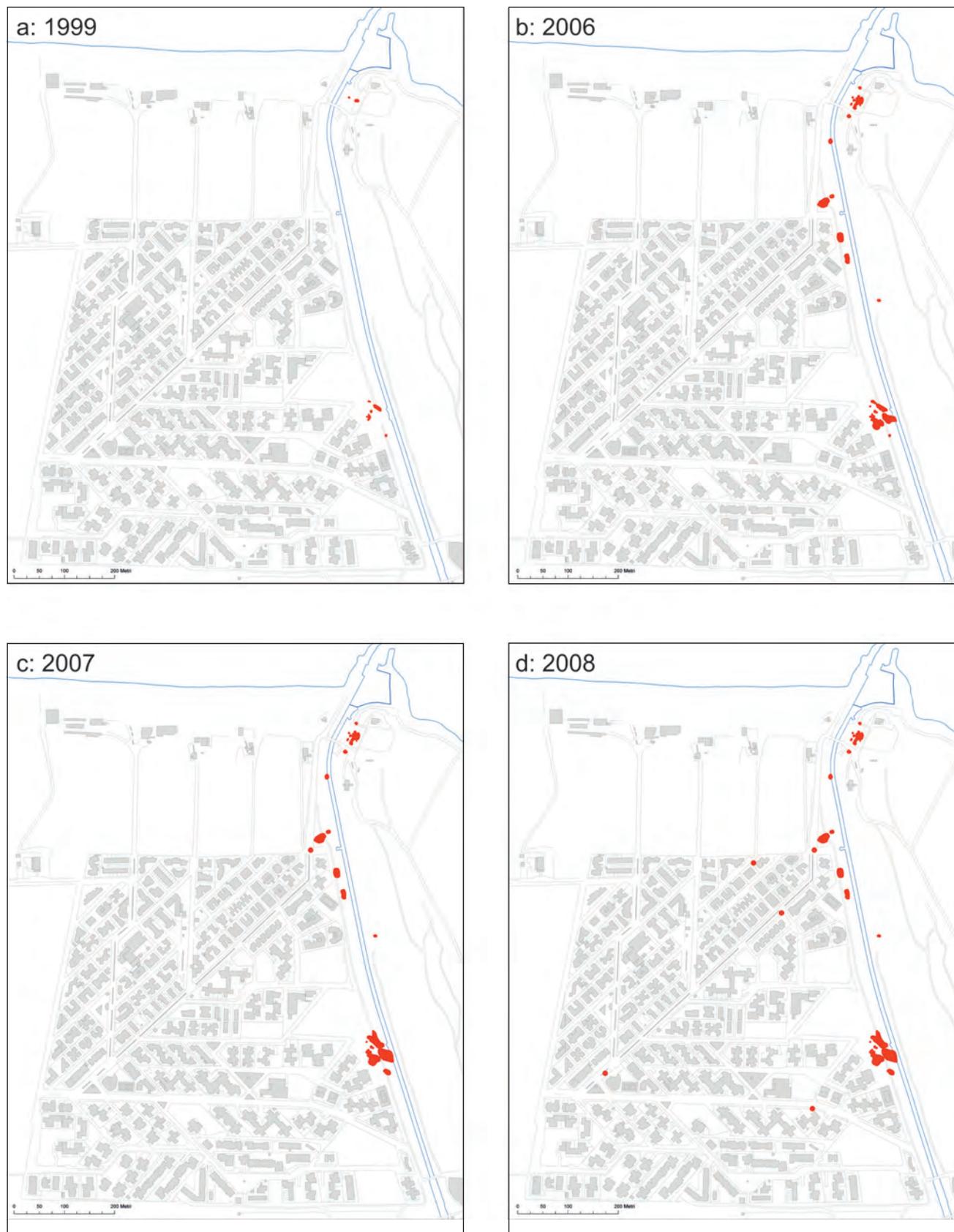


Fig. 8 - Generazione ed evoluzione multitemporale dei sinkholes nell'area di Lesina Marina nel periodo antecedente all'esecuzione dei primi lavori di mitigazione del rischio. a: 1999; b: 2006; c: 2007; d: 2008.

- Multi-temporal generation and evolution of sinkholes in Lesina Marina area before running the first risk mitigation measures. a: 1999; b: 2006; c: 2007; d: 2008.

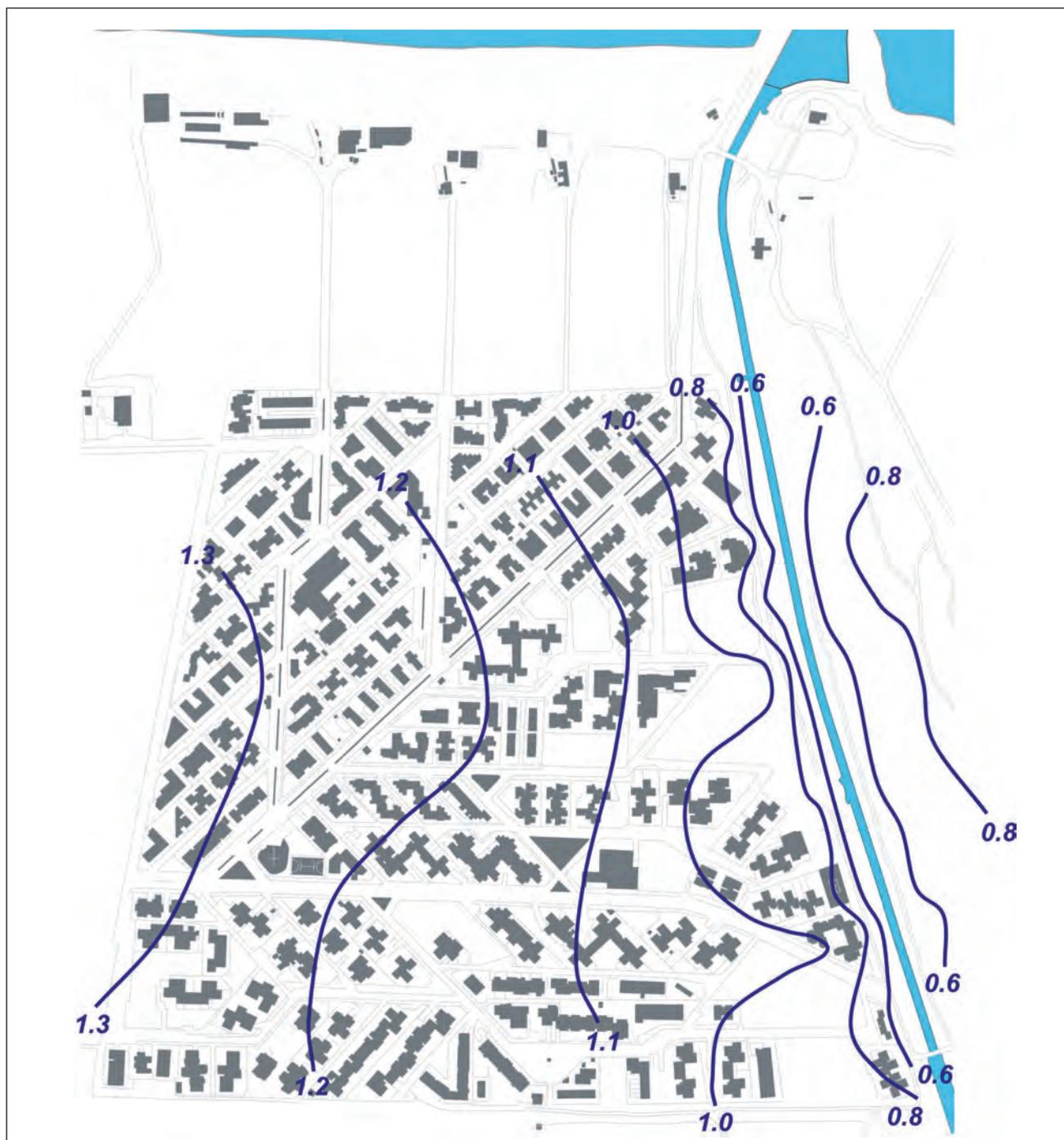


Fig. 9 - Isovalori della superficie piezometrica.  
 - Isovalues of the piezometric surface.

