

L'uso della termo camera a infrarossi per l'individuazione di cavità carsiche nel Salento

The use of infrared thermo-camera for identifying karst cavities in Salento

MICCOLI M.N. (*), FIORE A. (*), LEPORE D. (*),
LUISSI M. (*), SPALLUTO L. (*), VIVA M. (**)

RIASSUNTO - Le variazioni di temperatura nel corso delle stagioni si propagano nel sottosuolo in relazione alle peculiari proprietà termiche delle rocce. Sebbene la composizione geologica del sottosuolo sia il fattore preponderante nel determinare l'entità degli scambi termici tra sottosuolo e atmosfera, in via del tutto generale, è possibile affermare che la roccia è un mezzo a bassa conducibilità termica ed è, quindi, influenzata dai fenomeni termici a breve scala temporale e per uno strato superficiale quantificabile in alcuni metri. Per tale ragione, le cavità nel sottosuolo risentono in minima parte degli sbalzi stagionali di temperatura mantenendo, di conseguenza, dei valori di temperatura interna piuttosto costanti durante tutto l'anno (circa 14°-15° C).

Durante i mesi invernali, la differenza di densità tra l'aria relativamente più calda nel sottosuolo e quella più fredda esterna genera una corrente d'aria ascensionale che risale attraverso gli accessi fino in superficie. Questi flussi termici sono continui finché esiste un gradiente termico tra la temperatura dell'aria nella cavità e la temperatura dell'atmosfera. Oggetto di questo lavoro è testare la termografia a infrarossi come tecnica di rilevamento degli accessi di cavità carsiche, misurando l'anomalia termica positiva che si produce nel punto della superficie in cui il flusso di calore dall'interno della cavità risale nell'atmosfera, condizionando la temperatura delle rocce. In particolare, durante notti serene e invernali è stata condotta un'indagine con termocamera a infrarossi per stimare l'esistenza e l'entità dell'anomalia termica di alcuni inghiottitoi già noti nel settore ionico della Penisola Salentina, in particolare, nella fascia di territorio comprendente i comuni di Avetrana, Leverano, Nardò e Salice Salentino.

Le immagini termiche, così ottenute, evidenziano che le temperature maggiori sono misurabili in corrispondenza degli accessi delle cavità qualora questi siano collegati con la superficie terrestre e non siano ostruiti. Tali temperature corrispondono ai flussi di calore ascensionali che possono generarsi tra interno ed esterno di una cavità. L'esperienza

con la termocamera ha fornito i primi dati sulla validità del metodo per l'individuazione degli accessi, ma le indagini future proseguiranno con lo scopo di caratterizzare le condizioni atmosferiche e quelle litologiche e geometriche della cavità e degli accessi che producono tali anomalie termiche.

PAROLE CHIAVE: termocamera a infrarossi, cavità carsiche, flusso termico, interazione termica tra sottosuolo e atmosfera, penisola del Salento.

ABSTRACT - Atmosphere temperature propagates to underground in relation to thermal properties of rocks during the seasons. Although geological composition is the dominant factor on thermal exchange between underground and atmosphere, the first meters of the surface are influenced by thermal phenomena in short temporal scale because of the low thermal conductivity of rocks. In this way, seasonal variation of temperature weakly influences karst cavities, so that the inner temperature remains constant during the year (~14°-15°C).

During the winter, warmer air from the cavity produces a heat flux to the terrestrial surface where the atmosphere air is colder. These thermal fluxes are continuous while thermal gradient exists between underground and ground condition. The objective of this work is to test the infrared thermography as a method to reveal sinkholes, measuring the positive thermal anomaly that is produced at the surface point where heat flux from cavity goes up to the atmosphere. In particular, field survey with an infrared thermocamera on six known and preset sinkholes in Salento Peninsula (in particular, in Avetrana, Leverano, Nardò and Salice Salentino town) are conducted for verifying the existence and the quantity of positive thermal anomaly during winter and clear-sky nights. The taken thermal images confirm that higher temperatures are measurable at the sinkholes if they join with the ground and they are not obstructed. These temperatures correspond

(*) Autorità di Bacino della Puglia, c/o Innovapuglia (Ex Tecnopolis CSATA) - Str. Prov. per Casamassima, km 3 - 70010 Valenzano (Ba). E-mail: maria.miccoli@adb.puglia.it.

(**) Master in Analisi e Mitigazione del Rischio Idrogeologico, Dipartimento di Fisica Naturale, Università La Sapienza - Piazzale Aldo Moro 5, Roma. E-mail: viva.marco@virgilio.it

to upward thermal fluxes that could originate between inner and outer of a cavity. In this way, we use infrared images for showing that it is possible to recognize cavities from the induced heat flux in.

This work shows the first data about the method for cavity access identification, but future research will be oriented to characterize the atmospheric and sinkholes condition (i.e. lithology, geometry, etc.) that induce the upward heat fluxes.

KEY WORDS: infrared thermal camera, karst cavity, thermal flux, underground-atmosphere thermal interaction, Salento peninsula.

1. - INTRODUZIONE

Le cavità sotterranee naturali e antropiche suscitano notevole interesse sia dal punto di vista della ricerca scientifica sia da parte delle amministrazioni locali e statali a causa della problematica connessa alla loro presenza, ossia i dissesti indotti dai fenomeni di sprofondamento, i collassi improvvisi di calotte, pilastri o setti di roccia (ALEMANNO *et alii*, 2010; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2004; ANNUNZIATELLIS *et alii*, 2010; BERARDI *et alii*, 2010, CARAMANNA *et alii*, 2006; CARAMANNA *et alii*, 2008; NISIO, 2008, 2010). Inoltre, spesso le cavità sono inserite nel tessuto socio-economico, localizzate in aree urbane e possono essere aperte al pubblico per fini religiosi, culturali e turistici. Le cavità poste in aree rurali sono di più difficile localizzazione e spesso sono riconosciute solo a seguito di collassi.

L'Autorità di Bacino della Puglia (<http://www.adb.puglia.it/public/news.php>) provvede periodicamente all'aggiornamento del P.A.I., in funzione degli studi conoscitivi intrapresi, dello stato di realizzazione delle opere programmate, del variare della situazione morfologica ed ambientale dei luoghi e in funzione degli approfondimenti conoscitivi acquisiti all'interno dei tavoli tecnici di copianificazione con le Amministrazioni impegnate nella redazione dei P.U.G.. Inoltre, recentemente, la Società Speleologica Italiana e la Regione Puglia hanno pubblicato il "Catasto delle grotte e delle cavità artificiali" previsto dalla L.R. 33/2009. Al giorno d'oggi, sono state censite circa 1000 cavità antropiche e 2000 naturali, ma tale numero è in costante aumento dato il procedere del censimento.

