

## IL SINKHOLE DI CAMAIORE

**BUCHIGNANI VINCENZO\***, **LOMBARDI SALVATORE\*\*\*\***,  
**RIZZO STEFANO\*\***, **TORO BENIAMINO\*\*\*\***

\*Geologo, libero professionista, Lucca (LU)

\*\*Geofisico, libero professionista, Anguillara Sabazia (RM)

\*\*\*Dipartimento di Scienze della Terra, Università "La Sapienza" di Roma

---

### INTRODUZIONE

Il centro abitato di Camaiore, in provincia di Lucca, si trova posizionato in una conca naturale incastonata tra rilievi collinari e montuosi che costituiscono le propaggini sud-occidentali delle Alpi Apuane. La piana camaiorese si sviluppa nella parte terminale delle valli del T. Lucese e del T. Lombricese che convergono, da direzioni sub-ortogonali, verso l'abitato del capoluogo. Poco dopo la loro confluenza, ove ha origine il T. Camaiore, la vallata si restringe e sbocca nell'ampia pianura costiera della Versilia che si estende, sulla fascia litoranea, da Capezzano al Lido di Camaiore (v. Fig. 1).

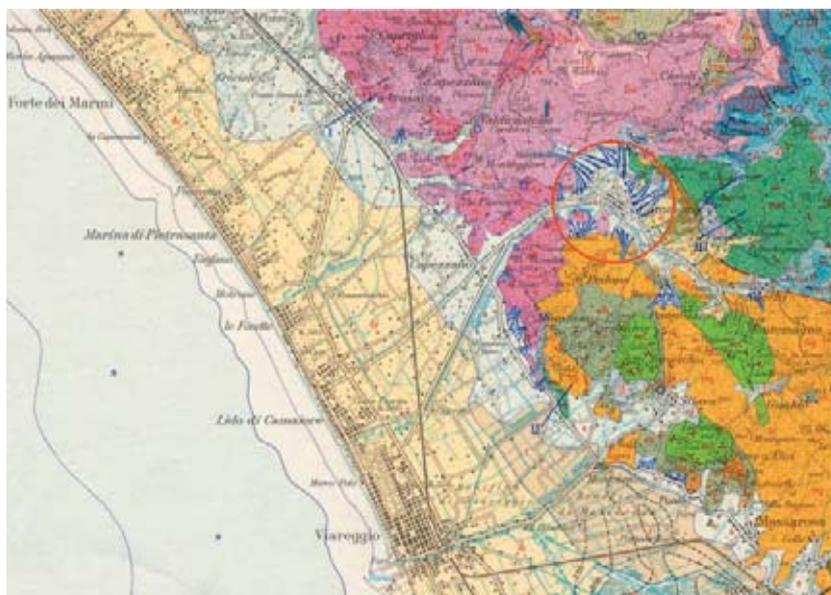


Fig. 1 – Inquadramento geologico e corografico dell'area.  
(Tratto da: Servizio Geologico d'Italia - Carta Geologica 1:100.000 - Foglio 104 – PISA)

L'Appennino Settentrionale e le Alpi Apuane, i cui margini lambiscono la piana di Camaiore, possono essere interpretati come il risultato dell'evoluzione spazio-temporale di una tettonica a tratti compressiva, a tratti distensiva, che ha interessato i bacini sedimentari liguri s.l. e toscani s.l. La collisione con la microplacca Sardo-Corsa durante l'Oligocene può essere vista come la causa principale della formazione, in un regime tettonico compressivo, dell'edificio a falde di ricoprimento sovrapposte che caratterizza i suddetti rilievi [CARMIGNANI, KLIGFIELD, 1990]. A partire dal Miocene Superiore e sino a tutto il Messiniano le strutture compressive sono interessate da una tettonica distensiva a larga scala, collegata, molto probabilmente, al processo di retroarco che ha portato all'aper-

tura del Mare Tirreno e che ha dato origine a strutture tipo "horst" e "graben" in tutta la Toscana. La piana di Camaiore è situata in una depressione tettonica compresa tra l'alto morfologico delle Apuane a Nord ed rilievi collinari dell'allineamento Monte Magno-Monte Moneta a Sud, formatasi in seguito alla suddetta fase deformativa distensiva. Tale struttura negativa, tipo "graben", si realizza principalmente attraverso faglie dirette sottrattive, a geometria listrica, a direzione appenninica (NW-SE), in associazione a sistemi secondari di faglie a direzione antiappenninica ed a faglie con direzione E-W e N-S (pleistoceniche). Il sistema di faglie dirette, che ha ribassato il substrato roccioso del margine occidentale dei rilievi apuani, ha determinato sia il rapido colmamento della pianura costiera con sedimenti terrigeni e costieri recenti (ghiaie, sabbie, argille e torbe), sia il ringiovanimento dei versanti nell'entroterra collinare e montano (Pleistocene inf.), con la formazione delle grandi conoidi di materiale alluvionale. Gli studi effettuati sulla piana in oggetto indicano la presenza di una tettonica attualmente attiva, riconoscibile proprio dalla particolare struttura profonda del "graben" della conca di Camaiore.

La fascia collinare-montuosa, che lambisce o contorna le aree di pianura, assume forme diverse nei rilievi che la costituiscono, ovvero forme blande nel settore centro-meridionale, con quote massime che si aggirano intorno ai 500-600 m slm, con versanti a medio-bassa acclività, raramente incisi da valli incassate e ripide; rilievi con asperità più accentuate nel settore settentrionale, sovrastanti la conca del capoluogo, culminanti in corrispondenza dei massicci prevalentemente carbonatici del M. Gabberi, del M. Prana e del M. Matanna (circa 1300 m slm). L'aspetto morfologico di questi ultimi massicci è tipico del paesaggio apuano, con pendii da mediamente acclivi a molto acclivi, con speroni rocciosi e doline, risultato di una evoluzione morfologica di tipo carsico. Il complesso assetto geologico della zona, con strette anticlinali, laminazioni e sovrascorrimenti, condiziona ovviamente la morfologia dei versanti, che assumono forme decisamente forti in corrispondenza degli affioramenti delle formazioni prevalentemente calcaree appartenenti alla Successione Toscana (localizzabili a Nord, Nord-Est e Sud-Est della conca con i termini dal "Calcere cavernoso" alla "Maiolica"), mentre sui più dolci rilievi meridionali e sud-occidentali affiorano terreni argillitici ed arenacei (dalla "Scaglia rossa" al "Macigno" della Succ. Toscana, alle argilliti caotiche ed i flysch delle Unità liguri). Ad Ovest, in corrispondenza delle colline che separano la valle interna dalla pianura costiera, affiorano le filladi quarzitiche del "Verrucano" dell'Unità di Massa.

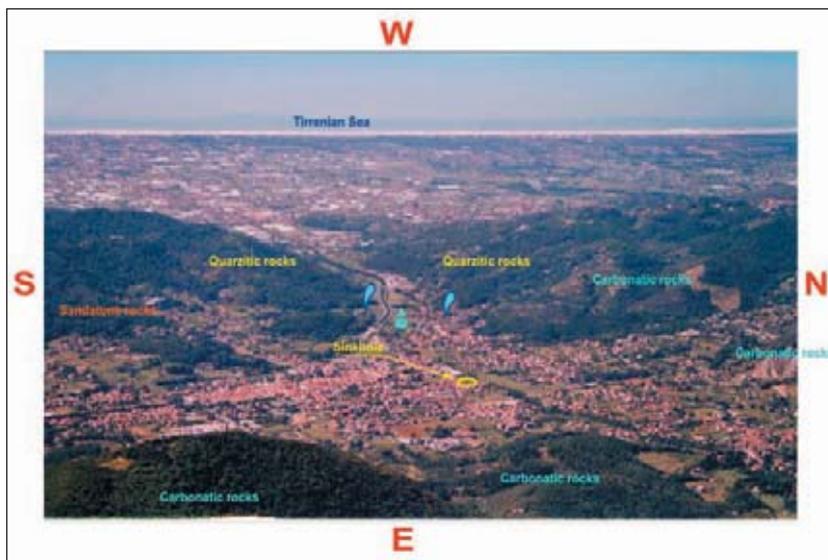


Foto 1 - Panoramica della conca di Camaiore

L'assetto geologico condiziona ovviamente anche il circuito idrogeologico delle acque sotterranee, determinando, nel caso specifico, una situazione particolarmente favorevole al trabocco. Nella zona tra le località Frati e Teneri, in corrispondenza della strettoia che delimita ad W la conca camaiorese, il substrato roccioso è costituito da Filladi quarzitiche a permeabilità molto bassa, mentre il sovrastante Calcare Cavernoso acquifero risulta laminato fino a sparire. Questo determina un effetto soglia al deflusso delle acque sotterranee che, risalendo dalle fratture nei calcari, fluiscono verso l'uscita del bacino, causandone l'emergenza. In questa zona si trovavano alcune grosse sorgenti, attualmente ancora presenti sia pure con portata ridotta; le maggiori erano alla base delle due colline di calcare cavernoso Monte di Rose a Nord e Colle Donaia a Sud. Sempre in questa zona si trova la batteria di pozzi per uso acquedottistico che viene pertanto alimentata sia dalla falda superficiale che dalle acque che risalgono dall'acquifero carbonatico nella zona della soglia naturale.