## 5. - PERICOLOSITÀ DA SINKHOLES E IMPOSTAZIONE DELLA MITIGAZIONE DEL RISCHIO

Gli studi eseguiti e resi disponibili al presente consentono di ricostruire con sufficiente precisione l'aspetto stratigrafico e strutturale dell'area

di Lesina Marina e dintorni, dell'idrodinamica della falda e della sua complessità in relazione al contorno marino, al regime nella vicina laguna e nel canale di connessione della laguna con il mare, alle variazioni di carico, di conducibilità e di densità indotte all'interno dell'ammasso gessoso. Tali studi, per alcuni aspetti ancora in progresso, hanno con-

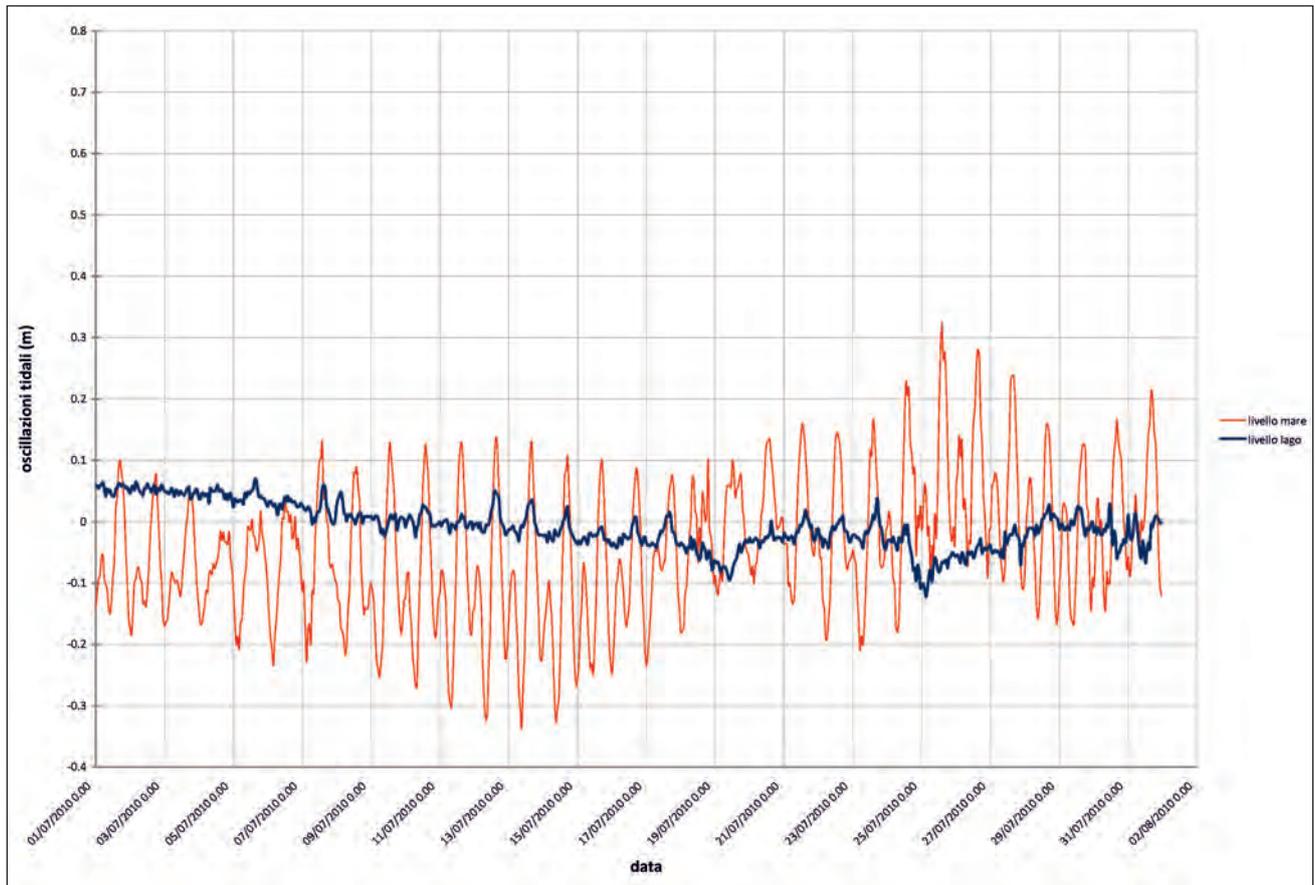


Fig. 10 - RegISTRAZIONI delle variazioni del livello mare e delle corrispondenti oscillazioni in laguna (periodo 01/07/10 - 02/08/10).  
 - Recording of sea level oscillations and of corresponding fluctuation of the lagoon (period 10/07/01 - 10/08/02).

sentito anche di assegnare gli specifici ruoli al paleo e neo carsismo dell'ammasso evaporitico, ai vuoti di altra origine ed al meccanismo di formazione e sviluppo dei sinkholes nel contesto precedente.

Ulteriori studi in corso (CANORA *et alii*, 2012a) stanno focalizzando la mappatura della pericolosità da suffosion sinkholes, definita attraverso 9 piani tematici ricostruibili sulla base dei dati disponibili e validata grazie ad una dettagliata conoscenza della formazione ed evoluzione nel tempo dei fenomeni stessi. Il fattore principale nella definizione di pericolosità è assegnato all'interazione tra il movimento delle acque sotterranee nello specifico contesto stratigrafico ed i terreni incoerenti di copertura e riempimento.

In considerazione della sovrapposizione sia pure parziale sulle aree affette da massima pericolosità con aree intensamente costruite e particolarmente frequentate durante la stagione estiva, si determinano condizioni permanenti di rischio, che

necessitano di provvedimenti di mitigazione attraverso la riduzione dell'esposizione, ovvero attraverso la riduzione della pericolosità.

La prima opzione, modificazione dell'esposizione, è stata ipotizzata dai vertici amministrativi regionali, attraverso uno scenario di delocalizzazione dell'abitato o di una sua parte. Il conseguimento della riduzione del rischio comporterebbe in tal caso la salvaguardia di possibili danni fisici alle persone, ma non dell'ingente patrimonio edilizio ed infrastrutturale ormai esistente, con conseguenze ambientali, paesaggistiche ed economiche tremende.

La seconda opzione, riduzione della pericolosità, può essere conseguita eliminando o riducendo gli effetti della forzante idrodinamica introdotta dal canale Acquarotta più di 80 anni fa.

