

Valutazione della suscettibilità agli sprofondamenti nella Piana del Fucino (Italia Centrale) mediante regressione logistica e analisi geospaziale

Sinkholes susceptibility assessment in the Fucino plain (central Italy) by using logistic regression and geospatial analysis

GIUSTINI F. (*), CIOTOLI G. (**),
FINOIA M.G. (**), NISIO S. (**)

RIASSUNTO - Uno studio preliminare volto alla valutazione della suscettibilità agli sprofondamenti è stato condotto nella depressione tettonica della piana del Fucino (Italia centrale). A tale scopo sono stati presi in considerazione alcuni fattori predisponenti la formazione dei *sinkholes* nella piana. In particolare, sono stati analizzati sia fattori geologici, quali lo spessore dei depositi quaternari fluviali e lacustri, la presenza di faglie, sia fattori geochemici, quali la concentrazione dei gas del suolo (CO₂, CH₄, He, Rn), la concentrazione dei solfati nelle acque del sottosuolo, la conducibilità elettrica, e gli indici di solubilità per la calcite e il gesso. Inoltre, tra i fattori antropici è stata considerata la densità dei pozzi autorizzati per l'approvvigionamento idrico.

L'analisi della regressione logistica ha permesso di costruire un modello probabilistico basato sullo studio delle relazioni statistiche tra, la presenza dei *sinkholes* e i fattori condizionanti, identificando quelli che maggiormente influenzano la formazione dei *sinkholes* e di conseguenza, aiutandone la comprensione dei processi genetici. I coefficienti del modello di regressione logistica costituiscono i pesi relativi all'importanza che ciascun fattore condizionante ha nell'ambito del fenomeno studiato.

I risultati indicano che i parametri che hanno un peso maggiore nella formazione dei *sinkholes* sono le elevate concentrazioni di anidride carbonica, elio e metano nei gas del suolo, e in misura minore, lo spessore della copertura alluvionale inferiore a 200m, la presenza di faglie e l'elevata conducibilità elettrica delle acque sotterranee. Particolarmente importante sembra essere il fattore antropico, ossia l'elevata densità dei pozzi per l'approvvigionamento idrico, che può determinare forti oscillazioni del livello piezometrico della falda. I fattori geologici, geochemici e antropici considerati sono stati trasformati in strati informativi (tipo *raster*) e pesati con i coefficienti del modello logistico al fine di ottenere una mappa di suscettibilità ai *sinkholes* della Piana del Fucino mediante

l'applicazione delle tecniche di analisi geospaziale. Le aree a maggiore suscettibilità sono state individuate lungo il bordo settentrionale del bacino (località Avezzano-Le Mole, Pozzone) e nel settore sud-occidentale, nell'area compresa tra il Canale Collettore e gli abitati di Luco dei Marsi e Trasacco.

PAROLE CHIAVE: Sinkhole, Abruzzo, Piana del Fucino Analisi Geospaziale

ABSTRACT - A preliminary sinkhole susceptibility analysis has been carried out in the tectonic depression of the Fucino plain (central Italy). The study is aimed at the identification of the conditioning factors that contribute to the formation of sinkholes, as well as to understand the processes that generate them by using multivariate statistics and geospatial analysis. A susceptibility map, in which sinkhole prone areas are identified, was elaborated by using a logistic regression model based on the evaluation of the statistical relationships between the known sinkhole locations and a group of conditioning factors. Several geological and geochemical conditioning factors have been considered: soil gas concentrations (CO₂, CH₄, He, Rn), hydrochemistry (sulphate concentration in groundwater, electrical conductivity, calcite and gypsum saturation index), thickness of Pliocene – Holocene continental deposits and faults. Anthropogenic factor, such as the density of authorized private wells for water supply, was also considered. The resulting logistic regression model highlights that high concentration of carbon dioxide, helium and methane in soil gases constitute the most significant factors governing the development of sinkholes in the Fucino plain. Minor factors are the thickness of continental deposits lower than 200m, the presence of faults, and the high electrical conductivity in groundwater. The anthropogenic factor seems to be of particular importance, because the high density of wells for water supply can result in strong fluctuations in the

(*) Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, CNR

(**) Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, ISPRA

water table of the aquifer. Areas with high susceptibility have been identified along the northern edge of the basin (Avezano-Le Mole and Pozzano area) and in the south-west, in the area between the middle channel and the villages of Luco dei Marsi and Trasacco.

KEY WORDS: Sinkhole, Abruzzo, Fucino Plain, Geospatial Analysis

1. - INTRODUZIONE

Uno degli obiettivi principali nella valutazione del rischio legato alla formazione dei *sinkholes* è il calcolo di modelli predittivi attendibili sulla distribuzione spazio-temporale di questi fenomeni attraverso l'elaborazione di mappe di pericolosità e suscettibilità. Le mappe di suscettibilità esprimono la probabilità che in un luogo specifico si verifichi o meno il fenomeno, in un intervallo di tempo infinito, mentre le carte di pericolosità devono indicare tale probabilità in termini quantitativi e in un dato intervallo temporale (ad esempio, *sinkholes* km² anno⁻¹) (GALVE *et alii*, 2009). In quest'ultimo caso le informazioni relative ai tempi di ritorno del fenomeno sono indispensabili, tuttavia non sempre disponibili, per questo motivo i classici modelli di pericolosità sono stati sostituiti dalle più generiche mappe di suscettibilità (CIOTOLI *et alii*, 2012, 2013, 2015; BASSO *et alii* 2013). Diverse metodologie possono essere utilizzate per valutare la suscettibilità agli sprofondamenti, dall'analisi del vicinaggio alle mappe di densità (GALVE *et alii*, 2009). L'uso dell'analisi statistica e delle metodologie probabilistiche, in particolare, quali la regressione logistica, costituisce attualmente un approccio sempre più utilizzato per produrre modelli di suscettibilità (SIMÓN *et alii*, 1991; SORIANO & SIMÓN, 1995; SIMÓN & SORIANO, 2002; HYLAND, 2005; YILMAZ, 2007) e per stimare il contributo dei diversi fattori predisponenti lo sviluppo dei *sinkholes* (LAMELAS *et alii*, 2008; GALVE *et alii*, 2008, 2009).

Nel presente lavoro l'analisi geospaziale e la statistica multivariata sono state utilizzate per costruire dei modelli di suscettibilità agli sprofondamenti nella piana del Fucino, selezionando questa località come caso di studio a causa dell'alta frequenza di questi fenomeni (NISIO, 2008). Un precedente studio interdisciplinare ha permesso di attribuire al fenomeno, in modo qualitativo, una genesi non semplicemente carsica, ma in parte dovuta a liquefazione degli orizzonti alluvionali di granulometria medio-fine, in parte a un processo di risalita (*piping*) di fluidi aggressivi (NISIO, 2003; NISIO & SALVATI, 2004) che possono generare sifonamento (asportazione meccanica di particelle solide) e/o dissoluzione chimica della copertura quaternaria (GIUSTINI *et alii*, 2009). Nel

presente studio, l'utilizzo della regressione logistica ha permesso di analizzare statisticamente i possibili fattori predisponenti e di valutare quantitativamente quali tra questi avesse un peso maggiore nel determinare la predisposizione del territorio a tali fenomeni.

2. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

La piana del Fucino è una depressione tettonica intramontana situata nel mezzo della catena appenninica (fig. 1). L'origine del bacino del Fucino è connessa con la tettonica estensionale che ha interessato la catena appenninica centro-occidentale durante il tardo Pliocene. Durante il Pliocene superiore-Olocene, un vasto lago (drenato artificialmente nella seconda metà del XIX secolo; GIRAUDI, 1989) si è sviluppato nel bacino che è stato colmato da una spessa sequenza di sedimenti fluviali e lacustri. Tali sedimenti, che possono raggiungere uno spessore superiore ai 1000 m (CAVINATO *et alii*, 2002), nascondono una complessa rete di faglie simmicamente attive e fratture che attraversano la piana (fig. 1). Estese indagini di prospezione di gas del suolo condotte nella piana (CIOTOLI *et alii*, 1998, 2007) hanno evidenziato la presenza di elevate concentrazioni di CO₂, CH₄, He e Rn lungo le principali strutture tettoniche della piana, come la faglia San Benedetto-Gioia dei Marsi (profondità > 5 km, lunghezza 12 km) e la faglia di Trasacco (profondità 1,5 km, lunghezza 7 km) (fig. 1). Dati di telerilevamento (GIRAUDI, 1986) e indagini sismiche e gravimetriche (CAVINATO *et alii*, 2002) hanno dimostrato che il *network* di faglie interessa anche i depositi più recenti del bacino. L'analisi della composizione isotopica del carbonio della CO₂ nel gas del suolo indica che questa specie gassosa è di origine biogenica, derivando dalla respirazione delle piante, dalla decomposizione della materia organica e, in misura minore, dall'ossidazione del metano (GIUSTINI & BRILLI, 2014).

I sedimenti alluvionali che colmano la piana rappresentano un complesso idrogeologico costituito da un acquifero superficiale e da un sottostante acquifero multifalda, in pressione, che riceve contributi idrici locali sia dagli acquiferi carbonatici circostanti sia dal substrato carbonatico sepolto (PETITTA, 2009). A partire dagli anni '60 sono stati realizzati numerosi pozzi per sopperire all'aumentata esigenza di acqua per usi domestici, agricoli e industriali; dati del 2003 hanno permesso di stimare che il prelievo di acqua per uso potabile è valutabile in 11,4 milioni di m³/anno (PETITTA, 2009).

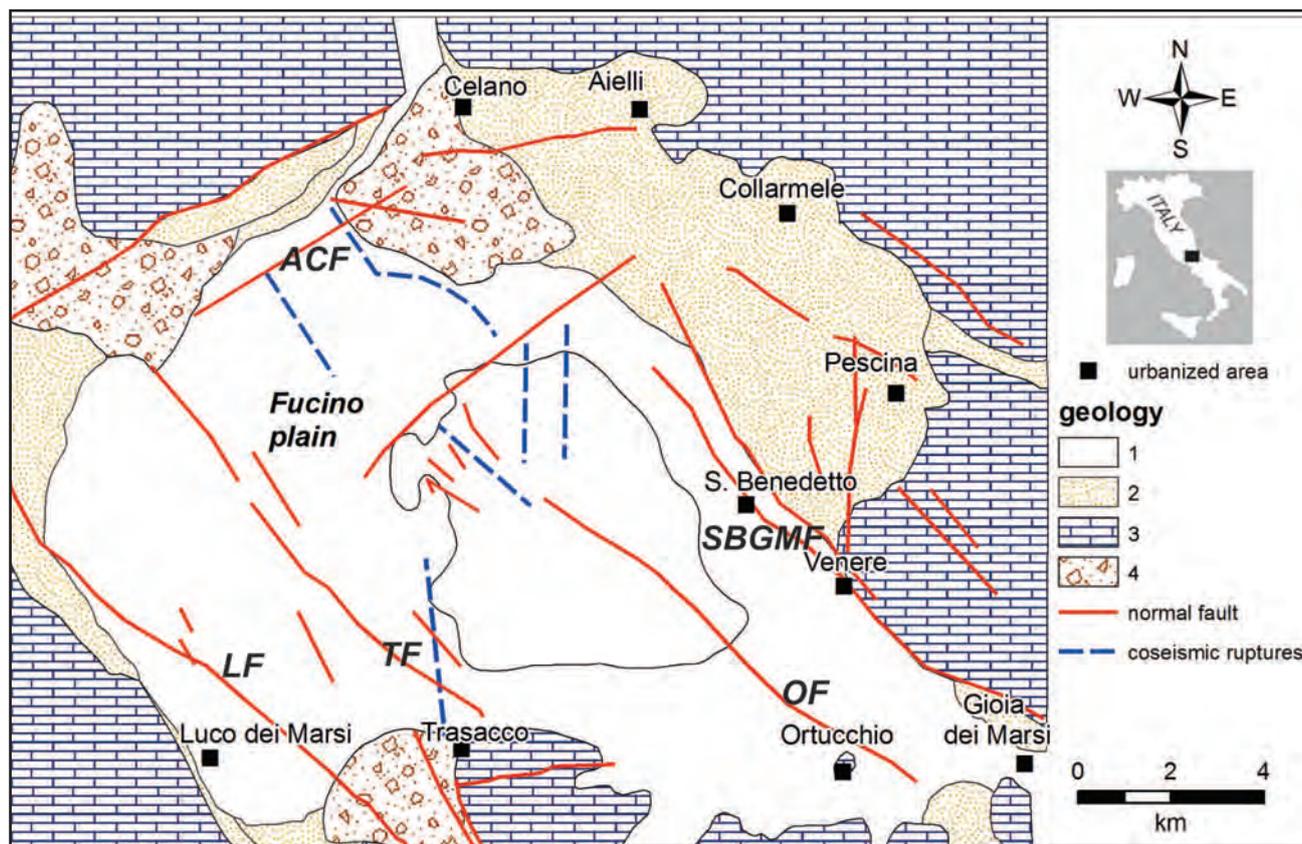


Fig. 1 – Carta geologica della piana del Fucino (modificata da CIOTOLI *et alii*, 2007). Geologia: (1) alluvioni recenti (Olocene); (2) alluvioni terrazzate (Pleistocene sup.); (3) serie carbonatica della successione Laziale-Abruzzese; (4) conoidi tardo Pleistocene Olocene. ACF faglia Avezzano-Celano, LF faglia Luco dei Marsi, OF faglia Ortucchio, TF faglia Vallelonga-Trasacco-Avezzano, SBGMF faglia San Benedetto-Gioia dei Marsi.

- Geological map of the Fucino plain (modified from CIOTOLI *et alii*, 2007). Geology: (1) historical lacustrine sediment; (2) latest glacial to Holocene terrace; (3) Meso-Cenozoic carbonate bedrock; (4) latest Pleistocene to Holocene alluvial fan. ACF Avezzano-Celano fault, LF Luco dei Marsi fault, OF Ortucchio fault, TF Vallelonga-Trasacco-Avezzano fault, SBGMF San Benedetto-Gioia dei Marsi fault.

3. - METODOLOGIA

La valutazione della suscettibilità agli sprofondamenti nella piana del Fucino è stata effettuata seguendo un approccio probabilistico mediante l'utilizzo di tecniche di analisi statistica multivariata e di analisi geospaziale. Questo approccio si basa sulla valutazione delle relazioni statistiche e spaziali tra l'ubicazione dei *sinkholes* noti e una serie di parametri (*fattori predisponenti*) al fine di studiare l'importanza di tali fattori sull'origine di questi fenomeni, e di costruire modelli che riflettono la probabilità che il fenomeno si manifesti in un certo punto dello spazio in un tempo infinito (suscettibilità).