### **1. EVOLUZIONE DELL'EVENTO**

Il fenomeno sinkhole, identificato con lo sprofondamento improvviso del terreno, è riconosciuto in diverse parti del mondo ed è considerato come una calamità scarsamente prevedibile e dalla quale non è facile difendersi. Negli Stati Uniti, da almeno un ventennio sono in corso studi specifici, dato che i casi di sinkhole verificatisi in zone urbanizzate o comunque antropizzate hanno determinato danni notevoli, anche di diversi milioni di dollari, senza contare che in alcuni casi, in altre parti del mondo, ci sono state perdite di vite umane.

In Italia i principali dissesti sono stati registrati lungo la fascia tirrenica, dalla Versilia alla Campania. Il dissesto verificatosi a Camaiore nell'ottobre 1995 è assimilabile a quelli già noti dell'alto Lazio e della Pianura Pontina, a quello di Grosseto del 1999 ed a quello avvenuto nelle vicinanze di Tivoli nel 2001. La maggior parte di questi fenomeni è caratterizzato dalla notevole profondità del bed-rock carbonatico (100 m ed oltre) e dal fatto che si trovano nella zona di "scarico" delle falde e non nella zona di ricarica.



Foto 2 - Panoramica della zona colpita dal dissesto

L'evento di Camaione è avvenuto nella notte tra il 14 ed il 15 ottobre 1995 con sprofondamento di un'area in Via F.lli Cervi ed apertura di una voragine del diametro di circa 30 metri e profonda, a ridosso del bordo, circa 18 m.

Al manifestarsi delle prime grosse lesioni sulle strade e sui fabbricati fu decisa l'evacuazione del quartiere compreso tra Via Fonda e Via Gramsci, con mobilitazione di circa 70 famiglie. A seguito di tale tempestivo provvedimento furono evitati rischi per la pubblica incolumità. All'alba del 15 ottobre, circa 6 ore dopo le prime lesioni, avvenne il disastroso sprofondamento, nel quale fu parzialmente inghiottito un fabbricato quadrifamiliare, mentre altri 5 fabbricati circostanti vennero gravemente lesionati, tanto da essere successivamente demoliti.

La foto evidenzia l'evolvere del dissesto che, a seguito del progressivo abbassamento del suolo, dapprima lesiona gravemente il fabbricato, poi, dopo l'apertura della "voragine", per scalzamento della platea di fondazione, determina il crollo dello stesso. Le due



Foto 3 - Particolare, prima e dopo l'evento, del fabbricato crollato

immagini si riferiscono alla stessa abitazione, ripresa da due diverse posizioni, ortogonali tra loro, prima e dopo l'evento.

Con il Dipartimento di Protezione Civile fu deciso di iniziare immediatamente il riempimento della voragine con inerti lavati, grossolani, al fine di evitare il naturale ampliamento della stessa ed il conseguente coinvolgimento di altri fabbricati, nonché di iniziare le prospezioni geognostiche e geofisiche nei dintorni dell'area del dissesto.

Furono immediatamente intraprese le indagini per studiare le cause del fenomeno, per verificare la situazione di rischio sinkhole nella piana camaiolese, notevolmente urbanizzata, e per allestire un sistema di allarme ai fini di protezione civile, con l'obiettivo di prevenire i rischi alla pubblica incolumità derivanti da altri possibili fenomeni dello stesso tipo.



Foto 4 - Operazioni di colmamento della "voragine"

Si deve rilevare che nei primi giorni di ottobre si era registrato un evento sismico di una certa intensità con epicentro in Lunigiana, dopo il quale si erano cominciati a manifestare, nella zona del collasso, piccoli disassamenti dei cancelli esterni e microlesioni sulle strutture esterne dei fabbricati. Per questo una delle prime ipotesi fatte per spiegare il fenomeno fu quella del crollo di una cavità ipogea all'interno del complesso carbonatico costituente il bed-rock, crollo innescato dallo shock sismico.

Fra le ipotesi fu avanzata anche quella dell'eccessivo pompaggio dei pozzi ad uso acquedottistico della VEA e della SEA Acque nella zona dei Frati, un'area posta a circa 850 metri ad WSW dalla voragine, con avvio del processo di dewatering nella coltre alluvionale.

## **2. CRONOLOGIA DELLE OPERAZIONI ESEGUITE**

A partire dal momento dell'evento, sono state eseguite, in più fasi, indagini multidisciplinari che hanno consentito di raccogliere una notevole mole di dati geologici, stratigrafici, idrogeologici, geofisici e geochimici, nonché di esaminare una serie di misure relative ai punti di controllo dislocati sul territorio. In sintesi, le operazioni effettuate nelle varie fasi possono essere così schematizzate:

### 1ª Fase

Inizialmente furono eseguiti 3 sondaggi geognostici a 120° intorno all'area dello sprofondamento, due dei quali attrezzati con tubi in pvc-hd per prove sismiche ed uno con tubo inclinometrico. Contestualmente furono eseguite indagini geoelettriche (Prof. Marchisio) e sismiche (Prof. Bernabini) per l'analisi indiretta delle condizioni stratigrafico-strutturali della zona. Da queste emerse un quadro strutturale profondo assai articolato, con diversi scalini al tetto del bed-rock. Con l'indagine sismica (cross-hole e down-hole) fu rilevata la presenza di anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche, tali da far ipotizzare l'esistenza di cavità ipogee nel bed-rock carbonatico. Nello stesso periodo (1995-1996) furono effettuate indagini geologiche, idrogeologiche ed aerofotogrammetriche per delineare il quadro geologico e strutturale della conca camaioiese.

Dopo la prima serie di indagini fu sostanzialmente scartata, come causa scatenante, l'influenza degli emungimenti dal campo pozzi distante circa 850 m dalla zona del crollo; non fu comunque totalmente esclusa, come concausa, l'incidenza del pompaggio di rilevante entità (c.ca 360 l/sec, con massimi di circa 500 l/sec nei periodi estivi di massima utenza coincidenti con quelli di minima ricarica). Dalle indagini eseguite emersero invece, come cause sostanziali, la fragilità del substrato carbonatico (interessato da paleo-carismo), la collocazione della zona del crollo in area tettonicamente attiva (con un evento sismico di discreta intensità verificatosi circa 8 giorni prima in Lunigiana), la presenza e l'intersezione di grosse lineazioni strutturali in corrispondenza dell'area del dissesto.

### 2ª Fase

In una seconda fase (1997-1999) furono eseguite indagini sia sull'area del dissesto, che più in generale sulla conca camaioiese, mediante prospezioni geofisiche (gravimetria, profili tomografici geoelettrici, sismica) e geochimiche (analisi dei gas endogeni). Le indagini consentirono di elaborare una cartografia nella quale sono evidenziate zone con anomalie gravimetriche (zone di rapido ribassamento del substrato), e zone con tenori anomali di gas endogeni. Furono poi effettuati profili tomografici geoelettrici che fecero rilevare anomalie elettriche in profondità. Da tutta questa serie di indagini è emerso il quadro strutturale del substrato profondo della conca camaioiese, con un "basso" allungato NW-SE nella zona del crollo e interessante parte dell'abitato del capoluogo, e con alcune aree nelle quali sono presumibili probabili cavità ipogee (o comunque substrato molto fratturato) a profondità dell'ordine di 100-130 metri dal piano campagna.

L'indagine sismica effettuata in questa seconda fase fu mirata a caratterizzare dal punto di vista geotecnico (con definizione dei parametri elastici) i depositi alluvionali che hanno progressivamente colmato la piana di Camaioie. Tali depositi, costituiti da materiali eterogranulari, presentano infatti situazioni stratigrafiche caratterizzate da scarsa omogeneità laterale. Nei dintorni dell'area della "voragine" si rilevano orizzonti prevalentemente argillosi, a profondità da 40 a 50 metri, che determinano un certo confinamento delle falde acquifere sottostanti. Dalle prospezioni sismiche sopra citate, risulta che i terreni alluvionali tendono a peggiorare le loro caratteristiche geotecniche con la profondità; in particolare da 60 a 100 m dal piano campagna si rilevano depositi poco addensati, con valori bassi, o quantomeno anomali, dei parametri elastici del terreno. Come primo step di allestimento del monitoraggio preventivo, furono messe a punto tre centraline di rilevamento in continuo, in grado di captare segnali di tipo sismico provenienti dal sottosuolo. L'apparato è costituito da un sistema di geofoni, disposti secondo le tre dimensioni, posizionato in corrispondenza del bed-rock; il sistema è collegato ad un PC attraverso un convertitore analogico-digitale. A monte del convertitore sono posti i filtri che, oltre che eliminare i possibili disturbi, servono ad amplificare i segnali dai geofoni. I segnali così acquisiti vengono gestiti da uno specifico software che, oltre che acquisire i dati, gestisce un modem interno che dà il via ad un sistema che con-

sente di localizzare, in prima approssimazione, la fonte del “rumore” attraverso l’analisi vettoriale degli impulsi.

