

ASSETTO GEOLOGICO E PERICOLOSITÀ DA SINKHOLE IN AREE URBANE: IL CASO DI CAMAIORE (TOSCANA, ITALIA)

D'AMATO AVANZI GIACOMO*, **GIANNECCHINI ROBERTO***,
PUCCINELLI ALBERTO*, **VERANI MARIO***

*Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Pisa

RIASSUNTO

Il 15 ottobre 1995, la zona di Camaiore (Toscana nord-occidentale) è stata interessata da un improvviso fenomeno di sprofondamento, che ha causato la distruzione o il severo danneggiamento di numerose abitazioni.

Poiché la struttura geologica di un'area è uno dei fattori fondamentali nella genesi dei sinkholes, sono state effettuate diverse indagini di superficie e di sottosuolo, allo scopo di comprendere le modalità di formazione ed evoluzione del collasso. Le caratteristiche dell'area sono state ricostruite sulla base di indagini geologiche, geomorfologiche e geognostiche: la zona della voragine è caratterizzata dalla presenza di un substrato carbonatico intensamente fratturato e interessato da molteplici faglie dirette. Il substrato è sormontato da depositi alluvionali, che raggiungono spessori fino a 140 m. Sulla base delle indagini e di sondaggi geognostici, nel substrato è stata evidenziata la presenza di cavità carsiche, generalmente riempite da brecce o materiale alluvionale.

Il disastro di Camaiore è attribuito al collasso di una cavità profonda nel substrato carbonatico. Gli effetti di tale collasso si sono propagati verso la superficie soltanto dopo un certo periodo di tempo, con la lenta progressione della subsidenza verso l'alto, interessando il materiale alluvionale e, in ultimo, le abitazioni soprastanti. Non è superfluo notare che, una settimana prima del collasso, una scossa di terremoto del VII grado della scala Mercalli, con epicentro situato a circa 50 km da Camaiore, ha interessato anche l'area in oggetto; è quindi probabile che lo shock sismico abbia innescato o accelerato il fenomeno di collasso.

Allo scopo di individuare altre zone potenzialmente instabili, sono state effettuate ricerche storico-archivistiche, unitamente a indagini geognostiche e geomorfologiche, sia nell'area urbana, sia nelle immediate adiacenze. Tali studi hanno evidenziato, nei pressi dell'abitato di Camaiore, possibili altre zone interessate da cavità profonde nel sottosuolo, nonché tracce di antichi fenomeni di collasso. Infatti, il substrato carbonatico è ampiamente diffuso nell'area in esame e potrebbe essere coinvolto, insieme alla copertura alluvionale, in fenomeni di sprofondamento carsico. Inoltre, Camaiore è situata in prossimità di un'area altamente sismica (Garfagnana-Lunigiana), dove possono verificarsi forti terremoti (magnitudo superiore a 6). In considerazione di questi aspetti, è necessario incrementare ed estendere le indagini all'intera area della piana di Camaiore, per identificare condizioni analoghe a quelle del collasso catastrofico del 1995 e pianificare lo sviluppo futuro dell'area.

Parole chiave: Geologia, Carsismo, Voragine, Sinkhole, Toscana, Italia.

ABSTRACT

In the Camaiore town (Tuscany), a sinkhole suddenly formed in 1995 and caused destruction or heavy damage of several houses. Many people were evacuated.

The geological structure being one of the most important preparing factor of the sinkhole developing, surface and underground geologic features of the area were investigated, in order to understand the collapse developing and evolution. Such features

were reconstructed on the basis of geologic, geomorphic and geognostic surveys: in the sinkhole zone, the bedrock is made up of limestone, densely fractured and intersected by several direct faults. This bedrock is buried by thick alluvial deposits, up to 140 m thick. Basing on surveys and drillings, the bedrock evidences karst cavities, generally filled by breccia and/or alluvial materials.

The sinkhole disaster is attributed to a deep collapse of a cave in the calcareous bedrock. The effects of this collapse were felt at the surface only after a considerable lapse of time, determined by the slow progress of the cavity upwards in the alluvial materials. Actually, it is significant to note that, one week before the collapse, an earthquake with a 50 km far epicentre involved the Camaiore area as well; probably, the earthquake triggered the collapse of the cave roof in the bedrock. In order to individuate other hazardous places, historic-archive researches together with geognostic and geomorphic surveys were also performed, in the urban area and around. These studies highlighted possible deep caves in the underground and traces of past karst collapses, close to and in the Camaiore town; in fact, limestone is widespread in the study area and might be affected by sudden karst phenomena. Furthermore, Camaiore is next a high seismicity region (the Garfagnana-Lunigiana), where very strong earthquakes (> 6 M) occurred. Finally, due to the high sinkhole hazard of the area, it is considered necessary to extend the investigations to the whole Camaiore plain, in order to identify any conditions like those of the 1995 collapse and to plan the next utilization of the area.

Keywords: Geology, Karst, Sinkhole, Tuscany, Italy.

1. PREMESSA

Nelle prime ore del mattino del 15 ottobre 1995, nella pianura di Camaiore (LU) si è prodotta repentinamente una voragine del diametro di circa 30 m (Fig. 1). In particolare, la voragine si è formata in una zona residenziale a nord-ovest del centro storico, dove ha causato il crollo o il grave danneggiamento di alcuni fabbricati di civile abitazione.



Fig. 1 - La voragine di Camaiore (foto L. Micheli). The Camaiore sinkhole (Photograph by L. Micheli).

La fase critica dello sprofondamento si è manifestata nella notte tra sabato 14 e domenica 15 ottobre, con vistosi cedimenti della sede stradale e lesioni nei fabbricati. Secondo alcune testimonianze, già da vari mesi erano in atto assestamenti del terreno, che avevano determinato deformazioni strutturali e allertato la popolazione. Ciò ha permesso l'evacuazione della zona prima che il collasso raggiungesse la fase parossistica, evitando di mettere a rischio l'incolumità delle persone.

Le fasi evolutive della voragine si sono succedute con un progressivo abbassamento a imbuto del terreno (fino a circa 2 m nella zona centrale), mentre intorno alle 7 del mattino del 15 si è aperta la voragine, con un diametro iniziale di circa 15-20 m e con acqua risaliente fino a 2-3 m sotto l'originario piano campagna. Tale voragine, di forma sostanzialmente circolare e con pareti sub-verticali, è andata progressivamente allargandosi fino a circa 30 m, determinando il crollo parziale di due fabbricati adiacenti e vistose fessure in altri edifici (Fig. 2). Il livello di falda si è poi assestato intorno ai 4-5 m di profondità dal piano campagna.



Fig. 2 - Edifici semidistrutti presso la voragine. Half-destroyed buildings close to the sinkhole.

I fenomeni di sprofondamento improvviso si verificano in varie parti del mondo, specialmente in aree carsiche (BECK, 1984). In alcune zone degli Stati Uniti, in particolare in Florida, i sinkholes rappresentano una delle più frequenti e temute calamità naturali, per le quali è spesso problematico predisporre adeguati sistemi di difesa e la cui prevedibilità, nonostante le numerose conoscenze in merito, è ancora lungi dall'essere effettivamente risolta (SINCLAIR & STEWART, 1985; NEWTON, 1987, WILSON & SHOCK, 1996). Una volta esauritosi il fenomeno di sprofondamento, la zona depressa può essere occupata da un laghetto, come si è verificato recentemente anche nella voragine del Bottegone, nei pressi di Grosseto (BERTI et alii, 2002a). In particolare, il termine sinkhole viene utilizzato per indicare sprofondamenti di qualsiasi genere, tra cui i collassi repentini, sia di origine naturale che antropica; in Italia, tale terminologia è stata introdotta da FACCENNA et alii (1993) e BRUNAMONTE et alii, (1994). Una sintesi sulla nomenclatura si trova anche in NISIO (2003).

