

## Comune di Grosseto

Università degli studi di Roma "La Sapienza"

Dipartimento di Pianificazione Territoriale e Urbanistica - D.P.T.U.

Direttore Stefano Garano

# Studio finalizzato alla elaborazione del Piano Strutturale

Art. 24 L.r. n.5 del 16.01.1995

### Gruppo di lavoro del D.P.T.U.

*Responsabile scientifico:* **Paolo Scattoni**

*Analisi dei processi di decisione:* **Paolo Scattoni**, con **M. Flavio Morini**

*Analisi urbanistiche:* **Roberta Strappini**, con **Laura Forgione**, **Marco Putano**

*Analisi dei vincoli:* **Maria Migliorini** con **Luigi Riccitiello**

*Coordinamento delle analisi dei valori territoriali, dell'uso del suolo, del sistema insediativo:* **Massimo Olivieri**

*Ambiente, paesaggio, usi del suolo:* **Massimo Olivieri**, con **Elena Andreoni**, **Claudia Iuliano**, **Barbara Pizzo**

*Permanenze storico-culturali:* **Lucio Carbonara**, con **Barbara Pizzo**

*Sistema insediativo e della viabilità:* **Carlo Nuti**, con **Elena Andreoni**, **Francesco Fazio**, **Francesca S. Sartorio**

*Analisi idro-geomorfologica:* **Carlo Alberto Garzonio**

*Analisi dei demani e usi civici:* **Gabriele Ciampi**

*Analisi dei percorsi storici, analisi delle zone umide:* **Paolo Marcaccini**

*Analisi socio-economiche:* **Maurizio Garano**, **Manuela Ricci**, con **Paola Silvestri**

*Elaborazioni cartografiche informatizzate:* **Michele De Silva**, **Ilaria D'Urso**, **Gigliola Gigli**, **Salvatore Morelli**

*Consulenza cartografica informatica:* **Cesare Salvestroni**

*Collegamento con il Comune di Grosseto:* **M. Flavio Morini**

### Per il Comune di Grosseto

**Marco De Bianchi**, Direttore Direzione Gestione del Territorio, Responsabile del progetto

**Mauro Martellini**, Funzionario Ufficio Pianificazione Urbanistica

**Mario Nencioni**, Ufficio Pianificazione Urbanistica

**Carlo Marcoaldi**, **Silvia Tedeschi**: Elaborazioni cartografiche informatizzate

**Elisabetta Frati**, Garante per l'informazione



Comune di Grosseto

TAVOLA

G1

**RELAZIONE - Studio fenomeno di  
subsidenza in loc. Bottegone  
redatto da Geoprogetti con la  
consulenza del Politecnico di  
Torino**

Settembre 2002



## Comune di GROSSETO

### STUDIO DI UN FENOMENO DI SUBSIDENZA ORIGINATO DA UN COLLASSO GRAVITATIVO PROFONDO - Loc. Bottegone

*Grosseto 11.12.2001*

**Tecnico incaricato:** Dott. Franco Pioli – studio Geoprogetti (Grosseto)

**Collaborazione prof.le:** Dott. Mario Corsi – studio Geoprogetti (Grosseto)

**Dott. Filippo Barsuglia – studio Geoprogetti (Grosseto)**

**Organizzazione dati e software:** Geoprogetti Informatica s.r.l. (Grosseto)

**Impostazione monitoraggio:** Geoprogetti Informatica s.r.l. e Leonardo engineering s.r.l. (Pisa)

**Sondaggi geofisici TDEM:** Dep. Geophysique – Parigi

**Sondaggi geofisici Magnetotellurici:** Università di Padova

**Sondaggi gravimetrici e geochimica dei gas:** Università La Sapienza di Roma

**Sondaggi elettrici:** Dott. Stefano Rizzo

**Sondaggi sismici a rifrazione e riflessione:** Dott. Marco Sozzi

**PARTECIPAZIONE AL PROGETTO CON CONTRATTO DI RICERCA PER INTERPRETAZIONE  
DATI GEOFISICI E SVILUPPO MODELLO GEOTECNICO**



## POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI GEORISORSE E TERRITORIO

**Interpretazione dati:** Prof. Otello Del Greco

**Interpretazione dati:** Prof. Mauro Fornaro

**Modellistica:** Ing. Claudio Oggeri

**Laboratorio:** Ing. Elena Garbarino

**Coordinamento e supervisione studio:** Arch. Marco De Bianchi – Dirigente Uff. Urbanistica

## **STUDIO DI UN FENOMENO DI SUBSIDENZA ORIGINATO DA UN COLLASSO GRAVITATIVO PROFONDO**

### **1. Introduzione**

La ricerca svolta concerne un fenomeno di sprofondamento avvenuto nel gennaio 1999 ad una distanza di circa 10 km a Nord di Grosseto. Si è trattato di un collasso repentino manifestatosi nell'arco di 22 ore, durante il quale si è originata una voragine di forma pseudocircolare, caratterizzata da un diametro di 140 m e da sponde scoscese e verticali, che nel tempo ha assunto una forma ellissoidica, con asse maggiore di 188 m in direzione NNE-SSO e con asse minore di 150 m nella direzione perpendicolare.



*Fig.1: Veduta aerea della voragine nella fase iniziale*

La conformazione raggiunta a due anni di distanza dalla manifestazione iniziale dell'evento osserva, pertanto, un allargamento perimetrale nelle porzioni orientali della voragine, conseguente a successivi fenomeni di richiamo, che hanno comportato una minore acclività ed un terrazzamento delle sponde. In conseguenza a tale configurazione, gli approfondimenti risultano maggiori nelle porzioni meridionali ed occidentali e di entità pari a 15 m.

Si può affermare che all'origine dell'evento non si possa collegare un periodo di intense precipitazioni tali da originare un aumento del flusso sotterraneo delle acque, e neppure sono presenti nella zona di interesse pozzi di emungimento capaci di innescare fenomeni di subsidenza conseguenti al sovrasfruttamento delle risorse idriche.



E' apparso quindi verosimile supporre che lo sprofondamento indagato abbia un'origine naturale e profonda e sia stato generato dal collasso di una cavità sotterranea presente nel substrato calcareo che caratterizza la geologia della regione. Si ritengono quindi del tutto inesistenti interferenze con pozzi irrigui distribuiti più o meno regolarmente nella pianura circostante, a causa della diversa profondità di pescaggio e della altrettanto diversa falda di alimentazione.