### 3ª Fase

Nella 3ª fase di studio (2000-2003) è stata portata a termine la campagna conclusiva di prospezioni geoelettriche, con raffittimento della maglia a copertura di tutta la conca camaiorese. Al termine di queste prospezioni è stata effettuata una campagna microgravimetrica sulle aree urbanizzate ritenute a maggior rischio secondo quanto emerso dall’indagine geoelettrica.

Per il controllo delle microdeformazioni del suolo è stata predisposta l’installazione e la lettura discreta di 23 punti di controllo GPS ubicati in punti significativi nella conca camaiorese, mentre per il controllo della falda idrica sotterranea sono state eseguite periodiche misure ai 30 piezometri di controllo, che hanno consentito di osservare le oscillazioni della falda stessa dalle condizioni di massima ricarica, a quelle di minima. Per il controllo piezometrico in continuo è stato installato un trasduttore di pressione nel pozzo-piezometro ubicato c.ca 350 m ad W del sinkhole. Sono state inoltre eseguite prove di emungimento su alcuni dei pozzi di studio per la determinazione dei parametri idraulici delle falde.

In tutto il periodo dello studio (1995-2003), sono stati inoltre eseguiti periodici controlli topografici di precisione a capisaldi superficiali, letture ad estensimetri posizionati su lesioni a fabbricati e letture all’inclinometro. Sono stati raccolti dati relativi alla piovosità, alle portate emunte al campo pozzi dei “Frati”, ai deflussi superficiali del T. Camaiore. Si deve rilevare che, nel periodo di studio, si sono registrate forti escursioni nel regime pluviometrico, con episodi di notevole afflusso ed episodi siccitosi. Nel primo caso si fa riferimento a due eventi meteorici importanti (nel 1998 e nel 2000), diversi nelle caratteristiche, ma entrambi significativi ed eccezionali: il primo per l’intensità di pioggia nel breve termine (circa 130 mm in un’ora), il secondo per la notevole quantità caduta in un periodo di circa 50 giorni (700 mm circa a Camaiore, 1000 mm circa in quota, nella zona di ricarica dell’acquifero carbonatico). Come episodio siccitoso si fa invece riferimento all’anno 2003 che ha fatto registrare un apporto meteorico molto scarso, privo in sostanza della ricarica primaverile e con un’estate asciutta; gli eventi piovosi, peraltro, hanno avuto spesso carattere temporalesco e si sono esauriti in tempi brevi, facendo così prevalere il ruscellamento all’infiltrazione. La ricarica della falda ha subito di conseguenza una forte limitazione. Confrontando i dati pluviometrici relativi al periodo gennaio-settembre negli anni dal 1989 al 2003, appare evidente il deficit pluviometrico dell’ultimo anno, ovvero, a fronte di una media di circa 730 mm nel periodo di nove mesi considerato, nel 2003 sono caduti 320 mm, con un deficit di circa 410 mm rispetto alla media dal 1989 al 2002; conseguentemente risulta una ricarica primaverile ridotta al 44% circa della media stagionale.

## 3. SINTESI DELLE INDAGINI

### 3.1. Geognostica e prospezioni sismiche

I vari sondaggi geognostici eseguiti, sia a carotaggio che a distruzione, hanno consentito di ricostruire l’assetto stratigrafico locale; dal confronto delle varie stratigrafie rilevate è emerso un quadro stratigrafico generale notevolmente eterogeneo ed eteropico, che evidenzia la sovrapposizione di varie fasi deposizionali a diversa energia e quindi condizionate da diverse condizioni climatiche. In sintesi si osserva la presenza di un pacco superficiale di depositi di conoide, eterometrici, sovrastanti livelli argillosi che confinano i sedimenti sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi che costituiscono i potenti orizzonti acquiferi posizionati alla base del complesso alluvionale.

Durante la perforazione dei sondaggi eseguiti nella prima fase nei pressi dell'area del sinkhole sono state osservate zone di bassissimo addensamento (pseudo-cavità) all'interno della copertura alluvionale, caratterizzate da spessori variabili da pochi decimetri a 3 metri circa. Le zone decomprese sono state rilevate a profondità variabili da 45 m a 50 m dal p.c., generalmente al di sotto del primo orizzonte argilloso o argilloso-ciottoloso confinante, ma anche a profondità minori.

I profili delle tomografie sismiche effettuate nei fori di sondaggio hanno fatto osservare una notevole analogia di risultati, evidenziando alternanze di strati a diversa velocità. L'andamento dei profili, nei primi 40-50 metri, risulta assai irregolare, ma denota sempre un trend abbastanza costante nell'aumento di velocità verso il basso, anche se già nei primi 25-30 metri si osservano bruschi cali di velocità al di sotto di strati rigidi a velocità elevate. Questo fenomeno si rileva invece con una notevole continuità intorno ai 40 metri di profondità, laddove, dopo uno strato assai rigido, si osserva un brusco e anomalo calo di velocità per alcuni metri. A partire dai 40-50 metri di profondità, il trend delle velocità sismiche si stabilizza su valori medio-bassi, senza far rilevare influenze dell'incremento del carico litostatico. Più in profondità, in corrispondenza del tetto del "Calcere cavernoso" compatto, si osserva una notevole risalita delle velocità sismiche, mentre un brusco calo delle stesse si rileva sulla verticale dell'area del sinkhole.

Le prospezioni eseguite dintorni dell'area della "voragine" hanno quindi consentito di individuare alcune particolari caratteristiche fisiche dei materiali costituenti il sottosuolo della conca di Camaione connesse con il rischio sinkhole; in particolare:

- All'interno dei depositi alluvionali sono stati rilevati degli orizzonti fortemente decompressi (corrispondenti alle zone di bassa velocità); in particolare il fenomeno risulta evidente e costante intorno ai 40 metri, al di sotto di uno strato argilloso o argilloso-ciottoloso. Nel primo sondaggio, eseguito in prossimità del sinkhole immediatamente dopo il crollo, fu evidente lo scollamento (vuoto) rilevato dai 42 ai 45 m nelle alluvioni al di sotto del livello argilloso compatto.
- Al di sotto dei 40 metri, fino al tetto del bed-rock, i sedimenti fanno rilevare uno stato di addensamento anomalo, inferiore a quello teorico prevedibile.

Per quanto concerne il substrato roccioso, le tomografie cross-hole hanno permesso di esprimere le seguenti considerazioni sullo stato fisico dello stesso:

- Il basamento roccioso presenta una velocità media di 3100 m/sec che indica la presenza di una notevole fratturazione e degradazione.
- Nella zona del crollo il tetto del bed-rock si approfondisce rapidamente, facendo rilevare un brusco gradino.
- Sulla zona rialzata del suddetto gradino ("up"), il basamento calcareo presenta una saccatura di cui non è possibile definire esattamente i contorni, con velocità dell'ordine di 2000 m/sec o inferiori. La zona della saccatura corrisponde con la fascia sub-verticale a bassa velocità nei terreni alluvionali e, di conseguenza, ambedue appaiono corrispondere all'area interessata dallo sprofondamento.

Dalle prospezioni sismiche eseguite nel '98 (2ª fase), effettuate con energizzazione polarizzata, risulta che i parametri elastici dei terreni alluvionali tendono a peggiorare con la profondità; in particolare da 60 a 100 m dal piano campagna. Più in dettaglio si osserva quanto segue:

- Le velocità delle onde sismiche ( $V_p$  longitudinali e  $V_s$  di taglio) diminuiscono dai 50 m in poi con minimo intorno ai 70-80 m;
- Il Modulo di Young diminuisce a partire dai 50-60 m, passando da  $0.12-0.14 \times 10^6$  a  $0.08 \times 10^6$  kg/cmq;
- Il Modulo di taglio ha stesso comportamento passando da  $0.05-0.04 \times 10^6$  a  $0.03 \times 10^6$  kg/cmq;
- Il Coefficiente di Poisson rimane pressoché costante.