La voragine catastrofica di Camaione è stato un evento di particolare rilievo, soprattutto per aver direttamente interessato un centro abitato, con devastanti conseguenze. Tale fenomeno è stato quindi studiato da numerosi autori (BUCHIGNANI, 2002;

BUCHIGNANI & CHINES, 2002; D'AMATO AVANZI et alii, 2002; RIZZO, 2002), allo scopo di evidenziarne le caratteristiche principali e soprattutto le cause.

In considerazione del fatto che tale tipo di fenomeni è solitamente controllato dalla struttura ed evoluzione tettonica e con l'intento di approfondire le conoscenze sulle cause che hanno prodotto il collasso, è stata programmata ed effettuata una serie di indagini, tra cui quelle, fondamentali, finalizzate alla conoscenza geologica dell'area. Tali studi sono consistiti essenzialmente nell'esecuzione di rilievi geologici, di una campagna geofisica (prospezioni elettriche e sismiche) e di sondaggi geognostici profondi nella zona interessata dalla voragine.

In questo lavoro vengono sintetizzati i principali risultati emersi da queste indagini, con particolare riferimento alle caratteristiche geologiche, sia dell'area circostante la pianura, sia del sottosuolo nella zona della voragine.

2. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

La città di Camaione è situata nell'entroterra della Versilia, a circa 8 km dal mare, in prossimità dei margini meridionali della catena apuana. L'abitato sorge in una piccola pianura intermontana, che si allunga per circa 3 km in direzione NW-SE, con una larghezza di 0,5-1,2 km; essa è attraversata longitudinalmente dal T. Lucese ed è limitata verso nord-ovest dal T. Lombricese, ai piedi dei rilievi che culminano nel M. Gabberi (m 1109); verso nord-est dalle pendici che digradano dai monti Prana (m 1221) e Matanna (m 1317); verso sud-ovest dai rilievi collinari di Pedona; verso sud-est, infine, dalla zona di Montemagno, spartiacque con il bacino del F. Serchio. A nord-ovest e nord-est della piana, le quote massime si raggiungono in corrispondenza del crinale apuano, spartiacque tra i bacini della Versilia e quello del F. Serchio. In questo settore le forme aspre sono tipiche del paesaggio apuano: versanti ripidi e valli incassate, particolarmente ove affiorano rocce carbonatiche (monti Gabberi, Matanna, Prana e Pedone, media e alta valle del Rio Lombricese). Le altre zone intorno alla pianura sono prevalentemente collinari, con forme più dolci e versanti meno acclivi.

La rete idrografica è più sviluppata e gerarchizzata nella zona montana a nord-est, dove complessivamente fa capo ai due corsi d'acqua principali (Rio Lucese e Rio Lombricese); a valle della loro confluenza, il corso d'acqua (che prende il nome di F. Camaione) supera le colline e prosegue fino al mare, attraverso la pianura della Versilia. L'idrografia è chiaramente influenzata dall'assetto strutturale e dalle caratteristiche di permeabilità ed erodibilità delle rocce: la configurazione generale è assimilabile a un pattern subdentritico, con una marcata asimmetria tra la porzione nord-est e quella sud-ovest. I vari corsi d'acqua che si immettono nella piana hanno formato alcuni conoidi, spesso coalescenti, che hanno contribuito alla deposizione di potenti coltri alluvionali ghiaiose, sabbiose e limo-argillose. Gli apparati più vasti e tipici sono riferibili ai sottobacini nord-orientali e nord-occidentali. Nella zona di Camaione, affiorano estesamente le formazioni carbonatiche (Calcere cavernoso, Calcere massiccio, Maiolica) e quindi non sono rare le forme di dissoluzione carsica, impostate in diverse formazioni carbonatiche. Si tratta per lo più di microforme superficiali, ma anche di doline, grotte e inghiottitoi. Le prime comprendono vaschette di corrosione, scannellature e solchi, disposte spesso lungo fratture. Le doline sono rielaborate dall'erosione o più o meno smantellate: alcune sono riconoscibili nella zona sommitale del M. Ciurlaglia e lungo i suoi versanti sud-occidentali; altre, più piccole, si trovano a est e sud del M. Gevoli. Infine, più vicina all'area della voragine, si individua una forma a imbuto presso C.le Carbonaia, che potrebbe derivare dallo smantellamento di una dolina relativamente ampia, il cui fondo sarebbe oggi sepolto dai depositi alluvionali.

Le forme carsiche ipogee non si manifestano invece con particolare evidenza; nel territorio circostante la piana, sono state comunque censite varie grotte (GIANNOTTI, 1988), rap-

presentate in genere da cavità assorbenti, favorite da sistemi di fratture o da faglie. Nel Calcare cavernoso - la formazione che costituisce il substrato roccioso nell'area dello sprofondamento - si trovano grotte tra 50 m e oltre 500 m di quota, tra la zona a nord di Pietrasanta e i dintorni di Capezzano Pianore (3-5 km dalla voragine). Si tratta di cavità modeste, tranne la Buca dell'Agnello, che si sviluppa per 385 m, con dislivello di 138 m. Altre piccole grotte si trovano a nord-est di Camaione. Meno diffuse sono le cavità sotterranee nelle altre formazioni calcaree. Quindi, nella zona circostante Camaione, il carsismo ipogeo nel Calcare cavernoso è documentato tra 50 m e oltre 500 m s.l.m. Poiché, come vedremo in seguito, la quota della pianura è compresa tra 30 e 50 m circa e il substrato roccioso nella zona della voragine è sepolto da 80-120 m di depositi alluvionali, la presenza di cavità carsiche in tale substrato implica che esse si trovino fino a quasi 100 m al di sotto del livello marino attuale. Potrebbe quindi trattarsi di grotte dislocate da movimenti tettonici di sprofondamento e in seguito sviluppatesi ulteriormente.

La stessa piana alluvionale è verosimilmente il prodotto di una subsidenza prolungata nel tempo, provocata dai sistemi di faglie dirette (di cui si parlerà in seguito), che ha favorito la sedimentazione di potenti coltri alluvionali. Infatti, la pianura di Camaione, come quella della Versilia, è il risultato delle vicende posteriori alla tettonogenesi tortoniana, con il collasso del margine continentale tirrenico, le oscillazioni eustatiche e la dinamica fluviale plio-quadernaria (FEDERICI & RAU, 1980). In particolare, secondo tali Autori, a partire dal Messiniano (Pliocene nella Toscana a nord del F. Arno) gli adattamenti isostatici postorogeni e i fenomeni estensionali hanno accentuato una situazione strutturale preesistente, caratterizzata da alti e bassi strutturali, attraverso movimenti verticali lungo fasci di faglie a direzione prevalente NW-SE. In questo quadro generale di movimenti relativi (sollevamento delle dorsali e subsidenza dei bassi strutturali), verosimilmente proseguito nelle sue linee fondamentali fino al Pleistocene superiore - Olocene, sono ipotizzabili ulteriori movimenti differenziali, di ambito più locale (come nell'area studiata).