La procedura prevede i seguenti *step*: preparazione del *geodatabase*, analisi delle relazioni statistiche tra i *sinkholes* e i fattori predisponenti ed elaborazione di un modello predittivo mediante la regressione logistica binaria, ed infine la validazione incrociata per testare la bontà del modello.

Il *geodatabase* comprende una serie di mappe tematiche, quali lo strato informativo (*layer*) relativo alla distribuzione dei *sinkholes*, e quelli relativi alla

distribuzione spaziale dei potenziali fattori predisponenti. Il *database* è stato realizzato utilizzando il *software* ArcGIS 10. Tutte le variabili sono state trasformate in formato *raster* (dimensione del *pixel* 200 m x 200 m) su base cartografica I.G.M. 1:25.000, utilizzando le procedure schematizzate nella tabella 1. La maggior parte delle variabili sono state trasformate in formato *raster* utilizzando il metodo dei “*Natural Neighbor*”, un interpolatore che si basa sui poligoni di Thiessen e che assegna a ciascuno dei punti che costituiscono il *dataset* di partenza dei pesi basati su quella che viene definita area di influenza (SIBSON, 1981). In alcuni casi, prima della trasformazione in *raster*, sono stati creati dei “*buffer*” intorno agli elementi vettoriali, ossia delle aree di spessore variabile intorno all'oggetto. Ad esempio intorno agli elementi puntuali dei *sinkholes* è stato creato un *buffer* della dimensione di 500 m, mentre nel caso degli elementi lineari, rappresentanti le faglie che attraversano la piana, è stato creato un *buffer* multiplo, a distanze progressivamente crescenti dal centro della faglia (rispettivamente a 50, 100, 200 e 500 m), in quanto l'effetto della presenza di questi elementi può di-

Tab. 1 – Descrizione delle variabili utilizzate per effettuare la regressione logistica, origine del dato e metodo applicato per trasformare i dati vettoriali in raster.

- Description of the layers of conditioning factors, data sources, methods applied to generate the raster layers.

VARIABILE DIPENDENTE		Variabile	Layer	Origine del dato	Trasformazione in raster
		Densità dei <i>sinkholes</i>	<i>sink</i>	Foto aeree, indagine sul campo (NISIO, 2008; GIUSTINI <i>et alii</i> , 2009)	Buffer 500m; Kernel Density Estimation
VARIABILI INDIPENDENTI	Gas del suolo	Concentrazione della CO ₂ nel gas del suolo	[CO ₂]	CIOTOLI <i>et alii</i> , 1998, 2007	Interpolation > Natural Neighbor
		Concentrazione del CH ₄ nel gas del suolo	[CH ₄]	CIOTOLI <i>et alii</i> , 1998, 2007	Interpolation > Natural Neighbor
		Concentrazione del Rn nel gas del suolo	[Rn]	CIOTOLI <i>et alii</i> , 1998, 2007	Interpolation > Natural Neighbor
		Concentrazione del He nel gas del suolo	[He]	CIOTOLI <i>et alii</i> , 1998, 2007	Interpolation > Natural Neighbor
	Idrochimica	Concentrazione dei solfati nelle acque sotterranee	[SO ₄]	PETTITA <i>et alii</i> , 2009; GIUSTINI <i>et alii</i> , 2009	Interpolation > Natural Neighbor
		Conducibilità elettrica nelle acque sotterranee	EC	PETTITA <i>et alii</i> , 2009; GIUSTINI <i>et alii</i> , 2009	Interpolation > Natural Neighbor
		Indice di saturazione del gesso	GSI	PETTITA <i>et alii</i> , 2009; GIUSTINI <i>et alii</i> , 2009	Interpolation > Natural Neighbor
		Indice di saturazione della calcite	CSI	PETTITA <i>et alii</i> , 2009; GIUSTINI <i>et alii</i> , 2009	Interpolation > Natural Neighbor
	Geologia	Spessore dei depositi continentali (Pliocene-Olocene)	TQ	CAVINATO <i>et alii</i> , 2002	Interpolation > Natural Neighbor
		Faglie	F	CIOTOLI <i>et alii</i> , 1998, 2007; CAVINATO <i>et alii</i> , 2002	Buffer 50-100-200-500 m; Feature to raster
Fattore antropico	Densità dei pozzi autorizzati	dw	Database A.R.S.S.A.	Kernel Density Estimation	

minuire all'aumentare della distanza dal suo centro. Infine, nel caso di alcuni elementi puntiformi (distribuzione dei *sinkholes* e dei pozzi di emungimento) sono state create delle carte di densità di questi elementi, utilizzando l'algoritmo di Kernel (*Kernel Density Estimation*) (SILVERMAN, 1986) che calcola il numero di eventi intorno ad ogni oggetto che ricade all'interno di un'area di vicinaggio stabilita.

Le informazioni sulle variabili analizzate sono state ricavate estraendo il centroide di ciascun *pixel* da ogni strato informativo; i valori estratti sono stati esportati in un *file* Excel e analizzati statisticamente attraverso il *software* SPSS 11 (SPSS Inc. 2001). Nel *database* così ottenuto ogni riga corrisponde a un punto nello spazio (a un *pixel* di 200 m x 200 m), mentre ogni colonna rappresenta una variabile. Il significato delle variabili del database verrà descritto nel seguente paragrafo.

L'analisi delle relazioni statistiche tra *sinkholes* e fattori predisponenti è stata effettuata utilizzando la regressione logistica, il metodo per la stima della funzione di regressione che meglio collega la probabilità del possesso di un attributo dicotomico con un insieme di variabili esplicative (CIOTOLI *et alii*, 2013). La regressione logistica, un'estensione della regressione multipla, lega un insieme di variabili indipendenti, continue o discontinue nello spazio, con la variabile dipendente che in questo caso è la presenza (1) o l'assenza (0) di *sinkholes*, che non è un parametro continuo o quantitativo (GEORGE & MALLERY, 2000). A ciascun fattore che contribuisce a determinare la formazione degli sprofondamenti la regressione logistica assegna un peso (i.e. il coefficiente β); la trasformazione esponenziale dei coefficienti è usata per determinare i pesi in termini di probabilità (Pr) secondo la seguente equazione:

$$\text{Pr} = \frac{e^y}{1+e^y} \text{ dove:}$$

$$y = \beta_{i0} + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon_i \quad [1]$$

in cui è il set di n variabili indipendenti e è il set di $n+1$ pesi.

Per una descrizione più approfondita della regressione logistica si rimanda alla specifica letteratura (HOSMER & LEMESHOW, 2000; KLEINBAUM & KLEIN, 2002).

4. - IL DATABASE

Il *database* include il *layer* dei *sinkholes* (la variabile dipendente) e una serie di variabili indipendenti, caratterizzate da una determinata distribuzione spaziale, che rappresentano i potenziali fattori predisponenti alla formazione dei *sinkholes*.

Attraverso l'interpretazione di foto aeree, rilievi sul campo e dati di letteratura (NISIO, 2008) sono stati individuati 48 *sinkholes* e alcune aree prive di vegetazione, interpretate come aree in cui si verifica risalita di gas che inibiscono la crescita della vegetazione e che preludono alla formazione degli sprofondamenti.