L'eliminazione del canale, altra soluzione proposta e preliminarmente presa in considerazione, alla luce delle conoscenze attuali, purtroppo non

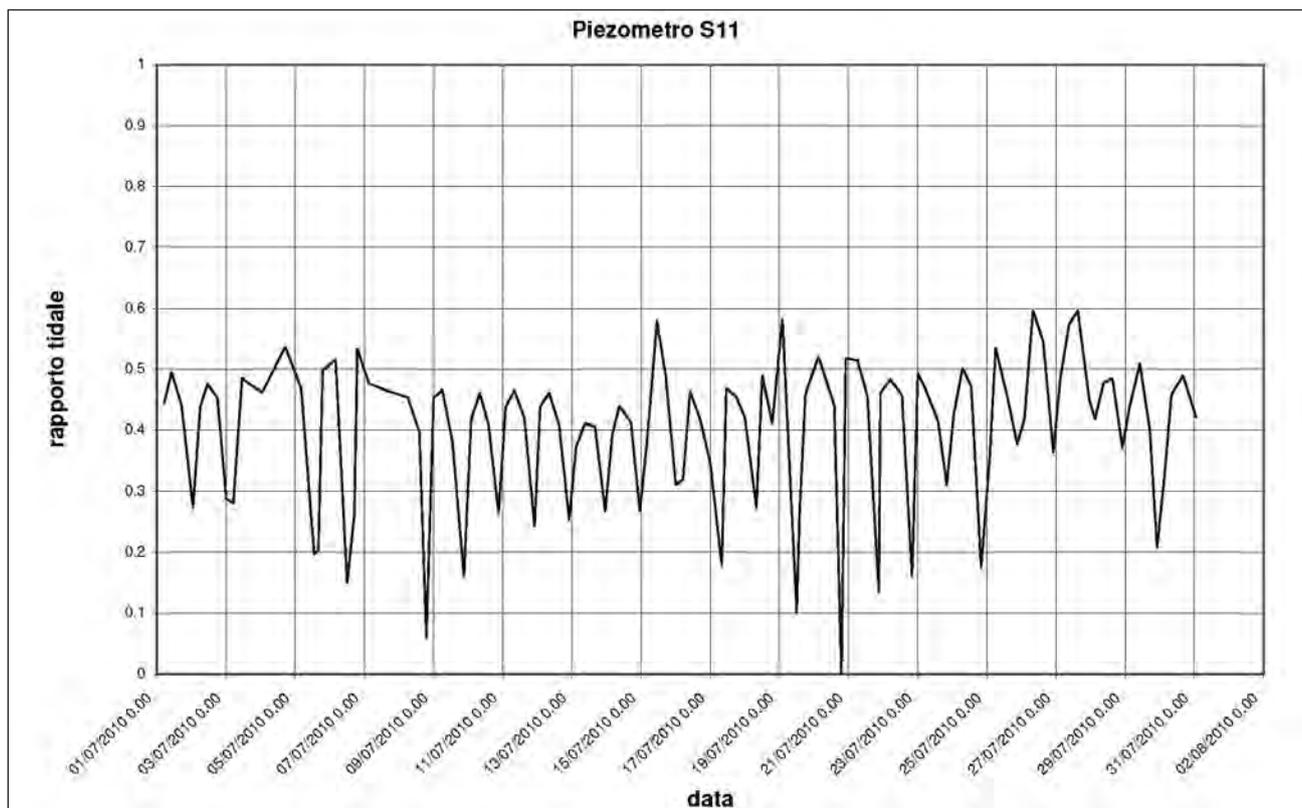


Fig. 11 - Plot mensile del rapporto tidale strumentale istantaneo (Pz 11b).  
 - Monthly plot of instantaneous instrumental tidal ratio (Pz 11b).

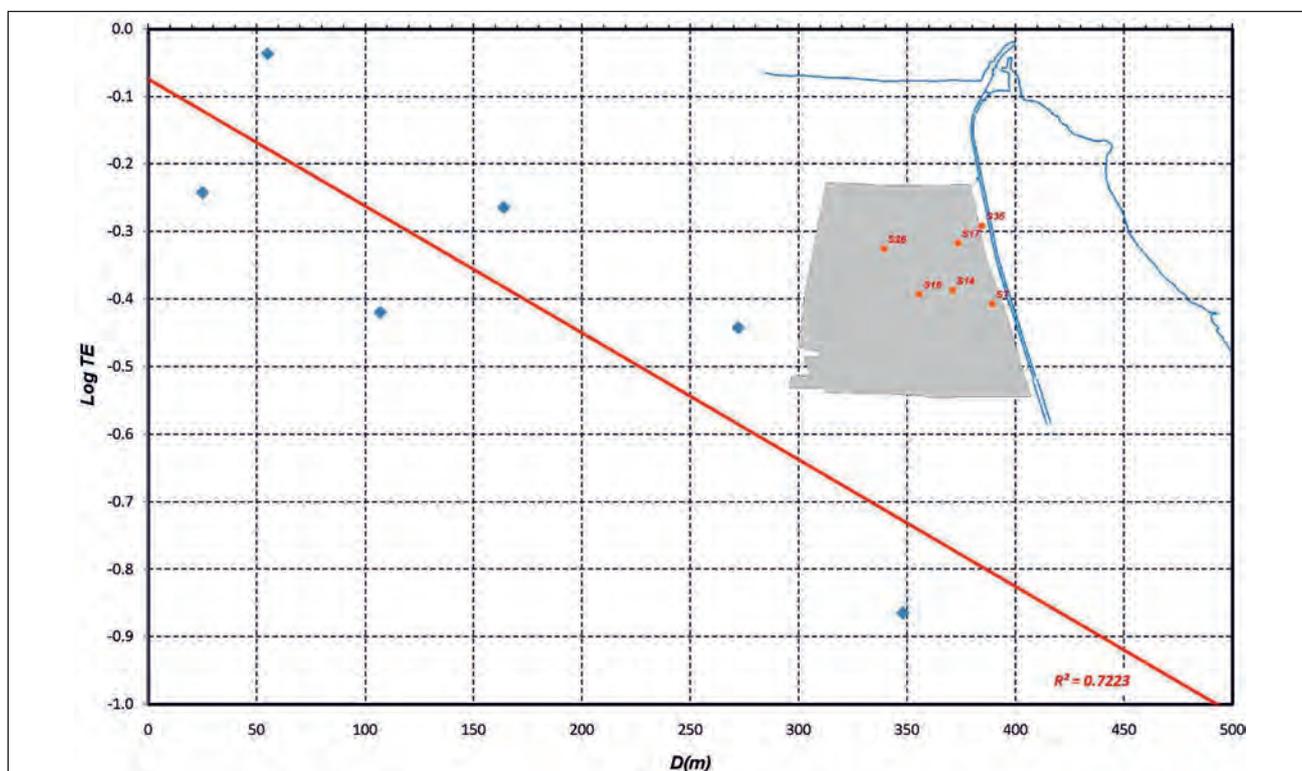


Fig. 12 - Plot dell'efficienza tidale in funzione della distanza dal canale Acquarotta. La retta di tendenza incrocia l'asse delle ascisse (distanza dal bordo oscillante) a breve distanza dall'origine, posta in corrispondenza del canale, confermandovi la posizione della forzante oscillante.

- Plot of the tidal efficiency vs the distance from the Acquarotta channel. The abscissa of the intersection of the trend line with the x-axis is the distance from the oscillating edge. In this case, the intersection is near the axis origin, corresponding with the channel distance, confirming the channel as main oscillating strength.

si identifica con l'eliminazione della forzante idrodinamica introdotta. Questa richiederebbe infatti il ripristino delle condizioni antecedenti alla costruzione del canale in termini di permeabilità e storatività dell'ammasso evaporitico e della sua copertura, drammaticamente e imprevedibilmente variate nel corso dei decenni trascorsi in particolare nella parte sottostante e circostante all'area di scavo, in ragione dei processi di soluzione della roccia e di dilavamento dei sedimenti fluitati, processi entrambi riattivati con particolare intensità negli ultimi 80 anni. Tale operazione è quindi tecnicamente irrealizzabile in ragione delle aree e dei volumi coinvolti, a meno di costi improponibili per l'acquisizione di una ragionevole efficienza.

La seconda opzione può invece essere significativamente realizzata attraverso l'opportuna variazione dei parametri idrologici che governano l'interazione idrodinamica tra acque sotterranee e le rocce in sito, associata al monitoraggio dei terreni e dei manufatti nelle fasce ad alta pericolosità.