Da questo quadro, appare evidente come l'individuazione delle cavità sotterranee, in una regione caratterizzata da carsismo, come la Puglia, sia una fase preliminare fondamentale per la pianificazione territoriale e la mitigazione del rischio. Le indagini indirette e dirette utilizzate con lo scopo d'individuazione delle cavità sotterranee sono metodologie lente e costose e possono anche non fornire dei risultati immediati.

Gli inghiottitoi o gli ingressi delle cavità sono dei punti in cui la superficie terrestre entra in contatto con gli ambienti ipogei. In corrispondenza di essi, infatti, non solo l'acqua meteorica e di ruscellamento superficiale può infiltrarsi, ma ha anche luogo uno scambio di aria e vapori tra l'esterno e il sottosuolo. Tale interazione di gas è dovuta alle diverse condizioni microclimatiche: il sottosuolo è un sistema termicamente quasi-chiuso e meccanicamente vincolato tale da controllarne il microclima sotterraneo, mentre l'esterno è influenzato dalla circolazione dell'aria nell'atmosfera per cui è maggiormente suscettibile alle variazioni stagionali e giornaliere di temperatura (BADINO, 1995; WHITEMAN *et alii*, 2003; BADINO, 2005; BADINO, 2010; RENON, 2011). Le diverse condizioni nei due ambienti producono differenti temperature e valori di umidità che inducono flussi di calore dall'interno verso l'esterno della cavità.

Il monitoraggio, attraverso l'utilizzo di termocamere, di questi flussi di calore prodotti in corrispondenza degli accessi di cavità sotterranee è un'attività, fino ad ora, non diffusa né applicata, ma le grotte soffianti sono ben note agli speleologi come delle cavità che presentano delle correnti d'aria in particolari condizioni o periodi dell'anno. Pochi studi sono stati condotti, nel passato per dimostrare la validità del metodo (CAMPBELL *et alii*, 1995; THOMPSON & MURVIN, 2005).

Le termocamere sono strumenti che rilevano la radiazione infrarossa emessa da un oggetto e la convertono in un segnale elettronico che, successivamente elaborato, produce un'immagine termica su un *display*. I dati termici, inoltre, sono acquisiti al fine di eseguire calcoli sulla temperatura. Questi strumenti, attualmente, hanno un ampio utilizzo in edilizia (localizzazione e verifica delle tubazioni e di eventuali perdite, individuazione eventuali difetti strutturali, visualizzazione di dispersioni energetiche, controllo infiltrazioni, ecc.), nel settore industriale e nel campo della manutenzione preventiva (ispezioni elettriche e meccaniche), ma scarsa applicazione in campo geoambientale (BLOOMQUIST *et alii*, 2005; GUNN *et alii*, 2008, WYNNE *et alii*, 2008).

Il lavoro sperimentale, qui presentato e condotto dalla Segreteria Tecnica Operativa dell'Autorità di Bacino della Puglia, ricade nel P.O. FESR 2007-2013, Asse II, Azione 2.3.6 "Miglioramento del sistema dell'informazione, del monitoraggio e del controllo nel settore della Difesa del suolo". Esso ha l'obiettivo di sperimentare la validità del metodo, basato sui rilevamenti e sulle misurazioni con termocamera a infrarossi del flusso di calore che s'instaura tra interno di una cavità sotterranea e ambiente esterno, nell'individuazione delle cavità sotterranee.

2. - INTERAZIONE TRA SOTTOSUOLO E SUPERFICIE TERRESTRE

Per comprendere l'interazione esistente tra suolo, sottosuolo e superficie terrestre dal punto di vista energetico, è importante partire dal concetto che il suolo emette radiazioni elettromagnetiche costantemente, ma la cui intensità e frequenza dipendono dalla temperatura della superficie più esterna. Flussi radiativi maggiori corrispondono a temperature più alte e tale flusso è il risultato del bilancio radiativo tra radiazione entrante (dall'irraggiamento dall'atmosfera fortemente influenzato dalla stagione e dal giorno/notte, dal flusso geotermico avente deboli oscillazioni giornaliere e proveniente dagli strati più interni del sottosuolo) e quella uscente (radiazione solare riflessa e radiazione emessa dal suolo), trascurando l'influenza che ha anche il flusso di calore prodotto dalla vegetazione. Assumendo numerose semplificazioni, questi processi interagiscono tra loro e producono una radiazione entrante maggiore durante il giorno e una radiazione uscente maggiore durante la notte (RAABE & BIALKOWSKA-JELINSKA, 2010).

Le caratteristiche chimico-fisiche del materiale costituente il suolo e il sottosuolo condizionano la conducibilità, la capacità e diffusività termica delle stesse, fattori questi che complicano l'andamento del flusso geotermico. Inoltre, le caratteristiche del materiale regolano l'emissività (ϵ), ossia la frazione di energia irraggiata da quel materiale rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero avente la stessa temperatura. Essa rappresenta la capacità di un materiale di irraggiare energia. Un vero corpo nero avrebbe un $\epsilon = 0$ mentre qualunque oggetto reale ha $0 < \epsilon < 1$ (corpo grigio). Il suo valore dipende dal contenuto in acqua, dalla rugosità della superficie, dalla temperatura e dalla presenza e dal tipo di vegetazione.

In considerazione di ciò e dei bassi valori di capacità termica dell'aria, essa si riscalda prevalentemente per irraggiamento di giorno e di notte si raffredda lentamente stratificandosi, ossia lasciando gli strati più freddi e, quindi, più pesanti a contatto con la superficie terrestre. Tale fenomeno è maggiormente visibile nelle notti serene invernali. Differentemente, l'aria presente nel sottosuolo è vincolata in un sistema quasi chiuso, in cui gli scambi con l'esterno sono limitati e la cui temperatura è mantenuta pressoché costante dal contatto con il materiale costituente il sottosuolo, che ha una capacità termica più elevata di quella dell'aria.

Il differente comportamento termico dell'aria all'interno del sottosuolo e nell'atmosfera implicherebbe interazioni tra interno ed esterno della cavità,

che sono influenzate anche dalla tipologia della cavità stessa. In particolare, nelle cavità con *circolazione a sacco d'aria*, nella stagione estiva, si ha un regime statico con formazione di sacche d'aria fredda sul fondo della cavità, mentre nella stagione invernale, si ha un regime dinamico dovuto all'aria fredda che entra dall'accesso lambendo il pavimento, si riscalda e fuoriesce con una temperatura e un grado di umidità maggiore (CITTERIO *et alii*, 2002). Tale fenomeno è particolarmente evidente durante le notti invernali con le temperature minime.

Di conseguenza, gli accessi (inghiottitoi o ingressi) corrispondono al punto sulla superficie terrestre in cui si ha interazione tra i gas interni alla cavità e l'atmosfera.