La frequenza di questo genere di fenomeni sul territorio della nostra regione (vedi evento di Camaione verificatosi nel 1995) suggerisce la necessità di dover effettuare studi accurati (almeno nelle zone interessate da tali eventi) degli stessi al fine di poter riconoscere e delimitare, anche in altre aree adiacenti, livelli di pericolosità per la costruzione di una vera e propria scala di rischio potenziale. All'indomani del Decreto "Sarno" infatti, in tutto il paese, ed in particolare nella Regione Toscana, sono state censite e delimitate tutte le aree soggette a rischio geomorfologico, geologico ed idraulico definendo per ognuna di esse il grado di pericolosità ed assegnando il relativo grado di rischio alle infrastrutture più importanti (edifici, strade, ferrovie etc.) che vi ricadono all'interno. A tale scopo ci preme precisare che il presente studio deve essere considerato come la base di partenza per aggiornare questo tipo di cartografia relativamente al rischio di "subsidenza" per crollo della volta della cavità generata da fenomeni carsici e/o di erosione inversa derivata dalle acque circolanti in pressione (nella fattispecie termali), quindi un rischio di natura geologica, per un territorio molto più vasto di quello attualmente in studio.



*Fig.2: Veduta di insieme della voragine dopo circa un anno dall'evento*

Lo studio svolto si è posto pertanto l'obiettivo di analizzare la tipologia dell'evento, le sue cause scatenanti e, conseguentemente, la pianificazione delle indagini conoscitive e delle campagne di misure da svolgere nell'intorno del bacino di sprofondamento.

Si è trattato quindi di affrontare lo studio di un fenomeno geologico singolare e di impressionante entità mediante un'ottica ingegneristica che, attraverso un'indagine approfondita degli elementi interagenti e delle possibili cause scatenanti, conduca al delineamento della configurazione strutturale e della dinamica progressiva dell'evento.



Tenendo conto dei risultati di un sondaggio geognostico eseguito in prossimità della voragine, che a 170 m di profondità non ha incontrato il substrato calcareo, ma semplicemente terreni limoso-argillosi, gli scopi della ricerca sono riassumibili come segue:

- ✓ l'obiettivo primario è rappresentato dall'individuazione della profondità del substrato calcareo sottostante la voragine: l'entità della cavità sotterranea risulta infatti essere una funzione dell'aumento dell'approfondimento del vuoto, che deve assumere dimensioni maggiori affinché il fenomeno di collasso possa estendersi fino in superficie;
- ✓ la definizione dell'assetto tettonico della regione analizzata ha assunto sempre più un ruolo determinante durante lo svolgimento dell'indagine sulla voragine. In particolare è sorta la necessità del posizionamento dei possibili sistemi di faglie interessanti il substrato calcareo, vie preferenziali per il flusso di acqua termale ed elementi di instabilità strutturale;
- ✓ il risultato finale perseguito è la costituzione dei modelli interpretativi capaci di valutare le possibili dimensioni della cavità sotterranea;
- ✓ l'obiettivo ultimo si è rivolto all'estensione dell'indagine in un'ottica di pianificazione territoriale che, dopo l'inquadramento preciso dell'assetto strutturale dell'area e della possibile presenza di cavità capaci di originare, indipendentemente dall'analisi dei tempi di azione (pressochè impossibile ad attuarsi senza prolungati studi di monitoraggio) altri fenomeni di sprofondamento, stabilisca le possibili aree di rischio per l'assegnazione delle classi di uso del territorio inseribili nel contesto delle nuove cartografie di rischio, secondo le previsioni del decreto "Sarno" e dello stesso piano regolatore generale comunale. E' inteso che, in ogni caso, sia per l'importanza dell'argomento sia per i risultati ottenuti, le indagini dovranno essere estese a tutta la pianura che va da Grosseto a Castiglione della Pescaia.

## **2. Inquadramento geomorfologico geologico ed idrogeologico**

Il primo approccio nello studio di una fenomenologia di collasso gravitazionale profondo è la descrizione dei lineamenti geomorfologici, geologici, idrogeologici e strutturali di un'ampia regione contornante il punto di interesse, dove, in un intorno di circa 10 km<sup>2</sup> perimetralmente alla voragine, sono state approfondite le indagini geofisiche indirette.

La voragine in oggetto è situata nella parte settentrionale della piana di Grosseto, un'area ad andamento sub-orizzontale, le cui quote variano dai 3 ai 5 m s.l.m., interessata da una fitta rete di canali, appositamente realizzati per il drenaggio delle acque superficiali dei terreni coltivati. Le alture più vicine sono poste a circa 1,5 km ad est, si tratta delle estreme propaggini meridionali di una dorsale collinare culminante nell'abitato di Montepescali.



Tale fenomeno è stato, da un punto di vista geomorfologico, definito come una dolina di sprofondamento o “sinkholes”, una forma caratteristica delle aree carsiche, e quindi legata ai processi di dissoluzione chimica del carbonato di calcio costituente le rocce calcaree da parte delle acque di origine esogena ricche di anidride carbonica e particolarmente aggressive nei confronti del carbonato.

Come confermato dal Prof. Barry F. Beck, un'autorità mondiale nello studio di questo genere di fenomeni, la dolina di sprofondamento si sarebbe generata col collasso di una cavità carsica posta in profondità al contatto fra il substrato calcareo ed i terreni sovrastanti non diagenizzati.

L'area interessata dalla voragine è costituita da depositi quaternari di origine alluvionale e palustre: si tratta di sedimenti sciolti o poco cementati appartenenti a classi granulometriche variabili sia in senso orizzontale che verticale.

In particolare affiorano sul posto terreni caratterizzati da sedimenti sabbioso-limosi-argillosi ottenuti per colmate o messi in luce da opere di drenaggio durante i processi di bonifica, con prevalenza delle granulometrie più fini, con intercalazioni di livelli torbosi, indice di un ambiente paludoso riducente.

Non lontano dal sito in questione affiorano in superficie depositi di ambiente alluvionale costituiti da classi granulometriche più grossolane, in prevalenza ghiaie e ciottoli immersi in matrice sabbioso-argillosa.

Il substrato roccioso di questi sedimenti recenti affiora più ad est, nelle colline a sud di Montepescali, ed è costituito dalla formazione del Calcere cavernoso e dalle formazioni del gruppo del Verrucano; ma è presente anche più a sud nel piccolo e isolato affioramento di Poggetti Vecchi costituito da affioramenti calcarei probabilmente cavernosi. In generale si tratta di formazioni di età triassica o pre-triassica di ambiente continentale o marino di transizione.

La struttura delle formazioni che costituiscono il substrato roccioso dell'area di pianura è stata determinata dalle fasi tettoniche compressive che hanno generato i rilievi appenninici e dalla susseguente fase distensiva che ha dato origine ad un sistema di faglie normali ad alto angolo determinanti aree di alto morfologico (horst) alternate ad aree di basso (graben), nelle seconde delle quali ha avuto luogo un'intensa attività deposizionale sia marina che continentale.

La disposizione prevalente di questi sistemi di faglie, e conseguentemente delle depressioni e degli alti morfologici da esse delimitati, è lungo la direzione "appenninica" cioè NW-SE e NNW-SSE ed in misura minore nella direzione anti-appenninica, cioè ortogonale alla precedente, e meridiana, Nord-Sud. Generalmente il rigetto di tali dislocazioni tettoniche si realizza in strutture complesse quali “gradinate di faglia”, cioè da fasci di faglie con decorso breve e rapide variazioni di rigetto.