I parametri prima richiamati sono la trasmissività e la storatività dell'acquifero; una loro modifica è concettualmente possibile con azioni di intasamento dei vuoti determinati dalle deformazioni tettoniche dell'ammasso gessoso e dal paleo carsismo, mediante tecniche opportune e riduzione della mobilità dei sedimenti incapsulati in essi. L'azione può essere disposta sia su allineamenti paralleli al canale per l'intera fascia prospiciente l'area edificata, sia ripetuta localmente in corrispondenza dei manufatti maggiormente esposti.

Una significativa mitigazione può essere conseguita anche attraverso il monitoraggio degli spostamenti verticali in superficie e l'acquisizione di mappe periodiche di spostamenti in superficie, ormai non più sperimentali attraverso l'uso di diffrattometria SAR, con l'ausilio di *corner reflectors* integrativi e posizionati nelle aree di maggior rilevanza dell'esposizione. Proprio nell'area di Lesina Marina il DinSar ha messo in evidenza un movimento di sollevamento di lungo periodo dell'area (REFICE *et alii*, 2011). Altre tecniche di monitoraggio risultano molto utili, quali il rilevamento dell'AE (emissione acustica), nel segnalare le fasi preparatorie di fenomeni di instabilità.

## 6. - IL PROGETTO E LE VERIFICHE

### 6.1. - IL PROGETTO

In ragione dei fenomeni che hanno afflitto l'area con intensità crescente a partire dagli anni 90, la Regione Puglia finanziò nel 2003 un primo progetto per "la messa in sicurezza dell'area di Marina di Lesina" dell'importo complessivo di circa 3.5 milioni di euro.

L'affidamento dell'attività di progettazione avviene nel 2005 e il suo completamento, con il conseguimento di tutti i pareri favorevoli e delle autorizzazioni necessarie, a seguito anche di procedura di Valutazione di Impatto Ambientale e la validazione da soggetto certificato a ciò, avviene nel 2008. Il progetto va in esecuzione nel periodo tra fine 2008 ed il 2009. Una Perizia di Variante per impegnare somme residue nelle stesse lavorazioni è inspiegabilmente ferma da allora.

Il progetto, ancorché precedente al completamento di alcuni degli studi prima esposti, ne anticipava le conclusioni in termini di mitigazione, mirando al conseguimento dell'interdizione all'interazione idrodinamica tra acque sotterranee ed ammasso roccioso, mediante interventi di intasamento e consolidamento dello stesso ammasso. L'obiettivo veniva conseguito attraverso la realizzazione di perforazioni di piccolo diametro e lunghezza di 28 m ed iniezioni a bassa pressione di miscele intasanti. La tecnica ed i materiali corrispondono a standard esecutivi utilizzati in analoghi problemi di dewatering frequenti nelle aree costiere e in particolare, pugliesi. Nel periodo di lavorazione sono state eseguite 630 perforazioni (fig. 13) ed iniettati poco meno di 7000 m<sup>3</sup> di miscele a base di acqua e cemento.

### 6.2. - VERIFICHE DI EFFICIENZA DEGLI INTERENTI DI MITIGAZIONE

Ribadendo che obiettivo dell'intervento progettato mirava alla messa in sicurezza dell'area, ma che le somme a disposizione non consentivano di coprire l'intero fronte del canale Acquarotta, la valutazione dell'efficacia dell'intervento eseguito, assistita da corretti livelli di oggettività e da adeguate



Fig. 13 - Distribuzione planimetrica delle perforazioni di iniezione eseguite nell'area di Lesina Marina prospiciente il canale. Le aree colorate in rosa corrispondono all'inviluppo dei cluster di espansione dei sinkholes.  
- Spatial distribution of the groutings performed in the Lesina Marina area near the left border of the channel. The pink colored areas correspond to the envelope of the expanding clusters of the sinkholes.

conoscenze tecniche, risulta di rilevante interesse ai fini della individuazione e proposizione di interventi sostenibili e non fantasiosi di mitigazione del rischio da sinkholes nell'area di Lesina Marina.

Numerosi sono gli spunti di verifica sostanzialmente positivi disponibili, riconducibili alla variata dinamica evolutiva delle fenomenologie di sinkholes, alla variata consistenza dell'ammasso trattato ed alla sostanziale differente risposta idrodinamica dell'acquifero costiero.

Nei vari riquadri la figura 8 riporta l'evoluzione dei sinkholes in termini di apparizione e variazione di intensità (allargamento e clusterizzazione) così come rilevate in date diverse prima e successivamente all'intervento parziale di intasamento. Le fenomenologie rilevate dopo l'esecuzione dei lavori sono esterne o perimetrali all'area trattata (fig. 14) o rientrano, in un solo caso, nelle aree già destrutturate dai precedenti fenomeni. Ricordando l'evoluzione esponenziale

assunta precedentemente dai fenomeni (CANORA *et alii*, 2010a), già questa prima valutazione è da considerare estremamente positiva.

La variazione di consistenza dell'ammasso è stata verificata attraverso una sismica a scansione radiale con disposizione di 8 geofoni per ogni diametro. I diagrammi di figura 15 riportano i dati relativi al 2006, 3 anni prima dell'intervento, ed in figura 16 quelli successivi all'intervento con la stessa tecnica e nella stessa posizione. L'indagine verifica e quantifica il miglioramento della risposta elastica dell'ammasso conseguente agli intasamenti; verifica e quantifica inoltre anche l'attenuazione dell'anisotropia di conducibilità delle onde p (fig. 17), precedente all'intervento (SPILOTRO *et alii*, 2009).

Il terzo livello di verifica è affidato alla variazione della risposta idrodinamica dell'ammasso circostante il canale alle oscillazioni di marea. Si presentano i dati relativi a due sezioni (fig. 18), una grosso modo in asse all'intervento eseguito, la se-



Fig. 14 - Posizione planimetrica dei sinkholes aperti nel 2010 e 2011, dopo l'esecuzione dei primi lavori di mitigazione del rischio. La posizione è esterna o periferica rispetto alle aree trattate.

- Location of sinkholes collapsed in 2010 and 2011, after the completion of the first works for risk mitigation. The location of the new sinkholes is external or peripheral to the grouted areas.