3. CARATTERISTICHE GEOLOGICHE

L'area studiata si trova nell'Appennino settentrionale, una catena a falde di ricoprimento prodottasi in una complessa storia evolutiva polifasata (ELTER, 1960, 1973; DALLAN & NARDI, 1974, 1979; BOCCALETTI & COLI, 1985; BOCCALETTI et alii, 1981, 1987). Schematicamente, si possono individuare due periodi principali: dal Cretaceo superiore al Miocene superiore si ha uno stile eminentemente compressivo, responsabile dell'impilamento e della messa in posto di unità tettoniche provenienti da domini paleogeografici diversi (da ovest verso est: Dominio Ligure, Dominio Subligure, Dominio Toscano). Nel Miocene sup.-Pliocene inf. si instaura una tettonica di tipo distensivo, che dà luogo alla formazione di depressioni tettoniche (Val di Serchio, Val di Magra, Versilia, etc.), nelle quali sedimentano potenti successioni lacustri e fluviali (FEDERICI & RAU, 1980; BARTOLINI et alii, 1983). In particolare, l'area di Camaione si colloca nella zona sud-occidentale delle Alpi Apuane. Senza illustrare nel dettaglio la complessa struttura geologica delle Apuane, oggetto di studi numerosi (fra i quali si ricordano, in particolare: ZACCAGNA, 1932; SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1969, 1970; CARMIGNANI & GIGLIA, 1983; COLI & PANDELI, 1992, cum bibl.; CARMIGNANI et alii, 2000), si ricorda che in questa catena affiorano molte delle Unità che compongono l'edificio strutturale dell'Appennino settentrionale, tra loro sovrapposte e deformate nel corso delle vicende tettoniche: le Unità Metamorfiche, la Successione Toscana non metamorfica (Falda Toscana Auctt.) e le Unità Liguri, sovrastate dalle successioni neogeniche e quaternarie.

Il complesso metamorfico, che comprende le unità strutturalmente più profonde affioranti nell'Appennino Settentrionale, è caratterizzato da metamorfismo di basso grado sin-tettonico polifasico alpino e può essere suddiviso in due unità tettoniche principali: Unità di

Massa e Nucleo Metamorfico Apuano. L'Unità di Massa affiora quasi esclusivamente lungo la fascia occidentale delle Apuane ed è costituita da potenti orizzonti detritico-filladici e quarziticci. Il Nucleo Metamorfico Apuano ("Autoctono" Auctt.) è l'unità maggiormente rappresentata e più tipica del massiccio e comprende una successione di età compresa tra il Paleozoico e l'Oligocene. La porzione paleozoica è rappresentata prevalentemente da rocce filladiche e quarziticche e da metavulcaniti; essa è sovrastata da dolomie e calcari dolomitici, marmi e breccie policrome, marmi selciferi, radiolariti, marmi "cipollini", mica-scisti e meta-arenarie (note come Pseudomacigno). Secondo CARMIGNANI et alii (1980) e CARMIGNANI & KUGFIELD (1990), la struttura sin-metamorfica del complesso apuano è riferibile a due eventi deformativi principali: una deformazione compressiva duttile, legata alla collisione del margine continentale africano con quello europeo; una deformazione distensiva duttile, per il collasso gravitativo e il riequilibrio isostatico della crosta ispessita.

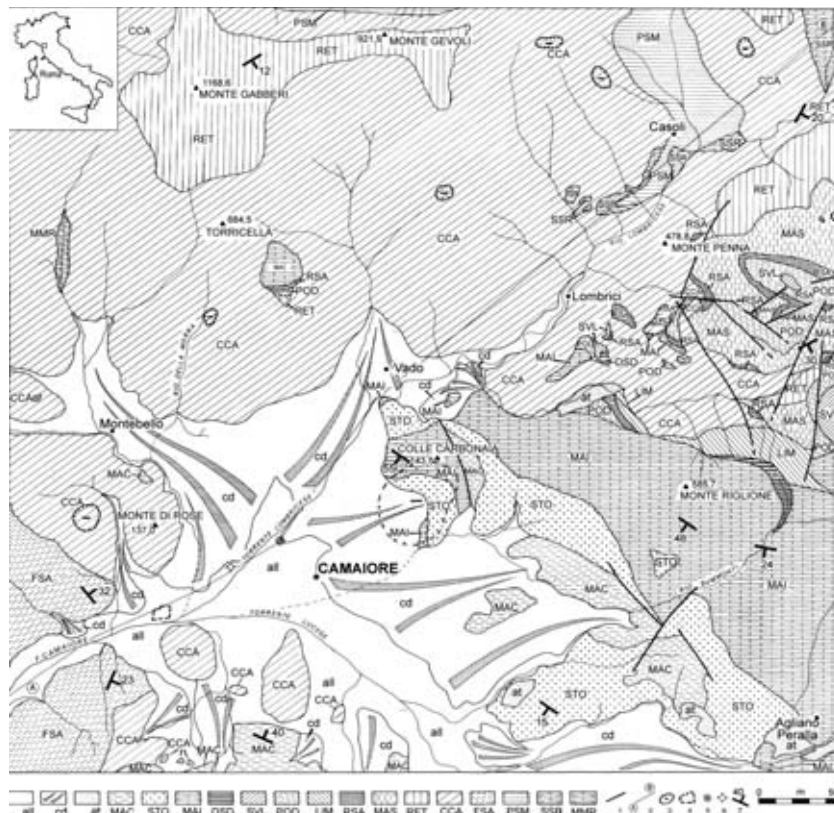


Fig. 3 - Carta geologica della zona di Camaione. Geological map of the Camaione area.
 all - alluvioni (alluvial deposits); cd - cono di deiezione (alluvial fan); at - alluvioni terrazzate (terrace); MAC - Macigno (sandstone); STO - Scaglia rossa (shale, marl, limestone); MAI - Maiolica (cherty limestone); DSD - Diaspri (chert); SVL - Calcarea selcifero della Val di Lima (cherty limestone); POD - Calcari e marne a Posidonia (limestone and marl); LIM - Calcarea selcifero di Limano (cherty limestone); RSA - Rosso ammonitico (limestone and marl); MAS - Calcarea massiccio (massive limestone); RET - Calcari a Rhaetavivula c. (limestone and marl); CCA - Calcarea cavernosa (cavernous limestone and breccia); FSA - filladi e anageniti (shale and anagenite); PSM - Pseudomacigno (metamorphic sandstone and shale); SSR - Scisti sericitici (schist); MMR - Marmo di M. Roccardaglia (marble). 1 - Faglia (fault); 2 - Sezione geologica (geological section); 3 - Dolina (doline); 4 - Sinkhole; 5 - Campo pozzi (well field); 6 - Pozzo Radicchi (Radicchi water well); 7 - Stratificazione (bedding).

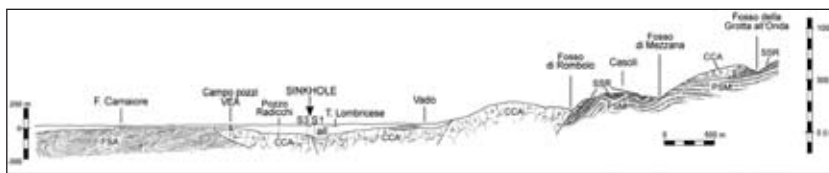


Fig. 4 - Sezione geologica. Geological section.

all - alluvioni (alluvial deposits); - CCA - Calcare cavernoso (cavernous limestone and breccia); FSA - filladi e anageniti (shale and anagenite); PSM - Pseudomacigno (metamorphic sandstone and shale); SSR - Scisti sericitici (schist).

3.1. Lineamenti geologici del territorio di Camaiore

Nell'area studiata affiorano varie formazioni, raggruppate in tre unità tettoniche (Falda Toscana, Unità di Massa, Autoctono Auctt.) e descritte di seguito, in ordine di successione stratigrafica (Figg. 3 e 4).