Da un punto di vista della circolazione delle acque sotterranee, i sedimenti fluviali e palustri affioranti nell'area presa in studio mostrano una permeabilità, dovuta alla porosità primaria, molto variabile sia in senso verticale che orizzontale e dipendente sostanzialmente dalla composizione granulometrica del sedimento.

In generale i depositi di bonifica mostrano in superficie una permeabilità scarsa, in profondità però la presenza di lenti e livelli di sedimento più grossolano (sabbie e ghiaie) determina una migliore conducibilità idraulica e permette la presenza di falde d'acqua confinate, talvolta anche di una certa entità tanto da essere sfruttate per uso irriguo.

Dalle stratigrafie dei pozzi presenti nell'area risulta che tali livelli acquiferi sono posti a profondità comprese fra i 15 ed i 50 metri dal piano di campagna, generalmente in corrispondenza di livelli ghiaiosi o di sabbie grossolane.

Per quel che riguarda le formazioni che costituiscono il substrato roccioso profondo, in particolare facendo riferimento a quelle di natura carbonatica come il Calcare cavernoso, sebbene siano dotate di porosità primaria praticamente assente, mostrano una elevata porosità secondaria dovuta allo stato di fratturazione ed ai fenomeni di dissoluzione chimica dei carbonati (carsismo) che conferisce una notevole permeabilità alla roccia.

Sono presenti nelle vicinanze dell'area del sito in cui si è verificato il fenomeno in oggetto di studio alcune sorgenti termali ubicate al contatto fra le formazioni carbonatiche con i terreni impermeabili più recenti. Fra queste le principali sono la sorgente denominata Le Caldanelle a Nord-Est e quella di Poggetti Vecchi posta più a sud, molto probabilmente entrambe sono ubicate in corrispondenza di importanti lineazioni tettoniche sepolte; un po' più distante è la sorgente del Bagno di Roselle posta a SW.

E' molto probabile che un flusso sotterraneo di acqua termale appartenente all'acquifero profondo del substrato carbonatico metta in collegamento le tre sorgenti termali e abbia assoggettato le rocce ad un processo di idratazione e dissoluzione, forse all'origine del fenomeno di sprofondamento, e notevolmente accresciuto dal termalismo delle acque

Ciò sarebbe confermato anche da una serie di fenomeni minori collegabili con il collasso della voragine. La sorgente di Caldanelle ha spurgato acqua fangosa per qualche giorno, mentre nella sorgente di Poggetti Vecchi si è osservata una risalita del livello piezometrico di qualche metro con aumento di portata e con acque limpide (lungo la faglia esistente si sono riscontrati dei piccoli comuli di fango come se si trattasse del "filtrato" lungo la risalita verso la sorgente): le diverse emergenze danno infatti luogo ad un laghetto, nel quale si è evidenziata la crescita della portata d'acqua pulita a differenza della sorgente "Caldanelle".



Quest'ultima ha subito ugualmente un incremento della portata, a testimonianza di un "collegamento" diretto con la cavità sotterranea satura; si può pertanto ipotizzare che il flusso sotterraneo di acqua appartenente all'acquifero profondo carsico interessi tutta la regione analizzata, colleghi le tre sorgenti termali con una direzione prevalente dalle aree settentrionali a quelle meridionali e sia una delle cause della dinamica del collasso.

Un altro fenomeno che si collega con l'evento è la risalita di acqua nei campi limitrofi alle sorgenti, dovuta dalla pressione raggiunta in profondità a causa del collasso e originante un "effetto stantuffo" nei canali di deflusso sotterraneo con lo sfogo delle sorgenti e nei ristagni superficiali. In particolare è significativa la formazione di vulcanetti di fango nei campi prossimi alla sorgente di Poggetti Vecchi allineati in direzione della voragine e idealmente posizionati sopra i canali di flusso.

La zona di ricarica dell'acquifero profondo è ritenuta a distanze elevate dall'area in esame, ciò per osservazioni di ordine geologico oltre che dalla considerazione del non immediato aumento del pelo libero dell'acqua della voragine a seguito dei periodi di intense precipitazioni. Tale aumento risulta posticipato di circa due mesi, indice dell'influenza delle condizioni idrogeologiche profonde e non solo delle acque superficiali.

Infine si ricorda che durante lo sprofondamento si è verificata una risalita sul fondo della voragine di acqua profonda, in quanto i dreni agricoli risultavano asciutti e non vi era la presenza di acqua superficiale o di una falda freatica.

In conclusione si può affermare con una certa sicurezza che l'acquifero superficiale oltre a non avere caratteristiche di continuità in quanto sospeso e frammentato in una molteplicità di situazioni locali, essendo i terreni principalmente impermeabili, non è messo in comunicazione con l'acquifero profondo.

Particolare attenzione deve essere dedicata all'acquifero profondo interessante il substrato calcareo, specialmente per il posizionamento della sua area di ricarica e per la sua predisposizione ad essere interessato da fenomeni carsici. Tali fenomeni sono rilevabili anche alle pendici delle colline calcaree e possono essere stati originati da un aumento dell'aggressività delle acque per la variazione dell'assetto idrogeologico anche a seguito della chiusura di alcune attività minerarie.

### **3. Descrizione dell'evento**

Durante l'indagine è stata focalizzata l'attenzione sui singoli fenomeni concomitanti: è stato evidenziato il comportamento alquanto rigido dei terreni di copertura durante lo sprofondamento tanto che si sono manifestati movimenti di traslazione pressoché verticale. Questo potrebbe indicare



che le linee di scorrimento preferenziale del cilindro terrigeno coincidono con i piani di faglia o sono molto prossime a questi, altrimenti sarebbe stato pressochè impossibile avere una traslazione quasi parallela del fondo della voragine, come evidenziano le foto riprese subito dopo l'evento. Inoltre sono state osservate all'interno del bacino di sprofondamento aree a profondità e meccanismo evolutivo differente: a partire dalla zona circolare iniziale è seguita nel tempo un'estensione areale in direzione NE causata da successivi fenomeni di richiamo che hanno portato ad ipotizzare dimensioni maggiori del vuoto sotterraneo in corrispondenza della zona iniziale della voragine.

#### **4. Indagini geofisiche**

Sono state eseguite, nell'arco di più di un anno di studi, una serie di analisi di campagna utilizzando metodi geofisici. Si sono innanzitutto optate due differenti metodologie di indagine, la prima concentrata in un ristretto intorno della voragine con l'esecuzione di indagini conoscitive per la determinazione della dinamica dell'evento; il secondo invece, di scala più grande, volto all'inquadramento del fenomeno all'interno dell'assetto geologico e strutturale della regione analizzata, ciò in quanto lo stesso non può essere studiato in modo disgiunto dai fattori geologici ed idrogeologici che l'hanno generato.