3. - AREA DI STUDIO E DESCRIZIONE DELLE CAVITÀ RILEVATE

L'area di studio è localizzata tra le province di Lecce e Taranto, la parte più meridionale della Puglia (fig. 1). Essa è costituita da una successione di calcari e dolomie cretaci con assetto suborizzontale e depositati principalmente in ambienti di piattaforma. Su questo substrato cretaco, in discontinuità di sedimentazione, si rilevano unità eo-mioceniche e plio-pleistoceniche. I depositi eo-miocenici consistono in calcareniti di piattaforma carbonatica esterna e descrivono la graduale emersione dell'Avampaese Apulo. Le unità plio-pleistoceniche sono trasgressive sui sottostanti depositi e sono formate da calcareniti che gradualmente passano a marne e argille di mare profondo. Esse probabilmente rientrano nel ciclo sedimentario della Fossa Bradanica (CIARANFI *et alii*, 1988; TROPEANO *et alii*, 2004). Le formazioni più recenti sono le calcareniti dei terrazzi marini del medio e superiore Pleistocene.

Le sabbie oloceniche bordano i settori costieri della penisola salentina.

I rilievi notturni e invernali effettuati con la termocamera a infrarossi hanno coinvolto gli inghiottitoi di alcune cavità sotterranee salentine, già censiti dalla *Società Speleologica Pugliese* (<http://www.fspuglia.it/>) e indicati in tabella 1. Le informazioni relative alle cavità rilevate e riportate di seguito sono state ottenute dalle schede di censimento del "Catasto delle grotte e delle cavità artificiali" consultabili sul sito della Società Speleologica.

La *Grotta di San Martino* non è accessibile, ma ha l'inghiottitoio principale orizzontale con un diametro maggiore di 1 m e modificato artificialmente. Sono presenti altri due ingressi verticali vicini tra loro. Essi hanno forma quadrata, dimensione 2x2 m e profondità di circa 4.7 m. Entrambi

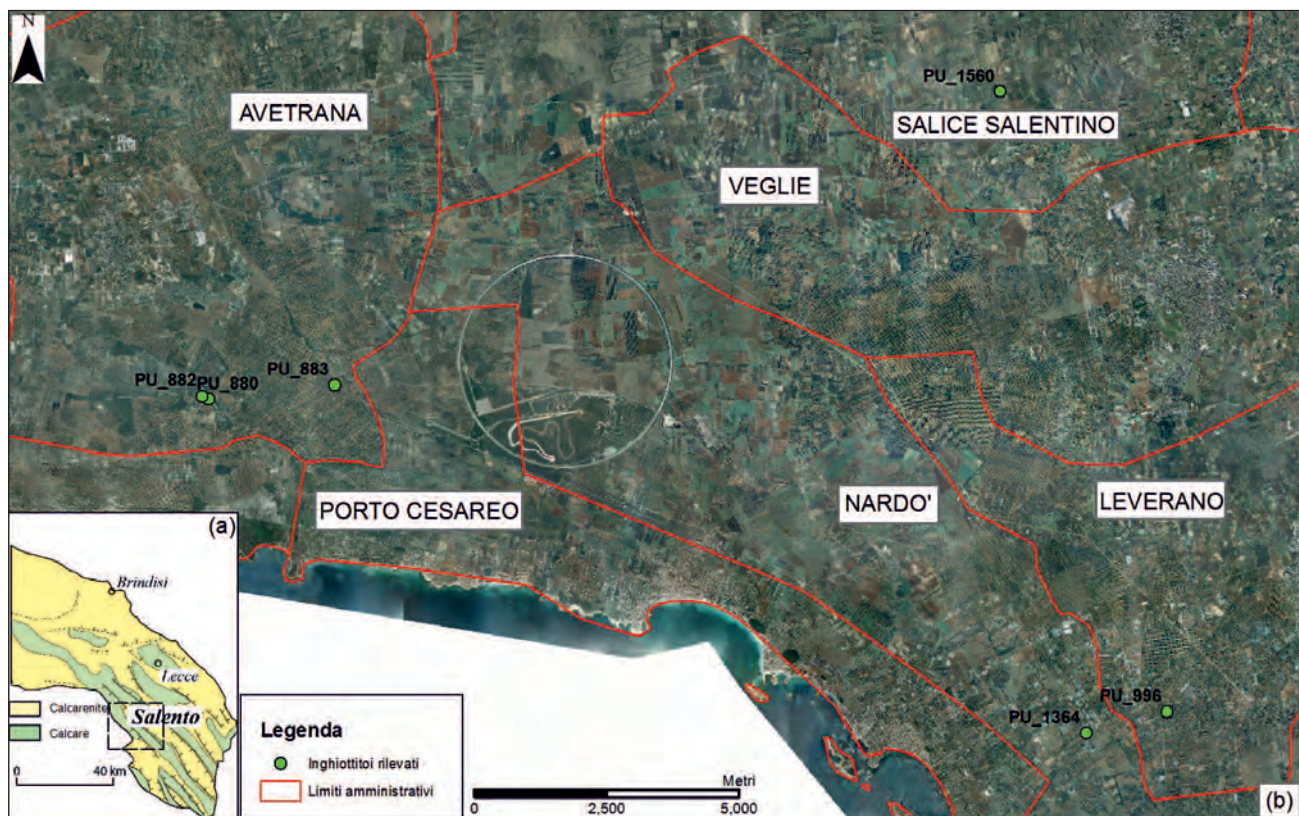


Fig. 1 - Carta Geologica schematica della Puglia meridionale (a) e ubicazione dei sei accessi alle cavità rilevati attraverso termocamera a infrarossi (b).
 - Schematic geological map of Southern Apulia region (a) and location of the six surveyed sinkholes with a infrared thermo-camera.

appaiono rimaneggiati artificialmente. La cavità si attesta in strati calcarenitici che hanno spessori medi di 0.80 m e assetto suborizzontale. Sono state descritte venute di acqua stagionali.

La cavità denominata *Grotta degli Ulivi* è anch'essa situata in località Voccolechia ad Avetrana e ha ingresso libero, seppur ostruito da un masso per motivi di sicurezza. L'accesso è costituito da un pozzo verticale di 2-3 m, il cui imbocco ha un diametro di circa 0.50 m. Alla base del pozzo è presente un piccolo ambiente con materiale di crollo. Da qui hanno origine due diramazioni laterali di difficile percorribilità per le dimensioni e per la presenza di materiale crollato. La cavità si attesta in calcari e calcari dolomitici e i flussi idrici sono, anche in questo caso, stagionali.

L'inghiottitoio della cavità *Grotta dei Salti*, in località Casa Nova ad Avetrana, è verticale e aperto. Esso ha una doppia bocca ed è profondo 5.2 m. Esso si attesta in una dolina poco evidente delle dimensioni di circa 160 m². La cavità è in roccia calcarenitica stratificata con assetto suborizzontale e spessori medi di 0.20 m.

Nel comune di Leverano, la *Grotta della Scure* è situata all'interno di un uliveto e l'unico ingresso è completamente chiuso da una colata di cemento su riempimento di pietrame.

La *Grotta Fica Lupara*, in località Pittuini a Nardò, è una cavità naturale il cui unico inghiottitoio è ostruito da pietrame.