L'ipotesi di lavoro si basa sul fatto che la genesi dei *sinkholes* della piana del Fucino non sia un semplice processo carsico, ma sia in parte dovuta a liquefazione della copertura alluvionale, dove questa abbia spessori inferiori a 100 m e granulometria medio-fina, a causa di un processo di risalita (*piping*) di fluidi aggressivi che possono generare sifonamento (asportazione meccanica di particelle solide) e/o dissoluzione chimica della matrice carbonatica della copertura quaternaria (GIUSTINI *et alii*, 2009). I principali fattori che controllerebbero la distribuzione spaziale dei *sinkholes* nell'area di studio sarebbero legati quindi alla geologia, al chimismo delle acque sotterranee e dei gas del sottosuolo, nonché a cause antropiche. Undici fattori predisponenti sono stati identificati e mappati, sulla base di dati di letteratura (tab. 1).

Le variabili considerate sono:

1. concentrazione dell'anidride carbonica nel gas del suolo $[CO_2]$. I gas acidi (come la CO_2 ma anche l' H_2S), che si dissolvono nelle acque sotterranee, incrementano la dissoluzione delle rocce del substrato e dei materiali di copertura.

2. concentrazione del metano nel gas del suolo $[CH_4]$. Il metano, prodotto per degradazione della materia organica ad opera di microrganismi o della temperatura durante il seppellimento dei sedimenti, può ossidarsi in CO_2 durante la migrazione verso la superficie.

3. concentrazione del radon nel gas del suolo $[Rn]$. Il radon è una specie gassosa utilizzata come tracciante di discontinuità crostali e per fornire indicazioni sul movimento dei gas (velocità e flussi).

4. concentrazione dell'elio nel gas del suolo $[He]$. Questo gas è importante in quanto suggerisce la presenza di faglie e fratture nascoste al di sotto della copertura quaternaria.

5. spessore dei depositi continentali (Pliocene – Olocene) TQ. Lo spessore di questi depositi è indicativo della profondità a cui si rinviene un livello gessoso, un substrato facilmente solubile. Al di sotto dei gessi si riviene il bedrock carbonatico, la cui geometria risulta particolarmente complessa (CAVINATO *et alii*, 2002).

6. faglie F. La presenza di un *network* di faglie o fratture permette un'intensa circolazione delle acque sotterranee e facilita l'erosione meccanica dei terreni di copertura.

7. densità dei pozzi autorizzati per emungimento di acqua *dw*. Questo fattore riflette l'intensità dell'attività antropica. Le aree con più alta densità di pozzi identificano zone di forte emungimento d'acqua con modificazione della superficie piezometrica; il forte pompaggio di acque per pratiche agricole o a scopi potabili sviluppa, nelle vicinanze dei pozzi, dei coni di depressione della falda che aumentano notevolmente la velocità dei flussi d'acqua e quindi la rimozione di particelle di sedimento e subsidenza della copertura alluvionale.

8. concentrazione dei solfati nelle acque sotterranee $[SO_4]$. Questo parametro riflette la quantità di gesso dissolto nell'acquifero o la presenza di H_2S .

9. conducibilità elettrica EC. Questo fattore riflette la salinità dell'acqua.

10. indice di saturazione della calcite CSI. Riflette la tendenza dell'acqua a dissolvere ($CSI < 0$) o depositare ($CSI > 0$) $CaCO_3$; è stato ottenuto dal calcolo di speciazione chimica attraverso il software PHREEQC.

11. indice di saturazione del gesso GSI. Il GSI riflette il potere dell'acqua a dissolvere ($GSI < 0$) o far precipitare ($GSI > 0$) i solfati. Anche questo indice è stato calcolato attraverso PHREEQC.

Le mappe di distribuzione spaziale dei parametri idrochimici ($[SO_4]$, EC, GSI, CSI) sono state generate interpolando i dati da PETITTA *et alii* (2009) e GIUSTINI *et alii* (2009), utilizzando il metodo dei "Natural Neighbor" (vedi paragrafo 3. Metodologia). Il limite principale di queste mappe è che sono state generate utilizzando un set di dati molto ristretto (solo 35 punti di campionamento), così l'accuratezza dell'interpolazione potrebbe essere bassa. Inoltre, il dominio detritico-alluvionale ospita una falda multi-strato ma i dati idrochimici,

derivati da pozzi, sorgenti e canali di irrigazione, non consentono di distinguere l'acquifero di provenienza. Infine, in generale esistono anche altri fattori che controllano l'origine e la distribuzione spaziale dei *sinkholes*, come l'uso del suolo, la quota e la pendenza dei terreni (GALVE *et alii*, 2008), tuttavia queste variabili non sono state considerate perché, nel caso specifico della piana del Fucino, esse non variano nello spazio. Le caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni di copertura, invece, non sono state considerate a causa dell'assenza di dati.

5. - RISULTATI E DISCUSSIONE

Le mappe, realizzate in ambiente GIS, che rappresentano la distribuzione spaziale delle variabili analizzate sono riportate nelle figg. 2, 3, 4. La variabile dipendente, ossia la carta di densità dei *sinkholes* (fig. 2A), mostra come gli sprofondamenti si concentrino in due aree: lungo il bordo settentrionale del bacino (località Avezzano-Le Mole, Pozzone) e nel settore sud-occidentale, nell'area compresa tra il Canale Collettore e gli abitati di

Luco dei Marsi e Trasacco. Questa carta rappresenta già un primo livello di analisi per determinare le aree più favorevoli alla formazione di nuovi sprofondamenti, in quanto la probabilità che si verifichino nuovi eventi è maggiore nelle zone in cui si sono già verificati in passato dei collassi (BRZEZINSKI, 2004; GALVE *et alii*, 2008).

La carta di densità dei *sinkholes* mostra un *pattern* molto simile alla mappa di densità dei pozzi autorizzati (fig. 2B). Questi si concentrano in corrispondenza dei principali centri abitati e ai margini della piana, dove le perforazioni possono intercettare a minime profondità le acque contenute nei carbonati, dato che lo spessore delle coperture quaternarie è minore (fig. 2C). In totale, a partire dagli anni '60, nella piana sono stati perforati più di 1000 pozzi (autorizzati), che costituiscono il *database* utilizzato per produrre la suddetta carta di densità, tuttavia è possibile che il numero reale di pozzi presenti nella piana sia superiore per la presenza di perforazioni non autorizzate e/o non censite.

Per quanto riguarda le mappe che rappresentano la distribuzione delle concentrazioni dei gas del suolo, come già evidenziato in CIOTOLI *et alii*,