Si può quindi sintetizzare che i terreni alluvionali al di sopra del bed-rock sono poco addensati ed hanno caratteristiche meccaniche scadenti a partire dai 50 m in poi. Le situazioni di decompressione della copertura alluvionale, rilevate anche con la microgravimetria, potrebbero nascondere la presenza di "vuoti" in profondità o cavità ipogee. Secondo vari Autori, in base alla casistica di eventi tipo sinkhole, gli svuotamenti sembrano avvenire, in gran parte di casi, in corrispondenza di cavità (o grosse fratture) nel substrato nelle quali migra la frazione fine. La conferma a tutto ciò è venuta nel 2002, quando è stata eseguita l'ultima campagna di prospezioni geognostiche, con esecuzione di 2 sondaggi profondi, di piccolo diametro e a distruzione di nucleo, con lettura dei parametri di perforazione in avanzamento ed in continuo. Le prospezioni sono state eseguite a verifica dei modelli utilizzati nelle indagini indirette che indicavano la presenza di anomalie per carenza di massa nel sottosuolo. Data la presenza di abitazioni e di stabilimento produttivo, si è cercato un sistema di prospezione che fosse il meno invasivo possibile e che non creasse i presupposti per la formazione di ulteriori svuotamenti nella copertura alluvionale. La lettura dei parametri meccanici della sonda ha consentito di valutare il grado di consistenza dei terreni in profondità attraverso il rilevamento delle: Velocità di avanzamento della colonna (dm/min) - Pressione del fluido di circolazione (bar) - Energia di perforazione (barxgiri/min) attraverso il rilevamento della rotazione (giri/min) e della energia di coppia (bar) necessaria alla rotazione della colonna per l'avanzamento.

Nell'ubicare le due prospezioni si è cercato di avvicinare al massimo le zone ritenute fisicamente più fragili anche se, nel caso del sondaggio eseguito all'interno dello stabilimento industriale, si è dovuto procedere alla verifica al margine dell'anomalia rilevata dalle indagini geofisiche. Nel secondo sondaggio, effettuato all'interno dell'area del "Colosseo", è stata invece investigata un'area in corrispondenza della quale era stata evidenziata una coesistenza di anomalie gravimetriche e geoelettriche. I risultati possono essere così sintetizzati: nel primo sondaggio non ci sono particolari livelli caratterizzati da bassa densità e scarsa consistenza. Nel secondo sondaggio, posizionato in zona quasi baricentrica rispetto ad un'area di anomalia, si è invece riscontrata la presenza di livelli prevalentemente sabbioso-limosi, di consistenza bassa o molto bassa. A partire dai 6 metri di profondità, infatti, si è registrato un notevole aumento delle velocità di avanzamento, con locale perdita di circolazione e fuoriuscita di cutting molto fine, talora scarso; l'energia di perforazione è rimasta bassa per il tratto compreso tra 6 e 21 m di profondità. I livelli particolarmente inconsistenti si sono incontrati tra 12 e 15 m e tra 18 e 21 m, laddove la velocità di avanzamento è stata molto elevata; in corrispondenza di tali orizzonti la colonna di rivestimento è scesa, in pratica, per peso proprio. Un secondo orizzonte a basso addensamento si è rilevato tra 27 e 39 m di profondità; anche in questo tratto, tra 29 e 31 m, si è nuovamente verificata una perdita di circolazione ed un affondamento repentino della colonna di rivestimento. A partire dai 45 metri di profondità l'avanzamento è stato sostanzialmente regolare, fino ai 70 m, laddove il sondaggio è stato interrotto.

### **3.2. Analisi dei gas endogeni**

Lo studio dei gas endogeni, come le altre prospezioni geofisiche della seconda fase d'indagine, è stato eseguito da Unigeo che, per quanto concerne la geochemica, ha affidato ai Proff.ri S. Lombardi e G. Ciotoli, del Dip.to di Scienze della Terra dell'Università La Sapienza di Roma, la campagna di rilievi, le analisi e l'elaborazione dati.

Per l'espletamento della campagna d'indagine geochemica furono prelevati dal terreno oltre 200 campioni, da cui vennero separati e misurati i tenori dei gas più significativi di origine profonda, ovvero dei gas endogeni che possono fornire utili informazioni sui movimenti in atto a notevoli profondità. L'analisi di tali gas consente infatti di riconoscere, laddove si misura la maggiore concentrazione, le zone di risalita dal substrato. Tale

risalita è ovviamente favorita nelle zone di maggiore permeabilità del bed-rock corrispondenti alle zone maggiormente fessurate per presenza di faglie o grosse fratture. La presenza e la più elevata concentrazione di gas nei terreni è peraltro indice di attività tettonico-strutturale recente.

I gas ricercati e misurati sono stati: Radon  $^{222}\text{Rn}$  -  $\text{O}_2$  -  $\text{CO}_2$  -  $\text{CH}_4$  - Idrocarburi aromatici fino al Pentano -  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{SO}_2$  - Elio 4. L'analisi dei tenori dei gas endogeni nel terreno ha consentito di evidenziare spiccate anomalie su diverse zone, alcune delle quali caratterizzate dalla coincidenza di elevata concentrazione di più gas ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ ). La distribuzione areale delle anomalie gassose è contraddistinta da una disposizione preferenziale lungo direzioni definite e allungate, riferibili a discontinuità tettoniche profonde (faglie). Il confronto tra l'orientazione delle anomalie e la direzione delle principali deformazioni fragili dell'area studiata hanno permesso di avanzare l'ipotesi che le direzioni N-S, E-W, e subordinatamente quelle antiappenniniche, coincidano statisticamente con le fratture più permeabili e probabilmente più attive o recentemente attivate. In particolare si fa notare che il sinkhole del 1995 si trova all'intersezione di più sistemi di anomalie ed all'intersezione di faglie.

### 3.3. Gravimetria e Microgravimetria

L'analisi gravimetrica e microgravimetrica della piana di Camaione è stata eseguita in tre diverse fasi dai Proff.ri B. Toro e M. Di Filippo. I vari modelli di elaborazione utilizzati sono stati realizzati con un programma che calcola l'anomalia gravimetrica sul piano campagna. Successivamente il programma di calcolo confronta le Anomalie Calcolate con Anomalie Residue ed in funzione degli scarti viene modificata la geometria, la profondità e il contrasto di densità. Questo processo viene svolto in modo iterativo fino ad ottenere un profilo dell'anomalia calcolata simile per forma ed entità dei valori a quello dell'anomalia residua. Nei modelli utilizzati è stato rappresentato l'andamento del bed-rock denso, inteso come substrato meso-cenozoico: l'effetto del bedrock non è stato calcolato in base alle Anomalie Residue di ordine n-1, ma bensì sulla base delle Residue di ordine n-2. Per quanto concerne i terreni alluvionali, è stato considerato un pacco di sedimenti di origine fluviale o fluvio-lacustre con una densità media di  $1.8 \text{ g/cm}^3$  ( $\Delta\rho = -0.8 \text{ g/cm}^3$  rispetto al bedrock). L'analisi del modello mette in evidenza un livello alluvionale intercalato con il precedente, di sedimenti sempre della stessa tipologia, ma caratterizzati da una densità più bassa,  $1.3 \text{ g/cm}^3$  ( $\Delta\rho = -1.2 \text{ g/cm}^3$  sempre rispetto al bedrock). Risulta evidente come le zone di anomalia negativa trovino conferma con la presenza di volumi di sedimenti nel sottosuolo caratterizzati da valori di densità estremamente bassi, quasi a livello di fanghi, e dalle caratteristiche geotecniche estremamente scadenti, con elevato valore di compressibilità, possibilità di solifluzione, e tali da far considerare le aree soprastanti a rischio sinkhole. Le prospezioni microgravimetriche hanno permesso di evidenziare tali aree con anomalie gravimetriche negative, che possono essere imputabili alla presenza di cavità sepolte o comunque a volumi a bassa densità. Un controllo tra i dati gravimetrici rilevati nel 1998 e quelli rilevati nelle campagne 2000 e 2003 ha evidenziato che nella piana ci sono zone in cui la gravità è diminuita nel corso degli ultimi cinque anni, anche fino a  $-0.090 \text{ mGal}$ .

### 3.4. Indagini geoelettriche

La geoelettrica è una delle metodologie di prospezione indiretta utilizzate che, integrandosi nel confronto dei dati, contribuisce ad arricchire il quadro conoscitivo. Attraverso le tarature delle prospezioni dirette (geognostica), consente sia di operare uno screening generale sulla situazione stratigrafica dell'area investigata, sia di implementare, con la sovrapposizione di elementi selettivi, gli scenari emersi da altre tecniche di

prospezione indiretta. Nel caso specifico, proprio dal confronto tra le molteplici discipline utilizzate, è stato possibile definire le aree soggette a potenziale rischio sinkhole.

La serie di prospezioni elettriche eseguite sull'area di Camaiole dal 1997 al 2003 è stata effettuata ed elaborata dal Dott. S. Rizzo.