Gli obiettivi delle analisi effettuate sono stati in pratica:

- la ricerca dell'andamento del substrato calcareo sottostante la voragine e dell'eventuale presenza di cavità sotteranee;
- lo studio dell'assetto geologico e tettonico della regione analizzata, con il posizionamento degli eventuali sistemi di faglie interessanti il basamento anche ad elevata profondità e, pertanto, non facilmente individuabili a causa dello spessore della copertura alluvionale;
- l'estensione dell'indagine in un'ottica di pianificazione territoriale volta a stabilire le possibili aree di rischio soprastanti eventuali cavità carsiche capaci di originare simili sprofondamenti superficiali.

Nell'ambito dello studio della voragine del Bottegone sono state realizzate alcune campagne di misure geofisiche, quali:

Campagna di misure con elettromagnetismo

Campagna di misure magnetotelluriche

Campagna di misure geoelettriche e tomografiche

Campagna di misure gravimetriche

Campagna di misure di sismica



qui di seguito analizzate nel dettaglio

### Indagine con Elettromagnetismo “TDEM”

E' stata la prima campagna di misure eseguite nello studio dello sprofondamento gravitativo, in una situazione di incertezza rispetto alle condizioni strutturali e geologiche dell'area; si è svolta nel periodo agosto-settembre 2000 ed ha coinvolto il Departement de Géophysique Appliquée dell'Université Pierre e Marie Curie (Paris VI) attraverso il Dott. F. Barsuglia all'epoca dottorando presso tale istituto.

Il TDEM (Time Domain Electro Magnetism) è una tecnica elettromagnetica a sorgente controllata nel dominio del tempo, tramite la quale si può determinare la presenza di strati conduttivi nel sottosuolo. E' stata utilizzata per la sua capacità di raggiungere grandi profondità di penetrazione senza richiedere distanze elevate tra trasmettitore e ricevitore; inoltre è un metodo capace di rilevare anomalie a bassa resistività ed è rapido e veloce su terreni non vegetati. Il limite di questa tecnica consiste nella sua sensibilità agli strati conduttivi e, pertanto, nella campagna svolta le misure hanno avuto una bassa risoluzione a causa dello spessore elevato di terreni argillosi.

Le indagini si sono concentrate in tre particolari aree:

- nei pressi della voragine, con una direzione principale delle misure NE-SW;
- nei pressi della sorgente termale delle Caldanelle e della vicina ferrovia;
- in località Poggetti Vecchi nei pressi dell'omonima sorgente.

Le misure nei pressi delle due sorgenti termali sono state eseguite per la presenza in quelle località di calcare subaffiorante, pertanto il loro scopo è stato innanzitutto di evidenziare la presenza di eventuali discontinuità, che potessero avvalorare le ipotesi sulla generazione di un sistema articolato di faglie, e, in secondo luogo, quello di testare le probabili resistività del calcare, sottolineando il fatto che nei pressi della sorgente delle Caldanelle il Calcare cavernoso si mostra molto alterato, friabile e di colore rossastro, con struttura brecciforme, mentre a Poggetti Vecchi si presenta in aspetto più massiccio, cristallino, di colore grigio chiaro.

Sfortunatamente non tutti i dati ottenuti sono risultati soddisfacenti, a causa della cattiva risoluzione derivante dallo spessore delle argille limose, che ha diminuito la profondità di investigazione: ciò è evidente soprattutto per i sondaggi in prossimità della voragine dove il tetto del substrato calcareo raggiunge la massima profondità e, pertanto, la copertura alluvionale acquista una notevole potenza; diversamente i sondaggi vicini alle sorgenti termali hanno fornito attendibilmente l'andamento del substrato in quanto in tali zone quest'ultimo si presenta affiorante.



### Indagine Magnetotellurica

Campagna di misure svoltasi nel periodo novembre-dicembre 2000 ed eseguita in collaborazione con il Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica dell'Università di Padova, la cui strumentazione è stata utilizzata sotto il coordinamento della Dott.ssa A.Zaja.

Tale tecnica consente di determinare la distribuzione della conducibilità elettrica nel sottosuolo grazie alle misure delle variazioni temporali dei campi elettrici e magnetici all'interno della Terra. Il metodo magnetotellurico possiede un elevato potere di penetrazione e permette di raggiungere strati resistivi a grande profondità, fornendo i risultati attraverso modelli interpretativi semplificati. Il suo limite è rappresentato dall'influenza dei rumori antropici, dovuti alla presenza delle ferrovie e linee elettriche, e dei rumori elettromagnetici naturali.

In particolare sono stati eseguiti 7 sondaggi magnetotellurici ad alta frequenza al fine di determinare un substrato resistivo sottostante la copertura alluvionale caratterizzata da valori di resistività elettrica molto bassi e pertanto altamente conduttiva.

I dati ricavati hanno evidenziato la presenza di un substrato profondo che si inclina gradualmente da est verso la voragine, dove raggiunge profondità superiori ai 200 m; improvvisi incrementi della profondità del substrato, fanno supporre la presenza di faglie ad elevato rigetto con il probabile e naturale orientamento appenninico.

### Indagine geoelettrica e tomografica

Questo tipo di indagini è stato eseguita nel periodo febbraio-marzo 2001 dal Dott. S. Rizzo con la collaborazione dell'Università La Sapienza di Roma, nell'area compresa tra la Fattoria Acquisti e la Fattoria Poggetti vecchi. Gli obiettivi di tale campagna sono stati quello di seguire il tetto del Calcere cavernoso sottostante la copertura alluvionale e di individuare le principali linee strutturali presenti nell'area analizzata, nonché quello di poter rappresentare la geometria della dolina di sprofondamento e di verificare l'esistenza di condizioni di rischio.

In particolare sono stati eseguiti complessivamente 31 Sondaggi Elettrici di cui 27 nella configurazione multipolare (SEM) e 4 con il metodo Schlumberger (SEV); gli stendimenti hanno avuto lunghezze diverse variabili fra 800 e 2500 – 3000 m.

Con i dati emersi da questa indagine è stato possibile realizzare una carta della profondità del substrato resistente che fornisce l'immagine dell'andamento del tetto del substrato costituito generalmente da calcari di cui però non è possibile indicare a quale formazione appartengano.



La carta è caratterizzata dalla presenza di quattro aree separate da linee di discontinuità elettrica, riferibili a probabili faglie:

- quella dei Poggetti Vecchi, che sembrerebbe essere il punto più alto di una anticlinale con direzione antiappenninica;
- l'area adiacente a Poggio Calvella, larga oltre 1 km, in cui compare un alto relativo; da notare che il substrato si immerge rapidamente ai piedi di Poggio Calvella, per poi rialzarsi nell'alto di cui sopra. L'andamento delle curve è concavo verso la piana;
- ad Ovest della linea di discontinuità il substrato si immerge rapidamente verso Ovest con un gradiente superiore al 25%. L'andamento delle curve è convesso in direzione del centro della pianura;
- infine in corrispondenza dei sondaggi eseguiti nell'area più centrale della piana, ad Ovest della voragine, il substrato si trova ad una profondità superiore ai di 500 m e non è stato quindi rappresentato dai risultati dei sondaggi elettrici.