3.1.1. Falda Toscana

La Falda Toscana è l'unità più rappresentata nell'area studiata, dove affiorano le seguenti formazioni:

Calcare cavernoso (CCA) - La formazione, con evidenti fenomeni di fratturazione e carsismo, costituisce il substrato nella zona della voragine ed è costituita da dolomie e calcari dolomitici con tessitura spugnosa (calcari a cellette). Lo spessore è valutabile intorno a 500-700 m, ma localmente può essere ridotto per motivi tettonici; l'età è riferibile al Norico p.p.-?Retico inf. Sono associate breccie poligeniche, comprendenti elementi metamorfici dell'Unità di Massa e Falda Toscana e riferite al Miocene inf.-medio.

Calcare a Rhaetavicula contorta (RET) - Calcari e calcari marnosi fini, da grigio scuri a neri, alternati con strati sottili di marne grigie e nerastre, alterate in giallo. Lo spessore massimo è dell'ordine di 150-200 m. L'età è attribuita al Retico.

Calcare massiccio (MAS) - Calcari non stratificati, grigi e grigio-scuro, con calcari dolomitici e dolomie nella parte inferiore della formazione; calcari rosati, grossolanamente stratificati nella parte superiore; lo spessore è di alcune centinaia di metri; l'età è riferita all'Hettangiano-Hettangiano sup./Sinemuriano inf.

Rosso ammonitico (RSA) - Calcari stratificati di colore da rosa a rosso cupo, più raramente grigio o nocciola, con struttura a tratti nodulare; a luoghi si rinvencono tracce e resti di ammoniti; in genere lo spessore non supera qualche decina di metri; la formazione è riferita al Sinemuriano inf./Pliensbachiano inf.-Pliensbachiano sup.

Calcare selcifero di Limano (LIM) - Calcari stratificati leggermente marnosi, a grana fine, di colore dal grigio al giallastro, con frequenti liste e noduli irregolari di selce chiara; vi si possono rinvenire anche sottili interstrati di argilliti e marne fissili; lo spessore massimo è valutabile intorno a 50-100 m; l'età è attribuita al Pliensbachiano sup.-Pliensbachiano sup./Toarciano inf.

Calcari e marne a Posidonia (POD) - Calcari marnosi, marne e argilliti grigio-giallastre, talora con strati di radiolariti; lo spessore massimo è di circa 150 m; l'età è attribuita al Pliensbachiano sup./Toarciano inf.-Bajociano sup./Batoniano inf. Lias sup.-Dogger p.p.

Calcare selcifero della Val di Lima (SVL) - Calcari e calcareniti a grana generalmente fine, di colore grigio scuro, con liste e noduli di selce nera; lo spessore può raggiungere 200 m; l'età è riferita al Bajociano sup./Batoniano inf.-Turoniano sup.

Diaspri (DSD) - Radiolariti e argilliti silicee sottilmente stratificate, con fratturazione prismatica e colore variabile dal rosso, al verde, al grigio giallastro; lo spessore varia tra 50 e i 100 m circa; l'età è attribuita al Bajociano sup./Batoniano inf.-Turoniano sup. al Malm p.p.

Maiolica (MAI) - Calcari stratificati, bianchi o grigio-chiaro, litografici, a frattura concoide,

con rare liste e noduli di selce chiara nella parte basale della formazione, con selci più scure nella porzione superiore; nella parte sommitale, può presentare bancate detritiche; lo spessore può raggiungere 350 m; l'età è riferita al Tortoniano sup.-Aptiano inf.

Scaglia toscana (STO) - Argilliti e marne fittamente stratificate, varicolori con prevalenza del rosso, caratterizzate da frattura aghiforme delle argilliti e sfaldatura delle marne, con intercalazioni di calcari, calcari marnosi, calcareniti e calcari silicei; lo spessore è valutabile intorno a 150 m; l'età è attribuita al Aptiano inf.-Oligocene sup.

Macigno (MAC) - Torbiditi arenacee o arenaceo-pelitiche quarzoso-feldspatico-micacee; gli strati di arenaria generalmente hanno spessore notevole (da 1 a 5 m) e sono spesso intensamente fratturati; localmente si osservano bancate calcarenitiche; lo spessore può raggiungere 1000 m; l'età è riferita all'Oligocene sup.-Miocene inf.

3.1.2. Unità di Massa

Quest'unità affiora sul versante occidentale delle Apuane, da Carrara fino alle colline ad est di Viareggio ed è interposta tettonicamente tra l'Autoctono Auctt. e la Falda Toscana. Di essa, nelle dorsali collinari a ridosso di Capezzano e lungo la valle del F. Camaiole, affiora una sola formazione:

Filladi sericitiche e anageniti (FSA) - Filladi quarzítico-muscovitiche varicolori e metaconglomerati quarzosi con matrice quarzítico-filladica; lo spessore affiorante è di qualche centinaio di metri; l'età è riferibile al Carnico.

3.1.3. Autoctono Auctt.

Quest'unità compone gran parte del massiccio aprano; nella zona studiata affiora a nord del territorio comunale, in prossimità della finestra tettonica di Casoli-Bologno. In passato, le rocce affioranti in questa zona erano riferite a una serie di scaglie tettoniche, note nella letteratura geologica come "Scaglie parautoctone" o "Parautoctono di Stazzema"; attualmente, esse sono riferite all'Autoctono Auctt. (CARMIGNANI et alii, 2000). In particolare, nell'area in oggetto affiorano le seguenti formazioni:

Marmo di Monte Roccandaglia (MMR) - In prevalenza, marmi massicci di colore variabile dal bianco al grigio scuro, con rari e sottili livelli di dolomie e marmi dolomitici giallastri. Localmente, brecce monogeniche o poligeniche. Lo spessore è difficilmente valutabile; l'età è attribuita al Lias inf.

Scisti sericitici (SSR) - Filladi e argilloscisti sericitici grigi, rossi, violetti o verdastri, con rari e sottili livelli di filladi carbonatiche, marmi a clorite e metaradiolariti rosse; lo spessore è di poche decine di metri; la formazione è attribuita al Cretaceo inf.-Oligocene.

Pseudomacigno (PSM) - Metarenarie quarzoso-feldspatico-micacee, alternate a filladi e scisti ardesiaci grigio scuri e livelli di scisti carboniosi; lo spessore è valutabile in alcune centinaia di metri; l'età è riferita all'Oligocene sup.-Miocene inf.

3.1.4. Depositi quaternari

I depositi quaternari più significativi, rappresentati in carta geologica (Fig. 3), sono descritti di seguito:

Alluvioni recenti e attuali (all) - Depositi prevalentemente limoso-sabbiosi con intercalazioni di livelli ghiaiosi (zona di fondovalle di raccordo con la pianura costiera), depositi limoso-sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi (piana di Camaiole), depositi ghiaioso-sabbiosi (alveo di alcuni corsi d'acqua minori). Lo spessore, molto variabile, può superare varie decine di metri. L'età è riferita all'Olocene.

Coni di deiezione (cd) - Depositi eterogenei, costituiti da sabbie, argille e limi con intercalazioni di livelli ghiaiosi e/o ciottolosi, a elementi prevalentemente calcarei; si trovano allo sbocco delle valli nel fondovalle principale, soprattutto al margine nord-orientale della piana di Camaiole. I depositi di conoide sono eteropici con gli altri depositi alluvionali; nell'area della voragine lo spessore può superare i 100 m. L'età è riferita al Pleistocene-Olocene.

Alluvioni terrazzate (at) - Ciottoli, ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose, localmente cementate; lo spessore è variabile; l'età è attribuita al Pleistocene medio-sup.