Le anomalie elettriche, rilevate con tecniche tomografiche sia nel materasso alluvionale, sia nel bed-rock carbonatico, sono attribuibili, relazionate alla locale situazione geologico-stratigrafica, ad una maggiore percentuale di indice dei vuoti e quindi probabilmente connesse con cavità, colme di terreni fini poco o nulla addensati, o grosse fratture.

Le indagini sono state interpretate con diverse metodologie, complementari tra di loro:

- attraverso l'analisi delle carte di resistività apparente con diversa profondità di indagine;
- utilizzando i modelli di inversione di Loke, con il programma RES2DINV della Geotomo software;

- interpretando tutte le misure con il metodo Schlumberger;

- utilizzando un programma originale che simula, data una situazione stratigrafica all'interno di un modello tridimensionale, un profilo di tomografia elettrica e confronta i risultati con i dati sperimentali.

Il confronto tra i diversi approcci e la loro sintesi ha permesso di ubicare una serie di anomalie elettriche conduttrici, riconducibili a terreni molto porosi o a cavità carsiche con materiale fine.

L'analisi dei dati è stata, in questo senso, facilitata dalla uniformità delle resistività misurate nella piana di Camaiole; la successione di ghiaie e sabbie, posta sul basamento cenozoico, ha mostrato resistività comprese generalmente tra 100 e 200 ohm.m, di poco inferiori alla resistività del calcare cavernoso (250 – 300 ohm.m); le zone di anomalia mostravano resistività comprese tra 10 e 20 ohm.m, e quindi nettamente inferiori. Tale uniformità nei valori di resistività ha complicato l'individuazione del tetto del bed-rock che è stato in ogni caso ipotizzato nel modello tridimensionale.

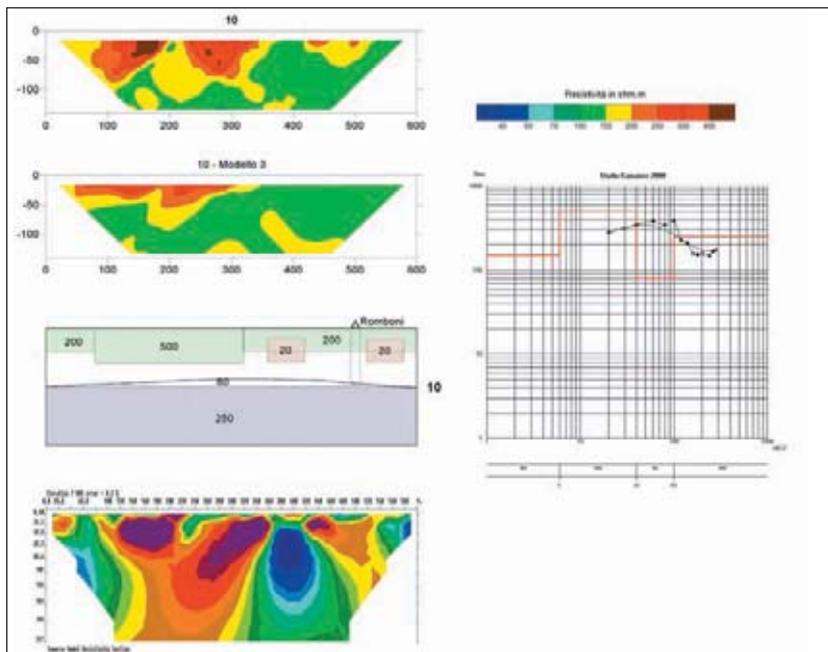


Fig. 2 - Confronto dei diversi metodi d'interpretazione dei profili topografici

In alto la pseudo sezione di resistività sperimentale (la profondità apparente è indicata in  $AM/2$ ); sotto la pseudo sezione di resistività ottenuta con il modello tridimensionale, disegnata immediatamente in basso; in fondo alla figura il modello di inversione di Loke e a destra la curva Schlumberger della misura 12.

### 3.5. Indagini idrogeologiche

Nei depositi della conca camaiorese si osservano più falde idriche sovrapposte; tra queste la superiore è freatica ed è in equilibrio con le acque superficiali, mentre le sottostanti (almeno due separate) hanno caratteristiche di falde in pressione, localmente artesiane. In passato, quando i prelievi erano scarsi, lo erano in buona parte della pianura. In tal senso si deve osservare che i numerosi pozzi privati (circa 600 solo nella conca), perforati talora senza un corretto criterio costruttivo, mettono ormai in comunicazione idraulica le diverse falde sovrapposte, che tendono ad assumere un livello piezometrico comune.

Una consistente circolazione avviene nei "Calcari cavernosi" che rappresentano il substrato della maggior parte dei rilievi settentrionali e della depressione quaternaria della piana di Camaioere e costituiscono l'acquifero più consistente; tale acquifero carbonatico alimenta, in misura prevalente, le falde della conca che vengono in subordine rifornite anche dalle piogge locali e dalla circolazione subalveare dei corsi d'acqua.

Nella zona tra le località Frati e Teneri, il substrato roccioso impermeabile (Filladi del Verucano) risale per la presenza di faglie antitetiche, mentre il Calcare Cavernoso sovrastante risulta laminato fino a sparire (v. sezione di Fig. 3, BUCHIGNANI & CATTOLICA, 1999).

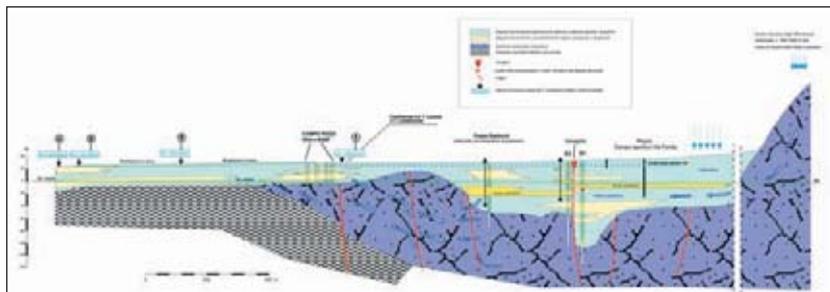


Fig. 3 - Sezione lungo l'asse T. Camaioere – T. Lombricese

Questo determina un effetto soglia al deflusso delle acque sotterranee che fluiscono verso l'uscita del bacino, causandone l'emergenza. In questa zona si trovavano alcune grosse sorgenti, attualmente ancora presenti sia pure con portata fortemente ridotta. Le maggiori erano alla base delle due colline di calcare cavernoso Monte di Rose a NW (Polla dei Frati, 80 l/s di portata media), e Colle Donaia a SE (Polla di Teneri, 40 l/s). La prima, più alta in quota, è in pratica scomparsa e la seconda, che alimenta un laghetto scavato nel luogo della sorgente ed utilizzato per la pesca sportiva, è attualmente integrata da un pozzo profondo pochi metri.

Alla stretta dei "Frati" la potenzialità idrica media del sistema alluvioni-complesso carbonatico, dal quale peraltro attingono i pozzi per uso idropotabile dell'acquedotto VEA e SEA Acque, è stata stimata, da vari Autori che hanno affrontato il tema dell'uso idropotabile delle acque, variabile da 0.3 a 0.8 mc/sec.

Le indagini idrogeologiche svolte dal 1995 ad oggi e basate su rilievi della piezometria, dei deflussi superficiali e della pluviometria, sono state finalizzate alla verifica delle interazioni tra le oscillazioni piezometriche ed i fattori che potenzialmente possono concorrere alla destabilizzazione dell'equilibrio ed all'evolvere di un sinkhole.

Il confronto tra i dati idrogeologici e quelli rilevati ai capisaldi di controllo (estensimetri, inclinometro, punti topografici, punti GPS), ai pozzi della batteria VEA e SEA Acque ed ai geofoni delle centraline è stato indirizzato alla definizione delle interazioni tra i vari fattori analizzati. Il quadro che è emerso può essere così sintetizzato:

- La ricarica dell'acquifero nel suo complesso, comprendendo in esso sia quello nel "Cavernoso" che nelle falde in pressione del materasso alluvionale, è estremamente rapida; confrontando infatti l'istogramma delle piogge giornaliere od orarie (stazione di Camaioere) ed il grafico delle oscillazioni di livello piezometrico nel pozzo profondo in loc. Radicchi (piana di Camaioere), si osserva una risposta rapida (poche ore) alla precipitazione (v. Figg. 4 e 5).