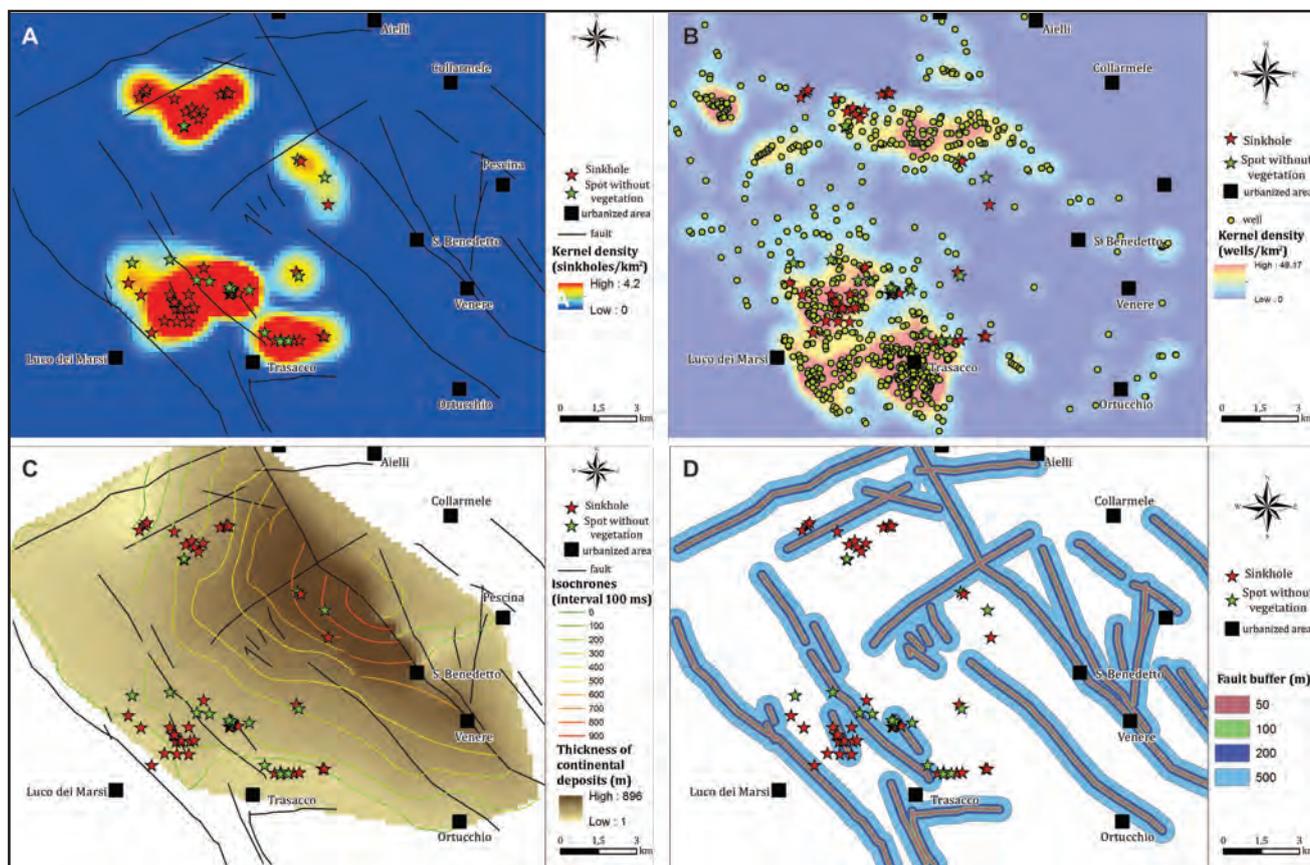


Fig. 2 – A) Mappa di densità degli sprofondamenti; B) Mappa di densità dei pozzi autorizzati; C) Mappa dello spessore dei depositi continentali; D) Mappa della localizzazione delle faglie.

- A) Sinkholes density map; B) authorized private wells density map; C) map of the thickness of Pliocene – Holocene continental deposits; D) Faults location.

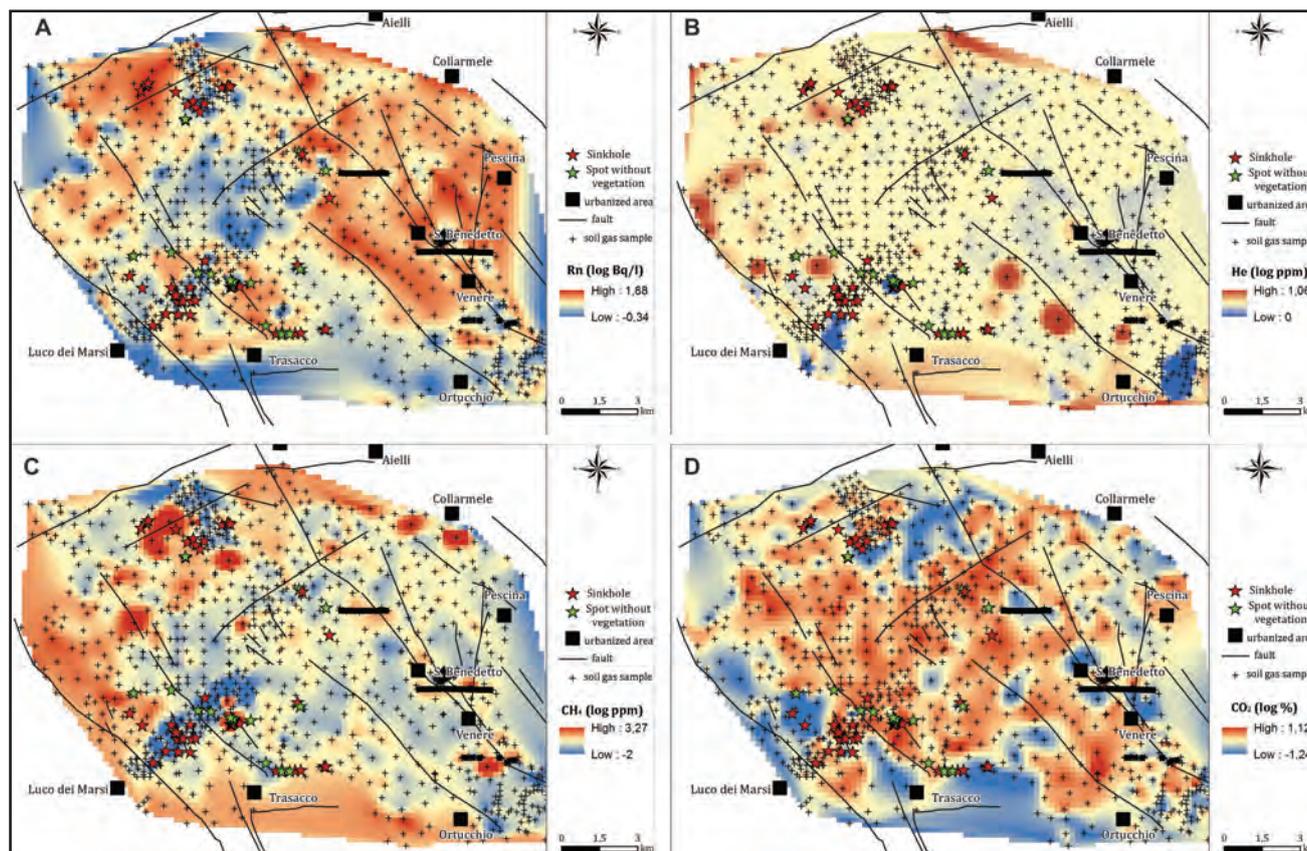


Fig. 3 – Carta delle concentrazioni di (A) radon, (B) elio, (C) metano e (D) anidride carbonica nel gas del suolo.
 Maps of concentrations of (A) radon, (B) helium, (C) methane and (D) carbon dioxide in soil gas.