3.2. Caratteri geologici della piana di Camaione

I movimenti epirogenetici iniziati durante il Pliocene, come precedentemente accennato, sono verosimilmente proseguiti nel Pleistocene sup.-Olocene. Si può ragionevolmente ipotizzare che tali movimenti proseguano tuttora, determinando fenomeni di sollevamento delle aree collinari e montuose, comprese tra l'alto morfologico delle Apuane a nord ed i rilievi dell'allineamento Monte Magno - Monte Moneta a sud, confermati da una certa attività sismica, dal ringiovanimento dei bacini idrografici, dal loro approfondimento e dall'erosione fluvio-torrentizia. Contemporaneamente, la pianura di Camaione sarebbe in fase di abbassamento per fenomeni subsidenza, confermati anche da frequenti inondazioni della piana. Mancando peraltro testimonianze paleontologiche dirette sull'età della piana di Camaione, si ritiene che essa si sia formata prevalentemente durante le fasi distensive del Pleistocene superiore, con i sollevamenti recenti dell'Appennino settentrionale. A questa fase corrispondono depositi prevalentemente di ambiente fluvio-torrentizio, ad alta energia, riferibili in gran parte ai vasti apparati di conoide precedentemente descritti. La loro genesi è stata probabilmente favorita, oltre che dalla disponibilità di materiale derivante dallo smantellamento dei rilievi in sollevamento, anche dalle vicende climatiche pleistoceniche. La struttura fondamentale della pianura potrebbe corrispondere, come altre pianure vicine della valle del Serchio, ad una depressione tettonica, limitata a NE da una faglia diretta principale, immergente verso occidente e attualmente sepolta, e da faglie dirette antitetiche a SW, immergenti verso oriente, i cui piani di faglia si esaurirebbero contro quello della faglia diretta principale, facendo prefigurare così una geometria di tipo listrico. Alcune di queste, individuate già come lineamenti tettonici in base all'esame delle foto aeree, sono state confermate correlando tra loro sia le stratigrafie, dedotte dai sondaggi meccanici, sia le elettrostratigrafie delle prospezioni geofisiche.

3.2.1. Indagini geognostiche

Le principali indagini geognostiche effettuate sono state indirizzate soprattutto alla definizione delle caratteristiche del substrato roccioso e della copertura alluvionale (stratigrafia, geometria, spessore dei vari corpi sedimentari, ecc.). Sono state svolte prospezioni geoelettriche (20 SEV - sondaggi elettrici verticali), sondaggi meccanici, tomografie sismiche. In questa sede, vengono riassunti i risultati principali di tali indagini, illustrati in dettaglio in lavori precedenti (Buchignani & Chines, 2002; D'Amato Avanzi et alii, 2002; Rizzo, 2002) o contenuti in questo stesso volume.

Sondaggi elettrici

I sondaggi elettrici verticali hanno accertato la presenza di un cospicuo spessore alluvionale, caratterizzato da diverse resistività, riconducibili generalmente ad argille e sabbie più o meno ghiaiose, deposto sopra un substrato più resistivo (220-280 ohm/m), riconducibile al Calcarea cavernoso. È stato inoltre evidenziato un consistente approfondimento del substrato calcareo in prossimità della voragine, verosimilmente a causa di una faglia diretta, con direzione appenninica (NW-SE), che avrebbe ribassato la porzione più orientale. Infine, è stato evidenziato anche un graduale abbassamento del substrato calcareo anche a valle della voragine, fino ad una brusca risalita verso la confluenza con il Rio Lucese. Questo andamento non è evidente invece nei profili SEV effettuati più a monte, in destra del Rio Lombricese.

Sondaggi meccanici

I sondaggi meccanici avevano l'obiettivo di definire la situazione strutturale e litostrati-

grafica di dettaglio nell'intorno della voragine. Sono stati pertanto eseguiti 3 sondaggi meccanici a carotaggio continuo (S1, S2, S3). Lo studio delle stratigrafie ha consentito di individuare lo spessore dei depositi alluvionali, assai superiore alle previsioni iniziali e molto consistente (139 m in S1; 101 m in S2; 94 m in S3). Tali depositi comprendono sabbie, ghiaie e argille; queste ultime costituiscono degli intervalli abbastanza continui, anche se di spessore variabile, riconosciuti soprattutto nella parte nord-occidentale della piana, come si può osservare dalla sezione geologica (Fig. 5). Per quanto riguarda il substrato roccioso, posto a profondità variabile, esso è costituito da Calcarea cavernoso molto fratturato. Infine, è significativo il fatto che nei tre sondaggi sia stato osservato un generale scarso addensamento dei depositi, in particolare a partire dalla profondità di 42 m.

Tomografie sismiche

Le tomografie sismiche sono state effettuate nei fori di sondaggio (S1, S2, S3), con la tecnica del Sondaggio Sismico Tomografico (SST), allo scopo di verificare le stratigrafie ottenute con i carotaggi; com'è noto, gli SST permettono di estendere per qualche decina di metri al contorno le informazioni puntuali dei sondaggi meccanici. Nei sondaggi S1 e S3, intorno a 40 metri, si osservano per qualche metro velocità superiori a 2.500 m/s, molto elevate per sedimenti non lapidei. Al di sotto, per qualche metro si hanno valori di velocità anormalmente bassi (1.600-1.800 m/s); le velocità poi si stabilizzano su valori normali (circa 2.000 m/s) fino a circa 90 m (sondaggio S3), 95 m (S2) e 130 m (S1), dove si ha una brusca risalita di velocità (superiore a 3.000 m/s), in corrispondenza del substrato calcareo.

Sono state eseguite anche due tomografie cross-hole, per mettere in evidenza la presenza di cavità o altre anomalie nel substrato. Esse hanno evidenziato un netto approfondimento del substrato calcareo in vicinanza del foro S1 e la presenza di un'insaccatura a bassa velocità nel calcarea stesso. Nella copertura si rilevano strati rigidi sia in S1 che in S2, mentre le anomalie a bassa velocità sono ben evidenti in S1 e poco evidenti in S2. Non si hanno indizi di discontinuità nella zona centrale. Ben diversa è la situazione individuata nella sezione S1-S3, dove è presente una zona a bassa velocità nella parte alta del substrato (Calcarea cavernoso). Nella copertura alluvionale, sono risultati evidenti sia gli strati rigidi sia gli strati a bassa velocità. Questi dati hanno permesso di formulare ipotesi attendibili per la ricostruzione dei fenomeni che hanno portato all'apertura della voragine.

3.2.2. La geologia nell'area dello sprofondamento

L'assemblaggio dei dati geologici e geognostici raccolti ha permesso di ricostruire con

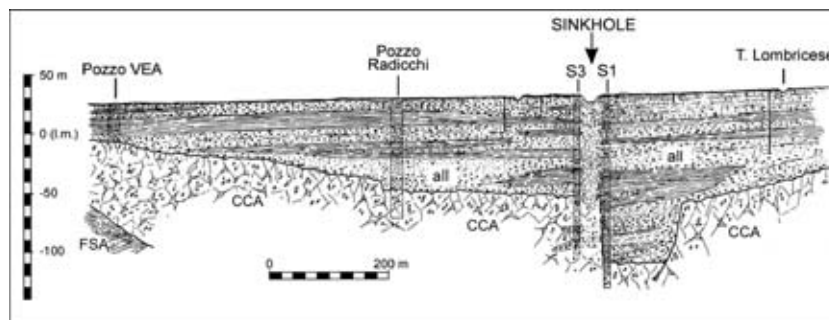


Fig.5 - Sezione geologica dell'area della voragine. Geological section of the sinkhole area. all - alluvioni (alluvial deposits); CCA - Calcarea cavernoso (cavernous limestone and breccia); FSA - filladi e anageniti (shale and anagenite).

soddisfacente dettaglio la struttura e la stratigrafia del sottosuolo intorno all'area della voragine.