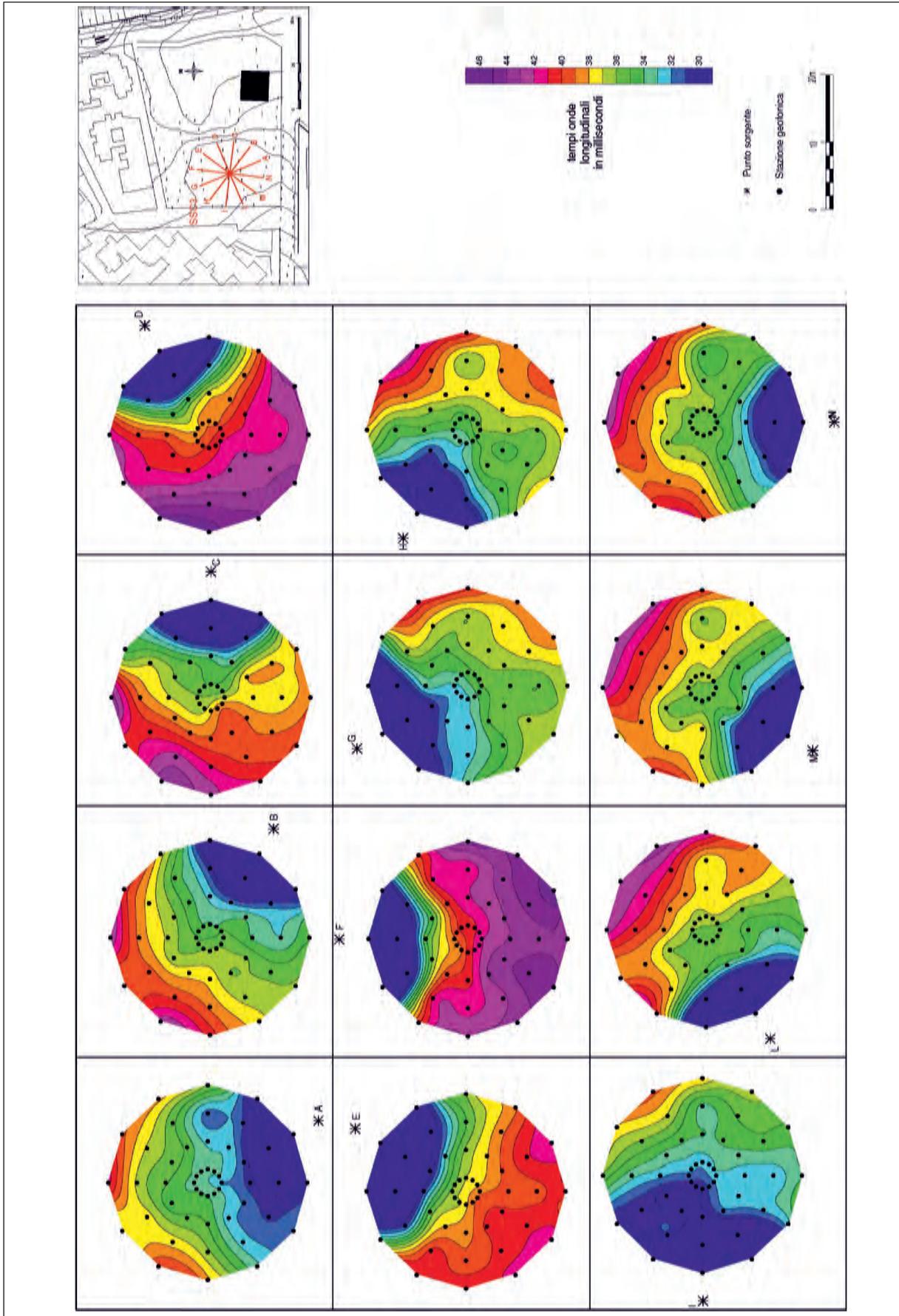


Fig. 15 - Indagini geofisiche con sismica a rifrazione e scansione radiale (febbraio 2006). a: stralcio planimetrico della postazione; b: diagrammi polari delle velocità delle onde longitudinali per ogni variazione radiale del punto sorgente.  
 - *Geophysical surveys consisting in radial scanning by means of seismic refraction profiles (February 2006); a) location of the investigated area; b) polar plots of velocity of longitudinal waves for each radial variation of source position.*

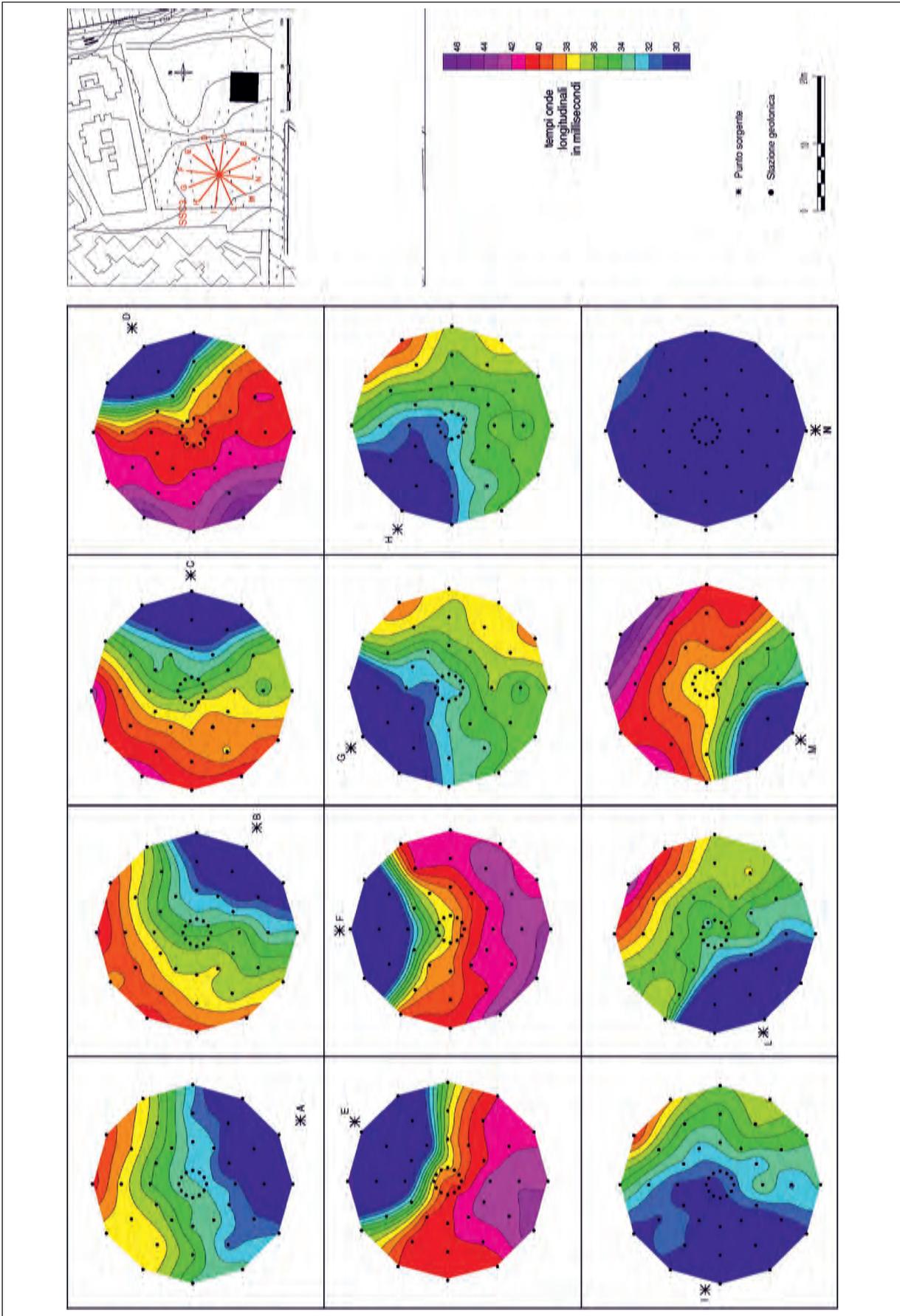


Fig. 16 - Indagini geofisiche con sismica a rifrazione e scansione radiale (aprile 2010). a: stralcio planimetrico della postazione; b: diagrammi polari delle onde longitudinali per ogni variazione radiale del punto sorgente.

- Geophysical surveys consisting in radial scanning by means of seismic refraction profiles (April 2010); a) location of the investigated area; b) polar plots of velocity of longitudinal waves for each radial variation of source position.