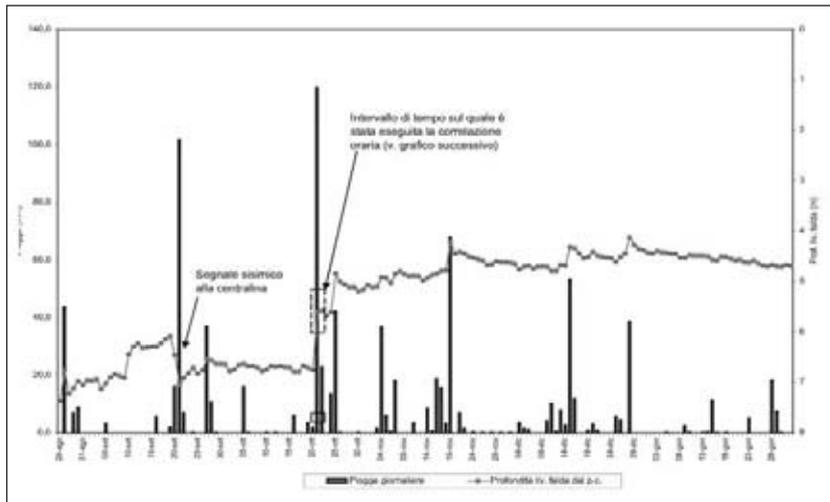


Fig. 4 - Grafico di correlazione tra piogge giornaliere e oscillazioni piezometriche al pozzo Radicchi

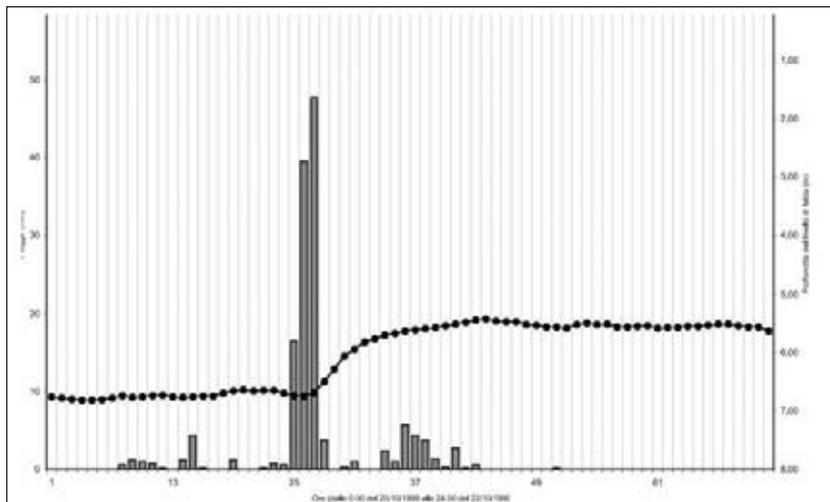


Fig. 5 - Grafico di correlazione tra piogge orarie e oscillazioni piezometriche al pozzo Radicchi

Si deve sottolineare il fatto che lo sfalsamento temporale tra le piogge nella piana (stazione di Camaiole: 30 m slm c.ca) e quelle in quota nella zona di ricarica (stazione di Valfelunga: 650 m slm c.ca) è trascurabile; variano ovviamente le quantità degli afflussi (v. Fig. 6). Per la particolare morfologia dei luoghi, con i rilievi a ridosso della conca camaiolese, le due stazioni distano in linea d'aria circa 5 km. È quindi evidente l'influenza della ricarica che avviene nel complesso carbonatico sulla piezometria della piana, che comporta variazioni rapide consequenziali delle pressioni idrauliche.

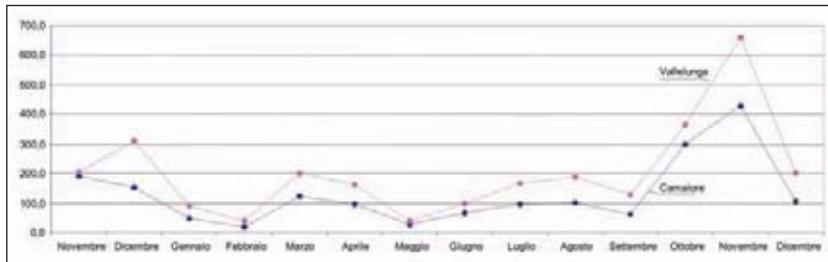


Fig. 6 - Grafico di confronto tra le quantità di pioggia alle stazioni di Camaiole e Valfelunga

- Il prelievo medio annuo, 11.435.000 m<sup>3</sup>, rappresenta poco più di un quinto del totale della risorsa idrica disponibile nel bacino, 51.989.639 m<sup>3</sup>. ("Bilancio idrogeologico della conca di Camaiole in relazione alla voragine del 1995" - G. PRANZINI E V. BUCHIGNANI, 2002). È evidente, quindi, che a livello di bilancio medio annuo i prelievi sono ampiamente compatibili con la risorsa rinnovabile, ovvero gli emungimenti attuati non vanno ad intaccare le riserve permanenti del complesso bacino che si sviluppa nel bed-rock carbonatico e che contribuisce ad alimentare le alluvioni della conca di Camaiole. Dalla strettoia in località Frati sembra quindi transitare, nell'arco dell'anno, un volume d'acqua ampiamente superiore a quello che viene estratto. Si deve però osservare che il bilancio eseguito tiene conto dei valori medi annui degli apporti, dei deflussi e dei prelievi. La situazione critica si viene però a determinare nella fase stagionale in cui gli apporti sono limitati o assenti, ed invece i consumi toccano i loro valori massimi. In questo periodo, generalmente corrispondente ai mesi di luglio e agosto, si registra effettivamente uno squilibrio nel bilancio idrogeologico. Ciò si evidenzia sia dall'analisi del diagramma delle portate del F. Camaiole, dove la curva di esaurimento delle portate, che in scala logaritmica dovrebbe essere una retta, nelle estati poco piovose subisce un incremento di pendenza, sia dall'andamento del grafico relativo alle oscillazioni piezometriche al pozzo Radicchi, nel quale si registra un flesso nella curva d'esaurimento in corrispondenza dei periodi asciutti (sia in scala normale che in quella logaritmica). Questi incrementi di pendenza indicano un'alterazione dei regimi di scarico dei deflussi superficiali e sotterranei, attribuibili ad interferenze antropiche ed in particolare ad eccessivi prelievi che non sfruttano più il solo surplus in trabocco, ma vanno ad alimentarsi nelle riserve permanenti. Lo squilibrio rimane comunque limitato al breve periodo estivo di circa 30-50 giorni, con rapido recupero in caso di pioggia (v. grafico di correlazione riassuntivo tra piovosità/deflussi/portate emunte/piezometria di Fig. 7). Dai grafici di correlazione si rileva quindi che l'interferenza tra piovosità e piezometria è notevolmente rapida, quasi istantanea; che l'incidenza degli afflussi è rilevante ai fini del recupero degli acquiferi carbonatici e, di conseguenza, di quelli confinati, alimentati attraverso le fratture; che il regime delle piogge è più importante sulle variazioni piezometriche rispetto al prelievo di acque sotterranee. Dal diagramma di Fig. 6 si può osservare che l'evento meteorico determina un rapido assestamento della piezometria, il cui andamento risulta quindi più influenzato dalle variazioni dei regimi pluviometrici che dagli incrementi o riduzioni di emungimento.

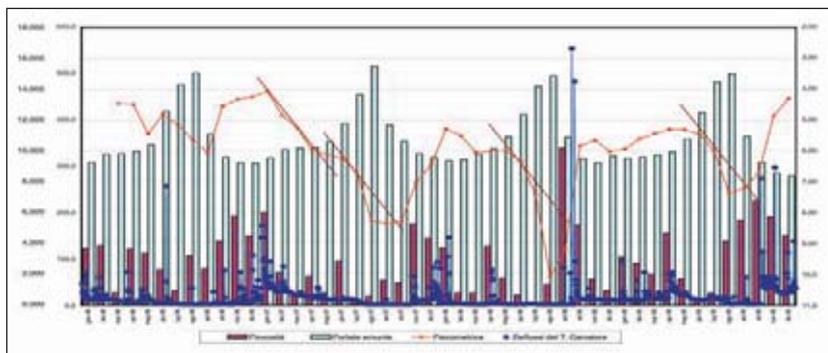


Fig. 7 – Grafico di correlazione tra piovosità/deflussi/portate emunte/piezometria

- Le misure all'inclinometro e all'estensimetro hanno fornito dati sostanzialmente concordanti con le ipotesi sopra riportate, ovvero di una maggiore influenza delle elevate pressioni idrauliche, legate a fenomeni meteorici intensi e concentrati, rispetto alle depressioni indotte dagli emungimenti. L'inclinometro, profondo 136 m, ha fatto rilevare un trend di deformazione a step fino all'evento del 1998, con deviazione progressiva dello strumento per tutta la sua lunghezza, con scostamenti massimi intorno ai 38-50 m di profondità ed in superficie. Dal 1999 in poi non si sono più osservati movimenti apprezzabili.
- Le registrazioni effettuate dalle centraline esistenti, ed inviate all'unità centrale di controllo, hanno fatto osservare dei segnali di tipo sismico (caratteristici di "rumori" di fondo) in concomitanza con eventi meteorici di particolare intensità. Questa coincidenza si è osservata in occasione di vari eventi, con tempi di risposta diversi a secon-