Infine, la cavità detta *Capuvientu del Porcomorto* è ubicata in località Farsano a Salice Salentino. Essa si presenta come uno sprofondamento del terreno di forma irregolare con più ingressi ravvicinati e, precisamente, tre. L'altezza del pozzo verticale d'ingresso è pari a 3 m e non è ben visibile. La cavità è in roccia calcarenitica stratificata e con spessori degli strati di 0.40 m.

4. - METODOLOGIA UTILIZZATA

Il rilievo termometrico a infrarossi è una tecnica poco costosa e non invasiva che permette di individuare anomalie termiche. Con l'utilizzo di una termocamera a infrarossi sono facilmente raccolte delle foto che mostrano le variazioni di temperatura nell'area rilevata. Lo strumento utilizzato per la nostra campagna di indagine è una termocamera a infrarossi FLIR B 400 (<http://www.flir.com/cs/emea/it/>), le cui caratteristiche sono mostrate in tabella 2.

Poiché lo scopo di tali misurazioni termometriche è quello di verificare la validità del metodo per l'individuazione di cavità sotterranee collegate con

Tab. 1 - *Tabella contenente il nome della cavità rilevata, il codice catastale attribuito dai rilevatori del Gruppo Speleologico Pugliese durante il censimento per la realizzazione del Catasto delle Grotte della Puglia. Sono indicati, inoltre, la località, il comune e la provincia corrispondente.*

– Table with the list of surveyed sinkholes (name, registry code given by the samplers of *Gruppo Speleologico Pugliese* during the census of *Catasto delle Grotte della Puglia*. Moreover, their corresponding locality, town and province are shown.

SINKHOLE RILEVATI				
NOME GROTTA	CODICE CATASTALE	PROVINCIA	COMUNE	LOCALITÀ
Grotta di San Martino	PU_880	Taranto	Avetrana	Voccolecchia
Grotta degli Ulivi	PU_882	Taranto	Avetrana	Voccolecchia
Grotta dei Salti	PU_883	Taranto	Avetrana	Casa Nova
Grotta della Scure	PU_996	Lecce	Leverano	-
Grotta Fica Lupara	PU_1364	Lecce	Nardò	Pittuini
Capuvientu del Porcomorto	PU_1560	Lecce	Salice Salentino	Farsano

Tab. 2 - *Nella tabella sono descritte le principali caratteristiche della termocamera a infrarossi FLIR B 400, utilizzata per questa campagna di indagine.*

– In the table, the main characteristics of the used infrared thermo-camera (FLIR B400) are described.

CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA TERMOCAMERA A INFRAROSSI	
Campo visivo	25° x 19°
Distanza di messa a fuoco minima	0,4 m
Lunghezza focale	18 mm
Risoluzione spaziale	1.36 mrad
Sensibilità termica	0.05°C a +30°C/50 mK
Zoom digitale	1-8 x zoom continuo
Tipo rilevatore	Focal Plan Array, microbolometro senza raffreddamento
Intervallo spettrale	7.5-13 µm
Risoluzione IR	320 x 240 pixel
Intervallo di temperatura dell'oggetto misurabile	Da -20° a +120°C
Precisione	± 2°C o 2% della lettura

l'esterno, gli inghiottitoi delle sei cavità rilevate sono stati definiti preventivamente con sopralluoghi diurni per accertarne l'accessibilità e le condizioni, e definirne i percorsi per il raggiungimento.

La campagna d'indagine è stata svolta in notti invernali e serene (febbraio 2014), durante le quali

la temperatura esterna oscillava tra i 4° e i 5°C.

Le modalità di presa appaiono molto semplici; dopo la messa a fuoco, si è proceduto a una regolazione automatica dell'immagine, ossia si è lasciato che lo strumento definisse autonomamente i livelli di temperatura massimo e minimo.

5. - RISULTATI

I rilievi termometrici effettuati sui sei inghiottitoi delle altrettante cavità sotterranee sono stati condotti in notti serene invernali con temperatura esterna di 4° - 5° C e i valori rilevati le riprese termometriche degli accessi sono riportate nelle figg. 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Tali rilievi hanno permesso di misurare le temperature in corrispondenza degli accessi delle cavità ed emesse nell'atmosfera attraverso gli accessi. Le misure raccolte sono riportate in tabella 3.

Osservando le figure si nota come in cinque dei sei accessi, oggetto del rilievo termometrico (figg. 2, 3, 4, 6, 7), presentano un flusso di calore che ben si distingue dalla temperatura di fondo. Inoltre, in figura 2 la presenza della grata metallica, come mostrato nella foto, appare rilevabile anche nell'immagine termica. Anche nelle figure 3 e 4 è evidente come le ostruzioni in roccia, ostacolando il flusso proveniente dall'intero delle cavità, mostrino una variazione di temperatura, ben lontana dalla tem-

peratura rilevata in corrispondenza dell'apertura e molto simile a quella delle rocce circostanti l'accesso.

L'accesso di una sola delle sei cavità, ossia quella riportata in figura 5, non è stata individuata. Questo è riconducibile alle caratteristiche dell'accesso stesso; infatti, come visibile in foto l'ingresso della cavità è completamente ostruito da una colata di cemento che non permette alcuno scambio termico tra l'interno e l'esterno.

Confrontando i valori delle anomalie termiche positive rilevate sulle cavità, a parità di temperatura esterna, si registra una variazione di temperatura all'inghiottitoio rispetto al fondo (circa 5°C) tra un minimo di 2°C e un massimo di 10°C. Le variazioni maggiori corrispondono alla *Grotta degli Ulivi* ed è probabilmente dovuta alla geometria dell'accesso che è più stretta. Per meglio definire l'influenza che ha la geometria dell'accesso nella dispersione del calore in superficie, va definito *sky-view factor (SVF)*, ossia un parametro topografico che rappresenta geometricamente l'accesso e,