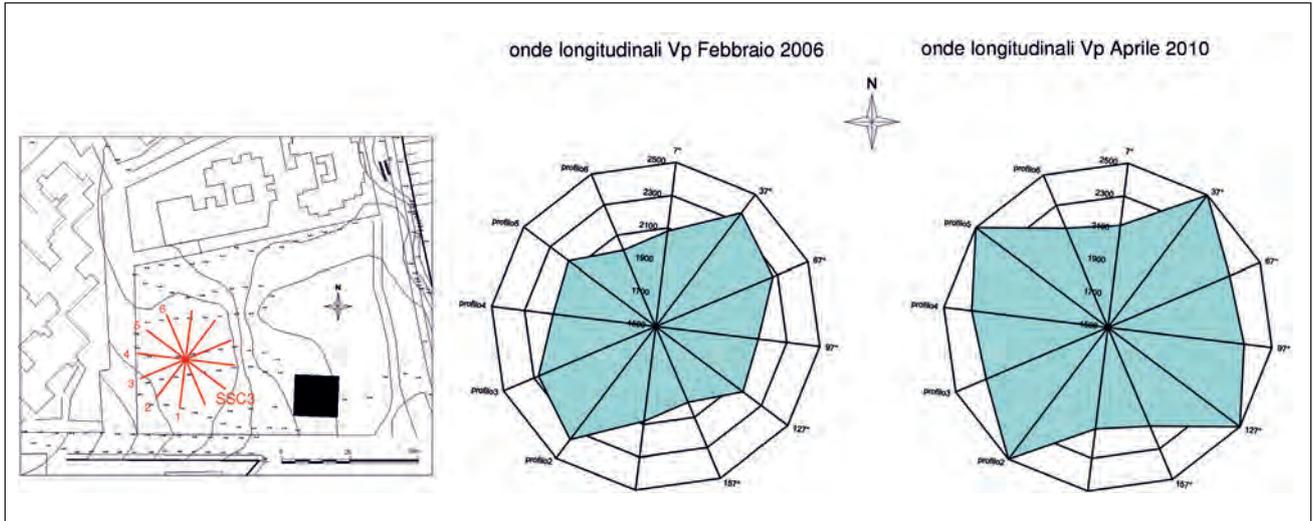


Fig. 17 - Indagini geofisiche con sismica a rifrazione e scansione radiale con rilevamento perimetrale e generazione nel punto centrale. A confronto i risultati dell'indagine 2006 e 2010, quest'ultima successiva all'esecuzione dei primi lavori di mitigazione. a: stralcio planimetrico della postazione; b: diagrammi polari delle velocità longitudinali del 2006 e del 2010.

- Geophysical surveys consisting in radial scanning by means of seismic refraction with central source and perimetric detection. Comparison between the results of 2006 and those of 2010, the latter after the execution of the first mitigation works; a) location of the investigated area; b) polar plots of longitudinal velocity of 2006 and 2010.

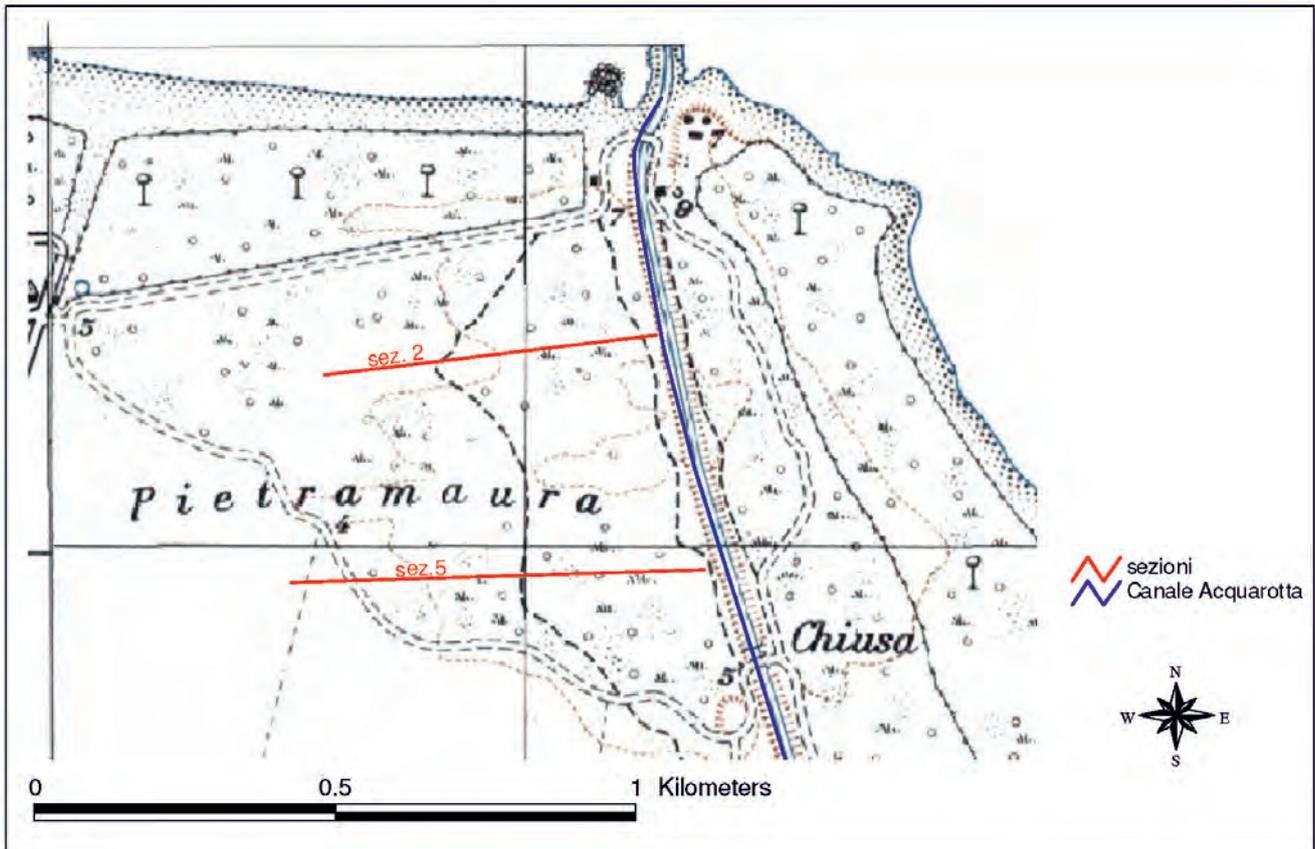


Fig. 18 - Stralcio planimetrico con traccia delle sezioni (sez. 2, in asse all'intervento di mitigazione; sez. 5, esterna all'area di intervento) lungo le quali si è proceduto alla valutazione della variazione dei valori dell'efficienza tidale.

- Map with the track of the two sections along which the variations of the tidal efficiency values were evaluated: section 2, in the middle of the grouted area; section 5, well outside the grouted area.

conda (sez. 5), decisamente esterna. Nei diagrammi (figg. 19, 20) sono riportati punti di controllo istituiti prima e dopo l'intervento. I dati disponibili evidenziano sostanziali e certo non casuali variazioni del trend dell'efficienza tidale in funzione della distanza dal canale Acquarotta. In particolare, nella sez. 2 la linea di tendenza del rapporto tidale a seguito dei lavori sposta la sua origine dall'ascissa del canale, portandola a distanza notevolmente maggiore. Ciò significa, tenendo ben presenti le condizioni di applicabilità del modello, che l'effetto del bordo oscillante costituito dal canale risulta significativamente attenuato. Questa variazione di comportamento non si legge invece nella sez. 5, abbondantemente lontana dall'area del trattamento.

## 7. - CONCLUSIONI

Le ineguagliabili valenze ambientali dell'area posta tra la foce del F. Fortore, il bordo W del

promontorio del Gargano, la laguna di Lesina e il non casuale toponimo di Punta delle Pietre Nere hanno inevitabilmente attirato a partire dagli anni 70 un considerevole insediamento turistico denominato Lesina Marina. Tale insediamento nasce sul bordo sinistro di un canale di recente costruzione (1930) per il collegamento stabile della laguna con il mare, che taglia, proprio in sua corrispondenza, un duomo di gessi fortemente tettonizzati, associati ad altre rocce. A partire dagli anni 90 ripetute fenomenologie di sinkholes sul bordo del canale fanno partire studi, miranti alla comprensione delle cause dei fenomeni di instabilità e della loro propagazione, alla mappatura della pericolosità specifica, alla definizione del rischio e degli interventi di mitigazione.