(1998, 2007), esse mostrano come le concentrazioni più elevate dei gas siano localizzate in corrispondenza delle principali discontinuità tettoniche della piana. In particolare, le più alte concentrazioni di radon si rinvergono nel settore orientale e nordoccidentale della piana, dove risulta evidente la coincidenza con la faglia San Benedetto-Gioia dei Marsi e con la Avezzano-Celano (fig. 3A). Valori moderatamente anomali di attività del radon si rinvergono anche lungo le faglie localizzate nella depressione del lago storico (faglie di Trasacco e di Ortucchio). L'elio presenta i valori di concentrazione più elevati nella parte occidentale della piana, sebbene non fornisca una chiara correlazione con le faglie che in questo settore sono state riconosciute tramite prospezione geofisica; anomalie di concentrazione "spot" si presentano tuttavia lungo la faglia Avezzano-Celano e in prossimità della faglia di Ortucchio (fig. 3B). Per le concentrazioni di metano i valori più elevati si osservano nel settore occidentale della piana nell'area compresa tra la faglia di Luco dei Marsi e quella di Trasacco, e nel settore settentrionale lungo la faglia Avezzano-Celano (fig. 3C). Infine, i valori elevati di CO₂ nel suolo mettono in evi-

denza in particolar modo le strutture sismogenetiche e le faglie normali attive in età recente nel settore orientale (San Benedetto-Gioia dei Marsi e Ortucchio), così come gli elementi strutturali sepolti nel settore occidentale (ossia la parte meridionale della faglia di Trasacco e Avezzano-Celano) (fig. 3D).

Le carte derivate dai dati idrochimici mostrano che la conducibilità elettrica così come la concentrazione dei solfati sono parametri elevati nel settore occidentale della piana (figg. 4A, 4B). In questa area l'elevata EC può essere ricondotta a una circolazione più profonda e/o lenta rispetto alle acque del settore settentrionale e orientale, le quali ricevono un contributo alla ricarica dagli acquiferi carbonatici che bordano la piana (PETITTA, 2009). Inoltre, va ricordato che l'area a più alta concentrazione di solfati, e conseguentemente a più elevata EC, coincide con la zona in cui lo spessore dei depositi quaternari, al di sotto del quale è presente un livello gessifero, è minore. Tuttavia la presenza dei solfati potrebbe essere imputabile non solo alla lisciviazione dei gessi, ma anche all'ossidazione dell'idrogeno solforato (H₂S) che, presente in associazione con il metano, è legato

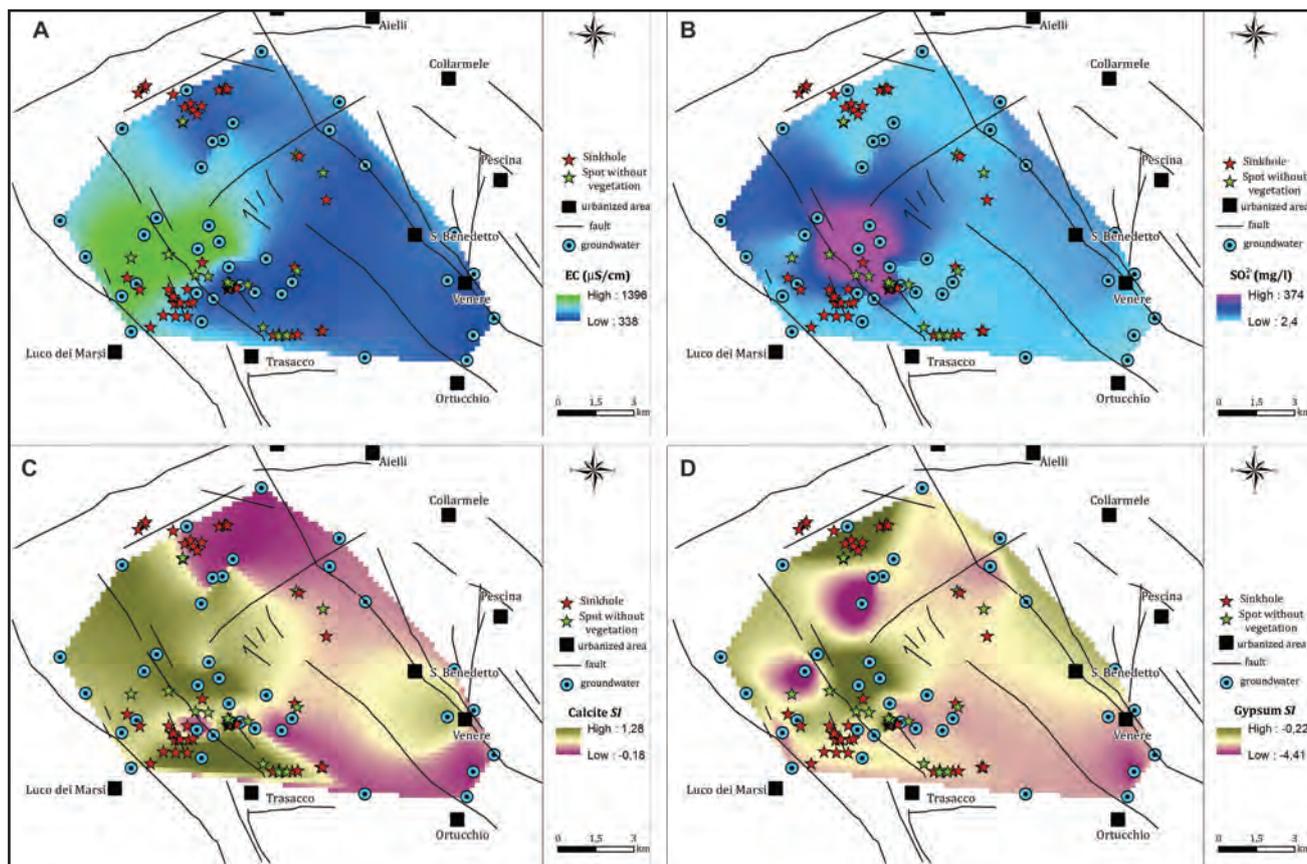


Fig. 4 – Carta della distribuzione spaziale di (A) conducibilità elettrica, (B) concentrazione dei solfati, (C) indice di saturazione della calcite, (D) indice di saturazione del gesso.

- Maps of spatial distribution of (A) electrical conductivity, (B) sulphate concentration, (C) calcite saturation index and (D) gypsum saturation index.

all'esistenza nel passato del bacino lacustre-palustre e alla conseguente deposizione di sedimenti torbosi (LETTA & MASI, 1997). L'indice di saturazione della calcite (fig. 4C) indica la presenza di acque prevalentemente soprassature in calcite (capaci di depositare calcite) nel settore occidentale della piana e sottosature (capaci di solubilizzare calcite) nel settore orientale, confermando la presenza di una circolazione più profonda a ovest e una ricarica più rapida dagli acquiferi carbonatici a est. Più nel dettaglio, l'area con $CSI < 0$ coincide piuttosto bene con le aree in cui sono più diffusi i *sinkholes*. Più variabile appare la situazione relativa all'indice di saturazione del gesso; dalla mappa si nota che le acque sottosature non coincidono con le aree a maggior densità di *sinkholes*, ma caratterizzano il settore sud-orientale della piana e le acque di due canali di irrigazione situati nel settore nord-occidentale (fig. 4D).

Ciascuna mappa costituisce uno strato informativo che rappresenta un fattore che condiziona la probabilità che si verifichi uno sprofondamento; il peso con cui ogni fattore influisce sul fenomeno è determinato dal relativo coefficiente β della regressione logistica. Sono stati elaborati due modelli,

utilizzando l'analisi logistica di tipo "forward" che elimina automaticamente le variabili non significative ai fini del modello.