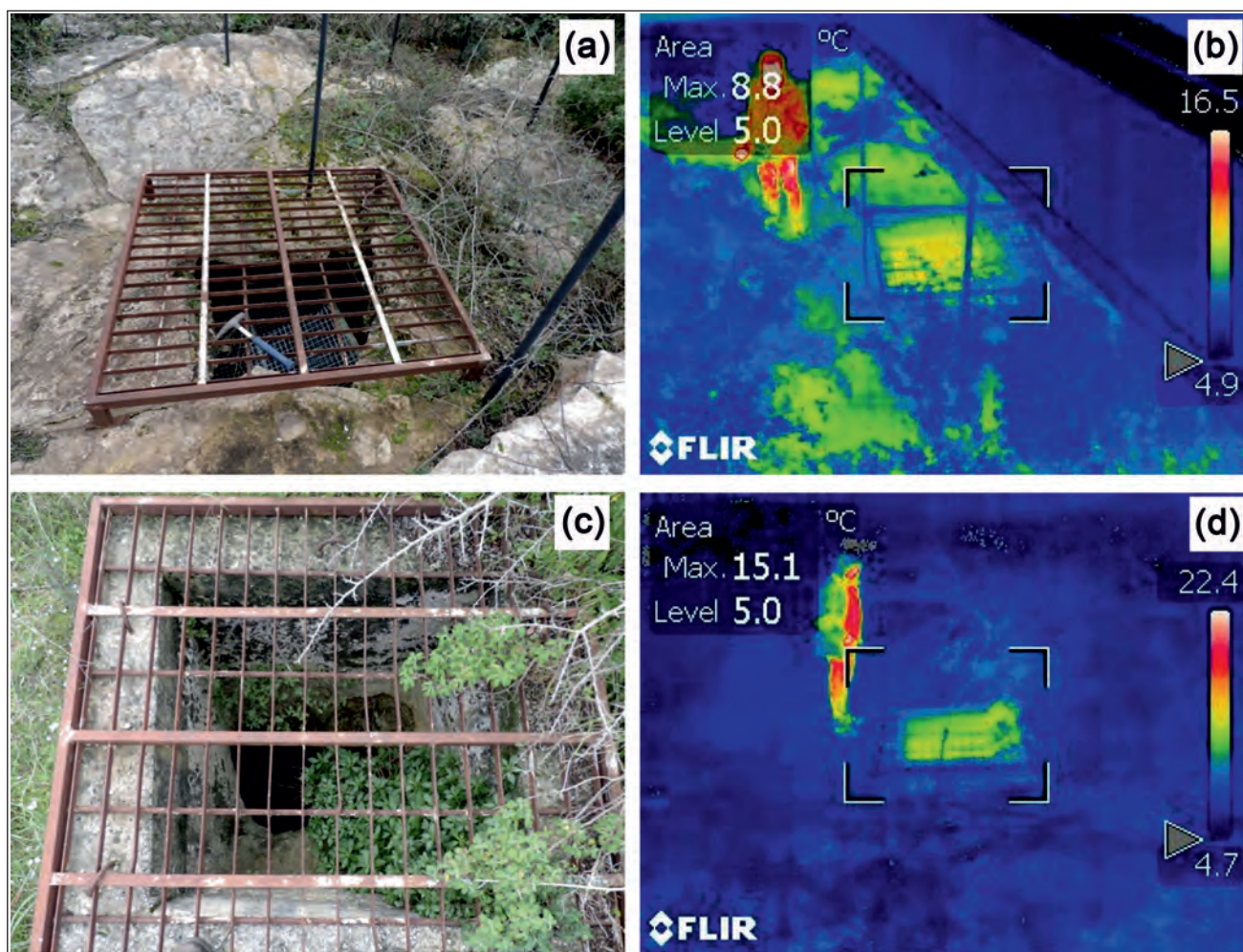


Fig. 2 - Fotografie e riprese termiche dell'inghiottitoio, il cui accesso è impedito da una grata metallica, della *Grotta di San Martino* nel comune di Avetrana.
 - Photos (a, c) and infrared images (b, d) of the sinkhole of the *Grotta di San Martino* (Avetrana) that is closed by a metal mesh.

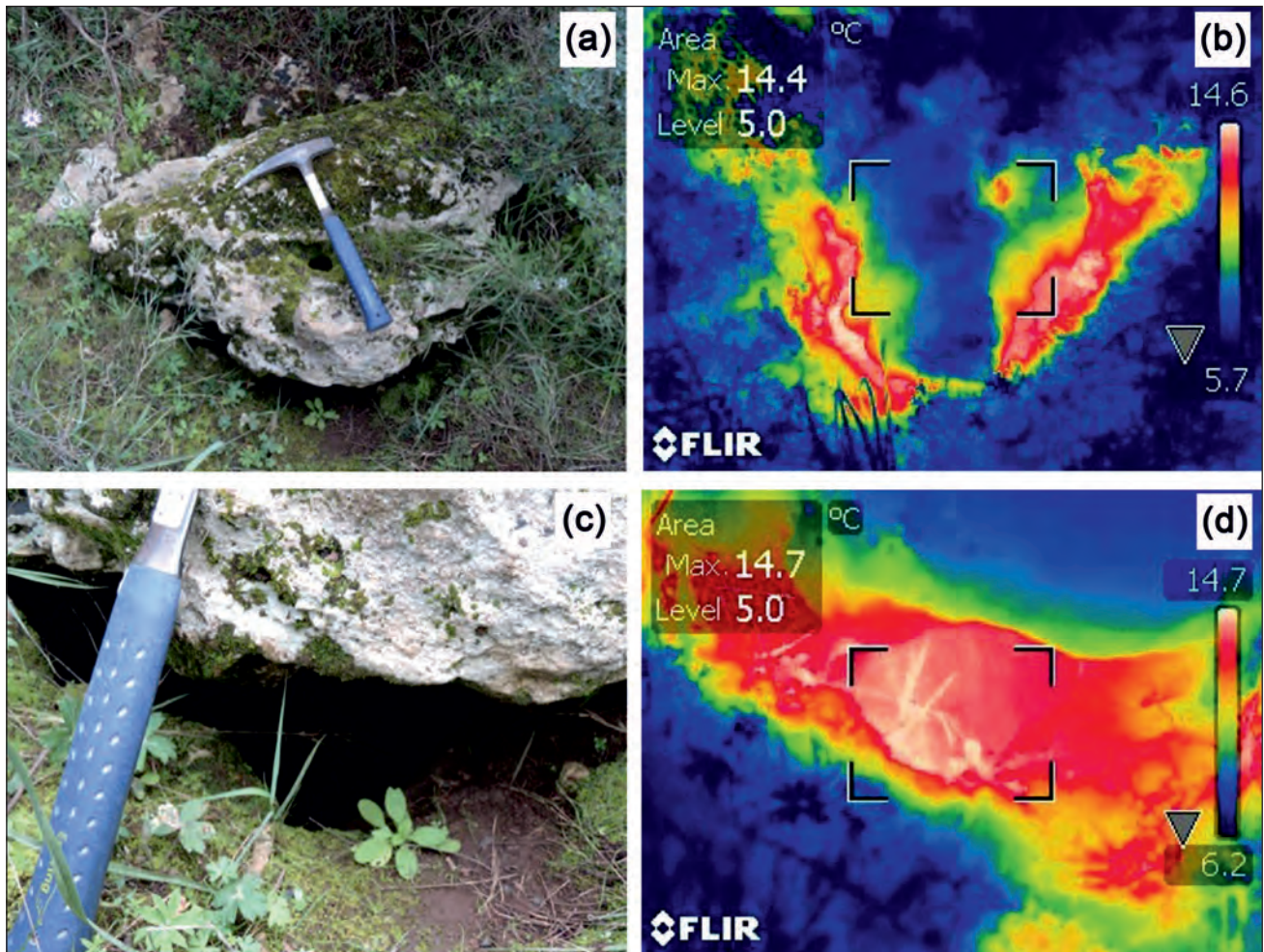


Fig. 3 - Fotografie e riprese termiche dell'accesso, che è ostruito da una roccia, Grotta degli Ulivi nel comune di Avetrana.
 - Photos (a, c) and infrared images (b, d) of the sinkhole of the Grotta degli Ulivi (Avetrana), which is closed by a rock.