Gli studi e le modellazioni sulle fenomenologie in atto nel complesso scenario di Lesina Marina che vedono gli scriventi impegnati da diversi anni, hanno permesso di identificare e classificare i fenomeni di instabilità ed i principali fattori

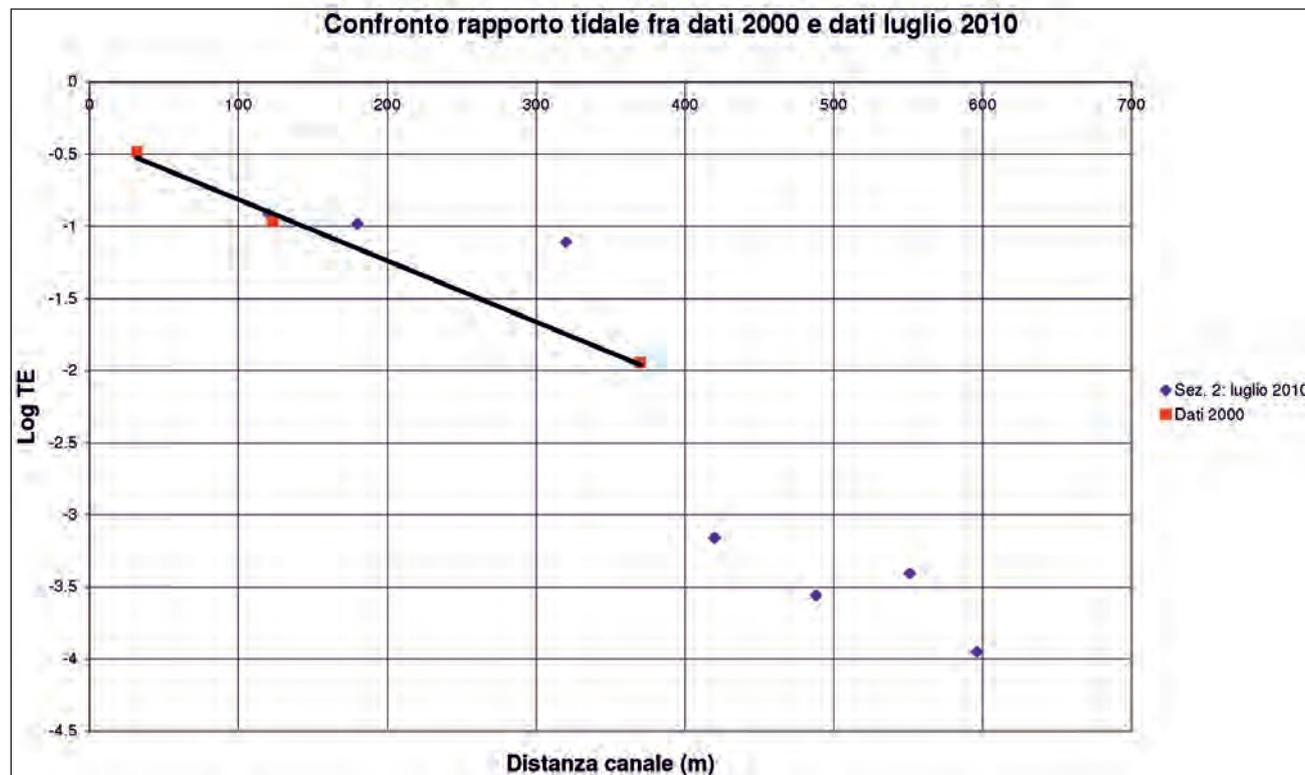


Fig. 19 - Valori di efficienza tidale in punti di misura piezometrica lungo la sez. 2. Sono riportati valori rilevati nell'anno 2000, con trend verso l'ascissa 0 (posizione del canale) e valori rilevati nel 2010, con tendenza nettamente ignorante la posizione del canale.

- Tidal efficiency values measured in piezometers along the section 2. The values were measured in 2000, with trend towards the zero abscissa along x-axis (the position of the channel), and in 2010, with trend neglecting the channel position as a grouting result.

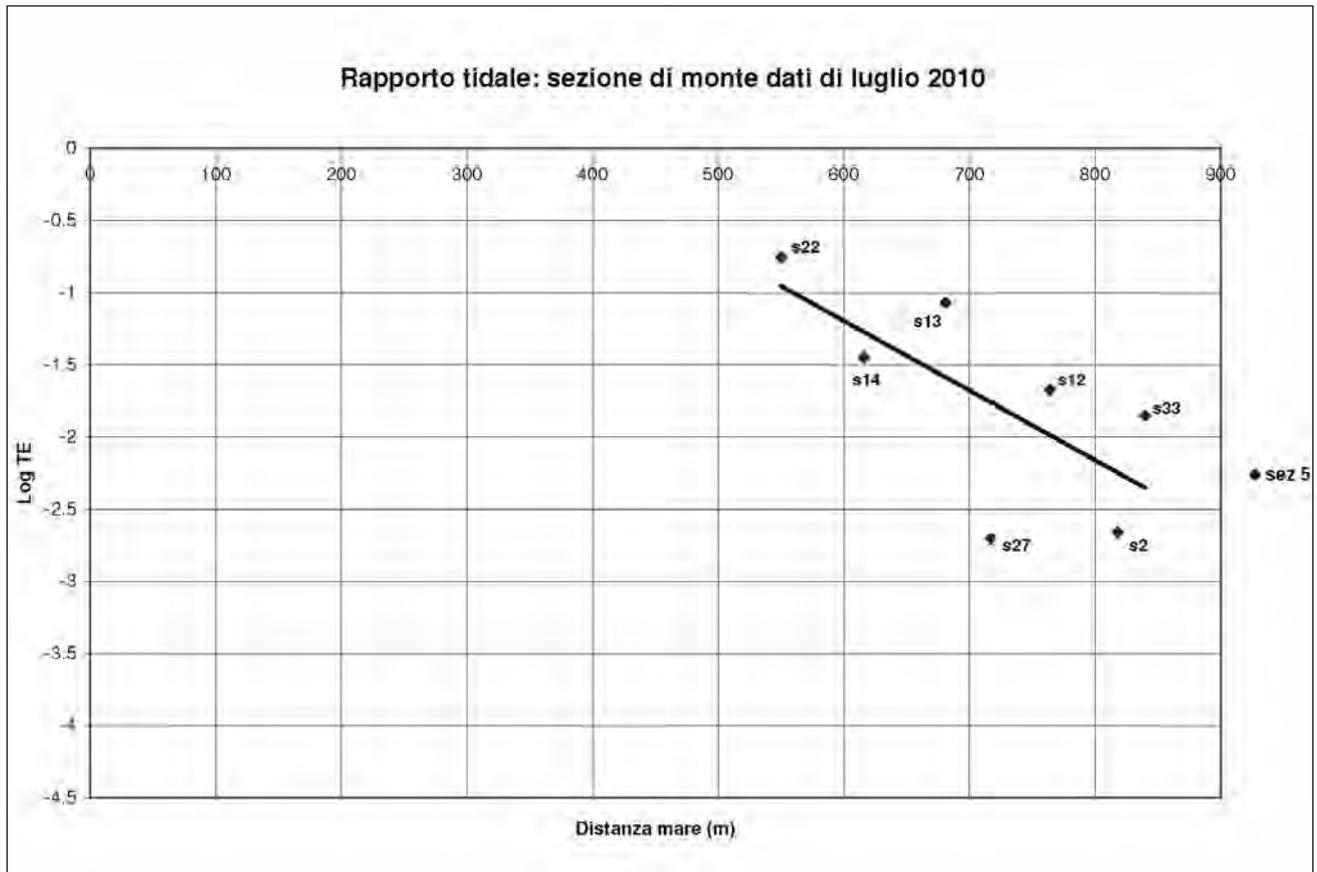


Fig. 20 - Valori di efficienza tidale in punti di misura piezometrica lungo la sez. 5. Sia i valori relativi alle misure 2000, sia i valori rilevati nel 2010 esprimono concorde tendenza verso l'ascissa 400 m, posizione del canale.