- Modello n. 1

Per questa analisi come dati di *input* sono state considerate le 10 variabili indipendenti che rappresentano i fattori naturali (geologia, idrochimica e gas del suolo), escludendo in pratica il fattore "antropico", ossia la densità dei pozzi autorizzati. La tabella 2 riporta il risultato dell'analisi, con i coefficienti β dell'equazione di questo modello in cui le variabili $[Rn]$, $[SO_4]$ e GSI non sono risultate significative. I fattori che risultano avere un peso preponderante nel determinare l'evento sono le concentrazioni del gas del suolo come CO_2 e elio. I fattori con un coefficiente negativo (F , TQ , EC , $[CH_4]$ e CSI) sono di minore importanza a causa dei corrispondenti bassi valori risultanti dalla trasformazione esponenziale di β . Attraverso la matrice di classificazione calcolata dal modello logistico relativa alle celle codificate 0 (assenza di evento) e 1 (presenza di evento), è possibile osservare che questo modello di regressione logistica classifica correttamente il 65% delle celle in cui sono presenti sprofondamenti. Applicando i coef-

Tab. 2 – Coefficienti (β) dell'equazione del modello logistico n. 1 per le variabili significative.

- Coefficients (β) of the equation of the logistic model n. 1 for the significant variables.

Variabile	Layer	β	Exp (β)
Faglie	<i>F</i>	- 0,002	1
Spessore dei depositi continentali	<i>TQ</i>	- 0,002	1
Conducibilità elettrica	<i>EC</i>	- 0,001	1
Indice di saturazione della calcite	<i>CSI</i>	- 1,528	0,22
Concentrazione del CH ₄ nel gas del suolo	[<i>CH4</i>]	- 0,439	0,64
Concentrazione del He nel gas del suolo	[<i>He</i>]	4,89	132,95
Concentrazione della CO ₂ nel gas del suolo	[<i>CO2</i>]	3,342	28,28

efficienti del modello logistico elaborato ai *layer* di tipo *raster* relativi ai fattori predisponenti considerati è stata elaborata una mappa di suscettibilità allo sprofondamento (fig. 5A).

- Modello n. 2

In questo caso sono state considerate le 10 variabili del modello n. 1, alle quali è stata aggiunta la densità dei pozzi autorizzati. La tabella 3 riporta i coefficienti β dell'equazione di questo modello, in cui le uniche variabili risultate significative sono la densità dei pozzi autorizzati e, subordinatamente, lo spessore dei depositi continentali e la concentrazione del CH₄ nel gas del suolo. La matrice di classificazione per questo modello indica che la regressione logistica ha classificato correttamente il 69% delle celle con valore 1 (presenza di

sinkholes). La mappa di suscettibilità elaborata per questo modello è riportata in figura 5B.

Uno dei principali vantaggi della regressione logistica è la possibilità di identificare statisticamente i parametri che contribuiscono alla formazione dei *sinkholes*, fornendo informazioni preziose sulla genesi di questi fenomeni. Considerando i due modelli proposti, è evidente il fortissimo impatto che ha l'emungimento di acque dal sottosuolo che accelera un fenomeno per cui il territorio della piana del Fucino è comunque naturalmente predisposto. Inoltre, il forte peso che ha la presenza dei gas nel suolo (CO₂, He e CH₄) fornisce una conferma al modello proposto per la genesi dei *sinkholes* del Fucino che risulterebbero legati a un processo di risalita (*piping*) di fluidi aggressivi che possono generare sifonamento e/o dissoluzione chimica della copertura quaternaria.

Infine, confrontando le mappe di suscettibilità ottenute dai due modelli, su cui sono sovrainposti anche i *sinkholes* censiti, si nota come entrambe hanno identificato due aree a più alta probabilità che si verifichino questi fenomeni: il bordo setten-

Tab. 3 – Coefficienti (β) dell'equazione del modello logistico n. 2 per le variabili significative.

- Coefficients (β) of the equation of the logistic model n. 2 for the significant variables.

Variabile	Layer	β	Exp (β)
Densità dei pozzi autorizzati	<i>dw</i>	0,216	1,24
Spessore dei depositi continentali	<i>TQ</i>	- 0,001	1
Concentrazione del CH ₄ nel gas del suolo	[<i>CH4</i>]	- 0,639	0,53

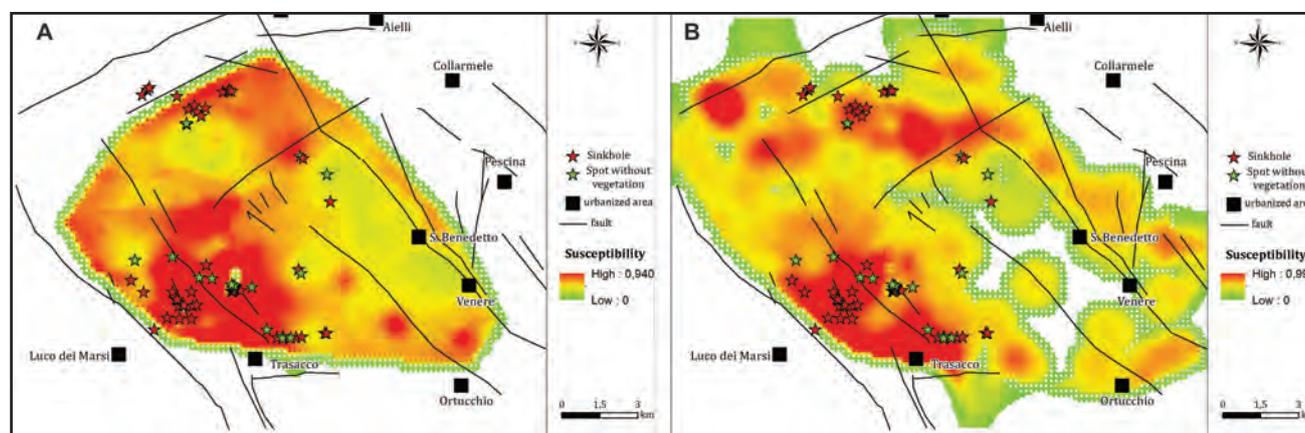


Fig. 5 – A) Mappa della suscettibilità allo sprofondamento nella piana del Fucino realizzata applicando il Modello n. 1; B) mappa della suscettibilità allo sprofondamento realizzata applicando il Modello n. 2.

- Map of sinkholes susceptibility in the Fucino plain elaborated by using Model n. 1; B) map of sinkholes susceptibility elaborated by using Model n. 2.

trionale del bacino (località Avezzano-Le Mole, Pozzone) e il settore sud-occidentale nell'area compresa tra il canale collettore centrale e gli abitati di Luco dei Marsi e Trasacco.

6. - CONCLUSIONI

L'analisi geospaziale e la statistica multivariata sono le metodologie applicate allo studio del fenomeno degli sprofondamenti nella piana del Fucino; l'approccio descritto ha consentito di effettuare una prima valutazione di suscettibilità di questo territorio. Attraverso la regressione logistica è stato possibile identificare i fattori predisponenti che influenzano maggiormente questi fenomeni; tali fattori sono l'alta concentrazione dell'anidride carbonica e dell'elio nel suolo, l'elevata densità dei pozzi per l'approvvigionamento idrico, e in misura minore, lo spessore della copertura alluvionale inferiore a 200 m, la presenza di faglie, l'alta concentrazione del metano nel suolo e l'elevata conducibilità elettrica delle acque sotterranee. Sebbene con alcune limitazioni legate all'impossibilità di restituire mappe della distribuzione spaziale di altri fattori che possono giocare un ruolo chiave nella formazione dei *sinkholes*, l'applicazione delle tecniche di regressione logistica binaria e delle tecniche dell'analisi geospaziale costituiscono un valido strumento per l'elaborazione di mappe di suscettibilità. Tali mappe hanno permesso di individuare due aree maggiormente predisposte al verificarsi di questi fenomeni, fornendo uno strumento promettente per la futura pianificazione territoriale.