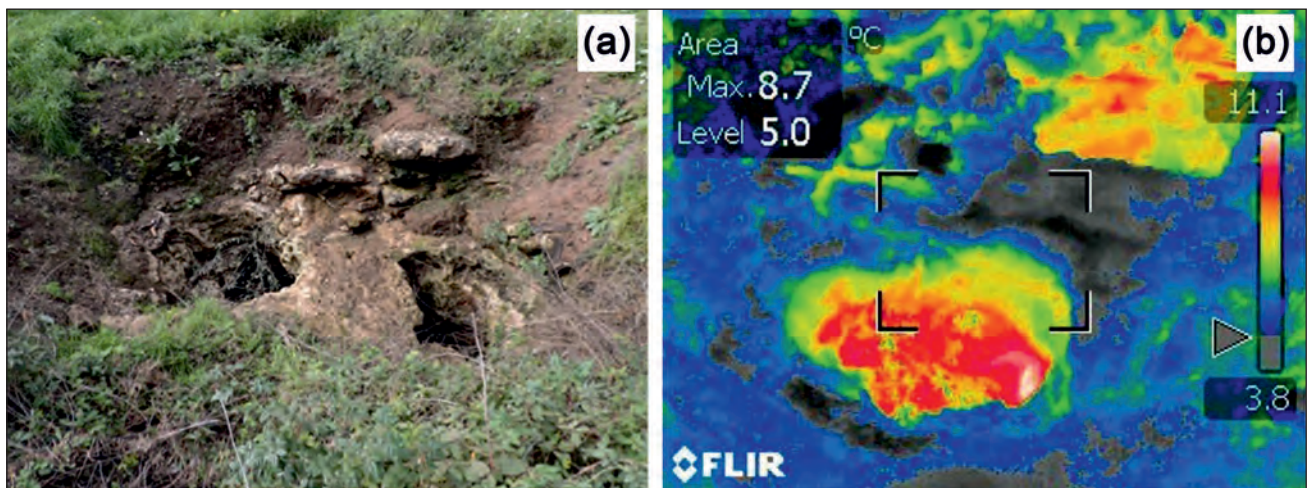


Fig. 4 - Fotografia e riprese termica dell'accesso, che è ostruito da una roccia, della Grotta dei Salti nel comune di Avetrana.
 - Photo (a) and infrared image (b) of the Grotta dei Salti sinkhole (Avetrana), that is closed the by a rock.

quindi, la superficie che permette la perdita di calore dall'interno verso l'esterno, determina l'entità di questa interazione tra superficie e sottosuolo

(WHITEMAN *et alii*, 2004). Maggiore è la superficie dell'accesso esposta all'atmosfera, ossia un accesso ampio e poco profondo, più alto è il valore dello

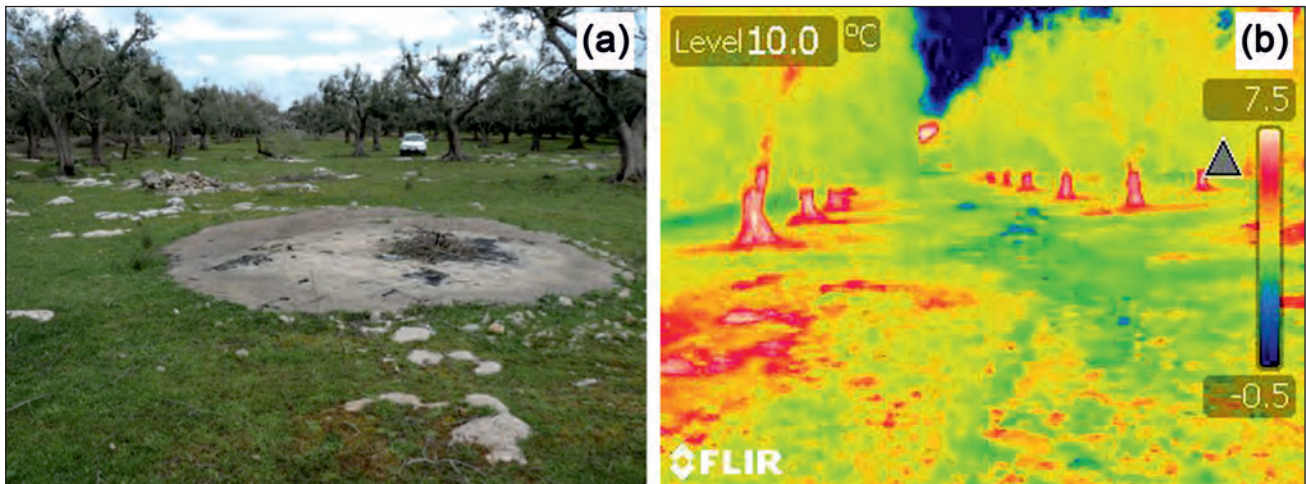


Fig. 5 - Fotografia e ripresa termica dell'accesso, che è ostruito da una colata di cemento, della *Grotta della Scure* nel comune di Leverano.
 - Photo (a) and infrared image (b) of the *Grotta della Scure* sinkhole (Leverano), which is completely closed by concrete.

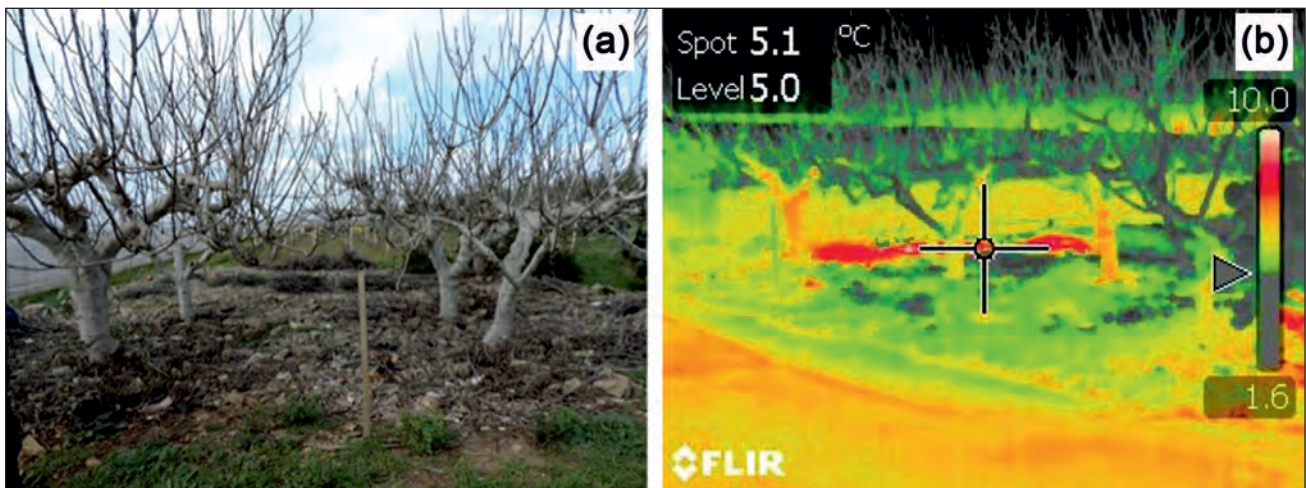


Fig. 6 - Fotografia e ripresa termica dell'accesso della *Grotta Fica Lupara* nel comune di Nardò.
 - Photo (a) and infrared image (b) of the access of the *Grotta Fica Lupara* (Nardò).