Da notare che la voragine si è formata al centro di un'area fortemente disarticolata da probabili faglie. E' probabile infatti che il forte gradiente con cui si immerge il substrato in questa area traduca la presenza di una serie di faglie con direzione Nord-Sud così come evidenziato d'altronde dalla carta della distribuzione del campo elettrico.

Nel punto del "sinkhole" il substrato sarebbe posto ad una profondità di circa 250 m.

Il tutto è stato reso meglio leggibile con una serie di sezioni geoelettriche interpretative.

Parallelamente a questa serie di indagini è stata eseguita una campagna di misure tomografiche: è una tecnica di misura della resistività attraverso lo stendimento di un numero di elettrodi, che fornisce sezioni reali di resistività; è un metodo capace di evidenziare le anomalie ed ha buona risoluzione nei primi metri di profondità.

Nei pressi della voragine sono stati realizzati due profili di tomografia elettrica allo scopo di studiare in dettaglio il fenomeno; i due profili sono stati eseguiti a ridosso del sinkhole, il primo a Nord, il secondo a Sud, con direzione Est-Ovest. Ugualmente altri due profili di tomografia elettrica sono stati eseguiti poche centinaia di metri a N della sorgente di Poggetti Vecchi, disposti parallelamente fra loro con andamento ENE-WSW.

I risultati ottenuti dalle indagini tomografiche sono illustrati da una serie di carte di resistività e dalle sezioni interpretative.

Dai primi due profili si possono fra l'altro trarre le seguenti conclusioni:

- il camino di collasso che ha provocato il "sinkhole" è posto al margine occidentale della voragine e dovrebbe avere un diametro medio di circa 100 m;



- l'origine del dissesto è da ricercare in profondità, molto probabilmente nei calcari sottostanti.

### Indagine gravimetrica

La prospezione gravimetrica è stata condotta, nell'aprile 2001, dai Prof. B. Toro e M. Di Filippo, dell'Università La Sapienza di Roma.

In particolare sono state realizzate 116 stazioni gravimetriche su una superficie di circa  $5 \text{ km}^2$  e 15 stazioni lungo un profilo perpendicolare ai Poggetti vecchi.

Dalla rilevazione dei dati gravimetrici sono state realizzate carte delle anomalie gravimetriche di Bouguer e, sottraendovi le anomalie ottenute dal Campo Regionale di I° ordine, si è ottenuto quello delle Anomalie residue che è più facilmente correlabile con la geologia locale

E' stata inoltre realizzata una carta, a curve di livello, dell'andamento del tetto del substrato roccioso (non viene specificato per questo da quale litologia sia costituito in quanto formazioni rocciose di diverso tipo affioranti nelle vicinanze presentano una densità del tutto simile e comunque molto maggiore dei terreni alluvionali che li ricoprono). Da notare che ad Ovest della linea che unisce le zone di alto relativo il substrato roccioso si immerge rapidamente, soprattutto nell'area della voragine, passando da  $-180$  a  $-280$  m in poco più di 500 m.

Un profilo eseguito ai Poggetti Vecchi mostra che il substrato roccioso che affiora in corrispondenza del colle, si immerge lentamente verso Est e più rapidamente verso Ovest.

### Indagine sismica

Ultima nella serie delle indagini effettuate nell'area è la campagna di misure eseguita nel periodo ottobre-novembre 2001 da parte del Dott. Sozzi. Questa è consistita nella realizzazione di una serie di 3 profili sismici sia a riflessione e 5 a rifrazione riguardanti l'area della voragine per un intorno di circa 300 m da questa.

Gli obiettivi della prospezione sono stati quello di fornire importanti informazioni del sottosuolo, caratterizzazione dei vari orizzonti stratigrafici, identificazione della profondità del substrato roccioso e suo andamento, presenza di strutture tettoniche lungo determinate direzioni; ma uno degli scopi più importanti di questo tipo di analisi è la correlazione, a fine di tutte le altre campagne di indagini geofisiche, dei dati emersi dalle altre prospezioni. Infatti la sismica, sebbene richieda i maggiori investimenti economici, è quella che da risultati più attendibili e meglio leggibili in quanto riduce il grado di incertezza nelle misure, quindi i suoi risultati possono confermare i risultati



ottenuti dalle altre indagini che, in quanto più economiche e di più rapida attuazione, hanno interessato aree del territorio più vaste, dando più attendibilità anche a quanto riscontrato al di fuori della ristretta area di sovrapposizione fra sismica ed altre prospezioni.

Per la sismica a riflessione è stata impiegata la tecnica dell' "optimum offset", che mostra una buona risposta nelle situazioni con morfologia pianeggiante dove la tavola d'acqua risulta vicina alla superficie topografica. La profondità massima di investigazione è risultata fra i 300 ed i 400 m.

Per quel che riguarda la sismica a rifrazione, i profili effettuati con questo metodo hanno avuto lo scopo di:

- integrare i risultati della riflessione a piccola e media profondità;
- fornire tarature delle velocità dell'orizzonte aerato e dei sottostanti orizzonti in falda;
- individuare e delineare la topografia del piano di falda freatica.

La profondità massima di investigazione è risultata all'incirca 100 m.

Dall'interpretazione dei profili sismici a riflessione sono stati rilevati quasi tutti gli orizzonti messi in evidenza dalla perforazione, è stato individuato e delineato l'andamento del substrato mesozoico e ciò in con una evidente grado di correlazione da quanto evidenziato con i sondaggi geoelettrici. Inoltre è stata messa in evidenza in maniera netta una faglia che disloca nettamente il settore orientale da quello occidentale, in posizione quasi coincidente con la lineazione tettonica ipotizzata con i dati geoelettrici.

I profili sismici a rifrazione hanno invece definito la presenza di un livello in cui è presente la falda superficiale. Da questi, come dalle altre indagini, si evince chiaramente che non ci sono interferenze tra la falda superficiale e quella profonda e i pozzi esistenti ad uso irriguo non rappresentano alcun problema sulla situazione statica locale.

Ciò che più colpisce dei risultati ottenuti dall'indagine sismica, soprattutto per ciò che a che fare con i profili a riflessione, è il grado di similitudine che c'è con le conoscenze che sono emerse da altre metodologie di indagine geofisica, prima fra tutte la geoelettrica. Ciò fa ben sperare per un eventuale ampliamento dell'area di indagine con l'utilizzo di quest'ultima metodologia.

Attraverso l'esecuzione di queste campagne di misure è stato evidenziato l'approfondimento del basamento calcareo verso le porzioni occidentali e settentrionali dell'area in esame; inoltre grazie ai risultati di sondaggi eseguiti in prossimità del cascinale a SO dalla voragine, in cui si ipotizzava la risalita del basamento a 40 m di profondità, è stata evidenziata la sola presenza di terreni a maggiore compattazione ed è pertanto decaduta l'ipotesi di una struttura a graben interessante l'area in studio. La profondità del basamento sottostante la voragine si attesta plausibilmente intorno ai 250 m.