Attualmente un tentativo per migliorare l'affidabilità dei modelli di regressione multivariata può essere fatto mediante l'applicazione della regressione multivariata in campo spaziale con la tecnica di Regressione Geografica Pesata.

BIBLIOGRAFIA

- A.R.S.S.A. Agenzia Regionale per i Servizi di Sviluppo Agricolo (1996-2004) – *Dati meteorologici, idrologici e di pompaggio*. Dati inediti.
- BASSO N., CIOTOLI G., FINOIA M.G., GUARINO P.M., MIRAGLINO P. & NISIO S., (2013) - *Gli sprofondamenti nella città di Napoli*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **93**, 73-104.
- BREZINSKI D.K. (2004) – *Stratigraphy of the Frederick Valley and its relationship to karst development: Maryland Geological Survey*. Report of Investigations, N. 75.
- CAVINATO G.P., CARUSI C., DALL'ASTA M., MICCADEI E. & PIACENTINI T. (2002) – *Sedimentary and tectonic evolution of Plio-Pleistocene alluvial lacustrine deposits of Fucino basin (central Italy)*. Sediment. Geol., **148**: 29–59.
- CIOTOLI G., GUERRA M., LOMBARDI S. & VITTORI E. (1998) – *Soil gas survey for tracing seismogenic faults: A case study in the Fucino Basin, central Italy*, J. Geophys. Res., **103** (23): 781–794.
- CIOTOLI G., LOMBARDI S. & ANNUNZIATELLIS A. (2007) – *Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino plain, central Italy* . J. Geophys. Res. **112** (B05): 407.
- CIOTOLI G., FINOIA M.G., LIPERI L., MELONI F., NISIO S., TONELLI V. & ZIZZARI P. (2015) - *Sinkhole susceptibility map of the Lazio Region, central Italy*. *Journal of Maps* **1/2015**.
- CIOTOLI G., NISIO S., FINOIA M.G. & CORAZZA A. (2012) – *Susceptibility maps of collapse sinkholes in urban areas by using geospatial analysis*. Proceeding of 7thEUREGEO, European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, **2**: 480–481.
- CIOTOLI G., CORAZZA A., FINOIA M.G., NISIO S., SERAFINI R. & SUCCHIARELLI C. (2013) – *Sinkholes antropogenici nel territorio di Roma Capitale*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **93**, 143–182.
- GALVE J.P., BONACHEA J., REMONDO J., GUTIÉRREZ F., GUERRERO J., LUCHA P., CENDRERO A., GUTIÉRREZ M. & SÁNCHEZ J.A. (2008) – *Development and validation of sinkhole susceptibility models in mantled karst settings. A case study from the Ebro valley evaporite karst (NE Spain)*. Eng. Geol., **99**: 185–197.
- GALVE J.P., GUTIÉRREZ F., BONACHEA J., LUCHA P. & CENDRERO A. (2009) – *Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain)*. Geomorphology, **111**: 160–172.
- GEORGE D. & MALLERY P. (2000) – *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference, 10.0 update*, pp. 371, Allyn & Bacon, Boston.
- GIRAUDI C. (1986) – *Faglie ad attività olocenica nella piana del Fucino*. Mem. Soc. Geol. Ital., **35**: 887–892.
- GIRAUDI C. (1989) – *Lake levels and climate for the last 30000 years in the Fucino area (Abruzzo, central Italy): A review*. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., **70**: 249–260.
- GIUSTINI F., BRILLI M., CIOTOLI G., LOMBARDI S. & NISIO S. (2009) – *Metodologie geologiche e geochimiche applicate allo studio dei sinkholes della piana del Fucino (Italia centrale)*. Atti del 2° Workshop Internazionale ISPRA: *I sinkholes, gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato*, 3-4 dicembre 2009, Roma, pp. 525–540.
- GIUSTINI F. & BRILLI M. (2014) – *Natural sources of carbon dioxide and methane from the fluvio-lacustrine sediments of the Fucino Plain (Central Italy): evidence from stable carbon isotopes*. Ital. J. Geosci. (Boll. Soc. Geol. It.), **133** (3): 439–444.
- HYLAND S.E. (2005) – *Analysis of sinkhole susceptibility and karst distribution in the Northern Shenandoah Valley, Virginia: Implications for Low Impact Development (LID) Site Suitability Models*. Virginia Polytechnic Institute and State University, pp. 56, Blacksburg, Virginia.
- HOSMER D. W. & LEMESHOW S. (2000) – *Applied Logistic Regression*. John Wiley and Sons, pp. 383, New York.
- KLEINBAUM D. & KLEIN M. (2002) – *Logistic Regression: A Self-Learning Text*. Springer-Verlag, pp.513, New York.
- LAMELAS M.T., MARINONI O., HOPPE A. & DE LA RIVA J. (2008) – *Doline probability map using logistic regression and GIS technology in the central Ebro Basin (Spain)*. Environ. Geol., **54**: 963–977.
- LETTA D. & MASI U. (1997) – *Caratteristiche geochimiche di acque sorgive e di pozzo della zona della Piana del Fucino (l'Aquila, Italia centrale)*. Geologica Romana, **33**: 1–12.
- NISIO S. (2003) – *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*. Il Quaternario, **16** (1) 2003, 121-132.
- NISIO S. (2008) – *I fenomeni naturali di sinkholes nelle aree di pianura italiane*. Mem. Descr. Della Carta Geol. D'It., **85**, 475pp.
- NISIO S. & SALVATI R. (2004) - *Fenomeni di sprofondamento catastrofico. Proposta di classificazione applicata alla casistica ita-*

- liana. 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: 573-584.
- PETTITA M. (2009) – *Impatto dell'attività agricola sulla risorsa idrica nella piana del fucino (Italia centrale)*. IJEGE, 2: 59–90.
- PETTITA M., ARAVENA R., FRACCHIOLLA D. & BARBIERI M. (2009) – *Application of isotopic and geochemical tools for the evaluation of nitrogen cycling in an agricultural basin, the Fucino Plain, Central Italy*. J. Hydrol., 372: 124–135.
- SIBSON R. (1981) – *A brief description of natural neighbour interpolation*. In: V. BARNETT (Ed.): «*Interpreting Multivariate Data*», pp. 21–36, Wiley, New York.
- SILVERMAN B.W. (1986) – *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman and Hall: 176, New York.
- SIMÓN J.L. & SORIANO M.A. (2002) – *Actual and potential doline subsidence hazard mapping: case study in the Ebro basin (Spain)*. In: P.T. BOBROWSKY (Ed.): «*Geoenvironmental Mapping: Method, Theory and Practice*»: 649–666, Balkema, Rotterdam.
- SIMÓN J.L., SORIANO M.A., GRACIAS J. & SALVADOR T. (1991) – *Dolinas aluviales en las terrazas del Ebro al oeste de Zaragoza: un análisis empírico de los factores de riesgo*. Cuaternario y Geomorfología, 5: 139–148.
- SORIANO A. & SIMÓN L. (1995) – *Alluvial dolines in the central Ebro Basin, Spain: a spatial and developmental hazard analysis*. Geomorphology, 11: 295–309.
- SPSS Inc. (2001) – SPSS 11 for Windows. SPSS Inc., Chicago.
- YILMAZ I. (2007) – *GIS based susceptibility mapping of karst depressions in gypsum: a case study from Sivas basin (Turkey)*. Eng. Geol., 90: 89–103.