Particolarmente complesso è l'assetto stratigrafico dei depositi alluvionali, che è stato condizionato dal regime dei corsi d'acqua che sfociavano nella pianura, dalle mutevoli vicende climatiche e dai movimenti epirogenetici, che hanno determinato fasi di ringiovanimento dei bacini idrografici, nonché di aumento delle capacità erosive e di trasporto dei corsi d'acqua. La natura dei depositi è pertanto molto variabile. Se a questa grande variabilità si aggiunge la scarsità di notizie circa la stratigrafia dei pozzi nella pianura, si può comprendere come la ricostruzione della geologia di sottosuolo della pianura sia complessa e probabilmente incompleta e lacunosa, a eccezione dell'area della voragine.

L'analisi delle foto aeree, il rilievo geologico e la correlazione litostratigrafica dei sondaggi geognostici hanno consentito di ricostruire la struttura del sottosuolo. In particolare, si evidenzia la presenza di una grande faglia, con direzione circa NW-SE, che ha ribassato di almeno 40 m il tetto del Calcarea cavernoso; infatti, dall'esame dei logs dei sondaggi meccanici eseguiti nei pressi della voragine si può verificare che il substrato roccioso è stato incontrato in S1 ad una profondità di circa 140 m dal piano campagna, mentre in S2 ed S3 esso è stato incontrato a profondità di 101 m e 90 m. I dati scaturiti dai sondaggi elettrici verticali, dalle prove cross-hole e dalle tomografie hanno permesso di localizzare con maggior precisione l'andamento del piano della faglia sopra citata e di ricostruire complessivamente il reticolo di faglie e fratture che interessa l'intera zona. Dalla correlazione delle stratigrafie dei sondaggi S1 e S3 è possibile individuare una faglia anche nei depositi di copertura, in corrispondenza dell'area della voragine (Fig. 5); essa potrebbe essere interpretata come una faglia molto recente, oppure come una faglia che ha interessato prima solo il substrato e che si è poi mantenuta attiva, interessando anche le alluvioni. La ricostruzione strutturale ha consentito quindi di individuare tre sistemi principali di faglie dirette, che si intersecano nella piana, con direzione rispettivamente appenninica, antiappenninica ed est-ovest. L'intersezione di queste faglie genera localmente forti ribassamenti di porzioni del substrato roccioso, che intorno della voragine raggiunge la massima profondità.

Infine, il sondaggio S3 ha messo in evidenza livelli di brecce calcaree a profondità di 112-117 m e di 122-130 m. Il livello di brecce meno profondo, caratterizzato da una matrice argillosa di colore rossiccio, presumibilmente è riconducibile a processi di alterazione di tipo carsico nel substrato calcareo; l'altro livello, di brecce cementate, potrebbe essere attribuito a fenomeni cataclastici lungo piani di faglia.

4. PERICOLOSITÀ DELL'AREA

La voragine di Camaione ha portato ancora una volta alla ribalta il fenomeno dei sinkholes, particolarmente distruttivi e ricorrenti in varie zone del mondo, dove l'informazione alla popolazione può essere capillare. Ad esempio, negli Stati Uniti informazioni, modalità di allertamento e norme di comportamento sono diffuse anche tramite internet. Spesso i sinkholes si verificano in contesti geologico-strutturali e idrogeologici particolarmente complessi, talvolta favoriti anche dall'attività antropica. Anzi, considerarli solo fenomeni naturali è limitativo, poiché i crolli di cavità sotterranee di origine antropica sono forse più frequenti: basti pensare al sottosuolo di città come Roma e Napoli, in cui la passata estrazione di materiali vulcanici, a scopo edilizio o per creare cisterne sotterranee, ha prodotto una serie sterminata di vuoti che talora, per alterazione/degradazione delle strutture portanti o per effetti di sismi, collassano trascinandosi con sé il sovrastante tessuto antropico. In altri casi, subsidenze e voragini possono verificarsi per l'eccessivo emungimento di fluidi. Inoltre, l'espansione urbani-

stica è spesso attuata in modo imprudente, invadendo aree pericolose e aumentando l'esposizione e la vulnerabilità.

Spesso, le aree a rischio sinkhole si trovano proprio in pianure alluvionali o costiere, oppure in conche intermontane, situate al di sopra di importanti complessi carbonatici carsificati e sedi di grandi acquiferi (NEWTON, 1984). Tali zone sono sovente considerate erroneamente sicure da un punto di vista della pericolosità geologica e geomorfologica e sono quindi spesso soggette a forti espansioni urbanistiche.

Come precedentemente esposto, la zona di Camaiole presenta queste peculiarità, trovandosi in una piana alluvionale intermontana, che copre un importante complesso carbonatico costituito prevalentemente dal Calcere cavernoso. Il Calcere cavernoso, caratterizzato da una struttura vacuolare a cellette, è particolarmente soggetto a processi di dissoluzione carsica e alla formazione di cavità e grotte. Questa situazione geologica e l'abbondante circolazione d'acqua sotterranea (i cui prelievi soddisfano il fabbisogno di gran parte della Versilia) favoriscono lo sviluppo di cavità nel sottosuolo, che in determinate condizioni possono collassare. La stessa formazione costituisce il substrato anche nello sprofondamento del Bottegone presso Grosseto (29 gennaio 1999), che ha formato una voragine ellittica, con asse maggiore di 180 m e profondità di circa 13 m (BERTI et alii, 2002a); tale substrato carbonatico si trova a 200-250 m di profondità, sepolto da un grande spessore di materiali alluvionali. Si tratta quindi di situazione con forti analogie con quella di Camaiole. Inoltre, nei dintorni di Camaiole si riconoscono alcuni indizi riferibili ad antichi collassi di cavità carsiche, che fanno prefigurare l'esistenza di altre zone esposte a possibili sprofondamenti. Questa situazione è aggravata dalla sismicità dell'area, non lontana dalle aree sismiche della Garfagnana e della Lunigiana: il forte terremoto del 1920 (X grado MCS) produsse a Camaiole effetti del VII grado; la cittadina è ora posta in zona 3 dalla nuova classificazione sismica nazionale (Ord. P.C.M. n. 3274/2003).

Dall'esame del caso di Camaiole, come in altri casi, emerge chiara la necessità di pianificare l'utilizzo urbanistico delle aree soggette a sprofondamento; la definizione del grado di pericolosità da sinkhole permetterebbe infatti di predisporre un quadro normativo tale da inibire, o almeno ridurre, gli effetti di eventi catastrofici. A monte quindi di qualsiasi pianificazione territoriale di aree soggette a sinkholes (naturali, ma criteri analoghi si possono applicare anche a quelli originati da attività antropiche), è quindi evidentemente necessario conoscere il contesto naturale in cui essi si collocano e le cause del loro verificarsi. Una corretta pianificazione delle indagini è perciò lo strumento fondamentale e forse più efficace nella quantificazione del rischio e nella pianificazione territoriale.