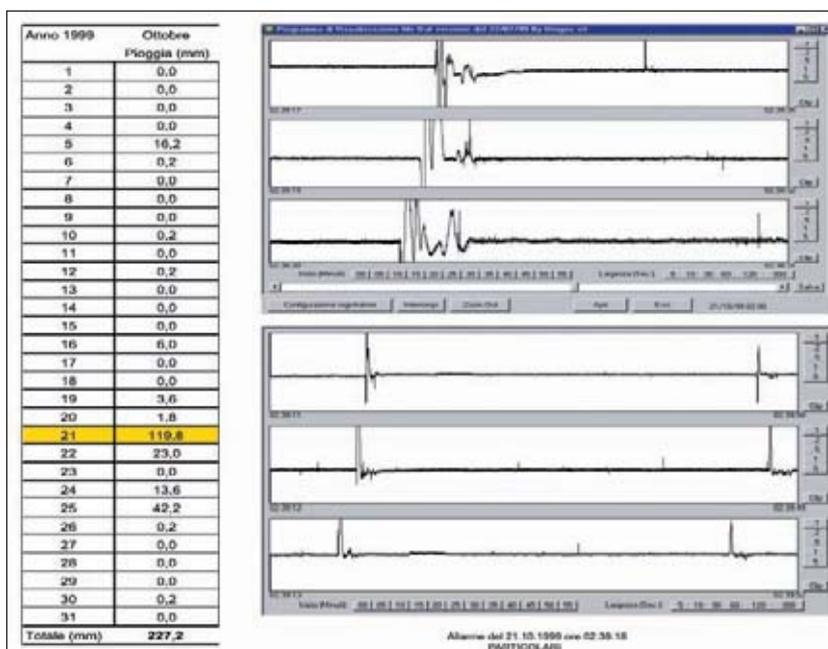


Fig. 8 – Segnale ai geofoni della Centralina 1 (Le Funi) in occasione di un evento meteorico intenso e concentrato

da che l'evento stesso sia particolarmente intenso (risposte in tempi brevi) o di media intensità (risposte a più lungo termine). Di seguito (v. Fig. 8) si riporta l'immagine di uno di questi segnali registrato in occasione dell'evento meteorico verificatosi nella nottata del 21 ottobre 1999, con precipitazione di circa 120 mm concentrata in un'ora e mezzo.

### **3.6. Rilievi delle microdeformazioni morfologiche**

Gli effetti al suolo delle microdeformazioni morfologiche connesse al fenomeno sinkhole determinano localmente piccoli lesionamenti e fessurazioni delle strutture rigide. L'analisi dell'entità di tali deformazioni, che spesso sono anche legate al naturale "respiro" delle coltri alluvionali, viene effettuata attraverso misure topografiche di precisione su capisaldi posizionati su punti strategici nei dintorni dell'area dello sprofondamento. Il resto della conca camaiorese viene monitorato attraverso un controllo periodico di capisaldi fissi misurati con strumentazione GPS di alta precisione, in grado di apprezzare deformazioni dell'ordine del mezzo centimetro. L'ubicazione dei punti di monitoraggio è stata ovviamente impostata in base ai risultati delle varie prospezioni e dei vari studi e comunque risulta distribuita, per quanto possibile, con una maglia abbastanza definita a coprire le zone ritenute più critiche della piana di Camaioire.

L'osservazione con le letture topografiche è iniziata immediatamente dopo l'evento ed ha fatto rilevare un trend delle deformazioni ben definito, con andamento iperbolico e tendenza all'asintoto (grosse deformazioni iniziali, diminuzione progressiva delle stesse con tendenza ad un andamento rettilineo del relativo grafico).

I rilievi con GPS sono invece piuttosto recenti e non hanno ancora un bagaglio di dati sufficientemente abbondante da individuare e definire dei particolari comportamenti del suolo e delle strutture, pur avendo già evidenziato dei significativi scostamenti relativi tra letture successive nelle zone caratterizzate da una particolare fragilità stratigrafico-strutturale. Si fa in particolare riferimento alla lettura del 22 dicembre 2000, effettuata successivamente al prolungato periodo di intensa piovosità tra ottobre e dicembre 2000, allorché le falde si trovavano sicuramente in condizioni di forte ricarica, anche se non all'eccezionale apice dei primi giorni di dicembre quando alcuni pozzi-piezometri erano fluenti. Le letture hanno fatto rilevare degli abbassamenti concentrati nel centro della conca di Camaioire dell'ordine di circa 3 centimetri; al contorno tali abbassamenti vanno a diminuire, fino ad azzerarsi. Contestualmente i vettori di spostamento orizzontale hanno fatto osservare una convergenza verso il centro della conca camaiorese. Lo strumento utilizzato ed il sistema di lettura adottato comportano un errore che può essere stimato (al massimo) in circa 1 centimetro, per cui gli abbassamenti massimi rilevati possono al limite risultare dell'ordine di 2 centimetri. Ciò che è estremamente interessante è la coincidenza dei punti di massimo abbassamento rilevato con GPS, con quelli indicati a rischio, caratterizzati dalla convergenza di anomalie geoelettriche e gravimetriche (v. Fig. 9).

## **4. SINTESI DEI RISULTATI**

L'analisi integrata dei dati strutturali, geognostici, sismici, idrogeologici, geochimici, geoelettrici e gravimetrici raccolti nel corso delle varie fasi di indagine condotte nel sottosuolo della "conca" di Camaioire dall'ottobre 1995 ad oggi, fa osservare una convergenza di indizi relativi ad anomalie più o meno profonde, tale da far ipotizzare il concentramento delle anomalie stesse nella zona compresa tra il T. Lombricese a NW, la Via Gusceri a NE ed il centro storico di Camaioire a S e SW.

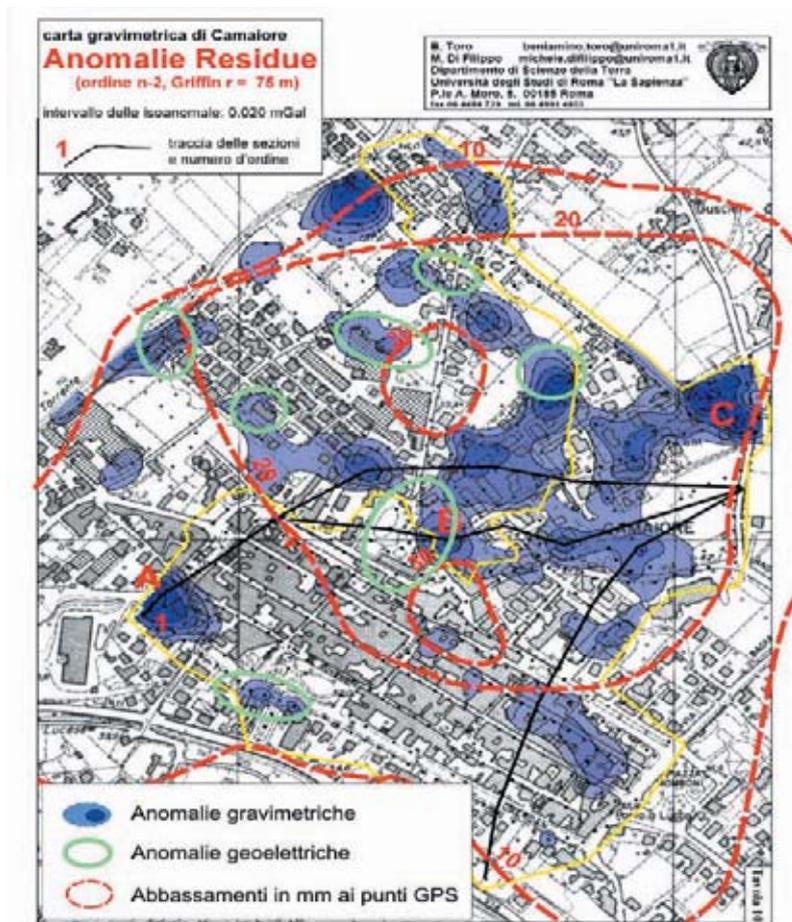


Fig. 9 – Confronto tra le posizioni delle anomalie rilevate e gli abbassamenti ai punti di controllo con GPS

Si è avvalorata l'ipotesi riguardo alla presenza di zone profonde, nel substrato roccioso, con anomalie elettriche evidenti, attribuibili ad una maggiore percentuale di indice dei vuoti nel carbonatico e quindi probabilmente connesse con cavità o grosse fratture riempite con materiale fine, sature. Il numero elevato e la loro distribuzione in zona urbanizzata indicano una situazione a rischio per quanto concerne la possibilità d'innescio di sinkhole profondi. Le conclusioni delle campagne gravimetriche effettuate sulla parte urbanizzata di piana riconosciuta a maggiore rischio, confermano la situazione sopra indicata ed anzi sono state individuate alcune zone nelle quali le anomalie gravimetriche (equivalenti a zone di basso o bassissimo addensamento) sembrano localizzate anche nell'ambito della copertura alluvionale, entro i primi 60 metri di profondità. C'è quindi una notevole corrispondenza areale tra le anomalie elettriche individuate e le anomalie gravimetriche misurate; addirittura si osserva la sovrapposizione quasi perfetta delle anomalie rilevate distintamente con i due metodi geofisici, sia per quanto concerne quelle profonde che quelle superficiali (v. Fig. 9). La successiva Fig. 10 mette in evidenza la sovrapposizione delle varie anomalie con le principali lineazioni rilevate da foto aeree e da satellite.