- Tidal efficiency values measured in piezometers along the section 5. Both the values measured in 2000 and 2010 express the same trend towards the 400 m value on the x-axis, that is the channel position.

cui correlarli. Un ruolo di particolare rilevanza è svolto dal regime idrodinamico delle acque sotterranee, che si relazionano al complesso e variabile regime del canale Acquarotta.

Diverse sono state le proposte di mitigazione elaborate, non sempre congruenti con il livello di conoscenza disponibile, onde risulta particolarmente utile ed importante analizzare l'efficacia di un primo intervento finanziato e in buona parte eseguito; tale intervento mira all'attenuazione dell'interazione idrodinamica tra canale ed acquifero, agendo simultaneamente sulla permeabilità e la storatività dell'ammasso gessoso in una fascia prospiciente il canale, mediante tecniche ampiamente utilizzate in problemi di dewatering di volumi sotto falda.

L'esito dell'intervento è valutabile attraverso almeno tre distinte metodologie: la variazione del comportamento idrodinamico dell'ammasso; la variazione della risposta elastica dell'ammasso; la

sequenza della generazione di nuove fenomenologie, di attenuata virulenza ed in zone non trattate e marginali, malgrado la parzializzazione dell'intervento ed i problemi da ciò derivanti.

Il basso costo dell'intervento, in relazione all'elevata efficacia che offre, permette di candidarlo con opportuni miglioramenti, per il necessario completamento nella fascia lineare di bordo canale e quale intervento topico, in corrispondenza degli edifici e delle infrastrutture maggiormente esposte. La mitigazione potrebbe infine ricevere un affidabile contributo da monitoraggio con tecniche avanzate, quali l'interferometria differenziale da satellite o da postazione fissa su una rete di *corner reflectors* di nuovo impianto, dato che l'area da sorvegliare è sostanzialmente priva di PS efficaci, e rilevamento dei precursori vibrazionali nel campo inferiore delle frequenze acustiche (AE).

## BIBLIOGRAFIA

- BIGAZZI G., LAURENZI A., PRINCIPE C. & BOCCHINI D. (1996) – *New geochronological data on igneous rocks and evaporites of the Pietre Nere Point Gargano Peninsula, Southern Italy*. Boll. Soc. Geol. It., **115**: 439-448, Roma.
- BONI A., CASNEDI R., CENTAMORE E., COLANTONI P., CREMONINI G., ELMI C., MONESI A., SELLI R. & VALLETTA M. (1969) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia: Foglio 155 San Severo*. Serv. Geol. d'It., Roma.
- CANORA F., CAPORALE F., D'ANGELLA A., PELLICANI R. & SPILOTRO G. (2012a) – *Sinkhole hazard assessment in Lesina Marina area (Apulia, Italy)*. Geophysical Research Abstracts, **14**, EGU2012-11240, EGU General Assembly.
- CANORA F., CAPORALE F., FIDELIBUS M.D., GUTIERREZ F., LEANDRO G. & SPILOTRO G. (2010a) – *Variazioni idrogeologiche e riattivazione del carsismo nei gessi di Lesina Marina (Puglia)*. ISPRA, Atti 2 Int. Workshop Sinkholes (2009), 435-452, Roma.
- CANORA F., CONVERTINI A., FIDELIBUS M.D. & SPILOTRO G. (2010b) – *Sea level stands, karst hydrology and morphologies through morphometric analysis in the Murgia Plateau (Apulia, Southern Italy)*. Università degli Studi della Basilicata, Atti del Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia Applicata, 1-16, Potenza.
- CANORA F., FIDELIBUS M.D. & SPILOTRO G. (2012b) – *Coastal and inland karst morphologies driven by sea level stands: a GIS based method for their evaluation*. Earth Surfaces Processes and Landforms, Accepted Article, Wiley, doi: 10.1002/esp.3246.
- ERSKINE A.D. (1991) – *The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK*. Ground Water, **19**: 556-562.
- FERRIS J.G. (1951) – *Cyclic fluctuation of water level as a basis for determining aquifer transmissibility*. IAHS, **33**: 148-155.
- FIDELIBUS M.D., GUTIERREZ F. & SPILOTRO G. (2009) – *Human-induced hydrological changes and sinkholes in the gypsum karst of Lesina Marina area (Foggia Province, Italy)*. Geophysical Research Abstracts, **11**, EGU2009-5602-1, EGU General Assembly.
- FIDELIBUS M.D., GUTIERREZ F. & SPILOTRO G. (2011) – *Human induced hydrogeological changes and sinkholes in the coastal gypsum karst of Lesina Marina area (Foggia Province, Italy)*. Engineering Geology, **118** (1): 1-19, doi: 10.1016/j.enggeo.2010.12.003.
- JACOB C.E. (1950) – *Flow of groundwater*. In: ROUSE H. (Ed.), «Engineering Hydraulics», 321-386, Wiley, New York.
- LAMBECK K., ANTONIOLI F., PURCELL A. & SILENZI S. (2004) – *Sea-level change along the Italian coast for the past 10.000 yr*. Quaternary Science Reviews, **23**: 1567-1598.
- MARTINIS B. & PIERI M. (1964) – *Alcune notizie sulla formazione evaporitica del Triassico superiore nell'Italia centrale e meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., **4** (1): 649-678, Roma.
- MILONE A. (2012) – *Evoluzione geologica e stratigrafica di sistemi costieri dell'area di Lesina (Italia Meridionale) durante il Pleistocene Superiore-Olocene*. Tesi Dottorale in Scienze della Terra, 24° Ciclo, Università degli Studi della Basilicata, Dipartimento di Scienze Geologiche.
- POSENATO E., DE FINO M., LA VOLPE L. & PICCARRETA G. (1994) – *L'affioramento del Triassico superiore delle Pietre Nere (calcari e gessi) e i prodotti del vulcanesimo basico paleogenico. Geologia delle aree di avampaese*. 77° Congresso della Società Geologica Italiana, Guida all'escursione pre-congressuale, 19-23.
- REFICE A., BOVENGA F., PASQUARIELLO G., FIDELIBUS M.D. & SPILOTRO G. (2011) – *Uplift at Lesina Marina (Southern Italy) revealed by PSI techniques*. ESA, Proc. FRINGE 2011 Workshop, Frascati.
- RUSSO M. (2008) – *I minerali delle vulcaniti di Punta delle Pietre Nere nel Gargano (Lesina, FG., Puglia)*. Micro, 2/2008: 227-244.
- SINDACATO AGRICOLO INDUSTRIALE MERIDIONALE (S.A.I.M.) (1930) – *Bonifica del Lago di Lesina*. Stab. Tipolitografico del Genio Civile, Roma.
- SPILOTRO G. & COVIELLO L. (2000) – *Relazione interpretativa finale delle indagini e sull'individuazione delle cause dei fenomeni e dei possibili interventi di risanamento*. Regione Puglia, Assessorato ai Lavori Pubblici.
- SPILOTRO G., CANORA F. & FIDELIBUS M.D. (2009) – *Anisotropy of hydraulic conductivity through shallow geophysical surveys*. Proc. of Int. Conference on Rock Joints and Jointed Rock Masses, Tucson Arizona, USA.
- TODD D.K. (1980) – *Groundwater Hydrology*, pp. 560, Wiley, New York.
- TREFRY M.G. & BEKELE E. (2004) – *Structural characterization of an island aquifer via tidal methods*. Water Resour. Res. **40**: 1-21, W01505.