La natura del substrato è il primo elemento da considerare. Si tratta generalmente di individuare litotipi suscettibili di fenomeni di dissoluzione, come rocce carbonatiche, rocce solfatiche o evaporati, in cui il processo chimico di dissoluzione è condizionato dal chimismo e dalla temperatura delle acque circolanti. Devono inoltre essere individuate le vie preferenziali di circolazione idrica sotterranea, come faglie o fratture, e definita la climatologia del sito, con particolare riguardo al tipo e alla distribuzione delle precipitazioni. E' quindi fondamentale la conoscenza geologico-strutturale e geomorfologica a scala di dettaglio, ma anche regionale, affiancata e integrata da una serie di indagini geognostiche: geoelettrica, sismica a rifrazione e a riflessione, gravimetria, sondaggi meccanici a carotaggio continuo, installazione di piezometri e di sistemi di controllo delle deformazioni del suolo. È necessario inoltre controllare le variazioni di assetto indotte da emungimenti o immissioni di acqua nel sottosuolo. Infine, saranno definite le caratteristiche di sismicità dell'area, in quanto l'energia liberata dal terremoto può fortemente contribuire all'innescio e all'evoluzione del fenomeno. Tutto ciò deve essere sintetizzato in una carta della pericolosità dell'area. A questo proposito, BERTI et alii (2002c) hanno proposto un'accurata tecnica di valutazione, in cui vengono prese in esame previsioni spaziali, temporali e d'intensità, nonché la perimetrazione del bacino interessato.

Dal confronto della pericolosità con gli elementi a rischio e la loro vulnerabilità, si può infine arrivare alla determinazione del rischio, cioè del danno atteso e alla mappatura delle aree a differente grado di rischio. Questa cartografia sarà la base per qualsiasi utilizzo del territorio si voglia proporre. Per esempio potrà servire in caso di redazione di strumenti urbanistici, per escludere aree dall'edificazione o per proporre determinate tecniche costruttive per i nuovi edifici, mentre per gli edifici già esistenti potranno essere indicate, analogamente a quanto si prescrive per le zone sismiche, le opere di consolidamento e rinforzo da effettuare in caso di interventi di ristrutturazione o manutenzione. Nel caso che il rischio sia conseguenza di comportamenti antropici, dovranno essere dettate le norme volte all'eliminazione di tali cause, come pure si potrà intervenire direttamente sui dissesti con interventi di bonifica. Particolare importanza assumono inoltre le regole di comportamento di competenza della Protezione Civile, quali la messa in opera di sistemi di allarme, l'illustrazione alla popolazione dei preavvisi premonitori del verificarsi dell'evento e l'organizzazione delle diverse modalità di evacuazione. Infine, nella valutazione del rischio da sinkhole, hanno un ruolo significativo le indagini storico-archivistiche, com'è sinteticamente illustrato nel paragrafo seguente, che si riferisce al caso di Camaioere.

4.1. Indagini storiche nell'area di Camaioere

Nella valutazione della pericolosità e quindi nell'attribuzione dei livelli di rischio, un contributo certamente utile è rappresentato dalle indagini storico-archivistiche, già ampiamente utilizzato per i terremoti, le alluvioni e le frane. Tali indagini possono fornire indicazioni significative in merito alla localizzazione, all'intensità e alla ricorrenza dei fenomeni, nonché agli effetti prodotti.

Per accertare se in passato si fossero verificati fenomeni analoghi a quello del 1995, sono state svolte ricerche presso l'archivio storico del Comune di Camaioere (ricerche inedite di F. Caredio e C. Santini). Sono stati esaminati vari documenti, fra cui richieste e segnalazioni particolari alle autorità comunali, deliberazioni, relazioni dell'ufficio tecnico, preventivi e giustificativi di spesa; particolare attenzione è stata dedicata ai periodi successivi ai terremoti importanti.

L'archivio storico del Comune di Camaioere è diviso in una sezione pre-unitaria (dove sono conservati documenti fino al 1860) e in una sezione post-unitaria (dal 1860 in poi), in cui non sono stati trovati dati significativi. Nella sezione pre-unitaria, invece, sono custoditi alcuni documenti, che descrivono situazioni forse ricollegabili a sprofondamenti del suolo.

- Una nota interna, inviata nell'anno 1721 alla Comunità di Camaioere e tratta dal registro dell'Offizio delle strade (preposto alla manutenzione viaria), chiede di far riempire una buca in cima alla via per S. Lazzaro (ora strada provinciale per Viareggio); l'ingente nota spese per pagare l'inerte e la cospicua manodopera utilizzata per quest'intervento inducono a ritenere assai ampia la buca da colmare, forse formatasi per un improvviso cedimento del terreno.
- In un documento datato 14 gennaio 1792, i frati descrivono alle Autorità i pericoli che correva il convento per il consistente abbassamento del suolo circostante, segnalando "... l'imminente pericolo di cadere le stanze di detto Convento, dal portone in su verso la strada per la mancanza del fondamento, vedendosi già uscir fuori la muraglia ...", supplicando di "... adoperarsi à far ponti per resarcimento di quella muraglia ...". Da fonti orali risulta inoltre che anche la chiesa del convento di S. Lazzaro in località "ai Frati" sia stata ripetutamente lesionata da tale fenomeno.
- Un altro documento indirizzato alle Autorità tra il 1770 e il 1785 descrive una "esplosione" di polle d'acqua in Sesto S. Vincenzo, che sconvolge la strada (attuale via IV Novembre), rendendola impraticabile e pericolosa per persone e animali. Per tale motivo, gli abitanti "... ricorrono alle MM.LL. acciò prontamente riparino ad un simi-

le pericolo e rendono la medesima strada praticabile e sicura ed infine fanno alle MM.LL. umilissima e profondissima riverenza la corrispondente ...". Il fenomeno descritto potrebbe essere stato innescato dagli eventi sismici del 1781.

– Infine, un documento riferibile al secolo XVIII riguarda la zona della Collegiata e consiste in una richiesta di aiuto della Compagnia di S. Vincenzo Confessore per risistemare i depositi della Collegiata stessa, dove si verificano gravi e pericolosi cedimenti strutturali. Queste informazioni storiche non possono evidentemente costituire conferme assolute che in passato nella piana di Camaiore si siano verificati fenomeni di dissesto analoghi a quello del 1995. Una parziale conferma potrebbe derivare dal fatto che alcuni dei fenomeni descritti sono avvenuti in aree della pianura morfologicamente depresse rispetto a quelle circostanti. Resta il fatto che alcune cronache dei secoli passati sembrano indicare una possibile ripetitività di collassi. Questa possibilità merita un'attenzione adeguata e suggerisce l'opportunità di ricerche storiche più approfondite, estese a tutti gli archivi storici disponibili.

CONCLUSIONI

Le indagini precedentemente illustrate hanno permesso di ricostruire il contesto geologico nel quale si è verificato lo sprofondamento di Camaiore. La causa primaria di tale fenomeno è da imputare all'esistenza di fenomeni carsici ipogei nel substrato roccioso intensamente fratturato della pianura, formato da Calcarea cavernoso e sepolto da oltre 100 m di sedimenti; l'origine del sinkhole è quindi riconducibile a un collasso profondo nel substrato calcareo, i cui effetti si sono risentiti in superficie con un ritardo verosimilmente consistente, ma non precisabile, in cui la cavità è progredita verso l'alto nella copertura alluvionale.

Il caso di Camaiore ha messo ancora una volta in evidenza come la conoscenza geologica e geomorfologica dell'area sia fondamentale nell'individuazione delle aree a rischio, ancor più nel caso di particolari fenomeni distruttivi, quali i sinkholes. Si tratta di un criterio imprescindibile per un'adeguata quantificazione del rischio e per un'efficace pianificazione territoriale in aree potenzialmente soggette a fenomeni di sinkhole.