La sintesi dei dati di campagna, confrontata con il quadro delle varie misurazioni eseguite, mette in evidenza che anche la piezometria gioca un ruolo fondamentale nell'equilibrio

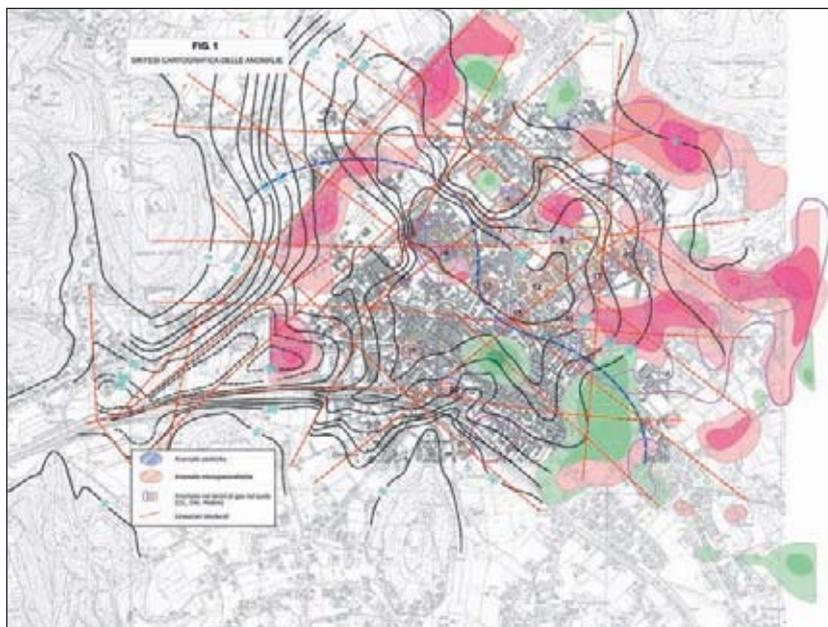


Fig. 10 – Sintesi cartografica delle varie anomalie rilevate, confrontate con il modello del bed-rock e le principali lineazioni strutturali

della zona di per sé fisiologicamente fragile per motivi litologici e, soprattutto, tettonico-strutturali. In particolare, nelle zone di intersezione delle principali lineazioni, in corrispondenza delle quali potrebbero peraltro svilupparsi cavità, avvengono le restituzioni più importanti di acqua in pressione durante la ricarica. Le colonne di acqua risalenti da queste cavità o fratture in fase di ricarica possono generare pressioni di alcune decine di atmosfere. I prismi di terreni sedimentari posti sulla verticale di queste zone di risalita sono stressati dai forti sbalzi di pressione verticale cui sono soggetti nel corso dell'alternarsi di ricarica e svasso. In queste fasi di intense variazioni di pressioni idrauliche, giocano un ruolo fondamentale anche i gas endogeni, sia come motori che come agenti influenti sugli equilibri chimici delle acque. Un ulteriore elemento importante è rappresentato dalla presenza di orizzonti confinanti (nel breve periodo) che contribuiscono a rallentare il riassetto degli equilibri delle pressioni nelle diverse falde. Appare quindi evidente che il fenomeno di dissesto in esame e, più in generale, i dissesti manifestatisi con questa tipologia di recente anche in altre aree sono favoriti anche dagli squilibri idraulici e idrochimici che si innescano all'interno del sistema acquifero delle falde in pressione anche, e forse soprattutto, per il caso in esame, nei momenti di intensa ricarica delle falde stesse.

In sintesi, questi squilibri, prodotti da cause naturali, destabilizzano punti intensamente fratturati o carsizzati del substrato carbonatico (ma potrebbe anche non essere carbonatico) e/o del sovrastante materasso alluvionale resi particolarmente fragili dalla persistenza nel tempo di una serie di fattori naturali negativi. Tali fattori, che giocano il ruolo primario sul fenomeno, possono essere quindi riconosciuti nella particolare geometria del sistema acquifero confinato della conca camaiorese, e nella elevata concentrazione acido carbonico di origine endogena circolante in soluzione nelle acque delle falde in pressione che rende particolarmente attiva la dissoluzione carsica nei punti del substrato carbonatico già indeboliti dalla fratturazione tettonica. Anche se allo stato attuale non è possibile stabilire con univoca certezza se le cavità nelle alluvioni sono sempre correlate o meno a cedimenti di cavità del substrato carbonatico sottostante, appare comunque chiaro che le sovra-pressioni idrauliche che si originano nell'ambiente

confinato delle falde inferiori in particolari momenti del ciclo idrologico, possono diventare il propulsore che nel tempo crea i vuoti in seno al materasso alluvionale e quello che, in particolari momenti e simultaneamente con altre concause, può dar origine ai dissesti. Non deve essere tuttavia trascurata l'influenza del prelievo acquedottistico in loc. Frati nei momenti di minima ricarica e di massima utenza di acque sotterranee (luglio-agosto), periodo in cui potrebbero essere intaccate eccessivamente le riserve permanenti, con innesco di possibili fenomeni di squilibrio nelle pressioni e, probabilmente, nell'idrochimismo delle acque. In occasione di periodi particolarmente siccitosi come quello registratosi tra gennaio e ottobre 2003, se la piezometria dovesse raggiungere minimi al di sotto delle normali oscillazioni stagionali per tempi ragionevolmente lunghi, data la presenza di terreni poco addensati e compressibili, potrebbero innescarsi fenomeni di subsidenza. A fronte di tutto quanto esposto, appare chiaro che i fattori che concorrono al disequilibrio del sistema sono molteplici e notevolmente complesso appare il processo con cui evolvono i potenziali sinkhole. Fermo restando il fatto che appare ancora improbabile un intervento strutturale di messa in sicurezza dei suoli e delle aree edificate a pericolosità elevata, per mitigare il rischio di crolli nel sottosuolo di Camaione occorre agire sul fronte della prevenzione e cioè sul monitoraggio in funzione di allerta nelle aree in cui si sono individuate le potenziali anomalie nel sottosuolo con le recenti indagini geofisiche. Nel caso in oggetto, l'ipotesi del monitoraggio in continuo è la sola risorsa che possa consentire la predisposizione di piani di sicurezza a tutela dell'incolumità pubblica nei confronti del ripetersi di un evento simile. Per questo è stato predisposto un progetto integrato che prevede il controllo degli elementi che caratterizzano l'evolvere di un sinkhole ed in particolare i precursori del fenomeno. I più manifesti tra i vari precursori appaiono le micro-deformazioni del **suolo**, per cui il sistema integrato inizierà, a breve, con l'installazione di una serie punti di controllo fisso con GPS per il controllo in continuo delle micro-deformazioni morfologiche di punti significativi. Posizionamento di un interferometro SAR (radar ad apertura sintetica) mobile, a lettura continua e produzione di informazioni in tempo reale immediatamente utilizzabili per l'interpretazione del fenomeno (sistema LiSA<sup>®</sup>). Il sistema verrà implementato con il controllo del **sottosuolo** attraverso l'osservazione di 3 centraline di rilevazione di segnali sismici per individuare la zona di origine dell'eventuale fonte di "rumore" (attive); l'installazione di rilevatori di deformazioni profonde con sensori inclinometrici a diverse profondità; la realizzazione di una stazione di monitoraggio per la misura in continuo delle concentrazioni di alcune specie gassose di origine endogena significative per lo studio del fenomeno; l'esecuzione di misure gravimetriche effettuate periodicamente su una serie di punti significativi, e rilevamento di micro-anomalie attraverso la lettura multipla dei capisaldi prescelti.

Il completamento del monitoraggio si attuerà con il controllo delle **acque sotterranee** attraverso la installazione di piezometri nelle diverse falde in cui saranno posizionati trasduttori di pressione per il monitoraggio in continuo delle variazioni del livello di falda e sonde multi-parametriche per l'analisi di parametri chimico-fisici significativi delle acque.