L'assetto strutturale proposto a conclusione delle tre campagne di misure appare complesso a causa della presenza di vari fenomeni dislocativi originanti zone a caratteristiche differenti, più profonde e disomogenee nelle porzioni centrali:

- ✓ la faglia principale ha direzione appenninica e si raccorda a Nord con la faglia del Torrente Rigo e a Sud con gli affioramenti di Roselle, leggermente distanziati dall'area in esame;
- ✓ è presente un sistema di faglie parallele di direzione NNO-SSE che interessa l'area della voragine ed approfondisce il basamento verso la costa tirrenica;
- ✓ una faglia minore di direzione appenninica è posta ai margini della pianura presso la sorgente termale delle Caldanelle nei pressi delle alture di Montepescali;
- ✓ una faglia di direzione ONO-ESE delinea l'affioramento di Poggetti Vecchi.



*Fig. 2: Ipotesi geologico-strutturale ottenuta mediante le campagne di misure geofisiche*

Di grande importanza è risultata infine l'individuazione attraverso un profilo tomografico di un'anomalia circolare sottostante la voragine, corrispondente al camino di collasso.

## **5. Indagini geochimiche ed idrogeochimiche**

Sono stati analizzati i dati emersi dalle analisi geochimiche delle sorgenti presenti nelle vicinanze della voragine del Bottegone e di altre sorgenti poste nella porzione settentrionale della provincia di Grosseto. Tali analisi sono state ricavate da dati presenti in bibliografia.

Le principali considerazioni che sono emerse dall'analisi di questi dati sono:

- le acque delle sorgenti più prossime all'area in studio (Roselle, Caldanelle e Poggetti Vecchi) appartengono allo stesso sistema acquifero; quest'ultimo ha interagito con il fenomeno di



spfondamento della voragine ed ha generato i fenomeni carsici in profondità, presumibile causa del fenomeno. Inoltre la zona di ricarica dell'acquifero profondo deve essere situata ad una distanza elevata dalla regione analizzata;

- la composizione solfato calcica delle tre sorgenti è legata alla presenza del Calcarea cavernoso: è la presenza di gesso che caratterizza la facies chimica e fa ipotizzare un fenomeno di dilavamento spinto e di innesco di grandi fenomeni carsici causati dal flusso di acque sotterranee;
- l'aggressività delle acque viene aumentata dal suo termalismo e ipoteticamente anche dalla variazione dell'ambiente originario, causata dalla chiusura di miniere nelle zone limitrofe (come quella di Gavorrano) in modo che i fenomeni di dissoluzione carsici abbiano subito un'accelerazione;
- altre sorgenti poste più distanti dall'area, come quelle di Massa Marittima e di Monticiano hanno caratteristiche chimiche molto simili e spesso interessano acquiferi con le stesse caratteristiche geologiche, anche se la distanza è troppo elevata per asserire che si tratti dello stesso acquifero.

### Indagini geochimiche dei gas

E' consistita in una campagna di campionamento e analisi dei gas per un totale di 109 punti di campionamento nel suolo, condotta dalla Dott.ssa N. Voltattorni nel Maggio 2001. Il ritardo nell'inizio della campagna è dovuto alla persistenza delle precipitazioni nel periodo precedente che ha impedito il campionamento dei gas nel suolo; i prelievi di gas infatti non possono avvenire in suoli argillosi saturi fondamentalmente per due motivi:

- il primo, pratico, perché le argille bagnate occludono i fori di ingresso alla sonda campionatrice;
- il secondo, teorico, perché i gas sono solubili in modo diverso in acqua e la prossimità delle precipitazioni avrebbe falsato la distribuzione percentuale dei gas campionati.

I gas presi in considerazione sono stati il Radon, l'Elio, il Metano, l'Anidride carbonica ed i composti volatili dello zolfo; questi sono stati campionati dal suolo in punti a distanza regolare intorno al perimetro esterno della voragine e seguendo tre allineamenti ben definiti in posizione ortogonale alle possibili strutture che sono state identificabili con i metodi geofisici succitati.

La presenza di questi gas, caratteristici di origine endogena, è legata alla permeabilità dei terreni che li lasciano passare. Le vie di fuga dei gas sono legate alla permeabilità dei terreni sia profondi che superficiali; una zona maggiormente fratturata del substrato può quindi essere tradotta da un'ampia fascia di anomalia nella concentrazione dei gas e può essere talvolta traslata rispetto alla posizione della zona fratturata.



In generale sono state una serie di anomalie positive (valori più elevati della media) sia lungo i profili in maniera più o meno continua, sia intorno alla voragine in maniera discontinua. La presenza di associazioni gassose caratteristiche (quali Rn e CO<sub>2</sub>) può contribuire a valutare l'effettiva provenienza endogena di alcune sostanze gassose.

Alcune delle anomalie coincidono con le linee di discontinuità elettrica emerse nella realizzazione della carta della profondità del substrato resistivo ed in particolare quelle che delimitano l'alto dei Poggetti vecchi e quelle situate ad Ovest ed a Est della voragine.

### **6. Indagini geognostiche**

E' stata eseguita una caratterizzazione geotecnica dei materiali della colonna stratigrafica del sondaggio geognostico e su alcuni campioni di calcare cavernoso prelevati in prossimità delle sorgenti termali mediante:

- Ø prove geotecniche di laboratorio sulle terre: a seguito dell'individuazione di sette campioni rappresentativi, sono state eseguite le analisi di laboratorio. I terreni sono risultati plastici, mediamente argillosi, inattivi e con il grado di plasticità decrescente con la profondità;
- Ø prove geotecniche sulle rocce: prove di compressione monoassiale e di trazione diretta su provini di calcare e di breccia.

### **7. Modelli interpretativi**

Infine la metodologia seguita ha previsto la costituzione di modelli interpretativi mediante l'utilizzo di metodi analitici ed empirici elaborati nell'ambito di problemi minerari; è stato ristretto il campo di indagine all'intorno della voragine per determinare la possibile conformazione della cavità originaria. Inoltre sono state ipotizzate due condizioni della cavità, una regolare, in cui l'altezza permane costante per tutta la sua estensione, l'altra con potenze maggiori in corrispondenza delle porzioni a SO della voragine.

Il meccanismo evolutivo maggiormente attinente al caso esaminato considera il crollo del tetto della cavità e la progressiva estensione del camino di collasso in superficie dovuta al franamento dei materiali di copertura ed al loro aumento di volume.

La modellazione parametrica del fenomeno ha richiesto l'avanzamento di ipotesi di omogeneità, isotropia e dimensioni e regolari; è stata eseguita mediante l'applicazione dei seguenti metodi:

- Ø Metodo analitico di Lehmann per coltivazioni minerarie su lunghe fronti, il cui vantaggio consiste nella capacità di fornire una geometria realistica della zona di influenza.