BIBLIOGRAFIA

- BARTOLINI C., BERNINI M., CARLONI G.C., CASTALDINI D., COSTANTINI A., FEDERICI P.R., FRANCAVILLA F., GASPERI G., LAZZAROTTO A., MARCHETTI G., MAZZANTI R., PAPANI G., PRANZINI G., RAU A., SANDRELLI F. & VERCESI P.L. (1983) - Carta neotettonica dell'Appennino Settentrionale - Note illustrative. *Boll. Soc. Geol. It.*, **101** (1982), 523-549.
- BECK B.F. ed (1984) - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact. Proc. First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Orlando, FL. A.A., Balkema, Rotterdam, Netherlands, 429 pp.
- BERTI G., CANUTI P. & CASAGLI N. (2002a) - Risultati preliminari delle indagini sullo sprofondamento in loc. Bottegone (Grosseto). Atti Convegno Nazionale "Le voragini catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana". Edizioni Regione Toscana, 242-256.
- BERTI G., CANUTI P. & CASAGLI N. (2002b) - Criteri per la previsione e la prevenzione del rischio connesso agli sprofondamenti catastrofici). Atti Convegno Nazionale "Le voragini catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana". Edizioni Regione Toscana, 82-95.
- BERTI G., CANUTI P. & CASAGLI N. (2002c) - Voragini e sprofondamenti nel territorio nazionale: analisi morfometrici di alcuni casi caratteristici in aree appenniniche. Atti Convegno Nazionale "Le voragini catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana". Edizioni Regione Toscana, 71-81.
- BOCCALETTI M. & COLI M. (1985) - La tettonica della Toscana: assetto ed evoluzione. *Mem. Soc. Geol. It.*, **25** (1983), 51-62.

- BOCCALETTI M., COLI M., DECANDIA F.A., GIANNINI E. & LAZZAROTTO A. (1981) - Evoluzione dell'Appennino settentrionale secondo un nuovo modello strutturale. *Mem. Soc. Geol. It.*, **21** (1980), 359-373.
- BOCCALETTI M., DECANDIA F.A., GASPERI G., GELMINI R., LAZZAROTTO A. & ZANZUCCHI G. (1987) - Carta Strutturale dell'Appennino settentrionale: Note Illustrative. C.N.R.-Prog. Fin. Geodin., pubbl. **429** (1982), 203 pp.
- BRUNAMONTE F., PRESTININZI A & ROMAGNOLI C. (1994) - Geomorfologia e caratteri geotecnici dei depositi di terre rosse nelle aree carsiche degli Aurunci orientali (Lazio meridionale, Italia). *Geol. Rom.*, **30**, 465-478.
- BUCHIGNANI V. (2002) - Indagini geologiche e geofisiche relative al fenomeno di crollo verificatosi nell'ottobre 1995 in loc. "Le Funi" - Camaiore capoluogo. Rapporto di aggiornamento (aprile 2001). Atti Convegno Nazionale "Le voragini catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana". Edizioni Regione Toscana, 202-209.
- BUCHIGNANI V. & CHINES C. (2002) - Indagini relative al fenomeno di crollo verificatosi nell'ottobre 1995 in loc. "Le Funi" - Camaiore capoluogo. Atti Convegno Nazionale "Le voragini catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana". Edizioni Regione Toscana, 176-201.
- CARMIGNANI L. & GIGLIA G. (1983) - "Autoctono Apuano" e Falda Toscana: sintesi dei dati e interpretazioni più recenti. In: "Cento anni di Geologia italiana". Vol. Giub. I Cent. Soc. Geol. It., 199-219, Roma.
- CARMIGNANI L. & KUGFIELD R. (1990) - Crustal extension in the Northern Apennines: transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex. *Tectonics*, **9**, 1275-1303.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G. & KUGFIELD R. (1980) - Nuovi dati sulla zona di taglio ensialica delle Alpi Apuane. *Mem. Soc. Geol. It.*, **21**, 93-100.
- CARMIGNANI, L., CONTI, P., DISPERATI, L., FANTOZZI, P.L., GIGLIA, G. & MECCHERI, M. (2000) - Carta geologica del Parco delle Alpi Apuane. Parco Regionale delle Alpi Apuane e Università degli Studi di Siena. Ediz. S.El.Ca., Firenze.
- COLI M. & PANDELI E. (1992) - La geologia delle Alpi Apuane: l'Unità di Massa, il Nucleo Metamorfico Apuano, le Breccie poligeniche neogeniche. In: "Guida alla traversata dell'Appennino Settentrionale". 76a Riunione Estiva Soc. Geol. It., Firenze, 16-20/9/1992, 79-103.
- DALLAN L. & NARDI R. (1974) - Schema stratigrafico e strutturale dell'Appennino settentrionale. *Mem. Accad. Lunig. Sc. "G. Capellini"*, **42** (1972), 1-212.
- DALLAN L. & NARDI R. (1979) - Il quadro paleotettonico dell'Appennino settentrionale: un'ipotesi alternativa. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A*, **85** (1978), 289-298.
- D'AMATO AVANZI G., PUCCINELLI A. & VERANI M. (2002) - La geologia della piana di Camaiore in relazione al fenomeno di sprofondamento del 15 ottobre 1995. Atti Convegno Nazionale "Le voragini catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana". Edizioni Regione Toscana, 154-175.
- ELTER P. (1960) - I lineamenti tettonici dell'Appennino a Nord Ovest delle Apuane. *Boll. Soc. Geol. It.*, **79** (2), 273-312.
- ELTER P. (1973) - Lineamenti tettonici ed evolutivi dell'Appennino settentrionale. *Quad. Acc. Naz. Lincei*, **183**, 97-109.
- FACCENNA C., FLORINDO F., FUNICELLO R & LOMBARDI S. (1993) - Tectonic setting and sinkhole features: case histories from western central Italy. *Quaternary Proceedings*, **3**, 47-56.
- FEDERICI P.R. & RAU A. (1980) - Note illustrative alla neotettonica del Foglio 104-Pisa. In: "Contr. Prelim. Real. Carta Neotett. d'It.". C.N.R.-Prog. Fin. Geodin., Pubbl. n. 356, 1383-1398.
- GIANNOTTI R. (Ed.) (1988) - Catasto unificato delle grotte della Toscana. Federazione Speleologica Toscana - Regione Toscana, Firenze, 199 pp.

- NEWTON J.C. (1984) - Review of induced sinkhole development. In Beck B.F. ed (1984) - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact. Proc. First Multidisciplinary Conference on Sinkholes, Orlando, FL. A.A., Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- NEWTON J.C. (1987) - Development of sinkholes resulting from man's activities in the eastern United States. USGS C-968, 54 pp.
- NISIO S. (2003) - I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia centrale. Il Quaternario-Italian Journal of Quaternary Sciences, AIQUA, **16** (1), 121-132.
- RIZZO S. (2002) - La geofisica applicata nel controllo e nelle indagini sui sinkholes: l'esempio di Camaiore. Atti Convegno Nazionale "Le voragini catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana". Edizioni Regione Toscana, 210-225.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1969) - Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000). Foglio 104 Pisa. L.A.C., Firenze.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1970) - Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000). Foglio 96 Massa. Stab. Salomone, Roma.
- SINCLAIR W.C. & STEWART J.W. (1985) - Sinkhole type, development and distribution in Florida. USGS, Florida Department of Natural Resources, Bureau of Geology Map Series n. 110.
- WILSON W.L. & SHOCK E.J. (1996) - New sinkhole data spreadsheet manual (v1.1). Winter Springs, Fla., Subsurface Evaluation, Inc., 31 pp.
- ZACCAGNA D. (1932) - Descrizione geologica delle Alpi Apuane. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **25**, 440 pp.