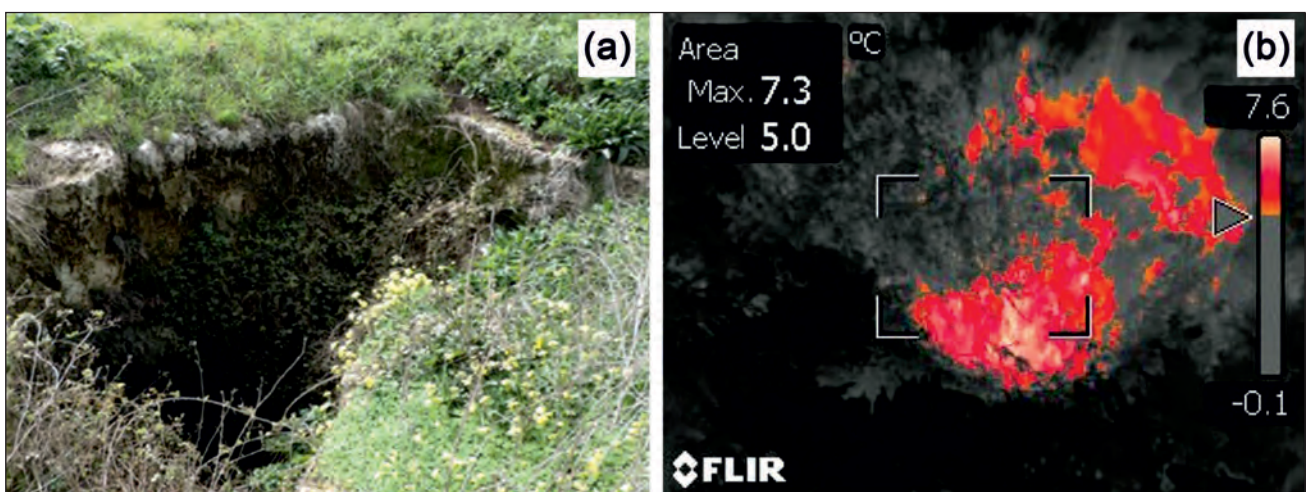


Fig. 7 - Fotografia e ripresa termica dell'accesso del *Capuientu del Porcomorto* nel comune di Salice Salentino.
 - Photo (a) and infrared image (b) of the access of the *Capuientu del Porcomorto* (Salice Salentino).

Tab. 3 - Nella tabella sono indicate le temperature misurate in corrispondenza degli accessi alle cavità sotterranee e la temperatura di fondo.

- In the table, the temperature of the sinkholes accesses and of surrounding area are listed.

CARATTERISTICHE TERMICHE RILEVATE		
Nome Grotta	Temperatura dell'accesso	Temperatura del fondo
Grotta di San Martino	7° - 8° C	5° C
Grotta degli Ulivi	14° - 15° C	5° C
Grotta dei Salti	8° - 9° C	5° C
Grotta della Scure	5° - 6° C	5° C
Grotta Fica Lupara	7° - 8° C	5° C
Capuvientu del Porcomorto	7° - 8° C	5° C

SVF. Ciò implica una maggiore dispersione di calore nell'atmosfera (fig. 8b). Diversamente, un accesso di piccolo diametro e profondo corrisponde a un basso valore di *SVF* e, quindi, produce fenomeni di raffreddamento minore (fig. 8a).

6. - CONCLUSIONI

L'indagine sperimentale condotta su sei inghiottitoi di cavità carsiche ricadenti nella penisola salentina è stata realizzata con l'utilizzo di termocamera a infrarossi. I rilievi termometrici effettuati mostrano come sia possibile misurare in superficie un'anomalia termica positiva in corrispondenza dell'imbocco degli inghiottitoi. I dati acquisiti durante la campagna di osservazioni invernali e notturne, con temperatura atmosferica di circa +4°- +5°C, hanno evidenziato significative anomalie termiche tra le rocce prossime agli inghiottitoi e quelle circostanti. Nei casi presi in esame, tali differenze di temperatura registrate sono comprese tra un minimo di 2°C e un massimo di 10°C. Le variazioni maggiori sono state registrate in corrispondenza degli inghiottitoi più stretti (soprattutto la *Grotta degli Ulivi*).

Questo ha mostrato che, in particolari condizioni climatiche e atmosferiche, possono generarsi

dei flussi di calore dall'interno della cavità verso l'esterno. Inoltre, le riprese termiche confrontate con le foto, realizzate sugli accessi in un precedente sopralluogo diurno, evidenziano la geometria dell'accesso e le ostruzioni parziali con roccia o grate metalliche possano essere individuate. Solo uno dei sei accessi analizzati, la *Grotta della Scure*, il cui accesso è occluso da cemento e pietrame, non ha evidenziato anomalie termiche.

L'esperienza con la termocamera ha fornito i primi dati per proseguire una ricerca sul campo mirata al riconoscimento delle anomalie termiche collegate alla presenza di cavità nel sottosuolo. Si prevede di approfondire tali studi sperimentali al fine di caratterizzare quali sono gli elementi delle cavità (lo sviluppo plano-altimetrico, la litologia, le condizioni climatiche interne), degli accessi (il numero, la tipologia, la geometria, la presenza di ostruzioni) e la tipologia del territorio naturale o urbanizzato e il suo utilizzo (coltivato, uliveto, pascolo, boschivo, ecc.) che possono produrre, in particolari condizioni atmosferiche, flussi termici rilevabili.

L'importanza di questa tecnica di rilevamento deriva dalla rapidità e semplicità di applicazione, oltre che dai costi non troppo elevati della strumentazione e al suo ambito applicativo. Infatti, tale studio permetterebbe l'individuazione sul territorio di inghiottitoi ed altre emergenze carsiche non censite, in cui la loro individuazione assume una notevole rilevanza per la valutazione della pericolosità legata a fenomeni di sprofondamento di cavità nel sottosuolo.