- Ø Metodo empirico U.K. basato sull'osservazione di molteplici casi reali, con il vantaggio di analizzare rapporti tra grandezze superando così il problema della limitatezza delle dimensioni.
- Ø Metodo analitico del camino di subsidenza con il meccanismo evolutivo più attinente al caso in esame che propone un camino di collasso cilindrico di larghezza pari alla zona pseudocircolare della voragine di entità variabile dai 120 ai 140 m, una cavità sotterranea di altezza pari a 70 m e profonda dai 240 ai 260 m.

Vengono proposti due modelli costitutivi discriminati in base all'inclinazione del basamento.

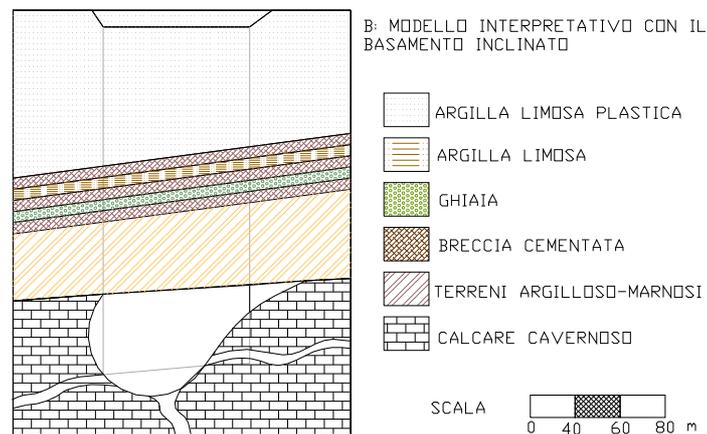


Fig. 3: Modello interpretativo con il basamento inclinato

In accordo con i modelli costitutivi, la modellazione numerica ha portato a risultati qualitativi, ma per certi aspetti rispondenti alla dinamica del fenomeno gravitativo proposto.

## 8. Analisi situazione attuale

Allo stato attuale, ad oltre due anni dall'evento, il movimento locale sembra essere cessato; lo sprofondamento si era esaurito immediatamente nell'arco di 22 ore, da allora il fenomeno non si è evoluto in senso verticale, ma in senso orizzontale, in quanto per effetto di richiamo la voragine si è allargata in direzione N-NE seguendo la grande frattura osservabile già durante il rapido collasso tanto da oltrepassare la strada sterrata, in un primo tempo tangente al fenomeno, e generarne il crollo.

Tutta l'area comunque non è ancora da considerarsi stabilizzata in quanto tale evento è direttamente collegato alla situazione di equilibrio di tutto il substrato interessato da innumerevoli faglie a prevalente direzione appenninica. Un fabbricato, distante circa 500 m dalla voragine, ad Ovest di questa, continua a manifestare segni di lieve cedimento con presenza anche di piccole lesioni sia nelle strutture che nel terreno; queste ultime sono quelle che destano un po' più preoccupazione in quanto sembrano collegate direttamente non tanto al fenomeno della voragine quanto all'evento del



disequilibrio raggiunto in vari tratti di superficie anche a molta distanza dalla voragine. Questo rappresenta un'ulteriore conferma sulla necessità di allargare l'area di studio e di prolungarne le indagini nel tempo, per poter classificare almeno le zone nei vari potenziali livelli di rischio, visto che non possono essere effettuati ulteriori interventi diretti sul territorio. Tale fabbricato, ovviamente non a rischio immediato, è stato tenuto comunque sempre sotto controllo sia mediante misure topografiche intervallate per rilevare ogni micromovimento, sia macroscopicamente dallo stesso proprietario che avverte puntualmente ogni qualvolta si presentano nuovi segni anomali. La situazione sarà prossimamente interessata da un'indagine sismica diretta, al fine di verificare lo sviluppo verticale delle fessure riscontrate sul terreno.

Attualmente la strada prossima alla voragine è interrotta ed il tratto racchiuso all'interno dell'area non è più visibile, in quanto quest'ultima si è ulteriormente protratta per una decina di metri nel campo limitrofo. Nei due anni successivi alla manifestazione dell'evento si è assistito ad una rinaturalizzazione della voragine con rinverdimento delle sponde e riempimento d'acqua meteorica e superficiale apportata dai dreni agricoli, con variazioni di livello stagionali: a seguito di periodi di intense precipitazioni non è stato notato un conseguente aumento del livello idrico della voragine.

Come già detto tale aumento si è manifestato con un ritardo di circa due mesi tanto che si è ipotizzato che l'acqua nella voragine derivi sia dallo scorrimento superficiali attraverso i dreni e dagli acquiferi freatici di scarsa potenza, ma che vi possa anche essere un collegamento con l'acquifero profondo carsico, caratterizzato da una zona di ricarica posta a notevole distanza dalla regione analizzata.

Nei dintorni del punto in cui si è manifestato il fenomeno non si sono avuti, contemporaneamente ad esso, abbassamenti o fessurazioni del terreno. E' vero però che, a meno di un anno dall'evento in prossimità del cascinale n°608, circa 1 km a WSW della voragine, nell'ottobre 2000 si sono aperte delle fessure circolari nella copertura terrigena dell'aia, seguite da sordi scricchiolii, che hanno allertato gli abitanti del fabbricato. Una serie di misure topografiche sono state effettuate ad intervalli regolari nel sito in questione per avere sempre il monitoraggio della situazione. Tali fenomeni purtroppo continuano a ripetersi con una certa regolarità, come accennato in precedenza.

Per cui alla data di oggi non ci sono evidenze di riprese del movimento da parte della voragine nè segnali inequivocabili dell'inizio del verificarsi di fenomeni analoghi nelle aree circostanti.



### 9. Classificazione aree a rischio

Il D.L. 180/98 (Decreto “Sarno”), convertito con L 267/98 come modificato dalla L 226/99 ha richiesto agli Enti Locali di definire sul territorio nazionale tutte quelle situazioni di carattere idrogeologico, nell’accezione più ampia di questo termine, che potessero mettere in pericolo cose o persone, delimitandone cartograficamente l’estensione e definendone il grado di pericolosità, oltre a ciò ha richiesto di indicare quelle infrastrutture o manufatti più importanti assegnandone il relativo grado di rischio.

La Regione Toscana ha recepito tale normativa (Del. G. R. 1212/99 e successive modifiche) realizzando, attraverso gli uffici provinciali del Genio Civile e le sedi delle Autorità di Bacino, una serie di cartografie di dettaglio che evidenziano quanto richiesto secondo gli intenti della normativa nazionale con particolare attenzione agli eventi di natura geologica e geomorfologica (frane, smottamenti, etc.) da una parte e quella idraulica (esondazioni, erosione fluviale, etc.) dall’altra.