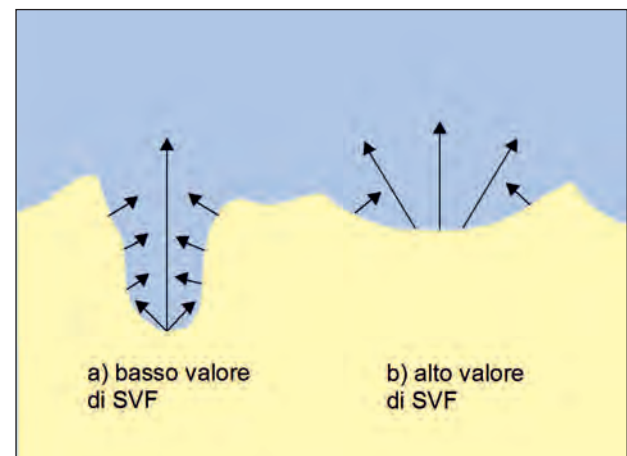


Fig. 8 - Schema rappresentativo dello *sky-view factor* (*SVF*). a) Il basso valore dello *SVF* corrisponde ad accessi stretti e profondi che determinano una limitata interazione termica con l'atmosfera. b) L'alto valore dello *SVF* è correlato ad accessi ampi e poco profondi, in cui si verifica un maggiore raffreddamento del flusso termico dall'interno della cavità a causa della maggiore superficie esposta all'atmosfera.

- Sketch of the *sky-view factor* (*SVF*). a) Low value of *SVF* corresponds to narrow and deep entry that produces limited thermal interaction with the atmosphere; b) High value of *SVF* matches to wide and shallow access where the greater exposed surface produces an air cooling of the upward air from the sinkhole.

BIBLIOGRAFIA

- ALEMANNI D., DAMATO B., DENORA D., DI SANTO A.R., FIORE A., IACOBELLIS V. & INTINI V. (2010) – *Il ruolo delle voragini nella valutazione della pericolosità idraulica delle aree endoreiche della Penisola Salentina*. Atti Workshop Internazionale “I sinkholes: Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropico”. Roma 3-4 dicembre 2009: 145-163.
- ANNUNZIATELLIS A., BEAUBIEN S.E., CIOTOLI G., LOMBARDI S., NISIO S. & NOLASCO F. (2004) - *Studio dei parametri geologici e geochimici per la comprensione dei meccanismi genetici degli sprofondamenti nella piana di S. Vittorino*. Atti Conv.: “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio”, Roma 20-21 maggio 2004: 63-82.
- ANNUNZIATELLIS A., CIOTOLI G., GUARINO P.M., NISIO S. (2010)- *Nuovi dati sui sinkholes del bacino delle Acque Albule (Tivoli, Roma)*. Atti 2° Workshop internazionale: “I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato”, Roma 3-4 dicembre 2009, ISPRA: 395-412.
- BADINO G. (1995) – *Fisica del clima sotterraneo*. Memorie dell’Istituto Italiano di Speleologia: pp. 136, Bologna.
- BADINO G. (2005) – *Underground drainage system and thermal flux*. Acta Carsaloga, **34**: 277-316.
- BADINO G. (2010) – *Underground meteorology- What’s the weather underground?*. Acta Carsaloga, **39**: 427-448.
- BERARDI C., BUONAMASSA G., DENORA D., FIORE A., LORUSSO G., PEPE P., WALSH N. & ZACCARIA V. (2010) – *Il catasto delle cave in sottterraneo, 2ccs”, di Altamura (BA): attività di censimento nelle aree interessate da cavità antropiche*. Atti Workshop Internazionale “I sinkholes: Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropico”. Roma 3-4 dicembre 2009: 145-163.
- BLOOMQUIST D., SHRESTHA R. & SLATTON C. (2005) - *Early Sinkhole Detection and Verification Using Airborne Laser and Infrared Technologies*, Final report BC-354-54: pp. 114, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida.
- CAMPBELL C.W., ABD EL LITIF M. & FOSTER J.W. (1996) - *Application of Thermography to Karst Hydrology*. Journal of Cave and Karst Studies, **58**(3): 163-167.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G., FERRELLI L., GUERRIERI L., NISIO S., VITA L. & VITTORI E. (2006) - *Relazioni tra strutture sismogenetiche, eventi sismici e fenomeni di sinkhole: un approccio metodologico in Appennino centrale*. Mem. Descr. Carta Geol. d’It, **71**: 121-122.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G. & NISIO S. (2008) - *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. Journal of Natural Hazard, **45**, 145- 172, DOI 10.1007/s, 11069-007-9165-7.
- CIARANFI N., PIERI O. & RICCHETTI G. (1988) - *Note alla Carta Geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., **41**: 449-460.
- CITTERIO M., TURRI S., BINI A. & MAGGI V. (2002) - *Glaciologia e climatologia ipogea in Moncodeno (Grigna Settentrionale, Lecco)*. Atti Convegno Nazionale in ricordo di Ardito Desio: “Nei ghiacciai, le montagne, l’uomo. Le variazioni dei ghiacciai montani e le modificazioni dei sistemi naturali ed antropici”. Bormio 12-13 settembre 2002.
- GUNN D., MARSH S., GIBSON A., AGER G., MCMANUS, K.B. CAUNT S. & CULSHAW M. (2008) - *Remote thermal IR surveying to detect abandoned mineshafts in former mining areas*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, **41** (3): 357-370.
- RAABE E. A. & BIALKOWSKA-JELINSKA E. (2010) – *Thermal Imaging of the Waccasassa Bay Preserve: Image Acquisition and Processing*. Open-File Report 2010–1120: pp. 1-61, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- RENON B. (2011) – *Le fabbriche naturali del freddo areas*. Primo rapporto sul monitoraggio sperimentale delle depressioni fredde condotto da ARPAV. Presentazione dei siti e dei dati raccolti fra l’autunno 2007 e l’estate 2010, pp. 44, ARPAV, Dipartimento regionale per la Sicurezza del Territorio.
- THOMPSON J. & MURVIN M. (2005) - *Experimental Research on the use of Thermography To Locate the Heat Signatures of Caves*. National Cave and Karst Management Symposium: 102-115.
- TROPEANO M., SPALLUTO L., MORETTI M., PIERI P. & SABATO L. (2004) - *Depositi carbonatici infrapleistocenici di tipo foramol in sistemi di scarpata (Salento – Italia meridionale)*. Il Quaternario, **17** (2): 537–546.
- WHITEMAN C. D., HAIDEN T., POSPICHAL B., EISENBACH S. & STEINACKER R. (2004) - *Minimum temperatures, diurnal temperature ranges, and temperature inversions in limestone sinkholes of different sizes and shapes*. J. Appl. Meteor. **43**: 1224-1236.
- WYNNE J. J., TITUS T. N. & CHONG DIAZ G. (2008) - *On developing thermal cave detection techniques for earth, the moon and mars*. Earth and Planetary Science Letters, **272**: 240-250.

WEBGRAFIA

- <http://www.adb.puglia.it/public/news.php>
<http://www.flir.com/cs/emea/it/>
<http://www.fspuglia.it/>