Sebbene l’evento oggetto del presente studio, nella sua particolarità, non rientri proprio negli schemi dei fenomeni indicati da tali normative, la sua pericolosità e la sua appartenenza a fenomeni di natura geologica è innegabile; risulta per cui primario l’aggiornamento delle cartografie suddette. E’ logico che l’area definita dal perimetro della voragine ed uno stretto intorno debbano essere indicate come aree a pericolosità di sprofondamento molto elevata, ma allontanandosi da essa il grado di pericolosità non diminuisce ma rappresenta un grosso punto interrogativo dato che mancano dati oggettivi di valutazione ed il grado di rischio delle infrastrutture presenti nelle vicinanze (fra i quali si hanno fabbricati rurali di non grandi dimensioni, ma anche due importantissime direttrici viarie quali la linea ferroviaria tirrenica e la Strada Statale n.1 “nuova Aurelia”) rappresenta un’ulteriore incognita.

Questo studio, in particolare la serie di indagini effettuate con i metodi geofisici, vuole costituire una metodologia di partenza per l’aggiornamento della cartografia attuale a scala più vasta. L’inquadramento preciso dell’assetto geologico e strutturale dell’area e della possibile presenza di ulteriori cavità sotterranee capaci di originare altri fenomeni di sprofondamento, può ridefinire le possibili fasce di pericolosità (ad es. molto elevata al di sotto di una cavità ed elevata in fasce adiacenti caratterizzate dallo stesso assetto strutturale a livello profondo) ed il conseguente rischio nelle infrastrutture che vi ricadano all’interno.



### Regole di gestione territoriale

La classificazione delle aree a rischio sopra descritte costituiscono un riferimento di cui si è obbligati a tenerne conto al livello di redazione dei Piani Strutturali dei singoli comuni (Del.C.R. 94/85), quindi influiscono direttamente sugli strumenti urbanistici e le relative destinazioni d'uso. In particolare tali informazioni vanno recepite al livello di carte della pericolosità geologica e di conseguenza determinano la fattibilità dei singoli interventi previsti sul territorio.

Ad esempio qualora venissero identificate ulteriori cavità sotterranee, le aree sovrastanti sarebbero classificate a pericolosità più elevata (classe 4) e di conseguenza risulterebbero a fattibilità "condizionata" per ogni nuovo intervento: in pratica diventerebbero a inedificabilità assoluta.

Risulta perciò evidente quale importanza può avere la esatta definizione della cartografia di cui parlato al capitolo precedente ai fini della pianificazione territoriale e l'estensione delle indagini a tutta la pianura Grossetana e Castiglionesa.

Un altro aspetto altrettanto importante per la corretta gestione del territorio riguarda tutte le problematiche legate al monitoraggio delle opere esistenti, siano esse fabbricati o infrastrutture (da notare che tutta l'area è interessata dal tratto ferroviario tirrenico che risulta di importanza vitale dal punto di vista delle comunicazioni Nord Sud e potrebbe rappresentare un elemento ad elevato rischio per le persone) da effettuare per un lungo periodo a partire proprio da ora.

### **10. Possibili obiettivi**

L'obiettivo ultimo della ricerca è rivolto all'estensione dell'indagine in un'ottica di pianificazione territoriale, che assegni le possibili aree di rischio nel contesto amministrativo del Piano Regolatore Generale Comunale. L'area analizzata è prevalentemente agricola e gli elementi di maggiore impatto sono rappresentati dalla linea ferroviaria e dalla superstrada Aurelia, posizionate lungo il lato orientale nei pressi delle colline di Montepescali. I danni legati al pericolo di crollo di una cavità sotterranea riguardano essenzialmente l'incolumità degli utenti delle due infrastrutture, eccettuati gli abitanti dei casolari isolati, distribuiti in modo randomico in tutta la pianura alluvionale. Nel caso in esame vengono fornite indicazioni qualitative sull'individuazione di due fasce esposte al rischio di fenomeni di crollo, che sono poste al centro della regione analizzata e che presentano situazioni più problematiche nelle porzioni settentrionali; al loro interno vengono individuate zone particolarmente esposte a causa dell'intersezione di faglie.

Nell'ambito della presente ricerca sono stati previsti sviluppi futuri delle indagini geofisiche, mediante l'esecuzione di campagne di misure gravimetriche e di sismica a riflessione. Inoltre verrà eseguita una campagna di misure dei gas derivanti dal termalismo dell'acquifero profondo ed emergenti lungo le linee di faglia.

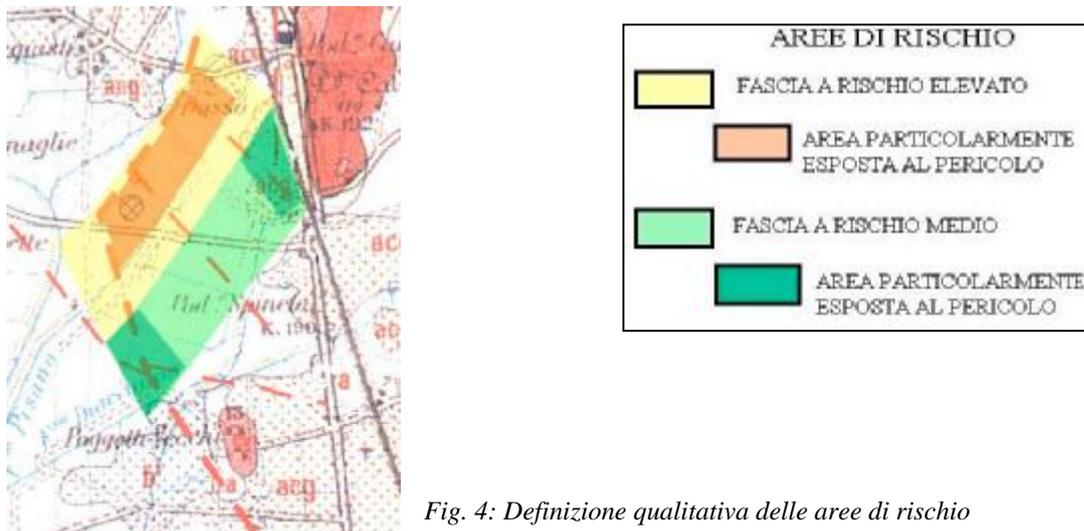


Fig. 4: Definizione qualitativa delle aree di rischio

Vengono infine avanzate alcune proposte riguardanti i sistemi di monitoraggio da posizionare lungo i 4 km di linea ferroviaria interessante la regione analizzata e sopra eventuali "punti a rischio". Tali sistemi possono richiedere misurazioni effettuate da un operatore con ripetitività giornaliera oppure possono presentare sistemi di acquisizione in continuo mediante antenne GPS, strumenti idrostatici o microsensori posizionati sulle rotaie. Appare comunque indispensabile un coinvolgimento delle Ferrovie dello Stato all'interno della ricerca allo scopo di prevenire i danni mediante il posizionamento di un sistema di allerta capace di interrompere il traffico viario e ferroviario qualora si verificassero fenomeni di sprofondamento. Il tutto comunque sarebbe finalizzato a costruire una base cartografica di rischio estesa, riferita ad un'area vasta monitorata e rappresentata da valori di classificazione ad alta affidabilità preventiva, visto che interventi antropici diretti di miglioramento non risultano generalmente possibili.